



Mesures des émissions des bus en conditions réelles

DIESEL ET CARBURANTS ALTERNATIFS GTL, HVO, B100



MESURES DES EMISSIONS DES BUS EN CONDITIONS REELLES : DIESEL ET CARBURANTS ALTERNATIFS GTL, HVO, B100

Juillet 2022

Sommaire

SOMMAIRE	2
RESUME	3
1. INTRODUCTION	6
2. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES EMISSIONS DES CARBURANTS ALTERNATIFS	7
3. PREMIERE EXPERIMENTATION : DIESEL, GTL ET HVO SUR UN BUS EURO IV ET UN BUS EURO VI	9
3.1. PROTOCOLE	9
3.2. CONDITIONS D'EXPLOITATION	10
3.3. RESULTATS	11
4. DEUXIEME EXPERIMENTATION : DIESEL, HVO ET B100 SUR QUATRE BUS EURO V	19
4.1. PROTOCOLE	19
4.2. CONDITIONS D'EXPLOITATION	21
4.3. RESULTATS	24
5. CONCLUSIONS	33
RÉFÉRENCES	35

Résumé

Deux expérimentations ont été menées afin d'évaluer les différences d'émissions en conditions réelles d'exploitation, sur des bus diesel utilisant alternativement du diesel et des carburants alternatifs (GTL, HVO, B100).

Pour la première expérimentation, deux bus ont été instrumentés (un bus Euro IV et un bus Euro VI) fonctionnant pendant deux semaines avec du diesel, deux semaines avec du GTL et trois semaines avec du HVO, sur une même ligne. **Les conclusions de cette première expérimentation ne sont pas généralisables à l'ensemble de la flotte, car les émissions sont en partie dépendantes de la technologie du bus.**

Pour la seconde expérimentation, quatre bus Euro V (deux par technologie de bus, avec les technologies A et B) ont été instrumentés, fonctionnant pendant deux semaines avec du diesel, trois semaines avec du B100 et trois semaines avec du HVO, sur les mêmes lignes.

Lors de ces deux expérimentations, les réglages du moteur et des systèmes de dépollution n'ont pas été modifiés avec le changement de carburant, ce qui peut, selon certaines études, limiter le gain de l'utilisation des carburants alternatifs. **Par ailleurs, les résultats pour une technologie/norme de bus ne sont pas transposables à une autre technologie/norme de bus. Par exemple, les résultats obtenus pour les bus Euro V lors de la seconde expérimentation ne peuvent pas être extrapolés à des bus Euro VI.**

Le **GTL** a été testé sur un bus Euro IV et un bus Euro VI en conditions estivales. Par rapport au diesel, il ressort que :

- Il permet de réduire légèrement les émissions de PN pour le bus Euro VI (autour de -20%) mais sur des émissions déjà faibles (résultats non conclusifs pour le bus Euro IV) ;
- Les émissions de NO_x sont similaires ;
- Les émissions de NO₂ sont réduites autour de -30% pour le bus Euro IV, mais pas pour le bus Euro VI (émissions similaires) ;
- Les émissions de CO sont réduites, autour de -40 à -60% ;
- Les émissions de CO₂ sont réduites, autour de -8% (à l'échappement).

Le **HVO** a été testé sur un bus Euro IV, quatre bus Euro V et un bus Euro VI, en conditions estivales et aussi hivernales pour les bus Euro V. Par rapport au diesel, il ressort que :

- Les émissions de PN peuvent être similaires ou augmenter pour les technologies pré-Euro VI (autour de +30%), et peuvent diminuer pour un bus Euro VI (autour de -20%), mais sur des émissions déjà faibles ;
- Les émissions de NO_x varient selon la technologie ou les conditions de l'étude, et peuvent être similaires ou plus faibles (autour de -8 à -20%) ;
- Les émissions de NO₂ varient aussi selon la technologie ou les conditions de l'étude, et sont les plus souvent plus faibles (autour de -40%) ou similaires, et dans un cas plus élevées (autour de +50%, pour un bus Euro V) ;
- Les émissions de CO sont plus faibles en général (autour de -20 à -60%), mais peuvent être similaires aux vitesses les plus « élevées » testées (autour de 20 km/h) ;
- Les émissions de CO₂ à l'échappement sont similaires voire légèrement plus faibles (-4%).
- Pour les particules en masse (PM) et les hydrocarbures (HC), la littérature disponible montre que, pour les technologies pré-Euro VI, les émissions baissent pour la majorité des cas, avec notamment pour les PM une baisse de 10 à 30%, selon l'étude considérée (les résultats étant très variables).

Le **B100** a été testé sur quatre bus Euro V, en conditions estivales et hivernales. Par rapport au diesel, il ressort que :

- Les émissions de PN peuvent être similaires (et très variables) ou diminuer (autour de 60%) ;
- Les émissions de NO_x augmentent, autour de +15 à +40%, avec une variabilité importante et des gammes d'émission proches de celles du diesel ;
- Les émissions de NO₂ augmentent, en moyenne de deux fois ;
- Les émissions de CO diminuent, autour de -40 à -50%, mais peuvent être similaires aux vitesses les plus « élevées » testées (autour de 20 km/h) ;
- Les émissions de CO₂ à l'échappement sont similaires voire légèrement plus élevées (autour de +5%).
- Pour les particules en masse (PM) et les hydrocarbures (HC), la littérature disponible montre que, pour les technologies pré-Euro VI, les émissions baissent pour la majorité des cas, pour les deux biocarburants, avec notamment pour les PM une baisse de 35 à 80% avec le B100, selon l'étude considérée (les résultats étant très variables).

L'intérêt des carburants alternatifs en termes d'émissions de CO₂ s'évalue surtout sur l'ensemble du cycle de vie du carburant (du puits à la roue).

Le Tableau 1 ci-dessous résume les résultats par carburant et par technologie de bus.

Émissions moyennes par rapport au diesel				
Polluant émis	Bus testés	GTL	HVO Résultats très variables selon le véhicule et/ou les conditions de l'étude	B100 Résultats très variables selon le véhicule et/ou les conditions de l'étude
PN	1 bus Euro IV	?	?	
	4 bus Euro V	(montée progressive des niveaux au fil des mesures)	(montée progressive des niveaux au fil des mesures)	Bus A : -56 à -68%
	1 bus Euro VI		Bus A : +26 à +29% Bus B : équivalent	Bus B : équivalent ou très variable
NO _x	1 bus Euro IV	-16%	-23%	
	4 bus Euro V	Equivalent	Equivalent	
	1 bus Euro VI		Équivalent ou -8 à -19%	+15 à +37%
NO ₂	1 bus Euro IV	Equivalent	Equivalent	
	4 bus Euro V	-33%	-49%	
	1 bus Euro VI		Variable : entre -16%, équivalent et +50%	+71 à +175%
CO	1 bus Euro IV	-55%	-56%	
	4 bus Euro V		Équivalent autour de 20 km/h ou -23 à -41% à vitesse plus faible	Équivalent autour de 20 km/h ou -38 à -53% à vitesse plus faible
	1 bus Euro VI	-40%	-43%	

CO₂	1 bus Euro IV	-10%	-4%	
	4 bus Euro V		Équivalent ou -4%	Équivalent ou +3 à 7%
	1 bus Euro VI	-6%	Equivalent	
HC	pré Euro VI*		-50 à -100%*	-5 à -40%* ou pas de baisse significative*
PM	pré Euro VI*		-10 à -30%*	-35 à -80%*

Tableau 1 : Synthèse des résultats pour le GTL et le HVO pour le bus Euro IV et le bus Euro VI testés, ainsi que pour le HVO et le B100 pour les quatre bus Euro V testés (* : résultats issus de la littérature, voir références dans la partie Introduction)

1. Introduction

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 – qui alimentent l'inventaire régional des émissions permettant, entre autres, d'évaluer l'impact des plans d'actions et de tester différents scénarii prospectifs. Pour ce faire, une méthode consiste à réaliser des mesures de ces émissions in situ.

Ile-de-France Mobilités s'est engagé 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 et l'incitation au développement d'innovations et au progrès technologique.

Dans ce contexte, Airparif a proposé à Ile-de-France Mobilités de déployer une série de campagnes de mesure des émissions de polluants atmosphériques en conditions réelles d'exploitation sur un échantillon de bus du parc roulant de différents opérateurs.

Ile-de-France Mobilités a alors conclu un partenariat avec Airparif pour la réalisation de campagnes de mesure des émissions de bus permettant d'objectiver en conditions réelles d'exploitation les baisses d'émissions de polluants de différents types de bus en fonction de leur norme « Euro » et de leur technologie. Cette campagne d'envergure démarrée en juin 2018 s'est terminée en février 2020.

L'ensemble des bus instrumentés lors de cette campagne utilise comme carburant du diesel, que cela soit pour les bus uniquement à moteur thermique ou les bus hybrides (diesel/électrique), ou du gaz naturel comprimé (GNC). Les résultats ont montré entre autres une amélioration significative des émissions de polluants (particules en nombre PN, oxydes d'azote NO_x, monoxyde de carbone CO) par le passage des bus Euro IV aux bus Euro VI.

Malgré les améliorations importantes du point de vue des émissions, le diesel reste un carburant fossile, et qui demande l'utilisation de technologies poussées pour limiter ses émissions de NO_x et de PN (réduction catalytique, filtre à particules...). Outre de nouvelles technologies (bus électriques et GNC), d'autres carburants sont envisagés par Ile-de-France Mobilités pour remplacer le diesel des bus qui ne seront pas renouvelés à court terme (dont des bus Euro V). Différents carburants alternatifs au diesel sont aujourd'hui disponibles sur le marché avec notamment le GTL (Gas-To-Liquids), le HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) et le B100 (alias biodiesel, obtenu à partir d'huile végétale ou animale par transestérification). Ces carburants peuvent être directement utilisés par un moteur diesel. Les bienfaits théoriques de l'utilisation de ces carburants est leur composition et leurs propriétés physiques qui permettraient une combustion plus « propre » comparée au diesel, et donc moins d'émissions des polluants réglementés (NO_x, PM, HC, CO), notamment pour les véhicules antérieurs aux bus Euro VI. Un autre argument, pour l'HVO et le B100 est de limiter les émissions de gaz à effet de serre, en considérant le cycle de vie du carburant du puits à la roue, de près de 40% selon le JRC par rapport au diesel [1].

Afin de comparer les émissions des bus selon l'utilisation de ces carburants alternatifs au diesel, dans des conditions réelles d'utilisation des bus, des campagnes de mesure ont été menées dans le cadre du partenariat entre Airparif et Île-de-France Mobilités, en deux temps : des expérimentations menées sur un bus Euro IV et un bus Euro VI pour les carburants GTL et HVO, ainsi que des expérimentations menées sur quatre bus Euro V pour les carburants HVO et B100 (Oléo100, EMAG produit avec du colza français). Ces expérimentations ont permis d'étudier les émissions sur les mêmes bus instrumentés en utilisant alternativement les carburants Diesel, GTL, HVO ou B100, ceci dans des conditions d'exploitation variées en termes d'usage et de circulation (les conditions

d'exploitation sont 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, la météo, etc). Il est rappelé ici que **les résultats pour une technologie/norme de bus ne sont pas transposables à une autre technologie/norme de bus. Par exemple, les résultats obtenus pour des bus Euro V ne peuvent pas être extrapolés à des bus Euro VI.**

La méthodologie utilisée pour les mesures est détaillée dans le rapport complet des mesures à l'émission des bus diesel, [disponible sur le site d'Airparif](#)¹. Sont mesurés à l'émission, avec un appareil PEMS (Portable Emission Measurement System) : les particules en nombre (PN), les oxydes d'azote NO_x (monoxyde d'azote NO et dioxyde d'azote NO₂), le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂). Les paramètres de météorologie ambiante sont aussi récoltés, ainsi que les paramètres moteur à partir de la prise FMS. La consommation de carburant n'est pas analysée ici car le débit de carburant calculé par la carte moteur est calibré sur le carburant diesel, et donc ne s'applique pas pour les carburant GTL, HVO et B100 (erreur possible en cumulé d'un pourcentage non négligeable entre débit calculé et débit réel).

2. Etat des connaissances sur les émissions des carburants alternatifs

Le **GTL** est un carburant paraffinique, fabriqué à partir de gaz naturel via le procédé Fischer-Tropsch. Le GTL ne contient pas de soufre, de métaux ou d'aromatiques (ce qui peut limiter les émissions de suies et de NO_x). Son indice de cétane (autour de 70) est plus élevé que celui du diesel (autour de 50) ce qui raccourcit le délai d'allumage de la combustion : la combustion démarre plus tôt et plus graduellement, ce qui favorise un meilleur mélange air/carburant, une combustion plus homogène, et donc potentiellement une réduction des émissions de PM et de NO_x [2]. Selon Shell² et certaines études [2-4], les émissions des poids lourds routiers pré-Euro VI peuvent être réduites de 5 à 37% pour les NO_x, de 10 à 38% pour les PM, de 14% à 25% pour le CO, selon la norme Euro du véhicule considéré. Selon Shell, les émissions de CO₂ du réservoir à la roue (émissions à l'échappement) sont inférieures de 4-5% à celles du diesel, du fait d'un contenu énergétique supérieur et d'un rapport hydrogène/carbone plus élevé du GTL [5] (ce qui conduit à un léger changement des produits de combustion, plus d'H₂O et moins de CO₂). Ces résultats sur les émissions varient selon les conditions de fonctionnement du moteur, les spécifications du moteur et les caractéristiques du GTL. Une étude reportée dans une annexe du groupe AMF [6], portant sur un poids lourd Euro V sans filtre à particules, donne en revanche une augmentation de 8% pour les NO_x, de 6% pour les PM, de 7% pour le CO, une réduction de 100% pour les hydrocarbures (HC), par rapport au diesel.

Le **HVO** est un biocarburant issu de l'hydrogénation d'huiles végétales (colza, soja, palme...) ou animales, qui est qualifié de paraffinique comme le GTL. Ses caractéristiques sont proches de celles du GTL, supposant que les émissions des polluants réglementés peuvent être réduites en théorie avec l'utilisation du HVO. Mais les résultats sont très variables selon le véhicule considéré et l'étude réalisée : des études reportées dans une annexe du groupe de travail AMF [6], portant sur des poids lourds Euro V sans filtre à particules, donnent par rapport au diesel une réduction de 5% pour les NO_x, de 10 à 29% pour les PM, de 6% pour le CO, de 50 à 100% pour les hydrocarbures (HC), ainsi qu'une réduction des aldéhydes. Une autre étude reportée dans cette annexe, portant sur un poids lourd

1 <https://www.airparif.fr/etudes/2021/mesures-des-emissions-des-bus-en-conditions-reelles-dexploitation>

2 Guide des Bénéfices du carburant Shell GTL : https://www.shell.fr/professionnels/nouvelles-energies/shell-gtl-fuel/product-benefits/jcr_content/par/relatedtopics_f52.stream/1518792156261/f5afcf2e27049739bf99d7848ec14ff63dd64cb0/shell-gtl-fuel-profit-guide-final.pdf

Euro IV, montre une baisse importante des émissions de CO (-75%) et de PM (-30%), mais pas de NO_x. Enfin, une étude portant sur des véhicules légers Euro 6b [5] a montré une baisse des émissions de THC, et pas de différences significatives pour le CO, les NO_x, le NH₃, le N₂O, et les PN (ceci étant lié à une bonne efficacité du FAP).

Le **B100** est un ester méthylique d'acide gras (EMAG) issu de l'estérification de matières grasses végétales, en l'occurrence pour cette étude, de colza. Ce carburant contient davantage d'oxygène, ce qui peut mener à une combustion plus complète et donc moins de particules, de CO et d'HC à l'émission, mais aussi davantage de NO_x (dont les émissions peuvent aussi augmenter avec l'avancement de l'injection dû au biodiesel, voir l'article de Kegl pour plus d'explications sur ce phénomène [7]). Les émissions de NO_x augmentent aussi avec l'indice d'iode, qui est plus élevé si les EMAG sont d'origine végétale (chaînes d'acide gras davantage insaturées) plutôt qu'animale. Cependant, selon une étude [8], les émissions de NO_x pourraient être réduites en adaptant les réglages de l'Engine Control Unit (ECU). Par ailleurs, l'Oléo100, carburant B100 produit intégralement à partir du colza et considéré dans la présente expérimentation, contient nettement moins d'impuretés susceptibles de produire des suies (Na, K, P, Ca, Mg) que ce que la norme B100 prescrit. En revanche, le B100 peut aussi former des particules « humides » à basse température ou charges faibles, ce qui peut mener à des émissions de PM plus importantes². L'utilisation d'un DOC peut réduire ces PM². L'indice de cétane du B100 Oléo100 est de 51, donc similaire au diesel. Sa teneur en soufre est faible (5 mg/kg), comme le HVO et le GTL. La viscosité plus grande du B100 peut cependant affecter la performance d'injection et les propriétés du démarrage à froid³. Son pouvoir calorifique plus faible induit aussi généralement une consommation plus importante de carburant (en masse) [7].

Les effets de l'utilisation des biocarburants de type EMAG sur les émissions ont été étudiés sur d'anciens moteurs, et de nombreuses publications des années 2000 [6, 9-11] montrent des résultats très variables selon la technologie pré-EuroVI considérée et les conditions de fonctionnement du moteur, souvent une baisse des émissions de CO (-20 à -40%), de PM (-35 à -80%), de PN (une seule étude trouvée sur le sujet, -67%), d'HC (-5 à -40%, voire pas de changement) et une hausse des émissions de NO_x (+9 à +20-30% voire, inversement, -25%), mais ces tendances ne sont pas systématiques. Elles peuvent notamment dépendre fortement des conditions de fonctionnement du moteur (charge par exemple). Une étude portant sur un moteur (et non un véhicule, donc hors système de dépollution) montre que les émissions de CO et d'HC ont tendance à être réduites en utilisant du biodiesel (colza), celles de NO_x à être augmentées, mais l'écart se réduit ou s'inverse à charge élevée [10]. Par ailleurs, la distribution granulométrique des PN dépend aussi de nombreux paramètres indépendants du carburant : généralement, le nombre de particules du mode accumulation (autour de 0.1 µm) est plus faible avec le B100, mais celui du mode nucléation (inférieures à 56nm) peut être plus élevé, notamment à températures faibles².

Au moment de la rédaction de ce rapport, à la connaissance des auteurs, aucune étude d'impact du B100 sur les émissions des bus Euro VI n'était publiée.

³ https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/fatty_acid_esters/emissions

3. Première expérimentation : Diesel, GTL et HVO sur un bus Euro IV et un bus Euro VI

3.1. Protocole

La campagne de mesure a eu lieu en été 2019, de fin juillet à septembre, sur 7 semaines au total : 2 semaines avec le carburant diesel, 2 semaines avec le carburant GTL puis 3 semaines avec le carburant HVO (1 semaine supplémentaire a été réalisée suite à un dysfonctionnement des capteurs de CO et CO₂ la première semaine de mesure de l'HVO). L'organisation de la campagne est résumée Figure 1. Deux bus ont été instrumentés pendant toute la durée de la campagne : un bus Euro IV et un bus Euro VI, afin d'analyser l'effet du changement de carburant sur une même technologie. Les résultats de cette campagne sont à mettre en regard d'autres études, les comportements des bus pouvant varier selon la technologie utilisée.

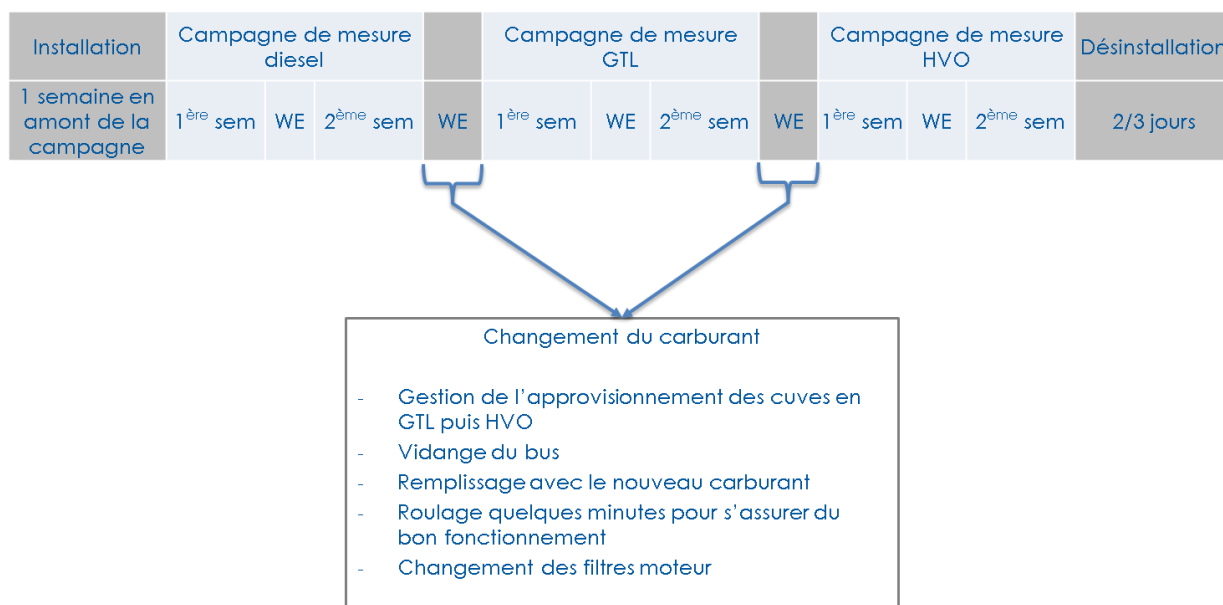


Figure 1 : Organisation de la campagne GTL/HVO, représentation schématique

Les deux bus ont circulé sur la même ligne de petite couronne, dénommée ligne PC 3 (en référence à la définition des lignes dans le rapport des bus diesel). La ligne PC3 comporte plusieurs sous-lignes en fonction de l'heure d'exploitation, identifiées par des lettres de « PC 3 a » à « PC 3 e ». Le nombre de courses (trajets de terminus à terminus) réalisées par carburant et par bus est représenté Figure 2. Le bus Euro IV est identifié par le numéro 22, le bus Euro VI par le numéro 21.

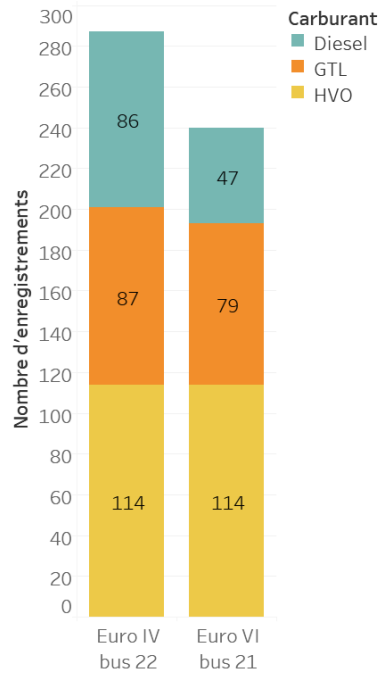


Figure 2 : Nombre de courses par carburant et par bus (hors dysfonctionnements et trajets avec moteur froid)

Cette expérimentation a permis d'obtenir un échantillon important de trajets pour chaque bus et chaque carburant, même si le nombre de trajets du bus Euro VI avec diesel est moins important compte-tenu de problèmes techniques.

3.2. Conditions d'exploitation

Les conditions de circulation des bus lors des différentes campagnes sont analysées via la température ambiante (Figure 3) et la vitesse moyenne des bus sur une course (voir Figure 4).

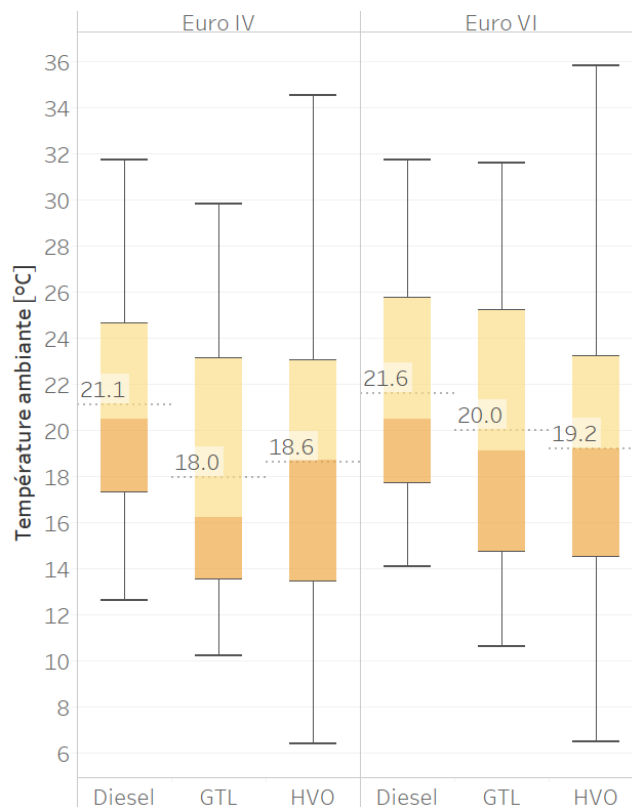


Figure 3 : Températures ambiantes lors des courses des campagnes diesel, GTL et HVO

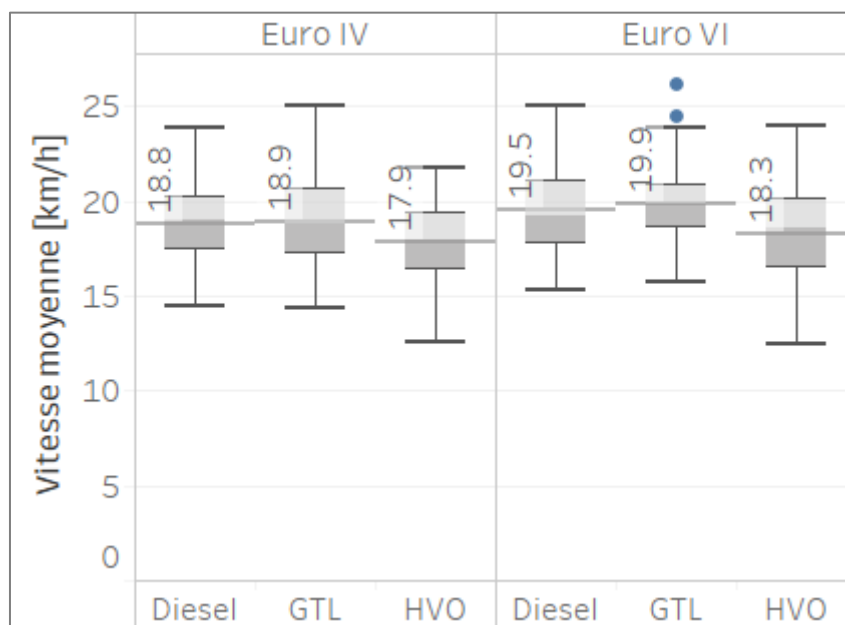


Figure 4 : Vitesses moyennes lors des courses des campagnes diesel, GTL et HVO

La température ambiante moyenne était plus élevée lors de la campagne diesel (environ 21°C) par rapport aux campagnes GTL et HVO (18 à 20°C en moyenne). Les températures ambiantes moyennes lors des courses du bus Euro VI sont légèrement supérieures à celles du bus Euro IV du fait du décalage de leurs services du matin, de 40 minutes (le bus Euro VI commençant plus tard que le bus Euro IV). Les températures restent cependant similaires en termes d'influence potentielle sur les émissions. Comme évalué lors de la précédente campagne, les émissions, de NO_x surtout, ont tendance à augmenter en-dessous de 10°C. Pour la campagne HVO, le bus Euro IV et le bus Euro VI ont circulé sur environ 10 courses à des températures inférieures à 10°C. L'amplitude des températures est également plus élevée lors de la campagne HVO (fin août – début septembre) avec des courses réalisées lors de périodes très chaudes (au-dessus de 32°C) et relativement fraîches (en dessous de 10°C). Toutefois les trois campagnes ont connu des courses dans une large gamme de températures (entre 12 et 32°C pour le diesel, 10 et 32°C pour le GTL, 6 et 36°C pour l'HVO).

Afin de ne pas biaiser les résultats, les courses pendant lesquelles une partie du trajet s'est fait à moteur froid ne seront donc pas prises en compte dans la comparaison des carburants ; le démarrage à froid peut être plus long lors de températures ambiantes plus faibles, et les émissions de NO_x sont particulièrement sensibles au démarrage à froid du fait de l'impossibilité de fonctionnement des systèmes de dépollution des NO_x à faibles températures moteur (<70°C).

Les vitesses moyennes rencontrées sur les courses sont comprises entre 10 et 25 km/h, donc très variables pour chaque carburant, selon les heures de circulation entre autres. Cette plage de vitesses moyennes correspond à celle rencontrée sur une ligne de petite couronne lors des précédentes campagnes de mesure. La vitesse moyenne lors de la campagne HVO était très légèrement plus faible de 1 ou 2 km/h selon la sous-ligne, du fait de la période de rentrée scolaire induisant une circulation plus dense. Globalement cependant, la répartition des vitesses moyennes est similaire entre les bus et les carburants.

3.3. Résultats

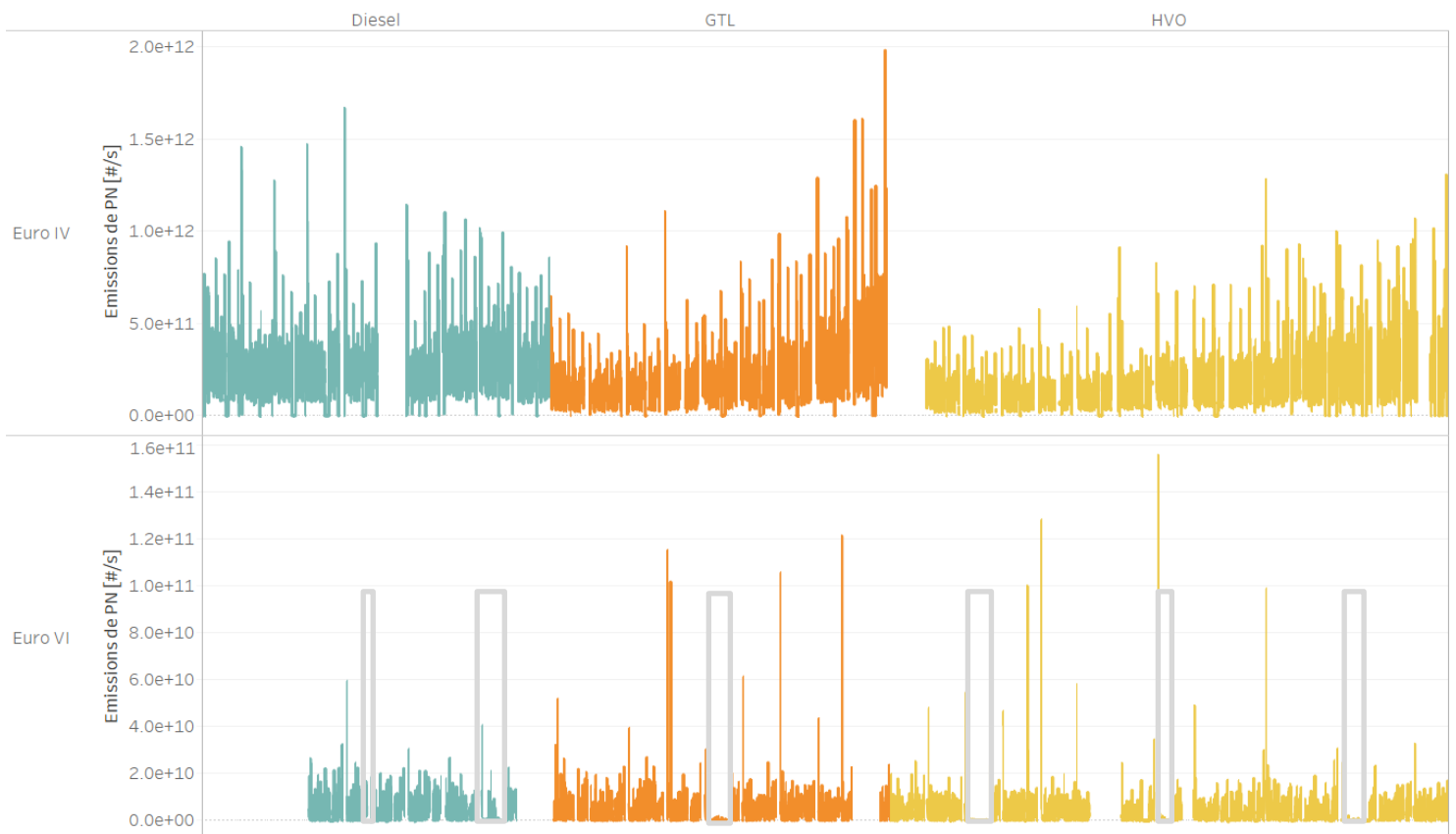
Les résultats sont exprimés en g/s ou nombre de particules/s (noté #/s) lorsque les émissions instantanées sont utilisées (données au pas de temps seconde), en g/km (ou #/km) lorsque les émissions sont calculées à l'échelle d'une course, ou à l'échelle du kilomètre parcouru.

Séries temporelles, illustration des anomalies rencontrées

Durant la campagne de mesure, le bus Euro VI a observé des dysfonctionnements de son système de dépollution des NO_x, par manque d'urée (raison confortée par un voyant lumineux sur le tableau de bord) : des occurrences ont eu lieu lors de deux jours de la campagne diesel, lors d'un jour de la campagne GTL et lors de trois jours de la campagne HVO. Ces dysfonctionnements, ayant un impact sur les émissions de NO_x, NO₂ et PN, ne seront pas traités dans cette analyse pour ne pas biaiser les résultats. Ils ont été analysés et expliqués dans le rapport global des mesures des bus diesel.

Les séries temporelles des émissions sont présentées dans un premier temps pour tous les polluants (PN Figure 5, NO_x Figure 6, NO₂ Figure 7, CO Figure 8 et CO₂ Figure 9), afin d'observer certaines particularités dans l'évolution des émissions. Les données présentées sont des données moyennées à l'échelle de la minute.

Pour rappel, si le NO₂ pose le plus de problème pour la santé publique, 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 dans le trafic (automobilistes) ou à proximité 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.



(a)

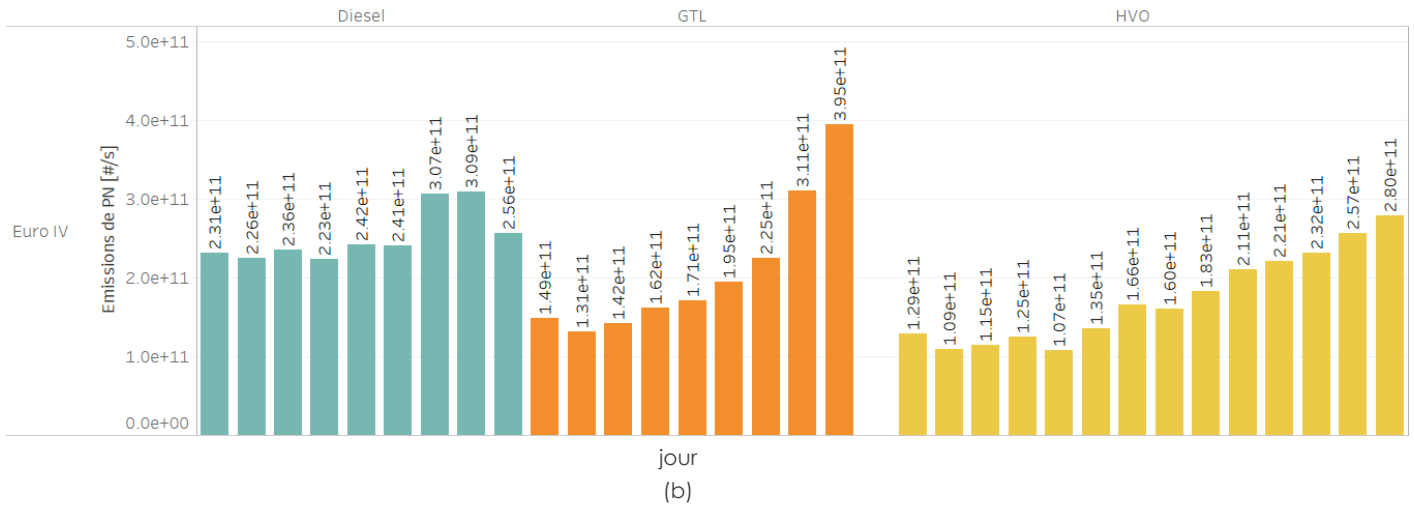


Figure 5 : Séries temporelles des émissions instantanées de PN (a), pour le bus Euro IV et le bus Euro VI, durant les campagnes diesel, GTL et HVO. Données seconde moyennées à la minute. Attention, les échelles sont différentes entre les deux bus. Dysfonctionnements du système de dépollution des NO_x encadrés en gris (non compris dans l'analyse des émissions moyennes) (a) et zoom sur l'évolution des émissions instantanées de PN du bus Euro IV, moyennes journalières (b)

Sans se focaliser ici sur les niveaux moyens par carburant, l'intérêt est surtout d'observer les séries temporelles des particules pour le bus Euro IV : lors de l'utilisation des deux carburants GTL et HVO, une croissance continue des niveaux de PN s'observe tout au long des campagnes. Si, les premiers jours de la campagne GTL et de la campagne HVO, les émissions de PN étaient plus faibles que celles de la campagne diesel (-44% en moyenne pour les émissions instantanées avec GTL, -56% avec HVO), elles finissent par les égaler voire les dépasser, au bout de 6 jours de circulation (environ 7h de circulation par jour) pour le GTL, et de 12 jours pour l'HVO. Le dernier jour de mesure, les émissions instantanées de PN avec GTL sont 58% supérieures en moyenne à celles avec diesel, celle avec HVO sont 12% supérieures. L'évolution des émissions au-delà des deux semaines de mesure pour le GTL et des trois semaines pour l'HVO ne peut être analysée, il n'y a ainsi pas de certitude sur une éventuelle stabilisation de ces niveaux ou une poursuite de cette augmentation. L'appareil de mesure était calibré régulièrement à la fin de chaque semaine, un défaut de l'appareil est donc exclu. L'hypothèse de dérive est aussi écartée du fait de l'amplitude des variations des émissions, augmentant en même temps que les niveaux moyens. La raison de cette évolution n'est pas expliquée : pourquoi cela n'est observé que pour le bus Euro IV, cela provient-il d'un comportement différent du FAP, d'un encrassement de l'échappement du fait d'une combustion différente... Ce constat limite de fait les possibilités d'interprétation de l'effet de ces carburants sur les émissions de PN pour ce type de bus, sur le long terme.

Les figures suivantes, pour les autres polluants, ne montrent aucune tendance similaire à celle des PN du bus Euro IV.



Figure 6 : Séries temporelles des émissions instantanées de NO_x, pour le bus Euro IV et le bus Euro VI, durant les campagnes diesel, GTL et HVO. Données seconde moyennées à la minute. Dysfonctionnements du système de dépollution des NO_x encadrés en gris (non compris dans l'analyse des émissions moyennes).

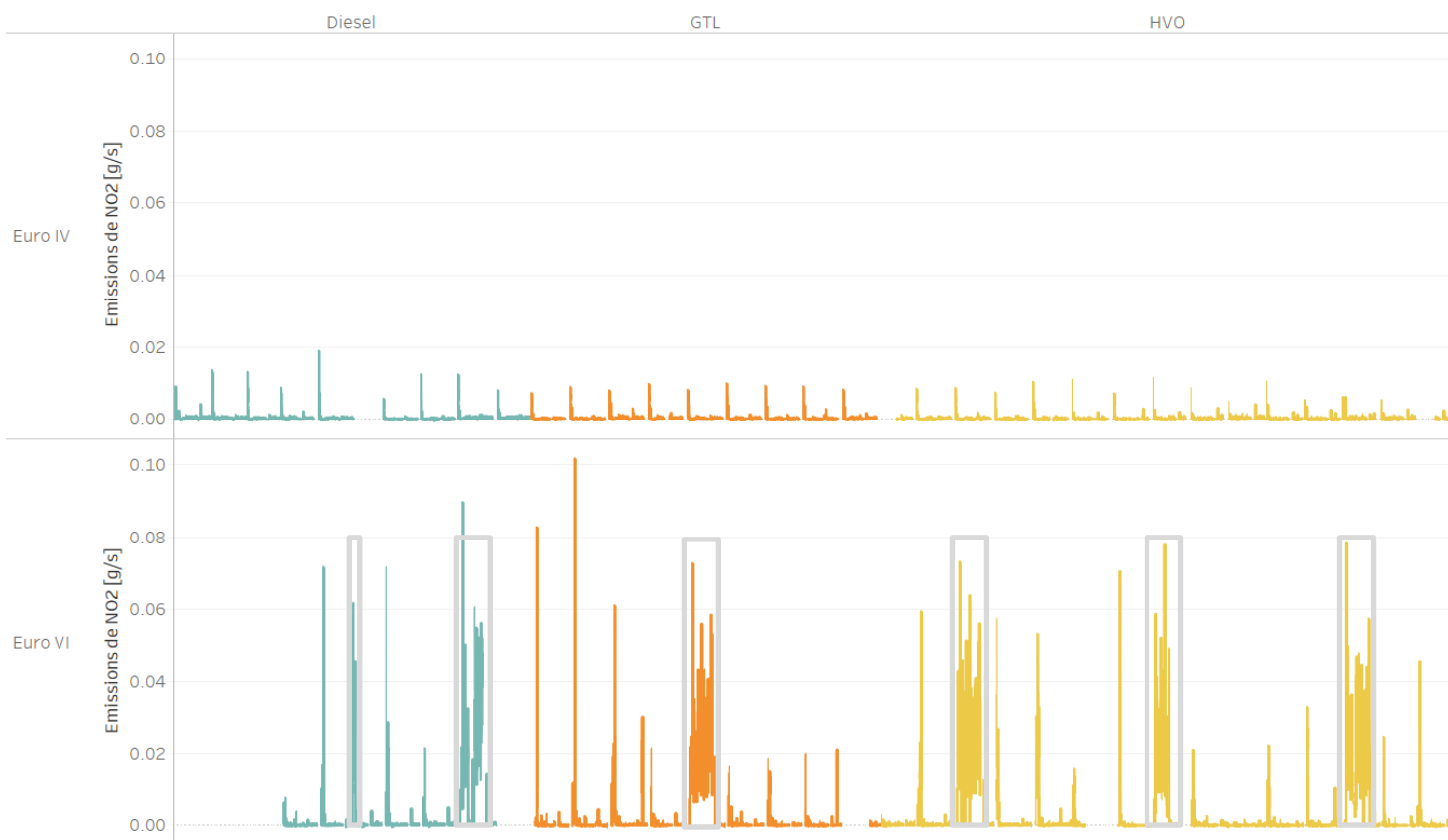


Figure 7 : Séries temporelles des émissions instantanées de NO₂, pour le bus Euro IV et le bus Euro VI, durant les campagnes diesel, GTL et HVO. Données seconde moyennées à la minute. Dysfonctionnements du système de dépollution des NO_x encadrés en gris (non compris dans l'analyse des émissions moyennes).

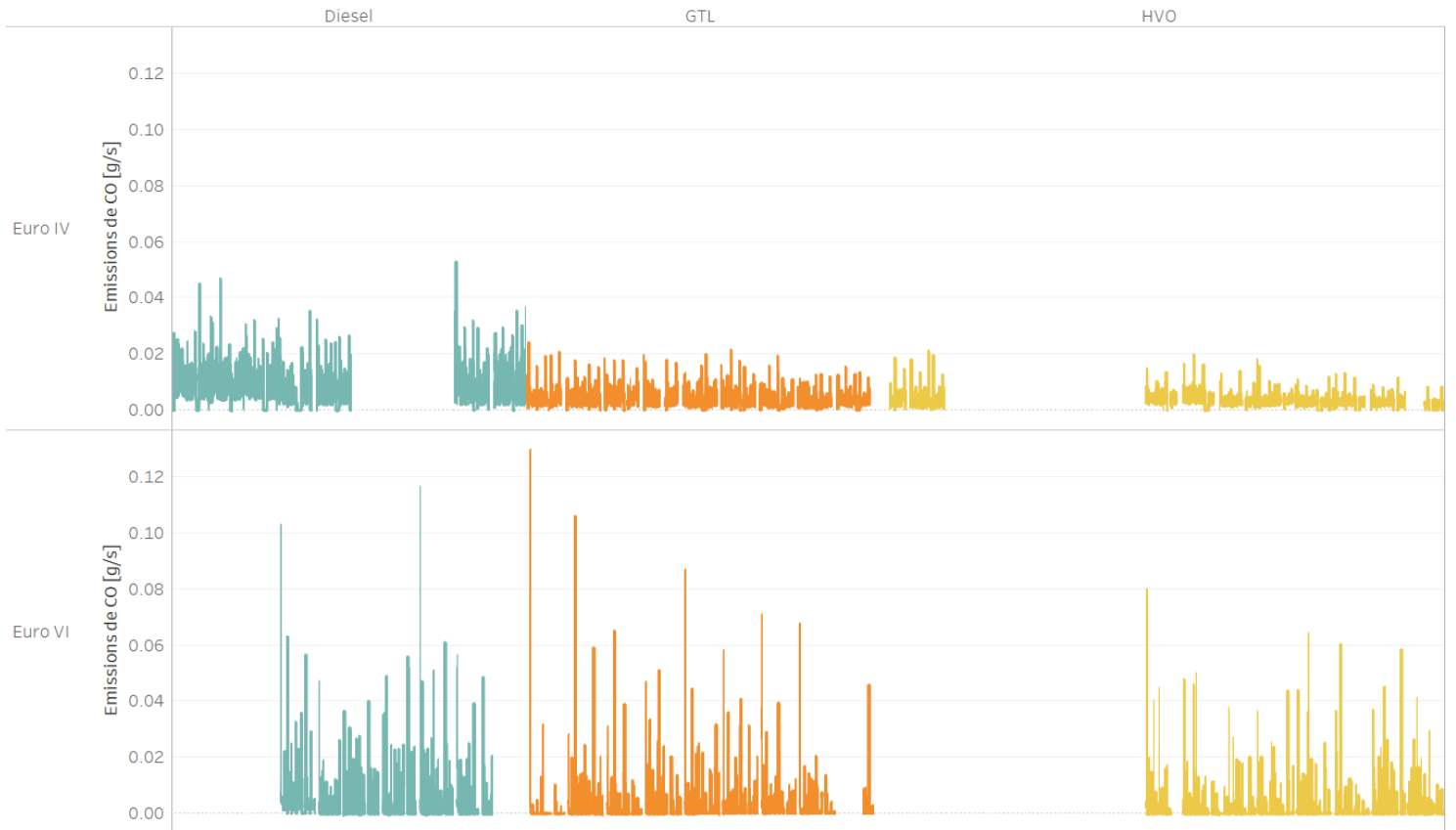


Figure 8 : Séries temporelles des émissions instantanées de CO, pour le bus Euro IV et le bus Euro VI, durant les campagnes diesel, GTL et HVO. Données seconde moyennées à la minute.



Figure 9 : Séries temporelles des émissions instantanées de CO₂, pour le bus Euro IV et le bus Euro VI, durant les campagnes diesel, GTL et HVO. Données seconde moyennées à la minute.

Globalement, il semble d'après les séries temporelles que les carburants GTL et HVO aient un effet important sur les émissions de CO, et moins sur les émissions des autres polluants.

Gammes d'émission, par bus et par carburant

Les graphiques présentés ci-dessous permettent une analyse quantitative, à l'échelle des courses (émissions en g/km ou #/km), des différences entre les carburants. Des tests statistiques de comparabilité des moyennes ont été menés pour vérifier la significativité de ces éventuelles différences.

Les émissions de PN sont représentées Figure 10, celles de NO_x et de NO₂ Figure 11 et celles de CO et de CO₂ Figure 12. Pour rappel, les périodes de dysfonctionnements observées sur le bus Euro VI sont écartés de l'analyse, ainsi que les courses à moteur froid.

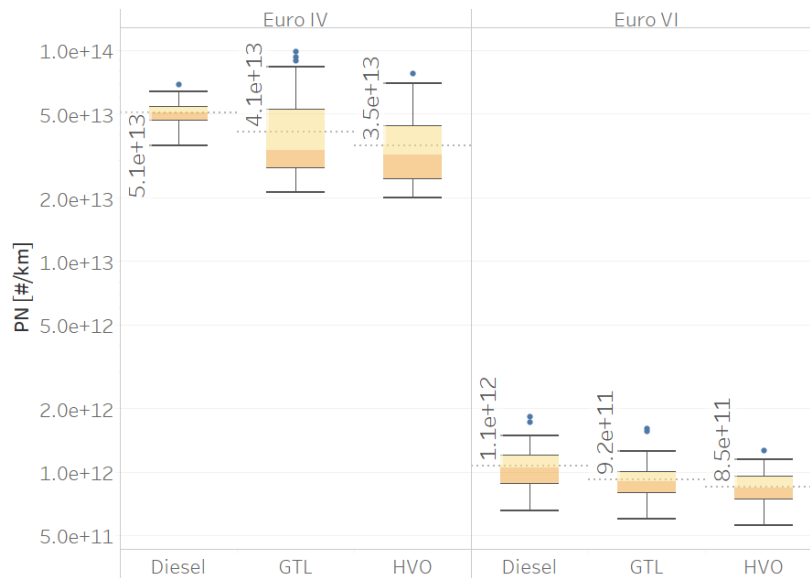


Figure 10 : Répartitions statistiques des émissions de PN des courses, pour chaque bus et par carburant (échelle logarithmique)

Les émissions de PN des courses du bus Euro IV sont en moyenne plus faibles pour le GTL et l'HVO, comparées à celles du diesel. Toutefois, comme expliqué précédemment, la comparaison des émissions de PN pour le bus Euro IV n'est pas faisable de manière fiable puisqu'elles ont augmenté continûment lors des campagnes GTL et HVO, sans se stabiliser. Compte-tenu de cette dynamique (évolution à la hausse des émissions au cours des campagnes GTL et HVO), **il n'est pas possible de qualifier et hiérarchiser les émissions de PN du bus Euro IV avec GTL et HVO par rapport au diesel** sur une période d'utilisation plus longue.

Pour le bus Euro VI, si les variabilités entre carburants sont proches, une hiérarchie se dégage entre les carburants sur les émissions de PN. Il existe ainsi une différence significative entre les émissions de PN du diesel et du GTL **(-16% en moyenne en faveur du GTL)**, celles du diesel et de l'HVO **(-23% en moyenne en faveur de l'HVO)**. Cela peut se rapporter en partie à la combustion globalement plus complète permise par les propriétés physiques du GTL et de l'HVO (voir Introduction).

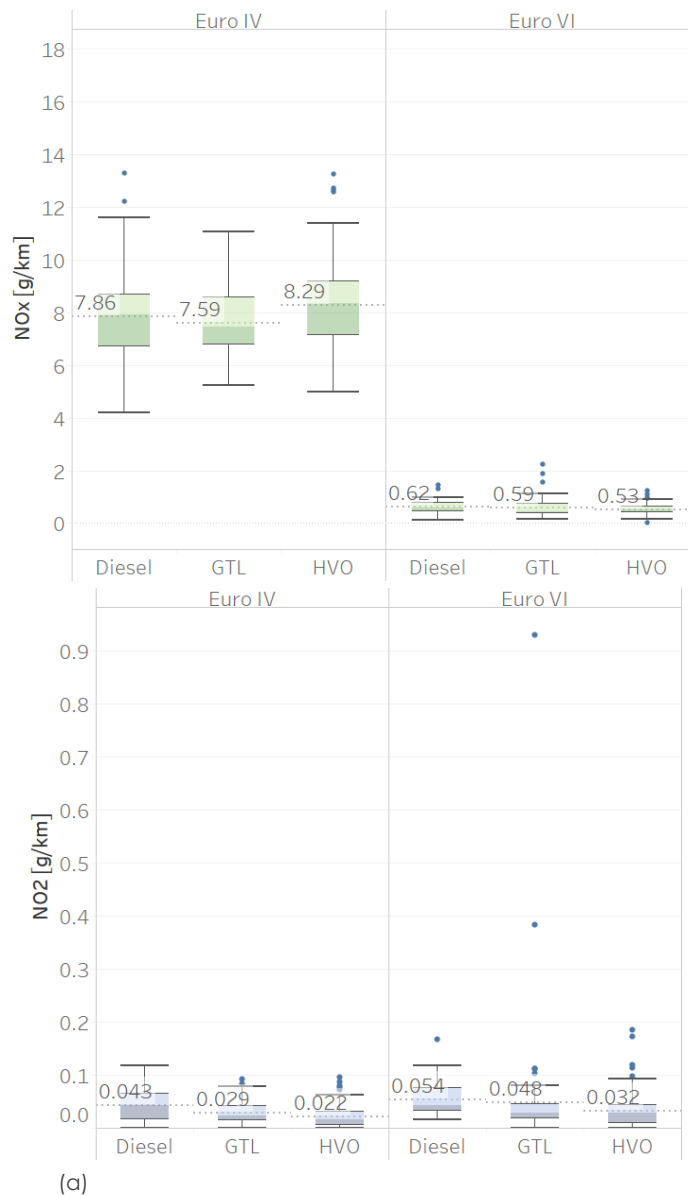


Figure 11 : Répartitions statistiques des émissions de NO_x (a) et de NO₂ (b) des courses, pour chaque bus et par carburant

Les émissions de NO_x du bus Euro IV ne sont pas significativement différentes entre le diesel, le GTL et l'HVO. En termes d'émissions de NO₂, les résultats sont plus contrastés : par rapport au diesel, elles sont 33% plus faibles avec le GTL, et 49% plus faibles avec l'HVO.

Pour le bus Euro VI, les émissions de NO_x (et de NO₂) ne sont pas significativement différentes entre le diesel et le GTL, mais sont 15% plus faibles en moyenne avec l'HVO (41% plus faible pour le NO₂).

Globalement, que ce soit pour le GTL et l'HVO et pour les deux bus instrumentés, ce sont les émissions de NO₂ et non de NO_x qui sont les plus influencées par le changement de carburant, pour des émissions qui sont par ailleurs déjà très faibles. La plus-value pour l'ensemble des émissions de NO_x (comprenant pour rappel le NO et le NO₂) est faible (seulement pour l'HVO sur le bus Euro VI) voire nulle le reste du temps, lors du bon fonctionnement des systèmes de dépollution.

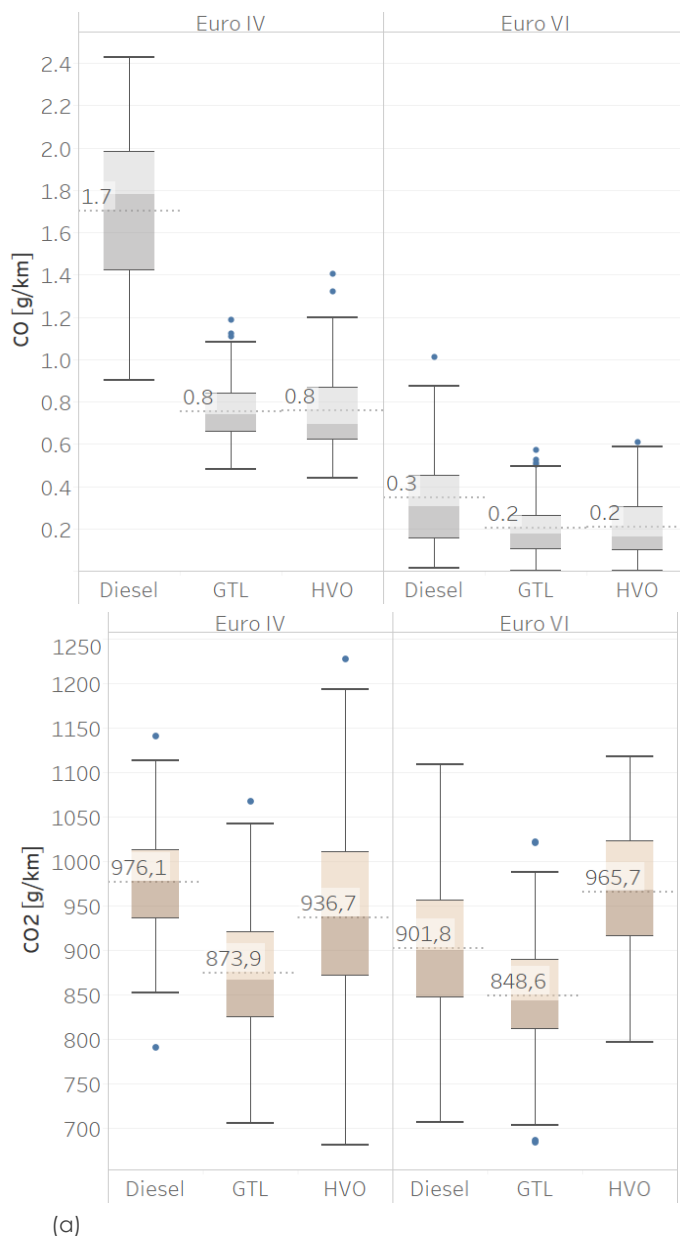


Figure 12 : Répartitions statistiques des émissions de CO (a) et de CO₂ (b) des courses, pour chaque bus et par carburant

Les émissions de CO du bus Euro IV diffèrent fortement avec les carburants alternatifs : une baisse d'environ 55% est observée en moyenne avec le GTL et l'HVO. Pour le bus Euro VI, cette baisse s'élève à 40-43% en moyenne. Cela provient de la combustion plus complète rendue possible par ces carburants.

Les émissions de CO₂ sont très variables. Le bus Euro IV observe en moyenne des émissions de CO₂ 10% plus faibles avec le GTL, et seulement 4% plus faibles avec l'HVO. Le bus Euro VI observe en moyenne des émissions de CO₂ 6% plus faibles avec le GTL, et pas de différence significative avec l'HVO. **Globalement, pour les bus instrumentés, il semble que le GTL soit légèrement plus performant sur les émissions de CO₂.**

Zoom sur le démarrage à froid

Pour le bus Euro IV, les émissions de NO_x et de NO₂ au démarrage à froid ne sont pas significativement différentes entre le diesel, le GTL et l'HVO, en termes de quantités émises et de temps de démarrage à froid. Pour le bus Euro VI, du fait des dysfonctionnements, les données ne sont pas suffisantes pour conclure. Globalement, il semble que ces deux carburants alternatifs n'aient pas d'impact notable sur les émissions en période de démarrage à froid.

4. Deuxième expérimentation : Diesel, HVO et B100 sur quatre bus Euro V

4.1. Protocole

Deux campagnes de mesure ont été menées sur quatre bus Euro V : deux bus de même technologie A lors de la première campagne (bus identifiés par les numéros 29 et 30), deux bus de même technologie B lors de la deuxième campagne (bus identifiés par les numéros 31 et 32). Les quatre bus avaient comme système de dépollution des NO_x un SCR (Selective Catalytic Reduction), et ne possédaient pas de FAP (Filtre à Particules).

L'intérêt de mesurer les émissions de deux bus de même technologie en parallèle est d'évaluer au moins partiellement la variabilité au sein même de cette technologie, car les émissions et potentiellement les comportements avec d'autres carburants peuvent différer d'un bus à l'autre et selon les conditions d'exploitation. Cela permet donc de consolider les observations faites pour cette technologie.

Par ailleurs, il était souhaitable d'évaluer l'effet de changement de carburant sur plus d'une technologie de norme Euro V, afin de consolider les observations aussi au sein d'une même norme Euro.

Les campagnes étaient organisées ainsi : pour la première (bus 29 et 30), trois semaines de mesure avec le carburant B100, deux semaines avec du diesel, puis trois semaines avec du HVO (voir Figure 13). Les mesures ne se sont déroulées que lors des jours ouvrés, le bus restant au dépôt le weekend afin de recharger pleinement les batteries permettant le fonctionnement autonome des moyens de mesure. Entre deux carburants, les bus étaient vidangés, les filtres changés, et les bus roulaient quelques kilomètres avec le nouveau carburant pour s'assurer que tout fonctionnait bien. La seconde campagne (bus 31 et 32), était organisée de la même façon, mais l'ordre des carburants était différent pour des raisons logistiques (voir Figure 14).

Les trois semaines de mesure pour les carburants alternatifs ont été décidées suite au comportement du bus Euro IV de la première expérimentation, dont les émissions de PN n'ont cessé de croître pendant les deux semaines de mesure. Si ce comportement s'était reproduit sur ces bus Euro V, les trois semaines de mesure auraient pu permettre d'évaluer la tendance finale.

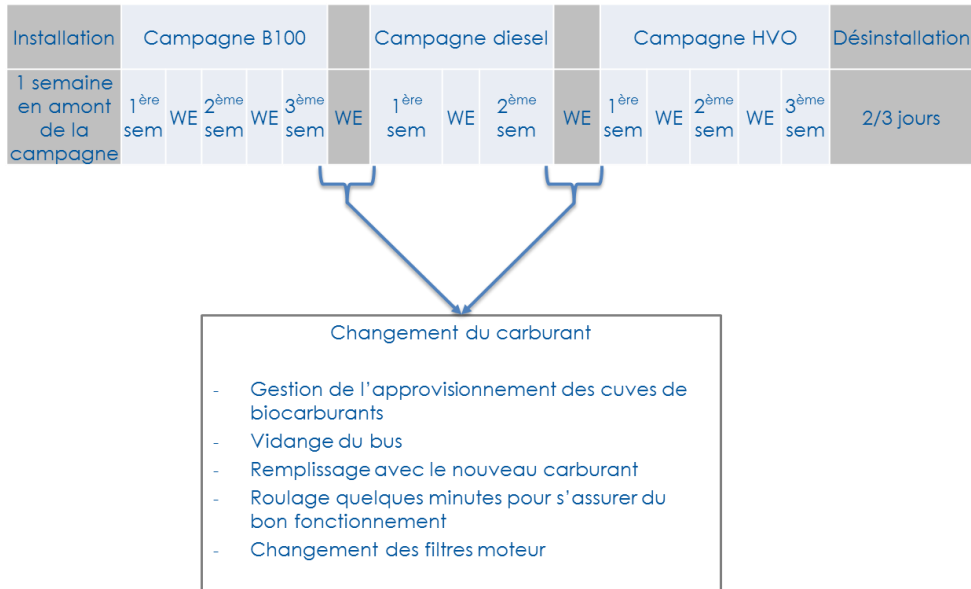


Figure 13 : Organisation de la première campagne B100/HVO, pour les bus 29 et 30, représentation schématique

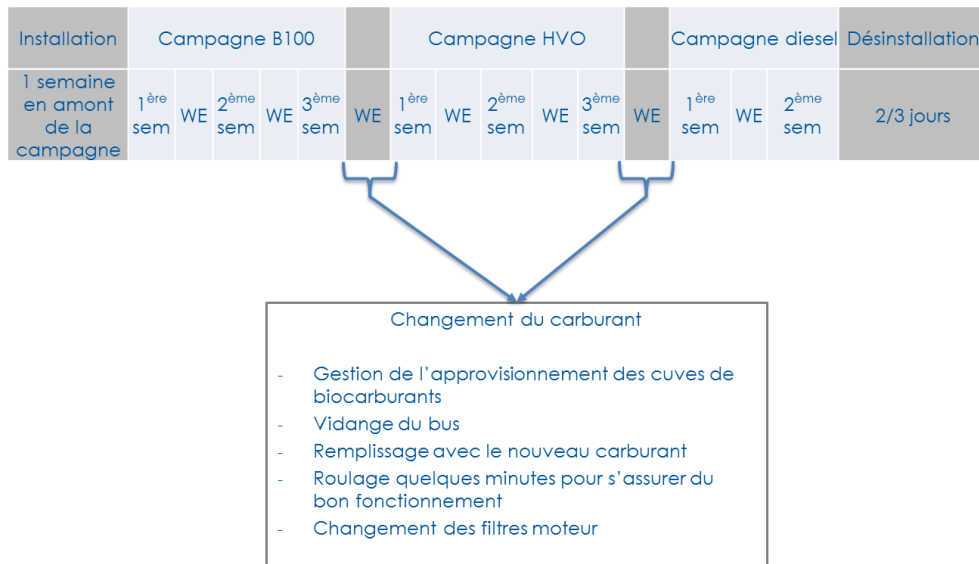


Figure 14 : Organisation de la seconde campagne B100/HVO, pour les bus 31 et 32, représentation schématique

Ces deux campagnes ont permis de récolter les émissions d'une centaine de courses pour chaque bus et chaque carburant alternatif (entre 84 et 141 trajets), et de 23 à 76 courses pour chaque bus avec diesel (voir Figure 15). Le nombre de courses dépend des occurrences de problèmes techniques rencontrés sur les appareils de mesure ou du bus, et notamment pour le bus 31 pour lequel les appareils n'ont pas fonctionné correctement lors de la dernière semaine de mesure avec diesel.

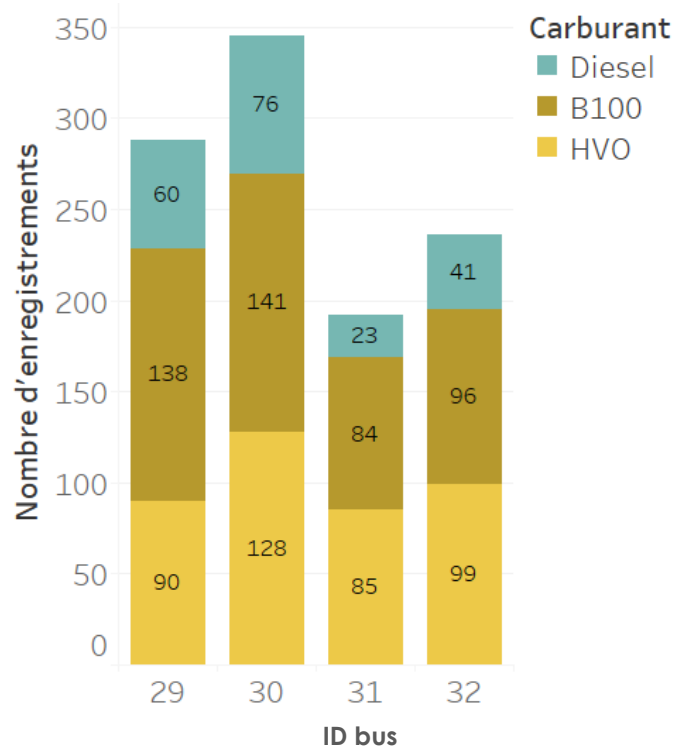


Figure 15 : Nombre de courses total par bus et carburant

4.2. Conditions d'exploitation

Les conditions d'exploitation réunissent les conditions d'usage (style de conduite, charge, etc.) et les conditions de circulation (trafic, météorologie, etc.). En termes de conditions d'usage, les bus 29 et 30 ont été conduits tout au long de la campagne par le même chauffeur, et idem pour les bus 31 et 32 par un autre même chauffeur, afin de limiter la variabilité due au style de conduite.

Les quatre bus instrumentés ont roulé sur les mêmes lignes de grande couronne, cinq lignes en tout, mais à des horaires décalés et donc des vitesses opérationnelles différentes. Lors d'un service d'une journée, un bus va donc parcourir, une ou plusieurs fois, plusieurs lignes de bus parmi ces cinq lignes, et les services se répètent d'une semaine à l'autre. Les bus 29 et 31 ont roulé sur le même service du matin, à des vitesses plus élevées que les bus 30 et 32 ayant roulé sur le même service de l'après-midi (voir Figure 16). En effet, les bus 29 et 31 ont roulé à des vitesses moyennes par course comprises entre 15 et 30 km/h (moyenne autour de 20 km/h), tandis que les bus 30 et 32 ont roulé à des vitesses comprises entre 10 et 20 km/h (moyenne autour de 15 km/h). Pour un même bus, les gammes de vitesse rencontrées sont globalement comparables.

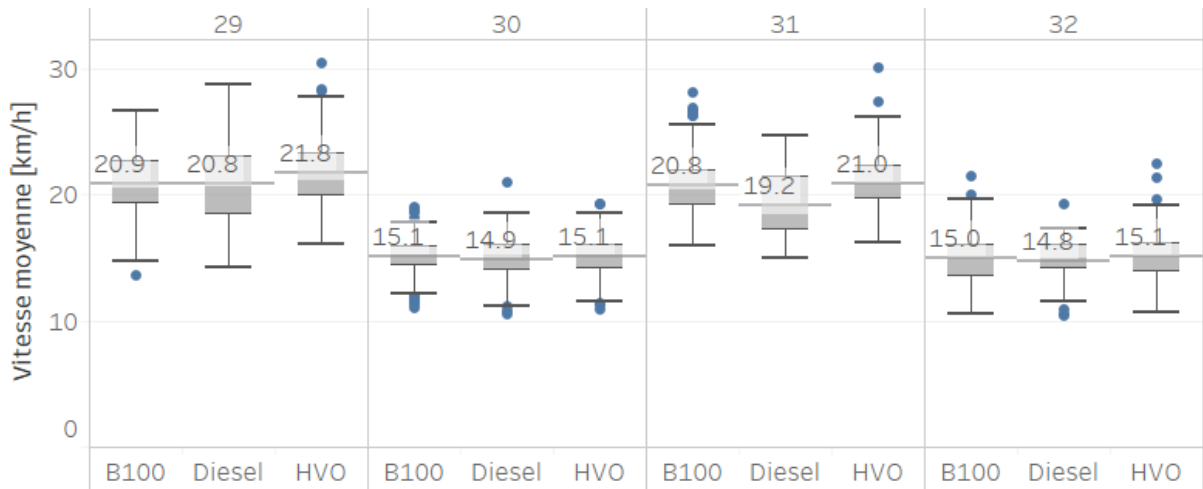


Figure 16 : Vitesses moyennes des courses, rencontrées pour chaque bus et chaque carburant

Le style de conduite peut être représenté par l'indicateur appelé Relative Positive Acceleration (RPA). Une RPA plus élevée se rapporte à une conduite plus dynamique. La Figure 17 montre les répartitions des RPA des courses pour chaque bus et chaque carburant, relativement proches pour des mesures en conditions réelles.

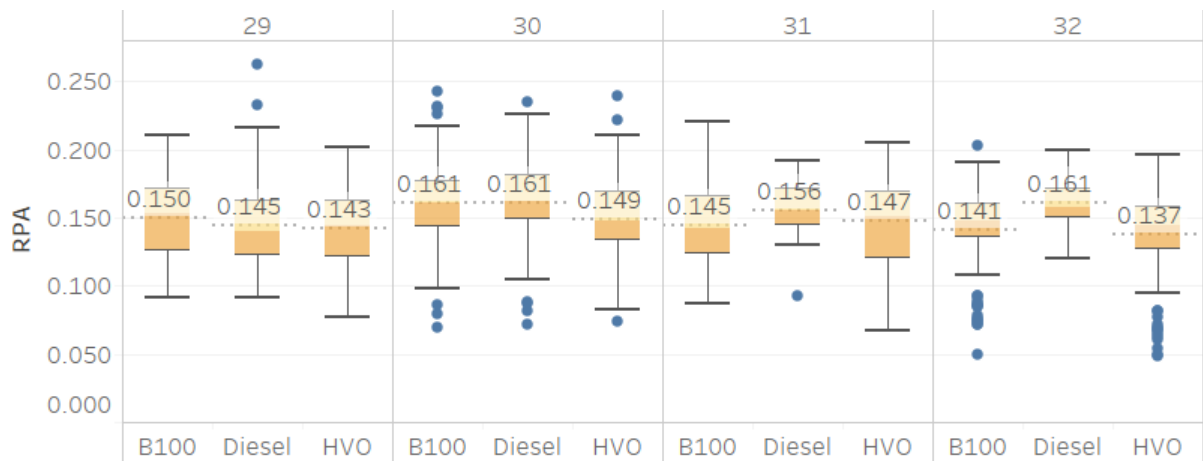


Figure 17 : RPA des courses pour chaque bus et chaque carburant

Les températures rencontrées pour chaque bus sont davantage variables d'un carburant à l'autre (voir Figure 18). Afin de limiter ce biais potentiel, notamment sur les émissions de NO_x, qui peuvent être influencées par la température ambiante, une analyse a été menée sur une sélection de courses ayant eu lieu à des températures entre 10 et 20°C pour les bus 29 et 30, et entre 4 et 10°C pour les bus 31 et 32. Cela permet de limiter les différences de conditions météorologiques étudiées à travers la température ambiante (voir Figure 19). La Figure 20 reporte le nombre de courses par bus et par carburant en prenant en compte ces filtres sur la température ambiante.

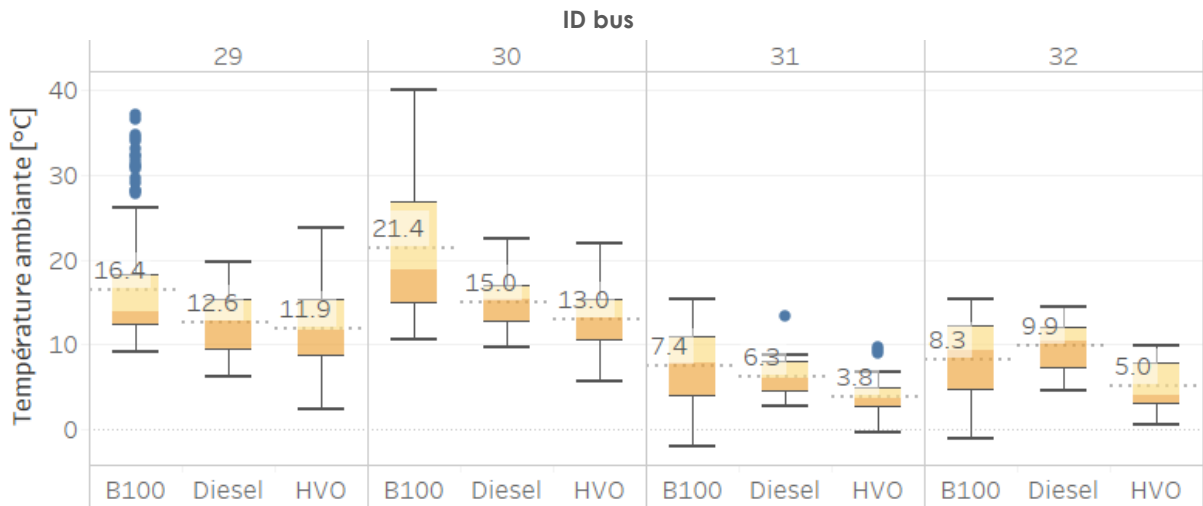


Figure 18 : Températures moyennes des courses, rencontrées pour chaque bus et chaque carburant

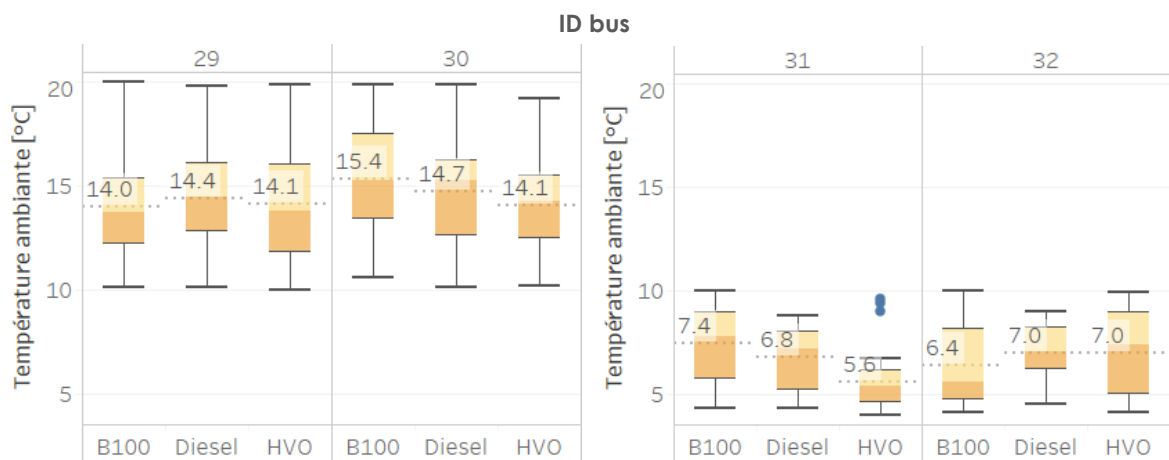


Figure 19 : Températures moyennes des courses, rencontrées pour chaque bus et chaque carburant, avec filtre pour homogénéiser les répartitions statistiques entre carburants

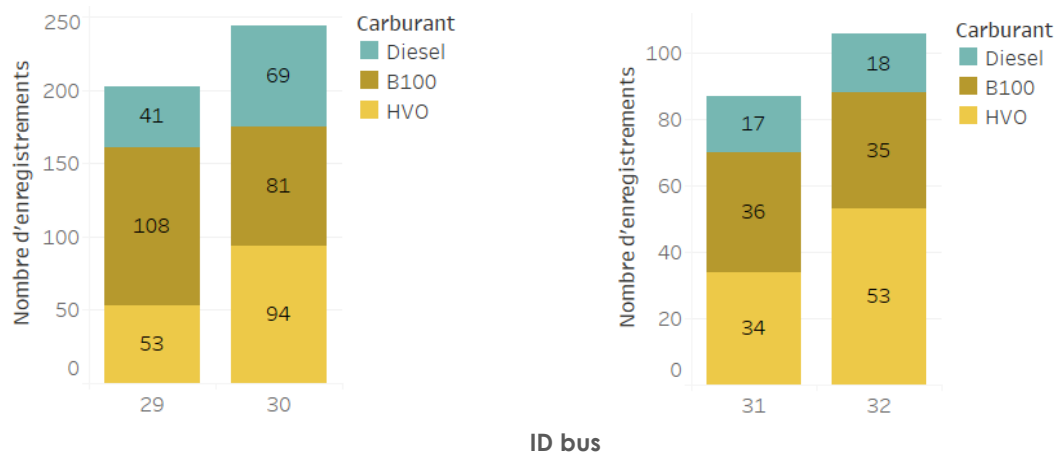


Figure 20 : Nombre de courses par bus et par carburant en prenant en compte les filtres sur la température ambiante

Les résultats seront donc reportés pour les courses sélectionnées via les températures ambiantes. Le nombre de courses par carburant et par bus reste important, même en appliquant ce filtre.

4.3. Résultats

Gammes d'émission, par bus et par carburant

Les graphiques présentés ci-dessous permettent une analyse quantitative, à l'échelle des courses (émissions en g/km ou #/km), des différences entre les carburants. Des tests statistiques de comparabilité des moyennes ont été menés pour vérifier la significativité de ces éventuelles différences, et seuls les écarts de moyennes significativement différentes sont reportés. Les courses prises en compte sont celles dont la température ambiante est comprise entre 10 et 20°C pour les bus 29 et 30, et entre 4 et 10°C pour les bus 31 et 32. Il est à noter cependant que les conclusions restent inchangées lorsque toutes les courses sont prises en compte, sans filtre appliqué sur la gamme des températures rencontrées.

Les émissions de PN sont représentées Figure 21, les émissions de NO_x et de NO₂ Figure 22, les émissions de CO Figure 23 et les émissions de CO₂ Figure 24.

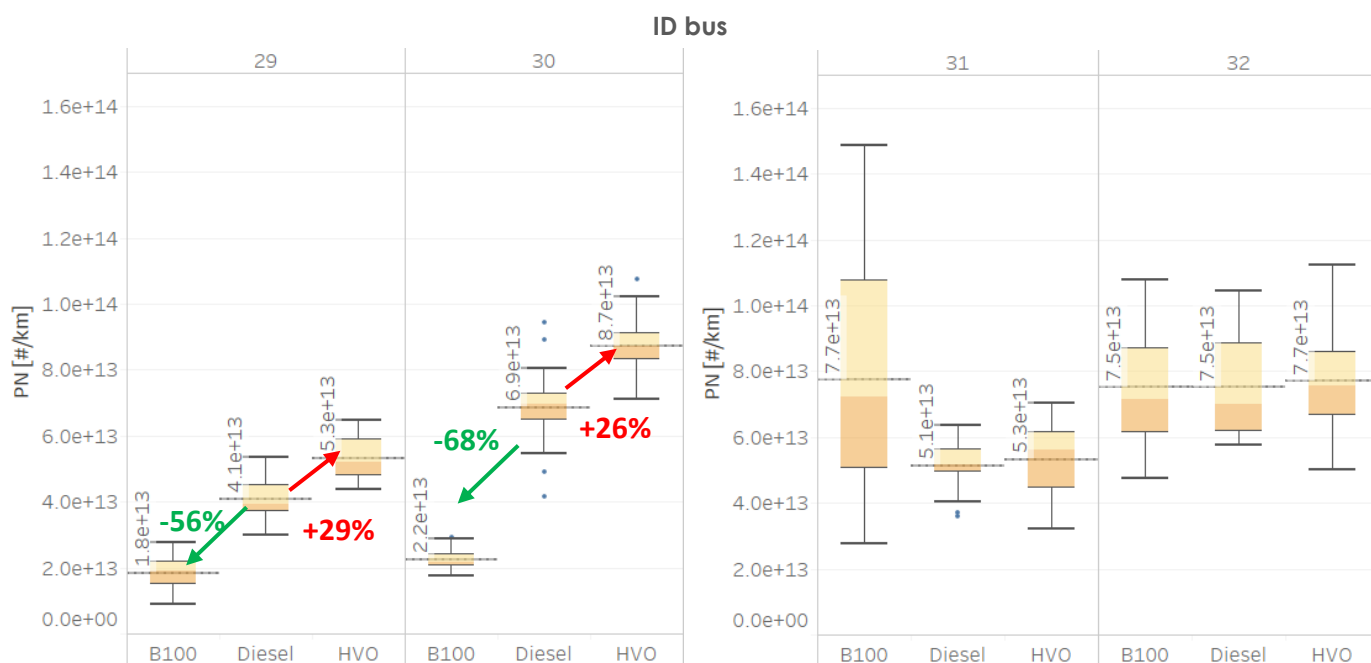


Figure 21 : Émissions de PN des courses sélectionnées par le filtre sur la température ambiante, par bus et par carburant

Les émissions de PN des quatre bus Euro V se situent entre $8,9 \cdot 10^{12}$ et $1,5 \cdot 10^{14}$ particules/km. Si seul le diesel est considéré, les bus 29 et 31 ont tendance à émettre davantage de PN ($6,9 \cdot 10^{13}$ et $7,5 \cdot 10^{13}$ particules/km) que leurs homologues 29 et 31 ($4,1 \cdot 10^{13}$ et $5,1 \cdot 10^{13}$ particules/km), ce qui illustre déjà la variabilité au sein d'une même technologie, associée potentiellement à celle liée aux différences de vitesses opérationnelles.

Les émissions de PN selon le carburant présentent une tendance claire pour les bus 29 et 30 : le carburant B100 permet de réduire les émissions par rapport au diesel, en moyenne, de 56% pour le bus 29, et de 68% pour le bus 30. En revanche, le HVO cause une augmentation des émissions, de 29% en moyenne pour le bus 29, de 26% en moyenne pour le bus 30. Les gammes d'émission sont aussi bien distinctes entre B100 et diesel, pour les deux bus 29 et 30.

En revanche, les émissions de PN selon le carburant pour les bus 31 et 32 montrent, d'une part, une plus grande variabilité, pour tous les carburants (écart-type autour de $2 \cdot 10^{13}$ pour les bus 31 et 32 contre $6 \cdot 10^{12}$ pour les bus 29 et 30), hormis le diesel du bus 31 comportant aussi moins de courses.

D'autre part, les gammes d'émissions de PN sont proches pour les différents carburants des deux bus. Un cas atypique cependant est le bus 31 avec le carburant B100, qui a rencontré un nombre important de courses avec des émissions élevées de PN, supérieures à 8.10^{13} particules/km, qui ne sont pas expliquées par les paramètres collectés lors de cette campagne (voir section suivante sur l'influence de certains paramètres). Ces courses sont la cause de la grande variabilité en émission de PN observée sur le bus 31 avec le carburant B100.

Ainsi, l'évolution des émissions de PN selon le carburant n'obéit pas à une règle unique selon la technologie du bus considéré et/ou les conditions de circulation. Par rapport au diesel, les émissions de PN sont très variables, similaires ou plus faibles pour le B100, et similaires ou plus importantes pour le HVO.

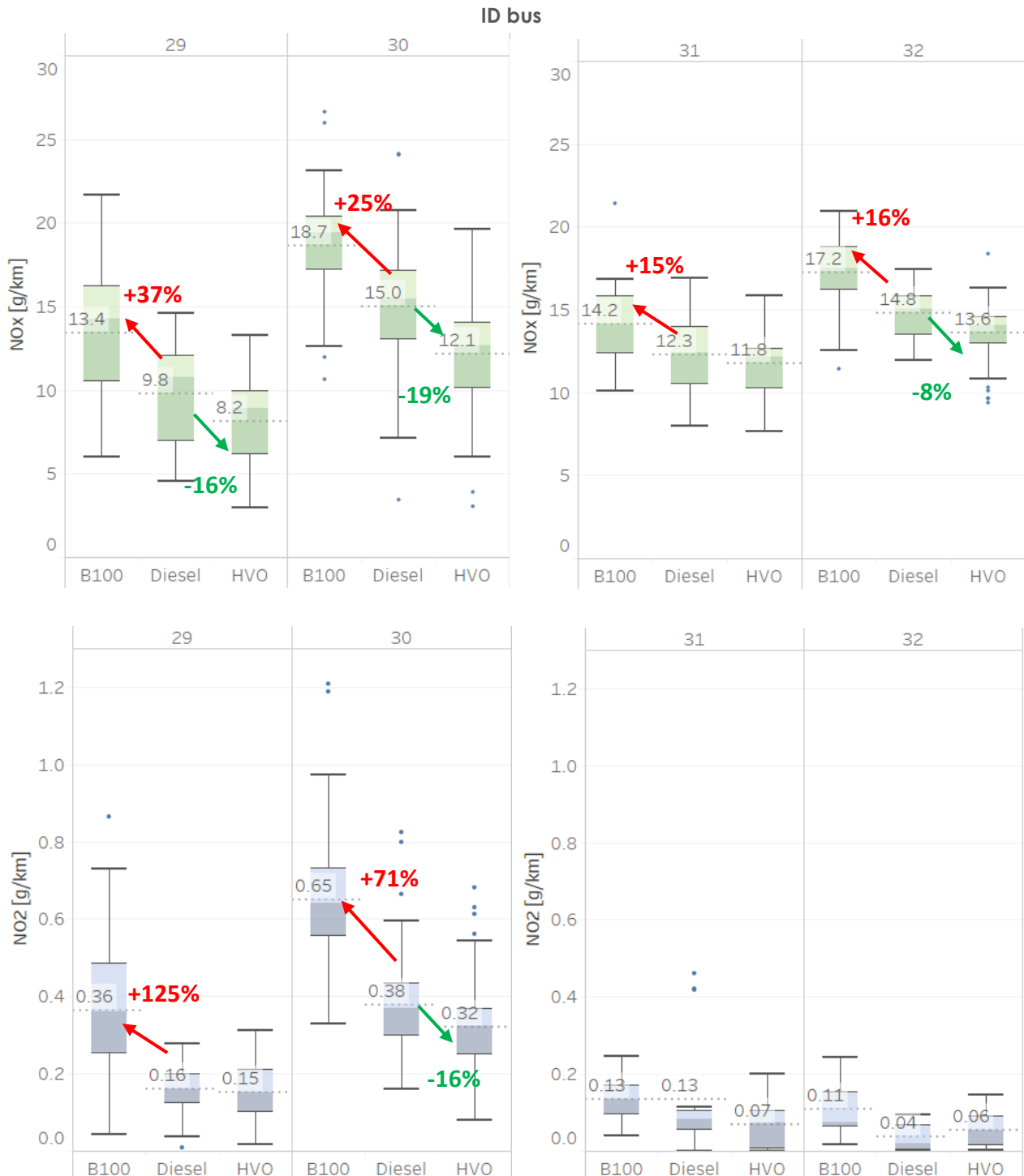


Figure 22 : Émissions de NO_x et de NO₂ des courses sélectionnées par le filtre sur la température ambiante, par bus et par carburant

Les émissions de NO_x des quatre bus Euro V se situent entre 3 et 27 g/km selon les courses. De la même façon que pour les PN, les bus 30 et 32 ont tendance à émettre davantage de NO_x que les bus 29 et 31 (ce qui est lié à des différences de conditions d'usage et de circulation).

Les émissions de NO_x selon le carburant présentent une tendance à la hausse pour le B100 et à la baisse pour le HVO, en moyenne, avec cependant de larges gammes d'émission qui sont proches (voir Figure 22). Ces résultats correspondent à ceux de la littérature. Le carburant B100 a tendance à augmenter les émissions de NO_x par rapport au diesel, en moyenne, de 15% à 37% selon le bus considéré. Le HVO a tendance à réduire les émissions de NO_x, de 8% à 19% en moyenne selon le bus considéré – le bus 31 présente quant à lui des émissions similaires entre diesel et HVO.

Les émissions de NO₂ suivent globalement les mêmes tendances que les émissions de NO_x, avec une augmentation moyenne de 71 à 125% selon le bus considéré pour le B100 par rapport au diesel. L'effet du HVO sur les émissions de NO₂ est moins marqué que pour l'ensemble des NO_x : majoritairement similaires, elles sont aussi 16% plus faibles en moyenne pour le bus 30. Par ailleurs, les bus 31 et 32 ont tendance à émettre moins de NO₂, pour tous les carburants, que les bus 29 et 30.

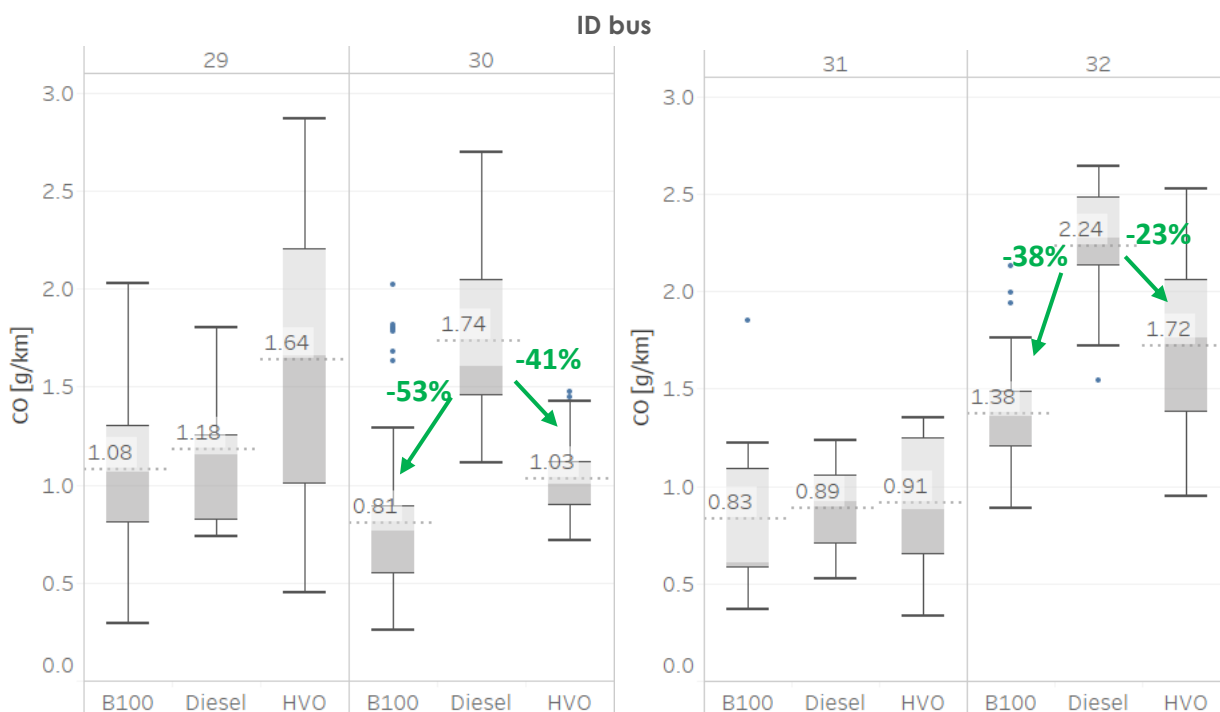


Figure 23 : Émissions de CO des courses sélectionnées par le filtre sur la température ambiante, par bus et par carburant

Les émissions de CO (polluant qui n'est plus un enjeu dans l'air ambiant en Île-de-France compte-tenu des teneurs très faibles) se situent entre 0,2 et 2,9 g/km. Les bus 30 et 32 en diesel ont tendance à émettre davantage de CO (1,74 et 2,24 g/km respectivement) que leurs homologues 29 et 31 (en moyenne, 1,18 et 0,89 g/km respectivement).

Les émissions de CO selon le carburant ne présentent pas de tendance unique. Pour les bus 29 et 31, ayant circulé à des vitesses opérationnelles plus élevées que les bus 30 et 32 (autour de 20 km/h contre autour de 15 km/h), n'observent pas de différences d'émission de CO significatives selon le carburant. En revanche, les bus 30 et 31, ayant donc roulé à vitesse plus faible, observent des baisses de 23 à 41% pour le HVO et de 38 à 53% pour le B100 en moyenne par rapport au diesel, avec donc une baisse légèrement plus importante pour le B100. **Il est donc supposé ici qu'une vitesse plus élevée va réduire les écarts d'émission de CO entre les carburants, tandis qu'à vitesse plus faible, les émissions de CO sont réduites par les carburants alternatifs** (ce qui est évoqué en termes de charge dans une publication de Roy de 2013 [10]).

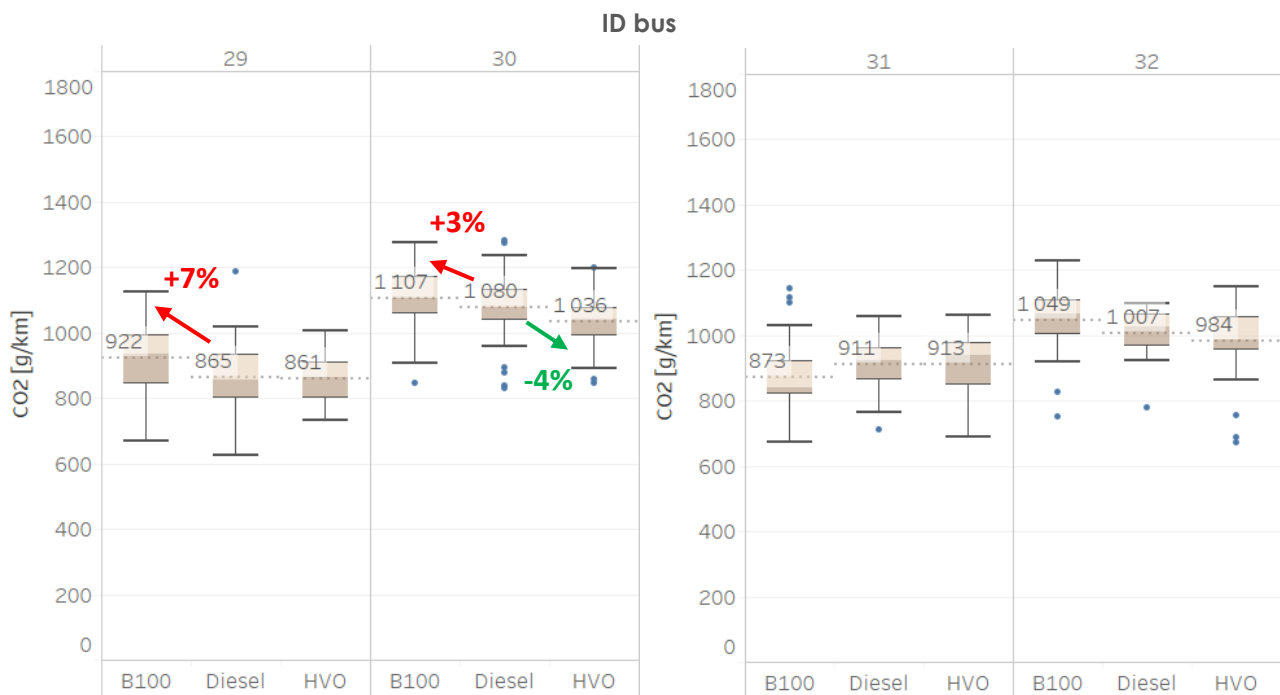


Figure 24 : Émissions de CO₂ des courses sélectionnées par le filtre sur la température ambiante, par bus et par carburant

Les émissions de CO₂ se situent pour les quatre bus Euro V entre 625 et 1284 g/km. Elles sont une nouvelle fois plus élevées en moyenne en diesel pour les bus 30 et 32 que pour les bus 29 et 31. Cette tendance se vérifie aussi pour les autres carburants.

Les émissions de CO₂ selon le carburant sont globalement similaires, sans différences significatives, voire en moyenne par rapport au diesel, légèrement plus élevées pour le B100 (+3 à 7%) et légèrement plus faibles pour le HVO (-4%).

Zoom sur certains paramètres d'influence

Cette section a pour but d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur les émissions, selon le carburant. Les paramètres considérés sont la température ambiante, le démarrage à froid, la température d'échappement (pour indiquer les conditions de fonctionnement du système de dépollution), la vitesse et le style de conduite. Les graphiques présentés ici utilisent soit des émissions sur l'ensemble d'une course en g/km, soit des émissions calculées en g/km pour chaque kilomètre parcouru par le bus (comprenant aussi les moments de « haut-le-pied », hors courses). L'ensemble des courses sont prises en compte dans cette partie, sans filtre sur les températures ambiantes.

La température ambiante peut influencer les émissions à la hausse, notamment de NO_x , mais aussi de PN pour le B100 selon la littérature (voir la bibliographie en Introduction). La Figure 25 vise à illustrer une éventuelle influence de la température sur ces émissions.

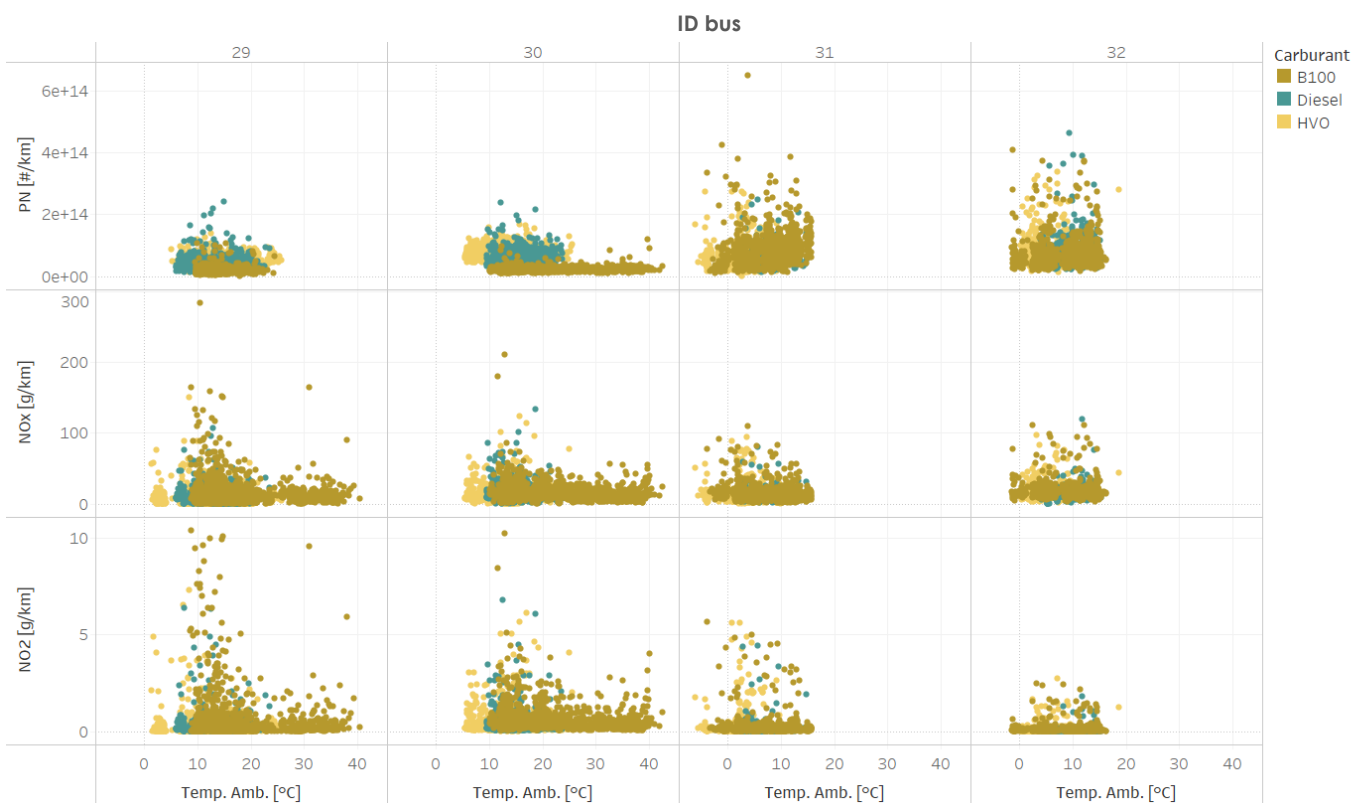


Figure 25 : Emissions de PN, de NO_x et de NO_2 selon la température ambiante, pour chaque bus et chaque carburant

Les graphiques montrent d'une part que les concentrations élevées de PN des bus 31 et 32 mais surtout du bus 31 avec B100 ne sont pas dues à des températures ambiantes plus faibles. Globalement, pour tous les polluants, et même les NO_x , la température ambiante n'est pas un paramètre d'influence important pour ces bus, quel que soit le carburant utilisé. Le seul impact observable est potentiellement une variabilité plus importante des émissions de NO_2 , voire de NO_x mais dans une moindre mesure, en-dessous de 15°C , et notamment avec le carburant B100. Cela s'observe plus clairement sur les bus 29 et 30 ayant rencontré une plus grande gamme de températures ambiantes.

Un autre paramètre d'influence, notamment pour les NO_x , est le démarrage à froid, indiqué par une température de liquide de refroidissement inférieure à 70°C . Dans cette situation, la combustion n'est pas optimale et les conditions de fonctionnement du système de dépollution (en l'occurrence du SCR) non plus. Cela crée typiquement des surémissions durant un laps de temps variable, de quelques minutes à plus de 30 minutes selon le bus et les conditions. La Figure 26 permet de

répondre à la question suivante : est-ce que le changement de carburant impacte le comportement des émissions à moteur froid, i.e. existe-t-il la même hiérarchie entre les carburants pour les émissions de NO_x entre moteur chaud et moteur froid ?

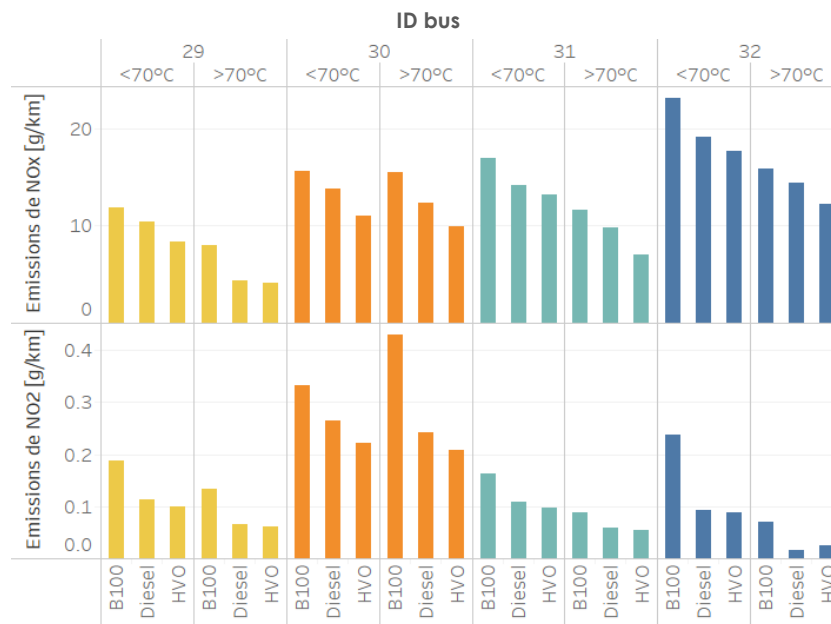


Figure 26 : Emissions de NO_x et de NO₂ selon la température du liquide de refroidissement (théoriquement si <70°C, moteur froid) pour chaque bus et chaque carburant

Le graphique ci-dessus montre que, pour les NO_x et le NO₂, les hiérarchies entre carburants sont similaires entre moteur chaud et moteur froid, ce qui signifie que le changement de carburant ne cause pas de comportements nettement différents à moteur froid (en termes de combustion, de dépollution). Par ailleurs l'analyse a permis d'observer que les temps de démarrage à froid ne diffèrent pas selon le carburant utilisé.

Dans la même logique, la température d'échappement peut être un indicateur du bon fonctionnement du système de dépollution SCR lorsqu'elle est supérieure à 200°C. La Figure 27 permet de répondre à la question suivante : est-ce que le changement de carburant impacte le comportement des émissions lorsque le système SCR ne fonctionne pas de manière optimale en théorie, i.e. existe-t-il la même hiérarchie entre les carburants pour les émissions de NO_x entre les moments où le système SCR fonctionne de manière optimale ou non ?

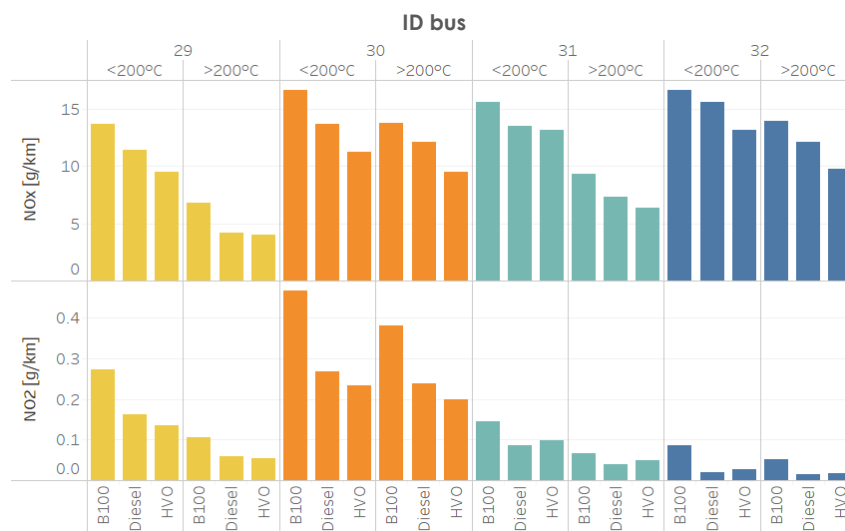


Figure 27 : Emissions de NO_x et de NO₂ selon la température d'échappement (théoriquement si <200°C, fonctionnement non optimal du SCR) pour chaque bus et chaque carburant

Le graphique de la Figure 27 montre que, pour les NO_x et le NO₂, les hiérarchies entre carburants sont similaires entre les modes de fonctionnement théoriques du système SCR, ce qui signifie que le changement de carburant ne cause pas de comportements nettement différents entre les deux situations.

Par ailleurs, la vitesse moyenne d'une course peut aussi influencer les émissions des différents polluants : une vitesse moyenne sur une course plus élevée (dont la vitesse moyenne d'une course est d'environ de 30 km/h au maximum) va avoir tendance à réduire les émissions au km. L'objectif ici est de voir si cette influence varie en fonction du carburant. La Figure 28 montre les émissions de NO_x et de CO₂ en fonction de la vitesse de la course, la Figure 29 montre celles des PN en séparant les deux technologies de bus.

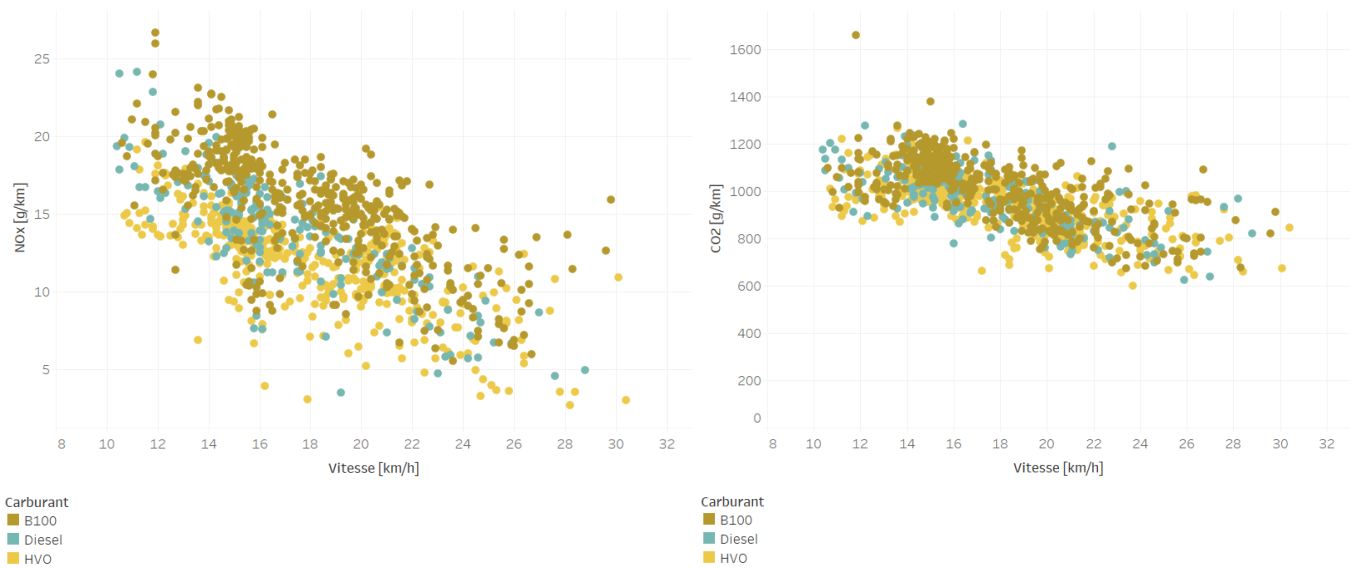


Figure 28 : Emissions de NO_x et de CO₂ de l'ensemble des courses, selon la vitesse moyenne des courses, par carburant

Pour les émissions de NO_x et de CO₂, l'influence de la vitesse semble être la même pour tous les carburants, selon l'analyse réalisée. Entre une course à 10km/h et une course à 20 km/h, il est observé une baisse d'émissions d'environ 50% pour les NO_x et d'environ 20% pour les CO₂, en moyenne pour tous les bus.

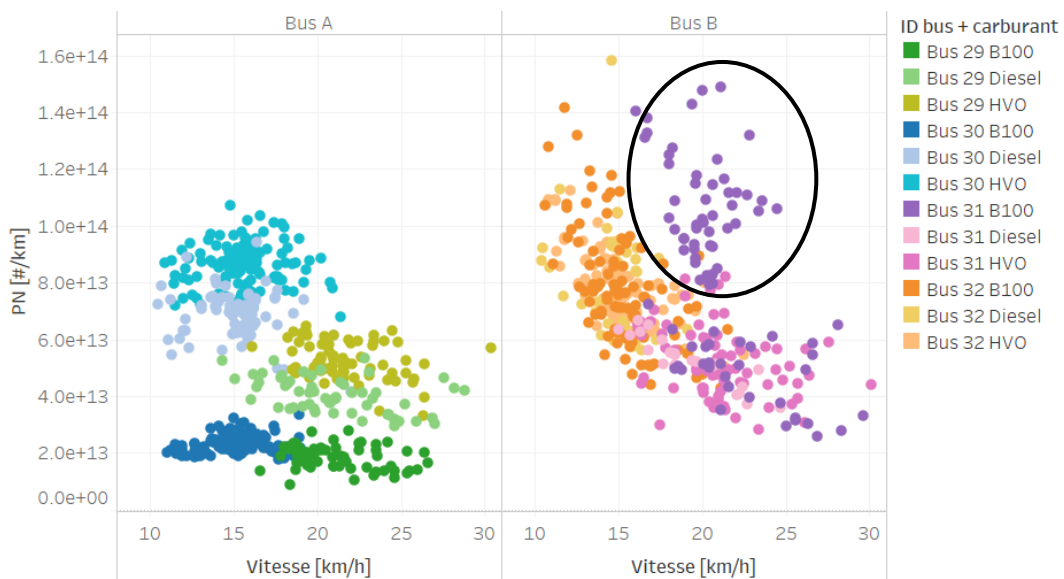


Figure 29 : Emissions de PN de l'ensemble des courses, selon la vitesse moyenne des courses, par bus et par carburant

En ce qui concerne les émissions de PN, l'influence de la vitesse est différente surtout en fonction du type de bus (A ou B). Pour les bus B, l'influence de la vitesse est homogène pour tous les carburants (sans compter les courses atypiques non expliquées du bus 31 avec B100 évoquée plus haut, entourées ici en noir), avec une baisse de 20% environ des émissions de PN entre 10 et 20 km/h. Pour les bus A, c'est surtout le type de carburant et non la vitesse qui définit les émissions de PN.

Les émissions de CO et de NO₂ ne sont pas clairement influencées par la vitesse. Il a été cependant observé dans la section précédente que les différences d'émissions de CO entre carburants augmentent à plus faible vitesse (autour de 15 km/h) et s'atténuent autour de 20 km/h.

Le style de conduite, indiqué par la RPA, est un autre facteur d'influence potentiel notamment pour les émissions de CO₂ et de PN. La Figure 30 présente les émissions de PN selon la RPA, par technologie de bus, la Figure 31 celles de CO₂, pour tous les bus.

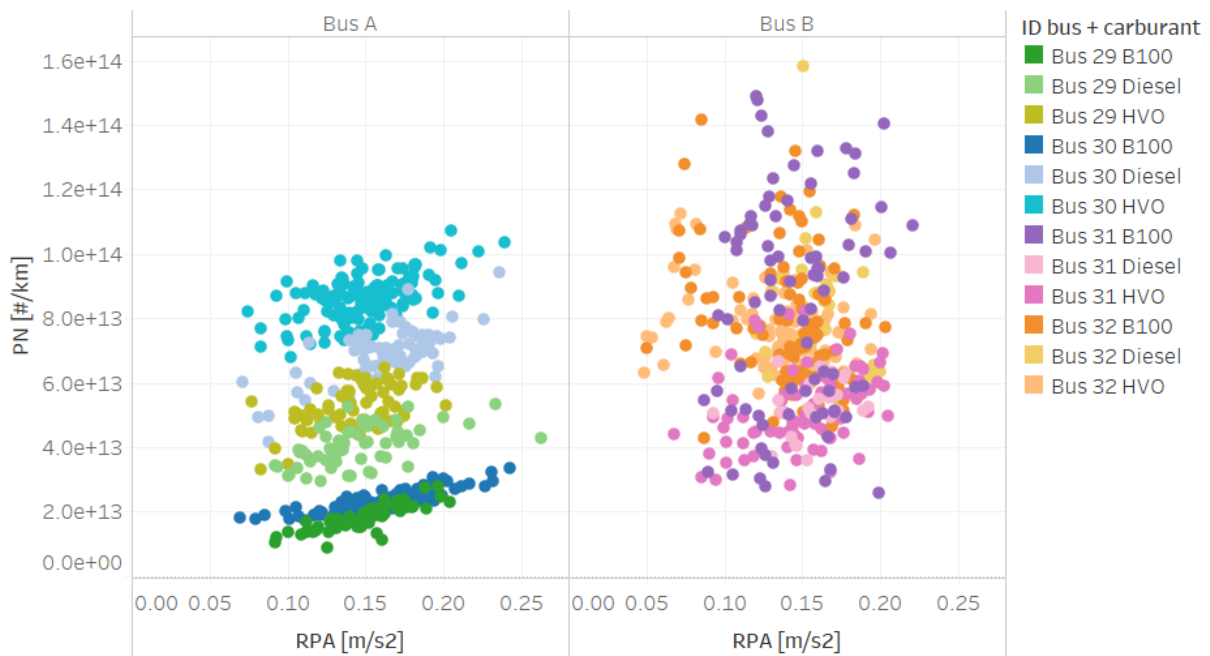


Figure 30 : Emissions de PN de l'ensemble des courses, selon la RPA, par bus et par carburant

Les influences de la RPA selon la technologie du bus pour les émissions de PN sont différentes de celles de la vitesse. L'influence est ici plutôt linéaire et de même ampleur pour les bus A, tandis que les bus B, même en retirant les courses atypiques, ne montrent pas de comportement linéaire en fonction de la RPA. Par ailleurs, il est encore visible sur ce graphique que le type de carburant a plus d'influence sur les bus A que la RPA.



Figure 31 : Emissions de CO₂ de l'ensemble des courses, selon la RPA, par bus et par carburant

Enfin, pour les émissions de CO₂, l'influence de la RPA est identique pour tous les bus et tous les carburants, et la variabilité des émissions de CO₂ semble être expliquée en grande partie par le couple RPA et vitesse.

En conclusion pour les paramètres étudiés, le changement de carburant ne semble pas provoquer de divergence nette pour l'influence de ces paramètres sur les émissions des bus Euro V testés.

5. Conclusions

Deux expérimentations ont été menées afin d'évaluer les différences d'émissions en conditions réelles d'exploitation, sur des bus diesel utilisant alternativement du diesel et des carburants alternatifs (GTL, HVO, B100). Il est rappelé ici que **les résultats pour une technologie/norme de bus ne sont pas transposables à une autre technologie/norme de bus. Par exemple, les résultats obtenus pour les bus Euro V ne peuvent pas être extrapolés à des bus Euro VI.**

Le **GTL** a été testé sur un bus Euro IV et un bus Euro VI en conditions estivales. Par rapport au diesel, il ressort que :

- Il permet de réduire légèrement les émissions de PN pour le bus Euro VI (autour de -20%) mais sur des émissions déjà faibles (résultats non conclusifs pour le bus Euro IV);
- Les émissions de NO_x sont similaires ;
- Les émissions de NO₂ sont réduites autour de -30% pour le bus Euro IV, mais pas pour le bus Euro VI (émissions similaires) ;
- Les émissions de CO sont réduites, autour de -40 à -60% ;
- Les émissions de CO₂ sont réduites, autour de -8% (à l'échappement).

Le **HVO** a été testé sur un bus Euro IV, quatre bus Euro V et un bus Euro VI, en conditions estivales et aussi hivernales pour les bus Euro V. Par rapport au diesel, il ressort que :

- Les émissions de PN peuvent être similaires ou augmenter pour les technologies pré-Euro VI (autour de +30%), et peuvent diminuer pour un bus Euro VI (autour de -20%), mais sur des émissions déjà faibles ;
- Les émissions de NO_x varient selon la technologie ou les conditions de l'étude, et peuvent être similaires ou plus faibles (autour de -8 à -20%) ;
- Les émissions de NO₂ varient aussi selon la technologie ou les conditions de l'étude, et sont les plus souvent plus faibles (autour de -40%) ou similaires, et dans un cas plus élevées (autour de +50%, pour un bus Euro V) ;
- Les émissions de CO sont plus faibles en général (autour de -20 à -60%), mais peuvent être similaires aux vitesses les plus « élevées » testées (autour de 20 km/h) ;
- Les émissions de CO₂ à l'échappement sont similaires voire légèrement plus faibles (-4%).

Le **B100** a été testé sur quatre bus Euro V, en conditions estivales et hivernales. Par rapport au diesel, il ressort que :

- Les émissions de PN peuvent être similaires (et très variables) ou diminuer (autour de 60%) ;
- Les émissions de NO_x augmentent, autour de +15 à +40%, avec une variabilité importante et des gammes d'émission proches de celles du diesel ;
- Les émissions de NO₂ augmentent, en moyenne de deux fois ;
- Les émissions de CO diminuent, autour de -40 à -50%, mais peuvent être similaires aux vitesses les plus « élevées » testées (autour de 20 km/h) ;
- Les émissions de CO₂ à l'échappement sont similaires voire légèrement plus élevées (autour de +5%).

Suite à ces expérimentations, il apparaît en premier lieu que les émissions de bus varient surtout en fonction de la technologie du bus, principalement de la norme Euro, mais aussi des différentes technologies de bus (moteur, systèmes de dépollution) au sein d'une même norme, qui sont les premiers facteurs de variabilité. Ensuite, selon la technologie et les conditions d'exploitation du bus, les carburants alternatifs vont réduire plus ou moins les émissions, à des degrés moins importants. Cela s'applique pour les polluants mesurés dans cette étude, PN, NO_x, CO, CO₂, et pour les PM et HC, selon la littérature. Les carburants alternatifs peuvent aussi dans certains cas augmenter ces émissions (cas pour les PN pour certains bus Euro V avec HVO, et cas pour les NO_x pour les bus Euro

V avec B100). **L'intérêt des carburants alternatifs doit donc être mesuré en premier lieu au niveau de leur cycle de vie, car leur performance pour la qualité de l'air locale est très variable et devrait idéalement être vérifiée localement selon la flotte présente et les conditions d'exploitation.**

Références

- [1] Joint Research Center, "Well-to-Wheels analysis of future automotive and powertrains in the European context," 2014.
- [2] TNO, "Assessment of pollutant emissions with Shell GTL fuel as a drop in fuel for medium and heavy-duty vehicles, inland shipping and non-road machines," 2014.
- [3] M. A. Bassiony, A. Ibrahim, and M. M. El-Kassaby, "An experimental study on the effect of using gas-to-liquid (GTL) fuel on diesel engine performance and emissions," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, pp. 2115-2124, 2016.
- [4] T. L. Alleman and R. L. McCormick, "Fischer-Tropsch Diesel Fuels - Properties and Exhaust Emissions: A Literature Review," presented at the SAE World Congress, Detroit, Michigan, 2003.
- [5] R. Suarez-Bertoa *et al.*, "Impact of HVO blends on modern diesel passenger cars emissions during real world operation," *Fuel*, vol. 235, pp. 1427-1435, 2019.
- [6] COMVEC, "Alternative Motor Fuels Technology Collaboration Programme Annex 49 : Fuel and Technology Alternatives for Commercial Vehicles," 2016.
- [7] B. Kegl, "Influence of biodiesel on engine combustion and emission characteristic," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 1803-1812, 2011.
- [8] IEA Advanced Motor Fuels Implementing Agreement, "Synthesis, Characterization and Use of Hydro-Treated Oils and Fats for Engine Operation," 2015.
- [9] R. L. McCormick *et al.*, "Regulated Emissions from Biodiesel Tested in Heavy-Duty Engines Meeting 2004 Emission Standard," presented at the SAE Brasil Fuels & Lubricants Meeting, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [10] M. M. Roy, M. Alawi, and W. Wang, "Effects of Canola Biodiesel on a DI Diesel Engine Performance and Emissions," *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, vol. 13, no. 2, pp. 46-53, 2013.
- [11] L. G. Anderson, "Effects of Biodiesel Fuels Use on Vehicle Emissions," *Journal of Sustainable Energy & Environment*, vol. 3, pp. 35-47, 2012.