Evaluation des émissions de gaz à effet de serre et de polluants locaux des poids-lourds

Etude IFPEN pour la DGEC, Rapport de synthèse – 11/2024

Objet du document

La présente étude consiste en une évaluation scientifique des émissions des véhicules actuels utilitaires lourds, couvrant les principales technologies disponibles sur le marché, à savoir les véhicules équipés de motorisations diesel (B7, B100, HVO, GTL), gaz (GNL) mais aussi des motorisations dual-fuel et hybridées électriquement.

L'étude porte sur un panel représentatif des véhicules vendus en nombre et en modèle, centré sur le parc français, et couvrant les catégories N2, N3 et M3. Les véhicules ont dans la mesure du possible été prélevés sur parc, en visant des véhicules le plus représentatif possible.

Cette évaluation a la double vocation de guider les pouvoirs publics et d'établir de manière publique et transparente les performances environnementales de l'offre actuelle des véhicules utilitaires lourds. Elle s'inscrit aussi dans le contexte des négociations récentes du paquet Euro 7, en vue de la mise en application de cette nouvelle norme et de l'éventuelle révision à cette occasion de la classification Crit'Air.

L'évaluation est focalisée sur les émissions de CO_2 et de polluants locaux réglementées (en particulier les oxydes d'azote et particules fines) et non réglementés, à savoir les particules fines en dessous de 23 nanomètres, ainsi que les émissions de NO_2, NH_3, N_2O et CH_4.

Elle vise également à qualifier les enjeux liés à chaque filière carburant : disponibilité des ressources et compétition entre secteurs, régulation et fiscalité, maturité et cout des process. Enfin, des éléments de bilan CO_2 du puit à la roue en fonction des différents carburants considérés ainsi que des éléments prospectifs d'analyse de cycle de vie et de TCO basés sur la synthèse de travaux antérieurs, figurent dans le bilan global de cette étude. Les véhicules électriques et hydrogènes (à motorisation thermique ou pile à combustible) non couverts par l'évaluation expérimentale, sont évoqués quant à ces aspects filières et décarbonation.

Cette étude, commandée par la DGEC[1] a été menée par IFPEN[2] avec les partenaires CRMT[3] et GreenMot[4] concernant les essais expérimentaux. Un comité de suivi a été mis en place entre la DGEC, IFPEN , le CRMT et l'ADEME[5].

[1] https://www.ecologie.gouv.fr/direction-generale-lenergie-et-du-climat-dgec
[2] https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/
[3] https://www.crmt.fr/fr/
[4] https://www.greenmot.com/
[5] https://www.ademe.fr/

Table des matières

Objet du document....2

1. A retenir....5

2. Introduction....6

2.1. Contributions des émissions des PL aux émissions globales du transport....6

2.2. Contexte technologique : diversification....9

2.3. Objectifs, périmètre et structuration de l'étude....11

3. Synthèse des connaissances antérieures....12

4. Contexte réglementaire....14

4.1. Rappel du cadre réglementaire Euro VI....14

4.2. Évolutions pour Euro 7....15

4.3. Classification Crit'Air....17

5. Protocole expérimental et sélection des véhicules....20

5.1. Synthèse des moyens de mesures et de l'instrumentation (annexe les éléments détaillés)....20

5.2. Matrices d'essais....22

5.3. Description des véhicules et carburants sélectionnés....24

5.4. Description du jeu de données collecté....30

5.5. Consolidation des résultats et méthodologies appliquées....30

6. Analyse des résultats expérimentaux....34

6.1. Comparaison Diesel vs. GNV....34

6.2. Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel....39

6.3. Analyse de l'effet des biodiesels....44

6.4. Comparaison B100 vs B100 exclusif....46

6.5. Comparaison bus CNG vs CNG Hybride....49

6.6. Diesel PHEV....51

6.7. Émissions en usage réel : analyse de la sensibilité aux conditions d'usages....54

6.8. Comparaisons chiffrées....62

6.9. Effet du traitement normatif et de la phase....67

6.10. FOCUS - Efficacité des systèmes de dépollution....70

6.11. FOCUS - PN_{10} vs PN_{23}....73

7. Extension des constats : autres technologies, analyses de cycle de vie et filières énergétiques....76

7.1. Considérations sur les filières bas carbone....76

7.2. Comparaisons des solutions technologiques et filières : WtT, WtW, ACV et TCO....83

8. Extension des constats : modélisation des impacts sur les territoires....91

8.1. État de l'art des modèles d'émissions 91
8.2. Présentation et calibration des modèles IFPEN 91
8.3. Validation des modèles microscopiques 95
8.4. Outils digitaux d'aide à la décision 97
9. Conclusion 99
10. Glossaire 102
11. Références bibliographiques 104
12. Annexes 109
12.1. Lotissement détaillé de l'étude et planning réalisé 109
12.2. Analyse bibliographique 110
12.3. Caractéristiques détaillées des moyens de mesures 116
12.4. Résultats expérimentaux véhicule par véhicule 122
12.5. Comparaison Diesel vs GNV 127
12.6. Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel 134
12.7. Analyse de l'effet des biodiesels 144
12.8. Comparaison B100 vs B100 exclusif 153
12.9. Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride 158
12.10. Diesel PHEV 166
12.11. Effet de la phase 173
12.12. Efficacité des systèmes de dépollution 177
12.13. Analyse détaillée des émissions en usage réel 186
12.14. Analyse des émissions en usage réel 190
12.15. Comparaison chiffrée aux seuils normatifs 206
13. Table des figures 210
14. Table des tableaux 216

1. A retenir

L'étude a consisté en une évaluation scientifique des émissions de véhicules lourds de type N2, N3 et M3. Les principales technologies disponibles sur le marché ont été explorées : Diesel (B7, B100, HVO et GTL), gaz (GNV) ainsi que Dual Fuel et hybridation électrique.
Des tests ont été réalisés sur banc de charge, sur route ainsi qu'en conditions réelles d'exploitation. A partir des résultats obtenus, six analyses comparatives ont pu être effectuées :
Comparaison Diesel vs GNV : les émissions de CO_2 dépendent peu du carburant. Les émissions de NO_x sont inférieures dans le cas GNV alors qu'au contraire les émissions de PN_{10} sont supérieures au cas Diesel (B7).
Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel : Le Dual Fuel permet une réduction très significative des émissions de CO_2, comprise entre 14% et 24% selon le cycle de test. Le bilan GES est cependant terni par de fortes émissions de N_2O (pourcentage final ?). De plus, les émissions de PN_{10} et PN_{23} sont élevées par rapport aux autres véhicules de la comparaison. Le faible kilométrage du véhicule peut expliquer ces émissions élevées (Système de post-traitement non encore à son efficacité et sa sélectivité nominales).

- Analyse de l'effet des biodiesels : les émissions de CO_2 varient peu avec le carburant : ± 3% en moyenne par rapport au B7. Le B100 est le carburant le plus émissif, le GTL et l'HVO les moins émissifs. Peu de différences sont également à noter concernant les émissions polluantes à l'échappement. Ces dernières sont beaucoup plus impactées par les conditions d'utilisation du véhicule (cycle, charge, température ambiante) que par le carburant.
- Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride : l'hybridation permet une réduction des émissions de CO_2 comprises entre 3% et 10%. Peu de différences sont à noter concernant les émissions polluantes. L'utilisation d'un filtre à particules sur ces véhicules permet de fortement limiter les émissions de PN_{10} et PN_{23}.
- Diesel PHEV : les émissions de CO_2 sont très sensibles au mode d'utilisation. En particulier, le mode « recharge » est très énergivore et émissif. Il existe un compromis en mode « épuisement de charge » entre les émissions de NO_x nulles en mode ZEV et les forts pics d'émissions relevés lors du redémarrage du moteur thermique.

Les résultats obtenus au banc à rouleaux montrent également une forte dépendance des émissions polluantes à la phase du cycle : une augmentation très significative des émissions est observée durant la phase froide du cycle pour la majeure partie des polluants. La faible efficacité du système de post-traitement dans de telles conditions en est à l'origine.

Les résultats obtenus pour chaque véhicule ont été comparés aux données communiquées lors de l'homologation ainsi qu'aux seuils normatifs. Dans des conditions d'essais proches de celles de l'homologation, les différences relevées par rapport aux données d'homologation sont similaires et les limites normatives Euro VI sont globalement respectées.

Au-delà des mesures opérées à l'échappement, une synthèse a été produite sur des aspects plus généraux nécessaires afin d'élargir la comparaison de technologies sur les émissions polluantes et le CO_2 à des défis environnementaux globaux. Ainsi, la comparaison a été élargie en incluant les véhicules électriques et hydrogènes (pile à combustible et moteur à combustion) et en considérant les impacts environnementaux (GES) sur le cycle de vie complet, les aspects coûts totaux d'usage et des considérations sur les filières énergétiques (maturité, disponibilité matière première, concurrence entre secteurs).

Les limites normatives sont globalement respectées par les différents véhicules pour les différents polluants. Il existe toutefois des exceptions ponctuelles pour les émissions de NO_x d'un véhicule diesel et de particules du véhicule dual-fuel.

2. Introduction

2.1. Contributions des émissions des PL aux émissions globales du transport

Les poids lourds (PL) jouent un rôle central dans le transport routier, mais leur contribution aux émissions de gaz à effet de serre (GES) et de polluants locaux reste une problématique majeure à l'échelle nationale et européenne. En France, le secteur des transports est le principal émetteur de GES, représentant 31 % des émissions nationales en 2019. Les transports routiers contribuent à la quasi-totalité (94 %) des émissions du secteur des transports. Les émissions liées à la circulation routière incombent à hauteur de 54 % aux véhicules particuliers, de 24 % aux poids lourds et de 20 % aux véhicules utilitaires légers (Figure 1).

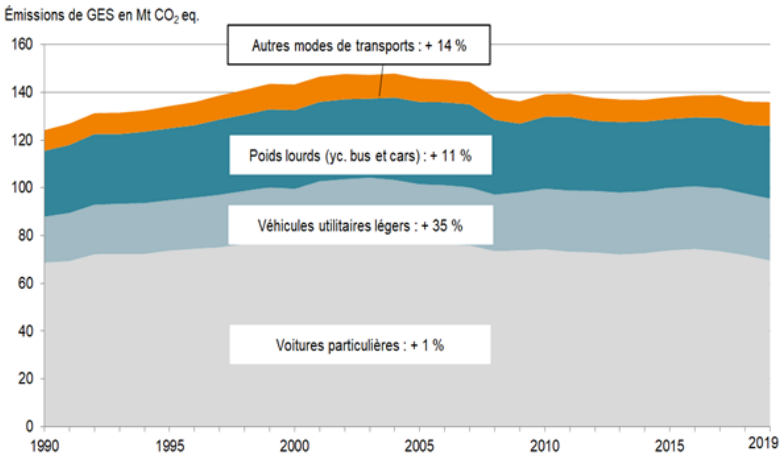


Figure 1 : Évolution des émissions française de GES du secteur des transports par mode de transport6 – France – 1990 / 2019 – Source [1]

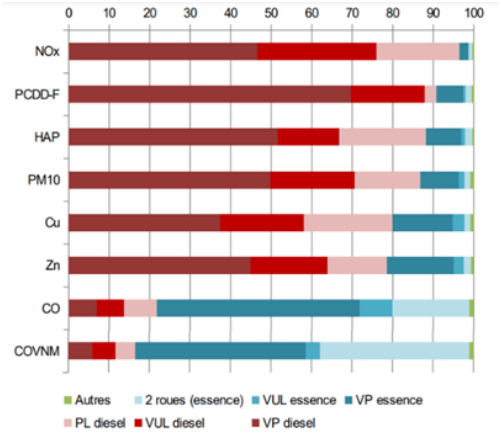


Figure 2 : Émissions du transport routier par type de véhicule et motorisation pour quelques polluants en 2018 – Champ : France métropolitaine - Source [2]

Les poids lourds contribuent également significativement aux émissions de polluants locaux (Figure 2), y compris d'oxydes d'azote (NO_x) et de particules fines (PM10), polluants particulièrement critiques pour la qualité de l'air et la santé publique, mais aussi de composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) et d'autres polluants spécifiques, comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). À l'échelle européenne, selon l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), les poids lourds représentent une part significative des émissions de NO_x : bien qu'ils ne constituent que 2 % du parc de véhicules, ils sont responsables de 28 % des émissions du transport routier, soit plus de 6 % des émissions totales de l'UE. Les poids lourds restent ainsi au cœur des enjeux de décarbonation et de réduction des polluants locaux. La complexité des défis nécessite des solutions combinées, incluant l'électrification, les carburants alternatifs (biocarburants, hydrogène) et des politiques ambitieuses pour réduire leur empreinte environnementale.

Bien que la présente étude traite des leviers technologiques (véhicules et filières énergétiques), il est important de mentionner en introduction que les enjeux de réduction des émissions du secteur ne se limitent pas aux seules mesures visant l'efficacité énergétique des véhicules, mais doivent aussi concerner la gestion de la demande. A titre d'illustration et concernant les émissions de gaz à effet de serre, une note d'analyse de l'AEE de 2020 démontre que les améliorations technologiques significatives réalisées ces 20 dernières années n'ont pas suffi à contrebalancer l'augmentation de la demande entraînant une hausse des émissions sur la période (Figure 3). Dans la stratégie dite « ASI » mise en avant par l'AEE pour « *avoid, shift and improve* » (éviter, transférer et améliorer), nous ne traitons donc ici « seulement » du dernier maillon d'amélioration technologiques.

[6] ***Note*** *: conformément aux conventions internationales (CCNUCC), les émissions des transports internationaux sont exclues du total de l'inventaire national et rapportées hors total ; les émissions nationales des transports aériens, maritimes et fluviaux répertoriées sont celles se produisant entre deux ports ou aéroports du territoire national. Autres modes : 2 roues, transport ferroviaire, transports intérieurs aériens, maritimes et fluviaux.*

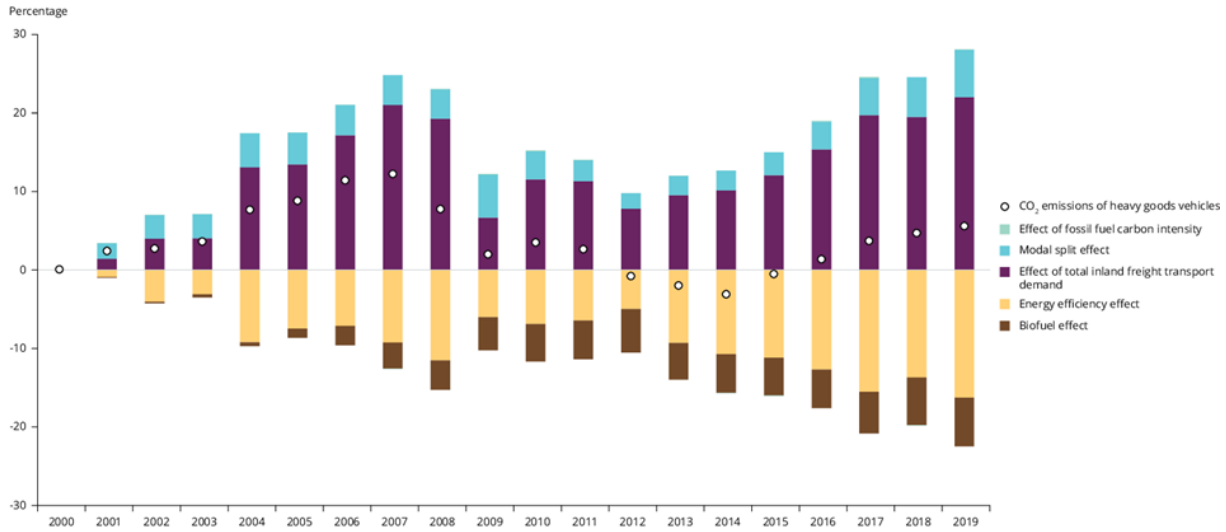


Figure 3 : Analyse de décomposition des émissions de CO_2 des camions dans l'UE-27, 2000-2019 - contribution en pourcentage de différents facteurs. Sources : [3][4]

La réduction des émissions des poids lourds s'inscrit dans un cadre réglementaire en constante évolution, à la croisée des politiques nationales, européennes et locales. Ces évolutions visent à répondre aux enjeux climatiques et sanitaires en imposant des objectifs ambitieux et des normes strictes.

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) et la feuille de route de décarbonation des poids lourds [5][6][7]

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) constitue le cadre de référence pour atteindre la neutralité carbone en France à l'horizon 2050. Dans ce cadre, le secteur des transports, premier contributeur aux émissions de gaz à effet de serre (GES) en France (31 % des émissions nationales en 2019), bénéficie d'une attention particulière. La SNBC 2 fixe un objectif de réduction de 28 % des émissions de GES des transports d'ici 2030 (Figure 4), avec des actions spécifiques pour les poids lourds. La feuille de route de décarbonation des poids lourds s'articule autour de trois axes principaux : le renforcement de l'efficacité énergétique des véhicules (amélioration des motorisations et réduction des consommations de carburant), la diversification des vecteurs énergétiques (promotion des biocarburants avancés, de l'électricité et de l'hydrogène) et le renouvellement accéléré des flottes : incitation au remplacement des véhicules anciens par des technologies plus propres. La troisième édition (SNBC 3), mise en consultation publique le 4 novembre 2024, intègre des objectifs encore plus ambitieux que la précédente version, en réponse aux exigences climatiques croissantes et à l'urgence de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Concernant les transports, et en particulier les poids lourds, la SNBC 3 renforce les objectifs de réduction des émissions pour le secteur. Elle porte l'objectif de réduction des émissions du transport routier d'ici 2030 par rapport à 2015 de 28 % à 35 %, avec une accentuation des mesures ciblant les poids lourds. Ces évolutions répondent à la stagnation observée des réductions dans ce sous-secteur, malgré les progrès sur les véhicules légers. Les principales nouveautés de la SNBC 3 pour les poids lourds incluent un renforcement des politiques de renouvellement des flottes, avec des incitations plus fortes pour accélérer l'adoption de technologies électriques, à hydrogène ou à biocarburants avancés, une augmentation des investissements dans les infrastructures de recharge et de ravitaillement pour l'électricité et l'hydrogène, afin de lever les obstacles à la transition énergétique et la reconnaissance des solutions transitoires comme les biocarburants durables, tout en limitant leur utilisation aux filières où des alternatives zéro émission ne sont pas encore disponibles.

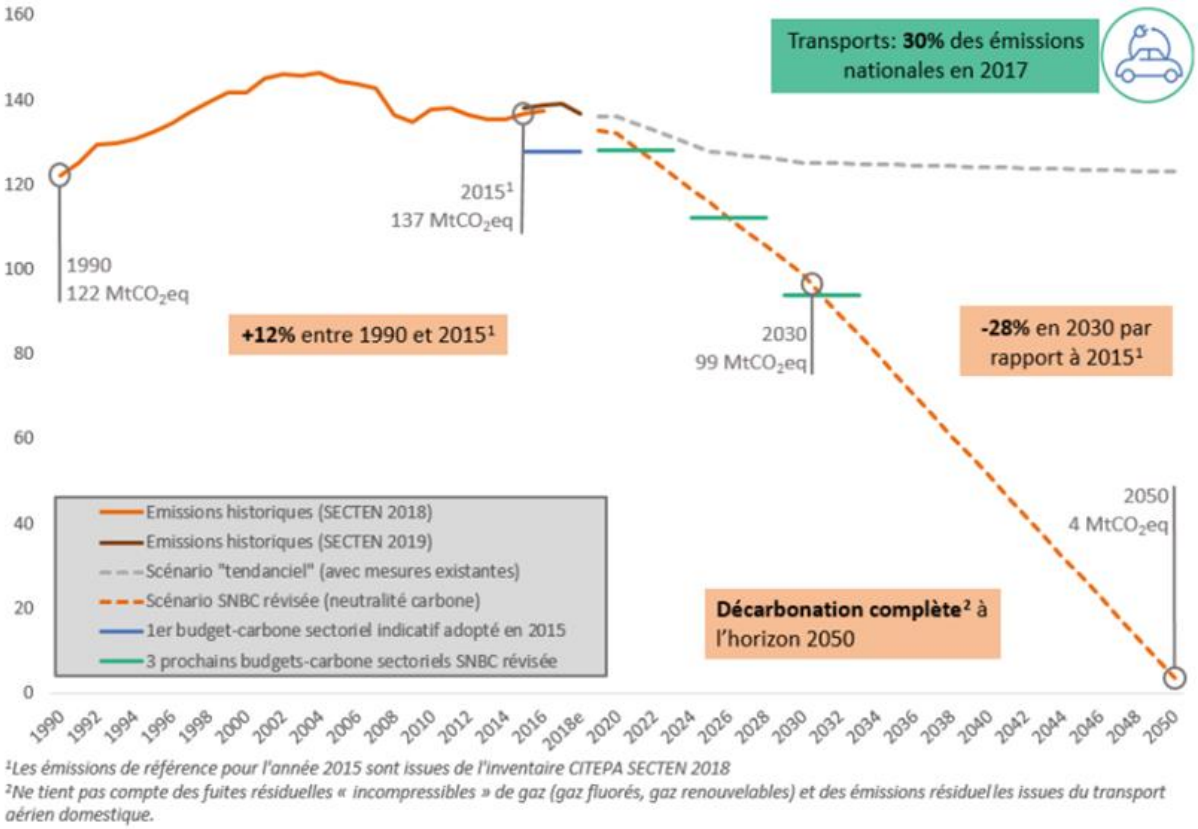


Figure 4 : Objectifs de décarbonation du transport routier national. Source : Synthèse SNBC 2 [5]

La norme Euro 7 : des exigences renforcées pour les poids lourds [8]

La norme Euro 7, adoptée le 28 mai 2024, marque une nouvelle étape dans la réglementation européenne sur les émissions des véhicules. Applicable à partir de 2028 pour les catégories M2, M3, N2 et N3, regroupant les poids lourds et les bus, elle introduit des exigences renforcées en matière de performances environnementales. L'un des principes clés de cette nouvelle norme est la neutralité technologique, qui impose des seuils d'émissions uniformes indépendamment de la technologie utilisée, qu'il s'agisse de moteurs à essence, diesel, gaz ou autres carburants. La norme prévoit également une sévérisation des seuils existants pour les polluants traditionnels, accompagnée de l'abaissement du diamètre minimal des particules mesurées (PN_{10}) afin de prendre en considération les particules ultrafines. En parallèle, de nouveaux polluants sont désormais pris en compte, comme les composés organiques non méthaniques spécifiques (NMOG), ainsi que les émissions d'ammoniac (NH_3, en mg/kWh, initialement seulement en volumique), de protoxyde d'azote (N_2O) et de méthane (CH_4), reflétant une volonté d'intégrer davantage les impacts climatiques et sanitaires dans les normes. Enfin, la durabilité des systèmes de dépollution devient un critère central, avec des exigences de conformité prolongées sur une période allant jusqu'à dix ans ou 700 000 kilomètres, garantissant une efficacité environnementale sur toute la durée de vie des véhicules. La section 4.2 détaille les évolutions normatives portées par Euro 7.

Réglementations locales : durcissement des ZFE-m et évolution des classifications Crit'Air

Les Zones à Faibles Émissions mobilité (ZFE-m), instaurées dans les grandes agglomérations françaises, se multiplient et deviennent de plus en plus strictes. D'ici 2025, les ZFE-m seront généralisées dans les villes de plus de 150 000 habitants, imposant des restrictions croissantes pour les véhicules les plus polluants, y compris les poids lourds diesel non conformes aux normes les plus récentes. Ces aspects seront également détaillés par la suite en section 4.3.

Ces évolutions réglementaires, à toutes les échelles, imposent des transformations profondes pour le secteur des poids lourds. Elles encouragent l'innovation technologique, le renouvellement des flottes et l'adoption de vecteurs énergétiques plus propres, tout en renforçant les exigences en matière de performance environnementale. Ce contexte réglementaire offre une feuille de route claire, mais exige des efforts considérables pour atteindre les objectifs climatiques et sanitaires fixés.

2.2. Contexte technologique : diversification

La réduction des nuisances environnementales liées aux poids lourds a conduit à une diversification croissante des technologies de propulsion et des vecteurs énergétiques utilisés (Figure 5). Ces évolutions technologiques visent à répondre aux objectifs de décarbonation et à réduire les polluants locaux tout en tenant compte des contraintes opérationnelles spécifiques de ce secteur. Cette transition s'articule autour de deux grands axes : l'amélioration des motorisations traditionnelles et l'adoption de nouvelles solutions énergétiques.

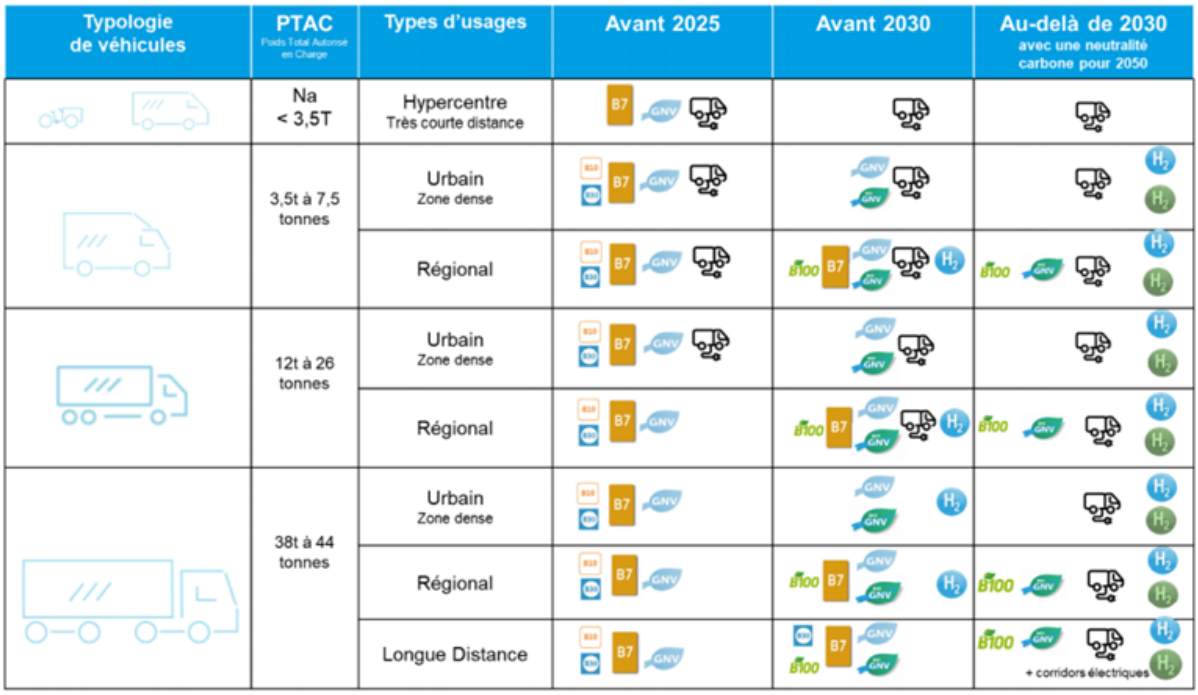


Figure 5 : Source : feuille de route TLF « Quelle transition énergétique pour le Transport Routier de Marchandise ? » [10]

Les moteurs à combustion interne continuent de jouer un rôle central, mais avec une transition progressive vers des carburants alternatifs. Si le diesel reste aujourd'hui prédominant, il est progressivement complété par des biocarburants avancés comme le biodiesel ou le bioéthanol (à la marge), ainsi que par le gaz naturel, sous forme comprimée (CNG) ou liquéfiée (LNG). À plus long terme, l'utilisation d'hydrogène dans des moteurs thermiques représente une autre voie envisagée et développée. Parallèlement, l'électrification s'impose comme une tendance majeure, offrant une gamme de solutions allant des véhicules hybrides (rechargeables ou non) basés sur des motorisations diesel ou gaz, aux véhicules 100 % électriques à batterie (BEV) et aux véhicules à pile à combustible (FCEV) utilisant l'hydrogène. Les avantages, inconvénients et défis relatifs à ces diverses solutions technologiques sont très dépendant du périmètre considéré et e l'externalité, comme l'illustre la synthèse proposée en Figure 6.

La mobilisation des biocarburants constitue une piste particulièrement importante dans cette transition, permettant de réduire rapidement les émissions de GES tout en exploitant les infrastructures existantes. Ces carburants avancés, produits à partir de résidus agricoles, d'huiles usagées ou de biomasse, offrent des perspectives intéressantes pour la décarbonation. Cependant, leur déploiement soulève des interrogations sur la disponibilité

des matières premières, les impacts environnementaux des filières de production et la concurrence avec d'autres secteurs et notamment l'aérien. Malgré ces limites, les biocarburants représentent une solution transitoire pour réduire les émissions des flottes actuelles en attendant une adoption plus large des technologies zéro émission.

La compréhension de l'impact global et local de ces nouveaux vecteurs énergétiques reste incomplète. Les analyses actuelles montrent que les gains en matière de GES dépendent fortement des conditions de production et des mix énergétiques utilisés, en particulier pour l'électricité et l'hydrogène. Par ailleurs, les émissions de polluants locaux comme le NO_x, le NH_3 ou les particules ultrafines varient selon les technologies et les carburants, et ne sont pas encore totalement caractérisées pour certaines solutions innovantes.

Ces incertitudes montrent l'importance de poursuivre les études pour évaluer de manière globale les performances environnementales et sanitaires des différentes options technologiques. La diversification des vecteurs énergétiques constitue une réponse nécessaire aux objectifs climatiques et sanitaires, mais elle exige une meilleure compréhension de ses impacts pour guider les choix futurs.

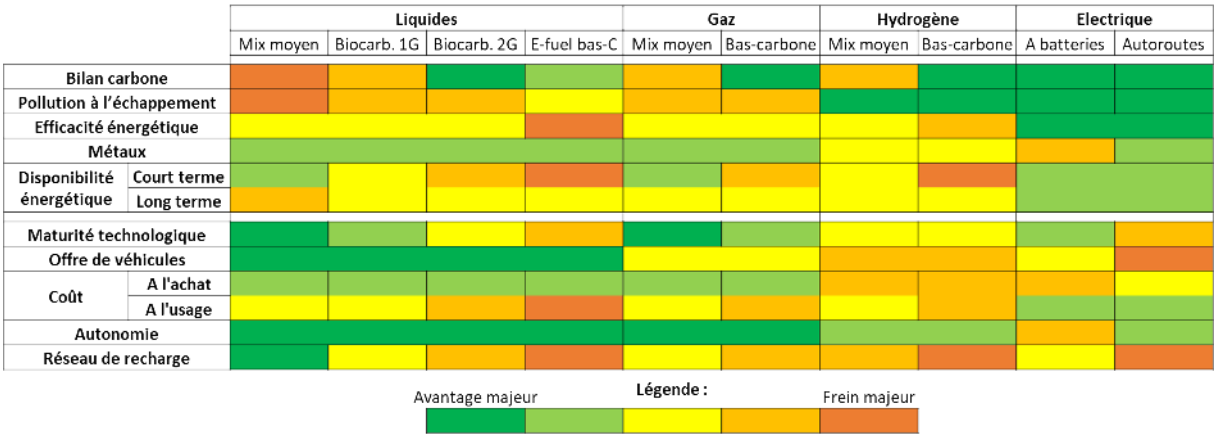


Figure 6 : « Principaux avantages (en vert) et inconvénients ou freins (en orange) des différentes options de décarbonation pour les poids lourds sur longue distance, de manière qualitative », [9]

2.3. Objectifs, périmètre et structuration de l'étude

Dans le contexte ainsi décrit, les objectifs de la présente étude sont multiples :

- **Etablir de manière publique et transparente un bilan transverse des émissions de gaz à effet de serre (GES), polluants réglementés (PR) et non réglementés (PNR) des véhicules lourds :**
  - **Sur un panel de solutions technologies actuelles le plus large possible**
  - **Dans des conditions d'utilisation variées y compris critiques**
- **Positionner ce constat par rapport aux normes actuelles et à venir pour guider les pouvoirs publics**
- **Apporter un éclairage au-delà des émissions à l'échappement, en considérant les filières énergétiques en amont et plus globalement des analyses sur le cycle de vie des véhicules**

Pour répondre à ceux-ci, l'étude a été structurée en trois lots. Le **Lot 1** a été dédié à la revue de l'état de l'art, à la sélection des véhicules et des carburants, ainsi qu'à la définition des missions et de l'instrumentation nécessaires. Cette phase initiale vise à lever les risques expérimentaux et à établir une base méthodologique solide. Le **Lot 2**, central, s'est concentré sur la campagne expérimentale, avec des volets spécifiques dédiés à la caractérisation des performances environnementales des poids lourds diesel (y compris l'effet des biodiesel B100, HVO et GTL, des poids-lourds gaz, des véhicule dédiés au transport en commun de personnes (TCP) et à l'apport de l'hybridation, garantissant une couverture large des technologies disponibles sur le marché. Enfin, le **Lot 3** a compris les taches d'analyses et synthèses des données collectées. Il couvrait les enjeux locaux (qualité de l'air et études de cas critiques comme les ZFE) et les enjeux globaux (GES et analyse de cycle de vie).

Enfin, concernant les parties prenantes et acteurs du projet et leurs rôles respectifs :

- La DGEC est commanditaire et financeur de l'étude, et membre du comité de pilotage.
- IFP Energies Nouvelles (IFPEN) est mandatée par la DGEC pour l'exécution de l'étude et en est la « maitre d'œuvre », en charge de :
  - la structuration et du montage de l'étude conformément au cahier des charges,
  - la définition de la matrice d'essai : véhicules, carburants et instrumentations,
  - la fourniture des carburants « spéciaux »,
  - la rédaction de l'appel d'offre public pour la sous-traitance des essais et la sélection des lauréats,
  - le suivi, de la validation finale et de l'analyse des essais,
  - et enfin les analyses, synthèses et préconisations au travers du présent rapport de synthèse et des restitutions régulières au comité de pilotage.
- L'ADEME participe au comité de pilotage pour le suivi technique de l'état et permettre une appropriation et une dissémination accrue des résultats.
- Le CRMT, lauréat de l'appel d'offre public pour la sous-traitance des essais, est en charge :
  - De l'approvisionnement des véhicules issus du parc et des carburants « standards »,
  - De garantir le bon déroulement et de la validité de l'ensemble des essais, incluant :
    - Les essais sur route ouverte réalisés par eux-mêmes et directement par les exploitants, et de l'instrumentation associée,
    - Les essais en laboratoire délégués à GREENMOT.
- GREENMOT a la charge de la réalisation des essais en cellule climatique y compris de l'instrumentation associée.

Le présent rapport de synthèse est structuré en huit grandes parties. Après un résumé des principaux enseignements dans la section « À retenir » et la présente introduction, la section 3 fournit une synthèse des connaissances antérieures, puis la section 4 présente le contexte réglementaire actuel et à venir, incluant les

évolutions des normes Euro VI et Euro 7 ainsi que la classification Crit'Air. La méthodologie expérimentale est détaillée dans la section 5, qui décrit les protocoles, les véhicules et carburants sélectionnés, ainsi que les données collectées. La partie centrale, la section 6, analyse en détail les résultats expérimentaux. Elle compare les émissions des différentes technologies testées et examine les effets des conditions d'usage, des carburants alternatifs et des systèmes de dépollution. Les sections 7 et 8 élargissent les constats dressés à partir des mesures à l'échappement sur véhicule : sur l'enjeux global des émissions de GES en considérant d'autres technologies (BEV, FCEV, ICE H2 – non testés dans le projet) et en considérant l'ensemble du cycle de vie des véhicules ; sur l'enjeux des polluants locaux en introduisant les outils de modélisation développés et validés sur les données expérimentales pour projeter les impacts du transport routier sur les territoires.

A titre d'information, un schéma détaillé du lotissement de l'étude ainsi que du macro-planning du déroulement de l'étude sont fournis en Annexe.

3. Synthèse des connaissances antérieures

Par la suite est proposé un tableau de synthèse (Tableau 1) reprenant les études considérées comme les plus importantes vis à vis de notre périmètre technique. Pour chacune d'entre elles sont précisés : le financeur, l'opérateur, les véhicules considérés, les carburants testés, le type d'appareil de mesure de gaz utilisé, les cycles d'essai et enfin les principaux résultats obtenus.

Dans le domaine du poids lourd, la plupart des études comparatives entre poids lourds ont été effectués sur la route avec des PEMS. Les mesures de polluants réglementés du PEMS sont parfois complétées par des mesures de polluants non réglementés (PNR) (QCL, PN_{10}, FTIR).

Si l'on doit résumer les conclusions en quelques points :

- Les comparaisons sur ISC (In Service Conformity) ne permettent pas de discriminer les véhicules, l'utilisation de cycles plus sévères de type « urbain dense » est indispensable. Dans ces conditions, la plupart des véhicules dépassent très largement leurs valeurs d'homologation, en particulier s'ils circulent avec une charge faible.
- L'usage réel d'un véhicule n'est pas forcément cohérent avec sa catégorie : les émissions globales d'un véhicule peuvent être fortement influencées par les phases de chargement / déchargement, les manœuvres et la circulation urbaine et péri-urbaine.
- Il est difficile d'obtenir de la répétabilité entre les cycles, ce qui complexifie les comparaisons entre les véhicules.
- La mesure de PNR est nécessaire pour obtenir un bilan de type Euro 7 de polluants locaux (NH_3) et de GES (N_2O, CH_4)
- La méthode de traitement des données d'essai est également de premier ordre sur les résultats obtenus.

Ref.	Financeur	Opérateur	Véhicules	Carburant	Mesures	Méthode	Résultats
AUTOCARS ETHANOL-DIESEL-GNV (2018) [11]	ADEME SCANIA	CRMT (F)	Autocars EuroVI	B7 GNV Ethanol	PEMS	ISC Roulage urbain Roulage MW	• Autocar GNV très sensible aux conditions initiales d'essai : moteur froid et/ou tiède les émissions s'envolent (amorçage 3W) • Les 3 premières minutes des essais ont été exclues des ISC pour éviter ce phénomène (compatible avec ISC EuroVI Step C (démarrage à chaud) et ISC EuroVI step D (prise en compte des mesures pour Teau > 70°C) mais plus pour Euro7 • Les émissions de CO2 du gaz sont légèrement plus intéressantes, malgré le rendement le plus faible. L'éthanol présente les émissions spécifiques de CO2 les plus élevées. • Les émissions spécifiques de NOx sont globalement faibles (<Norme dans tous les cas) avec un avantage au gaz, moins net en conditions urbaines. • Les émissions spécifiques de CO sont bien supérieures pour le GNV • Les émissions spécifiques de HC sont bien supérieures pour l'éthanol (THC)

EQUILIBRE
 	
[14]
	GRT
	ADEME
		CRMT (F)
		UGE (F)
			Trucks Euro	B7
				GNV
				GNL
					CEMS (système allégé de suivi - CRMT)	Usage réel	• Grande variabilité de la consommation et des émissions de NOx en fonction du type de route, profil, trafic, météo
							• Impact significatif de l'usage urbain et des phases de chargement / livraison sur les émissions
							• Une grande partie des NOx est émise en conditions urbaines : jusqu'à 86% pour un usage distribution, entre 36 et 51% pour un long-courrier
							• GNV vs. B7 :
							  • Les résultats montrent des consommations de carburant similaires pour les véhicules diesel et gaz, les faibles écarts pouvant être attribués à des différences dans les conditions d'exploitation.
							  • Les véhicules gaz présentent un net avantage en termes d'émissions de NOx par rapport aux véhicules diesel, en particulier dans des conditions de circulation difficiles.

AIRPARIF BUS GO, GTL, HVO, B100 (2022) [16]	IdF Mobilités	AirParif (F)	Autobus EuroIV, V et VI	B7 B100 GTL HVO	PEMS	Exploitation sur lignes de bus	• L'influence des carburants n'est pas forcément très importante (« drop-in ») et de ce fait les variations de conditions de mesure dans une étude comme celle-ci crée des incertitudes importantes. • Etude paramétrique sur l'influence de la Tech, Tamb, TSCR, RPA, V est menée. La vitesse moyenne et le RPA sont impactantes sur les NOx et le CO2, qq soit le carburant.
ICCT / VTT – BUS EURO VI step D [17]	ICCT	VTT (FINLAND)	Bus Euro VI step D	B7	PEMS + FTIR + CPC	ISC Trajet urbain Trajet Worst Case High NOx	• Dans l'ensemble les 2 bus se comportent bien en termes de polluants Euro VI sur les ISC et Urban bus route (à l'exception d'un ISC chelou : défaut SCR ?). Seul le worst case met en défaut les systèmes avec une puissance moyenne très faible (qui le serait encore plus en enlevant la partie à 80 km/h). • Les seuils Euro 7 vont imposer une amélioration des systèmes SCR (warm-up plus rapide, moins de NH3 et N2O) et DPF (meilleure efficacité de filtration) • Des essais worst case sur un véhicule ont été menés par -12°C…

ICCT / VTT + TU GRAZ + AVL – TRUCKS EUROVI STEP D
 	
[15]
	ICCT	TU GRAZ (AUT)
		VTT (FINLAND)
		AVL SE (SWEDEN)
			Trucks Euro VI step D	B7
				LNG (HPDI)
					PEMS	ISC
						Trajets urbains
							• Une étude intéressante sur l'impact des méthodes de traitement de données (différentes steps Euro VI, méthode CARB 3-bin MAW, proposition Euro VII)
							  • Euro VI step E ajoute une « fenêtre » de mesure et est donc un peu plus sévère (5-10%) que le step D
							  • L'analyse des émissions brutes par phase démontre le poids de l'urbain
							  • En faisant varier les percentiles + la T moteur mini on se rend bien compte de l'impact de ces deux paramètres sur les résultats (méthode ISC MAW)
							  • La méthode CARB 3B-MAW (explicitée dans le texte) est très exigeante, en particulier sur les phases urbaines à froid
							  • La proposition CLOVE est un peu moins sévère que la proposition CARB. Les niveaux de NOx des véhicules devront être diminués d'un facteur 4 et 7 par rapport à Euro VI-D pour répondre aux exigences CLOVE et CARB

ICCT / XIAMEN VTEC – TRUCKS CHINA Vib [20]	ICCT	XIAMEN VTEC	Trucks China VIb	B7	PEMS QCL PN10 (BàR)	ISC urbain, extra-urbain Urban-Delivery LLC	• Les véhicules sont mis en défaut par les conditions les plus lentes. • Les pics d'ammoniac sont constatés : sur les parties froides, après de longs ralentis, sur les parties les plus chaudes • Le N2O représente 5% des émissions de GHG (émis vers TSCR=250°C ou à haute température) • Le passage de PN23 à PN10 implique une augmentation de 100% des émissions (mesures BàR) • Une régénération lors d'un WTVC entraîne une augmentation de 16x des PN23 et 180x des PN10
JRC – Evaluation PL EU VI HD (2019) [19]	JRC	JRC (EU)	4 Trucks + 1 Coach Euro VI		PEMS	Proche ISC	• Les conditions les plus critiques pour les NOx sont à basse vitesse. • Le NOx/CO2 [g/km]varie entre 0.1 et 1.2 (facteur 10) ! • Le NO2/NOx varie entre 10 et 67%, et est en moyenne assez élevé dans le panel considéré. • Une rapide comparaison avec le modèle HBEFA3.2. NOx / PN OK, CO2 erreur de 10%, CO / THC un ordre de grandeur d'erreur

Tableau 1 : Synthèse de la bibliographie sur les études couvrant le périmètre des poids lourd et de leurs émissions

4. Contexte réglementaire

4.1. Rappel du cadre réglementaire Euro VI

Une réglementation dénommée Euro, destinée à limiter certaines émissions polluantes des véhicules de transport de personnes et de biens est en application depuis le début des années 1990. Les polluants initialement concernés étaient le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures imbrûlés (HC), les oxydes d'azote (NO_x) et la masse de particules (PM). Cette réglementation a par la suite régulièrement évolué, d'Euro I initialement à Euro VI, complétant la liste de composés considérés (à l'instar du méthane (CH_4), des hydrocarbures non méthaniques (NMHC) et des fumées (FSN) tout d'abord à partir d'Euro III, puis de l'ammoniac (NH_3) et du nombre de particules (PN) en Euro VI), sévérisant progressivement les limites d'émissions de ces différents polluants, voire faisant évoluer les protocoles d'évaluation des émissions des véhicules [26].

Ces réglementations (Euro I à VI) s'appliquent à tous les véhicules de catégorie M (M2, M3) destinés au transport de passagers et de catégorie N (N2, N3) destinés au transport de biens (voir Tableau 2), nouvellement commercialisés en vue de leur mise en circulation sur le marché Européen. Elle diffère des réglementations Euro 1 à 6 destinées aux véhicules légers (M1, N1) de transports de passagers et de biens, faisant l'objet de dispositions distinctes compte-tenu des caractéristiques très différentes des véhicules et de leurs utilisations.

Cate-gory	Description	Subcategory	Number of Persons	Mass Limit	
M	Transportation of Passengers Min. 4 wheel	M1	Up to 9 Persons	GVW ≤ 3,500 kg[1)]	
		M2	Over 9 Persons	GVW ≤ 5,000 kg	
		M3		GVW > 5,000 kg	
N	Transportation of Goods Min. 4 wheel	N_1 Cl 1	N.A.	Max GVW ≤ 3,500 kg	RM ≤ 1,305 kg
		N_1 Cl 2			1,305 kg < RM ≤ 1,760 kg
		N_1 Cl 3			1,760 kg < RM ≤ 3,500 kg
		N_2		3,500 kg < GVW ≤ 12,000 kg	
		N_3		12,000 kg > GVW	

Tableau 2 : Description des catégories de véhicules de transports de passagers ou de biens en Europe [47]

La norme Euro VI destinée aux véhicules de transport de personnes et de biens mis sur le marché à partir de 2013, a quant à elle vu l'apparition de paliers successifs (de steps A à E) entre sa date d'application initiale et 2022, date à laquelle le dernier step est entré en vigueur pour les véhicules nouvellement commercialisés. Ces paliers successifs impliquent pour certains d'entre eux des évolutions dans les modalités d'évaluation des émissions des véhicules ou les polluants considérés, dont les principales sont brièvement résumées dans le tableau suivant.

source : Reg. 582/2011 – JO (2011) & Reg. 582/2011 – JO (2022)

Entrée en vigueur	Entrée en vigueur	Charge	Durée min.	Vitesses	Ratio	Démarrage froid	Facteurs de Conformité	Fenêtres valides
A	01/01/14	50-60	>5*$W_{Ref.}$	Urbain = 0-50 Rural = 50-75 Auto. > 75	M1/N1: U=45 %, R=25 %, A=30 % M2/M3: U=45 %, R=25 %, A=30 % M2/M3 (cl. 1-2): U=70 %, R=30 % N2: U=45 %, R=25 %, A=30 % N3: U=20 %, R=25 %, A=55 %	Exclu (évaluation à partir de T° moteur ≥ 70°C, ou T° stable pdt 5' ou 20' max. après démarrage moteur)	1,5 max. pour tous les polluants	Fenêtres dont Pmoy. > 20 % de Pmax. du moteur
B	01/01/14							
C	01/01/17							
D	01/01/19	10-100	4-8*$W_{Ref.}$	Rural 1er acc. > 55 Auto 1er acc. > 55	M1/N1: U=34 %, R=33 %, A=33 % M2/N2/M3: U=45 %, R=25 %, A=30 % M2/M3 (cl. 1-2): U=70 %, R=30 % N3: U=30 %, R=25 %, A=45 %	Inclu (évaluation à partir de T° moteur ≥ 30°C, ou T° stable pdt 5' ou 10' max. après démarrage	1,5 max. pour tous les polluants	Fenêtres dont Pmoy. > 10 % de Pmax. du moteur
E	01/01/22						1,5 max. pour tous les polluants & 1,63 pour PN	

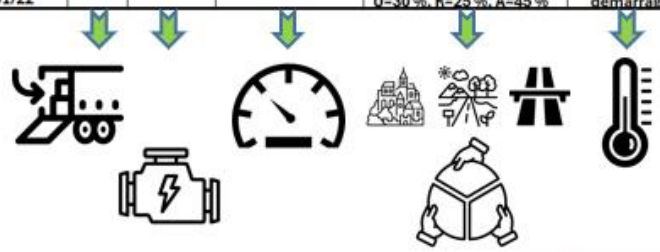


Tableau 3 : Comparaison des steps A à E de la norme Euro VI [27][28]

Ces réglementations successives ont pour objectif principal de démontrer :

- D'une part dans le cadre de leur homologation initiale, la conformité des émissions polluantes générées à l'échappement des véhicules en vue de leur mise sur le marché
- D'autre part dans le cadre de la conformité en service, la conservation de leur conformité tout au long de la durée de vie utile du véhicule exprimée en durée et distance, au premier des deux termes échus.

Ainsi à titre d'exemple, un véhicule de catégorie N3 homologué Euro VI step D début 2019, pourrait théoriquement voir ses émissions polluantes contrôlées pendant 7 ans (jusqu'en 2026) ou 500 000 km, après sa date de première mise en circulation afin d'aider à garantir sa conformité en service.

4.2. Évolutions pour Euro 7

Afin d'améliorer encore la qualité de l'air en Europe, de réduire les impacts sanitaires et environnementaux des transports, tout en prenant en compte les évolutions récentes et à venir en Europe (que sont par exemple l'entrée en vigueur des zones à faibles émissions (ZFE) dans les métropoles Européennes ou l'interdiction de commercialisation de véhicules à motorisations thermiques à horizon 2035), la commission Européenne a proposé en novembre 2022 d'introduire une nouvelle réglementation dénommée Euro 7 [29].

La procédure d'adoption, dite procédure législative ordinaire, a nécessité 1 an et demi de travail et de négociations au sein des instances Européennes avec les principaux jalons suivants [30] :

- Proposition initiale de la commission Européenne (10/11/2022) [31]
- Approche générale du conseil de l'union Européenne (25/09/2023) [32]
- Position du parlement Européen (09/11/2023) [33]
- Négociations inter-institutions en fin d'année 2023 (novembre et décembre), suivies par :

- Un premier accord provisoire à la suite de ce trilogue (18/12/2023)
- Son approbation en première lecture par le parlement Européen (13/03/2024) [34]
- Son approbation en première lecture par le conseil de l'union Européenne (12/04/2024) [35]
- La signature de l'acte final par les présidents du conseil et du parlement (24/04/2024) [36]

A l'issue de cette procédure, l'acte définitif a été publié au journal officiel de l'union Européenne (08/05/2024) [37], officialisant ainsi son entrée en vigueur vingt jours plus tard (soit à partir du 28/05/2024) [37], point de départ (t0) officiel pour la définition des dates d'application associées. De ce fait, ce nouveau règlement s'appliquera à parti des dates suivantes en fonction des catégories [37] :

- Catégories M1 et N1 :
  - 29/11/2026 : nouveaux types de véhicules et leurs composants
  - 29/11/2027 : nouveaux véhicules et leurs composants
- Catégories M2, M3, N2, N3 :
  - 29/05/2028 : nouveaux types de véhicules et leurs composants
  - 29/05/2029 : nouveaux véhicules et leurs composants

Les constructeurs produisant peu de véhicules de ces catégories, dénommés Small Volume Manufacturer (SVM) et Ultra Small Volume Manufacturer (USVM), bénéficient de délais supplémentaires [37] :

- Catégories M1 et N1 (01/07/2030)
- Catégories M2, N2, M3, N3 (01/07/2031)

Cette réglementation Euro 7 rassemble donc pour la première fois l'ensemble des véhicules dits légers et lourds ; c'est-à-dire l'ensemble des catégories M (M1, M2, M3) et N (N1, N2, N3) au sein d'un même texte, dans un souci de simplification normative [37]. En effet, les évolutions successives ont conduit à une augmentation importante du nombre de documents et des coûts de certification des véhicules [31], en particulier à la suite de l'adoption des procédures d'évaluation des émissions en conditions réelles (RDE) destinées à mieux garantir la conformité des émissions en conditions réelles d'utilisation pendant leur durée de vie. La distinction entre les réglementations Européennes destinées aux véhicules légers (M1, N1 ; Euro 1 à 6) écrites en chiffres arabes et celles destinées aux véhicules lourds (M2, N2, M3, N3 ; Euro I à VI) écrites en chiffres romains disparaît donc officiellement au profit de la seule indication Euro 7 sans distinction.

Bien que la suite de ce rapport se focalise sur les émissions à l'échappement des véhicules lourds, le périmètre de la réglementation Euro 7 est plus large et inclut notamment pour la première fois (en plus des évolutions liées aux polluants considérés, leurs limites d'émissions et la durabilité des solutions technologiques mises en œuvre (motorisations, post-traitement ou batteries dans le cas des véhicules électriques)), un volet spécifique aux pneumatiques et aux freins des véhicules, prévoyant en particulier l'évaluation et la limitation des émissions de particules provenant des dispositifs de freinage puis du taux d'abrasion des pneus [37].

Le tableau suivant [38] qui synthétise et compare les limites d'émissions définies dans la réglementation Euro VI actuellement en vigueur et dans la future norme Euro 7, fait apparaître les principales évolutions relatives aux véhicules de catégories M2, M3, N2 et N3. On notera en particulier :

- En termes de polluants nouveaux, l'apparition du protoxyde d'azote (N_2O) et des composés gazeux organiques non méthaniques (NMOG)

- En termes de métriques nouvelles, la considération de l'ammoniac (NH_3) dorénavant via une limite exprimée comme pour les autres composés gazeux en mg/kWh, ainsi que la réduction du diamètre minimal des particules considérées passant de 23 nm (PN_{23}) à 10 nm (PN_{10})

- En termes de valeurs limites d'émissions, une sévérisation globale pour l'ensemble des composés considérés, soit vers la valeur la plus basse déjà appliquée en Euro VI (selon le type d'essai : stabilisé (WHSC), transitoire (WHTC) ou routier (RDE)), soit vers une valeur inférieure.

La réglementation Euro 7 inclut également une extension des prescriptions relatives à la durée de vie des véhicules, moteurs et systèmes anti-pollution, afin de garantir la conformité de leurs émissions sur une durée et un kilométrage, plus importants et représentatifs de leur durée de vie réelle. Cette dernière est en effet estimée en 2022 à 13,9 ans en Europe pour les camions et 12,5 ans pour les bus (respectivement 9,3 et 7,7 ans en France) [39], la réglementation Euro VI actuelle prévoyant un contrôle possible des émissions dans le cadre de la conformité en service (ISC) sur une période allant de 5 ans (ou 100 000 km) à 7 ans (ou 500 000 km) selon la catégorie considérée [40]. Pour Euro 7, les périodes s'étendent (en fonction de la catégorie de véhicules considérée et de l'échéance arrivant en premier) [37] :

- De 8 à 12 ans ou de 160 000 à 700 000 km pour la durée de vie principale
- De 10 à 15 ans ou de 200 000 à 875 000 km pour la durée de vie supplémentaire

Euro 7 tailpipe emission limits for heavy-duty vehicles of categories M_2, M_3, N_2 and N_3

	WHSC (only CI engines)			WHTC (CI and SI engines)			On-road emissions limit		
	Euro VI (mg/kWh)	Euro 7 (mg/kWh)	Change compared to Euro VI	Euro VI (mg/kWh)	Euro 7 (mg/kWh)	Change compared to Euro VI	Euro VI (mg/kWh)	Euro 7 (mg/kWh)	Change compared to Euro VI
NO_x	400	200	-50%	460	200	-56%	690	260	-62%
PM	10	8	-20%	10	8	-20%	—	—	—
PN_{10}[a]	$8x10^{11}$	$6x10^{11}$	No change	$6x10^{11}$	$6x10^{11}$	No change	$9.8x10^{11}$	$9x10^{11}$	-8%
CO	1500	1500	No change	4,000	1,500	-62%	6,000	1,950	-68%
NMOG	—	80	-38%[c]	160[b]	80	-50%	240	105	-56%
THC	130	—	—	160[c]	—	—	—	—	—
NH_3	—	60	New	—	60	New	—	85	—
CH_4	—	500	New	500[b]	500	No change	750	650	-13%
N_2O	—	200	New	—	200	New	—	260	—

Notes: WHSC: World Harmonized Stationary Cycle; WHTC: World Harmonized Transient Cycle; CI: Compression ignition; SI: Spark ignition;
[a] Particle number limit in #/kWh; [b] Only for gas engines; [c] Only for diesel engines; [d] compared to Euro VI THC

Tableau 4 : Comparaison Euro VI et Euro 7 [38]

4.3. Classification Crit'Air

Le Tableau 5 présente la classification des véhicules de catégories M2, M3, N2 et N3, publiée en 2016 en application des articles L.318-1 et R.318-2 du code de la route [49], cette classification étant plus connue sous les noms de certificat qualité de l'air ou de vignette Crit'Air. Également applicable aux véhicules particuliers, utilitaires, 2 roues, tricycles et quadricycles à moteur avec des conditions de classement différentes, elle classe les véhicules en fonction de leurs émissions polluantes en particules et oxydes d'azote. C'est sur la base de ce classement qu'un véhicule est autorisé à circuler dans une zone à faibles émissions (ZFE) instaurée par certaines collectivités, ou lorsqu'un préfet instaure une circulation différenciée en raison d'un d'épisode de pollution.

Classe	Classement selon catégorie. motorisation, norme "Euro" ou 1er mise en circulation						
							Non classés
Autres sources	Electrique - H_2	Gaz - PHEV					
Bio-Diesel		Euro VI 01/01/14⇨		Euro V 01/10/09⇨ 31/12/13	Euro IV 01/10/06⇨ 30/09/09	Euro III 01/10/01⇨ 30/09/06	Euro I, II & avant ⇨ 30/09/01
Diesel			Euro VI 01/01/14⇨	Euro V 01/10/09⇨ 31/12/13	Euro IV 01/10/06⇨ 30/09/09	Euro III 01/10/01⇨ 30/09/06	Euro I, II & avant ⇨ 30/09/01
Essence		Euro VI 01/01/14⇨	Euro V 01/10/09⇨ 31/12/13	Euro III & IV 01/10/01⇨ 30/09/09			Euro I, II & avant ⇨ 30/09/01

Tableau 5 : Classification des véhicules de catégories M2, M3, N2, N3 selon vignette Crit'Air (certificats qualité de l'air) [49]

Compte-tenu de certaines particularités des véhicules évalués dans le cadre de cette campagne expérimentale et de l'étude d'impacts réalisée en ce qui concerne les carburants, l'abréviation des différentes sources d'énergie associées à ce classement est rappelée pour chacun des véhicules, ainsi que la source d'énergie à laquelle elle se réfère selon la nomenclature officielle [50] et la vignette Crit'Air correspondante (Tableau 6).

Désignation	Abréviation	Source d'énergie	Crit'Air
N2 GN OEM#1	GN	Gaz naturel	1
N3 GO OEM#3	GO	Gazole	2
N3 GO OEM#2	GO	Gazole	2
N3 B1 OEM#3	B1	BioDiesel B100 excl.	1
N3 GN OEM#2	GN	Gaz naturel	1
N2 GO OEM#1	GO	Gazole	2
N3 GO PHEV OEM#2	GL	Gazole/élec. Hyb. Rech.	1
N3 DF OEM#4	1A	Dual-fuel Gazole/Gaz	1
Bus GN OEM#1	GN	Gaz naturel	1
Bus GN HEV OEM#1	NH	Gazole/élec. Hyb.	1

Tableau 6 : Synthèse par véhicule de la source d'énergie considérée et de la classification qualité de l'air associée (https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000049860492/2024-06-30/

La loi d'orientation des mobilités (2019) prévoyait initialement l'instauration de zones à faibles émissions (ZFE) dans les agglomérations présentant des dépassements réguliers des seuils de qualité de l'air, proposition étendue en 2021 par la loi Climat et Résilience à l'ensemble des agglomérations de plus de 150 000 habitants pour lesquelles les recommandations de l'organisation mondiale de la santé (OMS) n'étaient pas respectées [51].

Pour accompagner la mise en œuvre de ces ZFE au regard des potentielles craintes et réticences rencontrées au fur et à mesure de leur déploiement, l'état Français a également initié en 2022 un dialogue régulier avec les élus des métropoles concernées ou susceptibles d'être concernées. L'année 2023 a été particulièrement intense avec trois missions à ce sujet (mission flash de l'Assemblée nationale confiée à G. Leseul consacrée aux mesures d'accompagnement (2022) [52], mission flash du Sénat confiée à Ph. Tabarot pour renforcer l'acceptabilité des ZFE [53] et mission de comparaison internationale des ZFE confiée à B. Pompili (2023) [54]), ainsi qu'un comité national de concertation ZFE [55].

Deux types de territoires coexistent dorénavant afin de distinguer rapidement leurs situations respectives et le niveau de contraintes associées (Figure 7) [51] :

- Les territoires ZFE effectifs, c'est-à-dire dépassant encore de manière régulière les seuils réglementaires de qualité de l'air, à l'image de Paris, Lyon, Marseille, Rouen et Strasbourg et devant de ce fait respecter le calendrier législatif de restrictions,

- Les territoires de vigilance respectant les seuils réglementaires de qualité de l'air et n'ayant de ce fait plus d'obligations de renforcer leurs restrictions actuelles si elles ont déjà déployé une ZFE, ou devant dans le cas contraire uniquement restreindre à compter de 2025 la circulation des voitures immatriculées jusqu'en 1996.

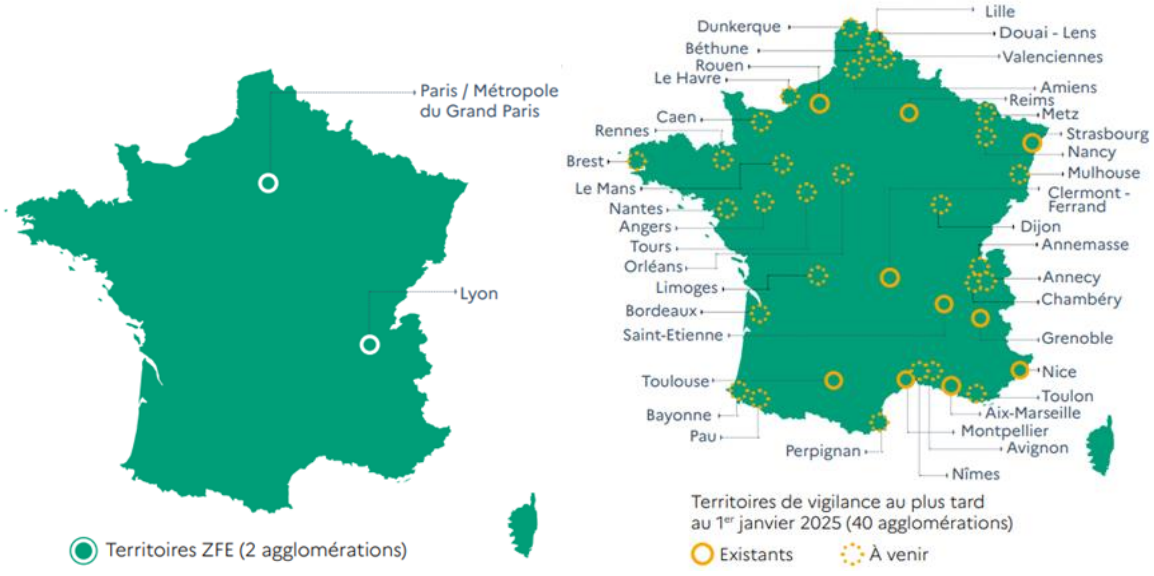


Figure 7 : Territoires ZFE effectifs (gauche) et territoires de vigilance (droite) [51]

5. Protocole expérimental et sélection des véhicules

5.1. Synthèse des moyens de mesures et de l'instrumentation (annexe les éléments détaillés)

Le protocole expérimental mis en œuvre dans le cadre de cette étude a été proposé sur la base de la réglementation Euro VI à laquelle les véhicules évalués sont soumis, des évolutions réglementaires envisagées dans le cadre de la norme Euro 7 (la version définitive du texte n'étant alors pas encore con nue), ainsi que de la disponibilité et possibilité d'implémentation des équipements que ce soit lors des essais en laboratoire ou dans les véhicules lors des essais routiers.

En complément de l'évaluation des émissions en sortie de la ligne d'échappement des véhicules (aval EATS), certains polluants ont également été mesurés en entrée du dispositif de post-traitement (amont EATS) afin de permettre d'évaluer l'efficacité des systèmes de post-traitement des gaz d'échappement (EATS) de chaque véhicule. D'autres informations complémentaires utiles relatives aux conditions d'utilisation du véhicule ou aux conditions de fonctionnement du moteur et du dispositif anti-pollution ont également été collectées, que ce soit par le biais de données issues du contrôle moteur (ECU) ou via de l'instrumentation dédiée (mesures de température, pression, débits, …).

Afin de permettre une évaluation étendue des émissions des véhicules, que ce soit dans des conditions proches de l'homologation initiale (TA), de contrôle de conformité en service (ISC) ou de cas d'usage réels, trois types d'expérimentation ont été réalisés, en laboratoire d'une part et sur routes ouvertes à la circulation d'autre part.

5.1.1. Évaluations en laboratoire

Ces évaluations ont été menées dans l'une des cellules d'essais climatiques de la société GREENMOT située à Villefranche-sur-Saône (69). Cette cellule d'essais est destinée à l'évaluation de véhicules industriels et allie la capacité d'accueil de véhicules de grande dimension, la reproduction (par le biais d'un robot de conduite) de cycles de roulage représentatifs de conditions d'homologation ou réelles dans des conditions climatiques étendues, ainsi que la simulation de lois de routes et de charges véhicules représentatives.

Le protocole analytique et l'instrumentation utilisés lors des essais en laboratoire, plus complets que ceux mise en œuvre lors des essais routiers en raison des capacités d'implantation et d'acquisition accrues des bancs d'essais, incluent les analyses suivantes :

- Une baie d'analyse de gaz AVL AMA i60 [41], permettant la mesure simultanée des émissions de certains polluants en amont (CO_2 et CO (principe : NDIR), NO, NO_2, NO_x (principe : CLD), THC et CH_4 (principe : FID)) et en aval (CO_2 et CO (principe : NDIR) et THC et CH_4 (principe : FID) du système de post-traitement
- Un analyseur multi gaz HORIBA QCL MEXA-ONE [42], permettant grâce à son principe de mesure QCL, de mesurer en aval de l'EATS, les émissions de NO, NO_2, NO_x et de NH_3
- Une baie FTIR HORIBA [43], permettant via son principe de mesure FTIR d'accéder à un panel de composés gazeux accru, fonction de la bibliothèque choisie elle-même fonction du type de motorisation évaluée
- Une mesure simultanée en amont et en aval du dispositif anti-pollution, des émissions de particules en nombre selon le protocole Euro VI (PN_{23}), par le bais de deux compteurs de particules normalisés AVL

APC Plus [44], associée à une mesure complémentaire en aval du dispositif anti-pollution des émissions de particules en nombre selon le protocole Euro 7 (PN_{10}) par le bais d'un compteur de particules normalisé HORIBA SPCS [45]

- A des fins d'inter-comparaison et d'aide à la validation des protocoles analytiques mis en œuvre lors des différents types d'essais réalisés en laboratoire et sur route, l'analyseur PEMS [46] utilisé lors des essais d'évaluation des émissions en service est également ponctuellement mis en œuvre lors de certains tests

- L'enregistrement de l'ensemble des paramètres provenant des éléments de la cellule d'essais (conditions ambiantes, vitesse du véhicule et du vent, données de conduite, couples et puissance développés, …)

- L'enregistrement d'informations complémentaires destinées au calcul des émissions polluantes (débit de gaz d'échappement) et au suivi des conditions de fonctionnement du dispositif antipollution (températures, pressions, richesse, signal injecteur de l'injection d'AdBlue, …)

- L'enregistrement des données véhicule, moteur et post-traitement provenant des données CAN propres aux véhicules

5.1.2. Evaluations en conditions réelles

L'instrumentation des véhicules en vue de leur évaluation en laboratoire et sur routes, ainsi que la partie des évaluations relative à la conformité en service des émissions, a été réalisée par la société CRMT située à Dardilly (69), spécialisée dans la réalisation de mesures de polluants sur véhicules poids-lourds en conditions réelles de conduite. Le protocole analytique et l'instrumentation utilisés lors des essais ISC sur route sont moins complets que ceux mise en œuvre lors des essais routiers, en raison des capacités et contraintes d'implantation et d'acquisition liées à leur implémentation dans les véhicules. Les principales différences avec l'évaluation au banc sont les suivantes :

- Remplacement de la baie d'analyse de gaz de la cellule d'essais, par un analyseur PEMS HORIBA [46] conforme aux préconisations relatives à la norme Euro VI, incluant un module d'analyse des polluants gazeux (CO/CO_2 par NDIR, NO/NO_x par CLD et HC par FID) ainsi qu'un module de mesure du nombre de particules PN_{23}, donnant ainsi accès aux polluants réglementés

- Conservation de la baie FTIR [43] afin de compléter la mesure des polluants réglementés réalisée via le PEMS, avec celle de polluants complémentaires actuellement non réglementés par ce second analyseur, en permettant également une redondance sur certains polluants réglementés (CO, CO_2, NO, NO_2, NO_x), utile à la consolidation des résultats obtenus et tendances observées ou en cas d'indisponibilité ou de non-conformité ponctuelle d'un des deux analyseurs

- L'enregistrement d'informations complémentaires destinées au calcul des émissions polluantes (débit de gaz d'échappement) et au suivi des conditions de fonctionnement du dispositif antipollution (températures, pressions, richesse, …)

- L'enregistrement des données véhicule, moteur et post-traitement provenant des données CAN propres aux véhicules

- L'acquisition par le biais d'un GPS des données permettant le positionnement continu du véhicule, ainsi que des conditions ambiantes (température, hygrométrie, pression) via une sonde météo

La partie des évaluations relative à la captation d'usages réels des véhicules a quant à elle été essentiellement réalisée à l'aide d'une instrumentation simplifiée, en restituant chaque véhicule à son propriétaire après installation d'une instrumentation spécifique, afin de pouvoir enregistrer les profils de missions caractéristiques auxquels ils sont soumis, au plus proche de leurs conditions réelles d'utilisation (parcours, charge, chauffeur, …). L'instrumentation utilisée lors des essais de captation d'usages réels au sein des sociétés de transport nous ayant confié leurs véhicules présente une instrumentation encore allégée, présentée sur la Figure 8, afin de conserver les contraintes usuelles de mise en œuvre et d'utilisation des véhicules par leurs propriétaires dans le cadre de leurs tournées quotidiennes. Elle inclut un dispositif d'enregistrement continu à une fréquence d'1 Hz (dénommé CEMS), de la localisation du véhicule (via une antenne GPS), de la concentration en NO_x et O_2 (par sonde électrochimique) et d'autres paramètres (véhicules et moteur principalement) provenant du réseau CAN du véhicule.

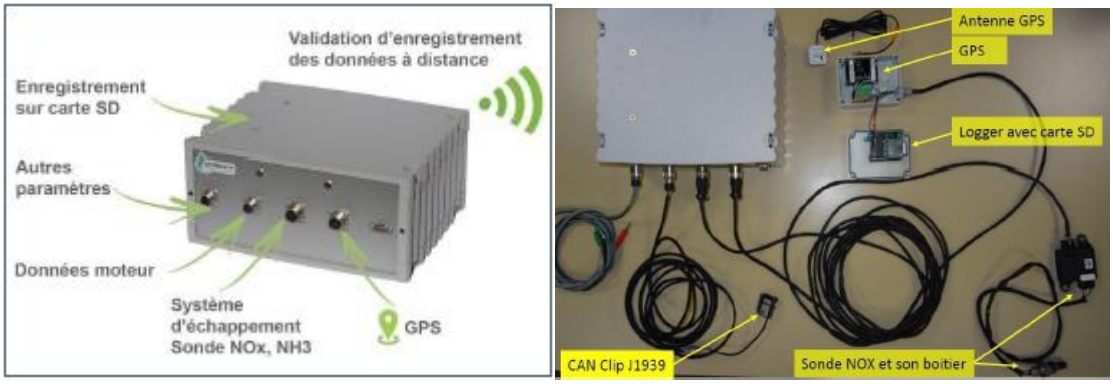


Figure 8 : Dispositif CEMS mis en œuvre lors des campagnes de captation d'usages des véhicules

5.2. Matrices d'essais

La définition de la matrice d'essai a visé à couvrir des situations variées d'usage, en incluant une variation de cycles d'usage (vitesse et pente), de température ambiante et de charge. Les prochains chapitres détaillent les conditions retenues pour les différents types d'essais.

5.2.1. Evaluations en laboratoire

Lors de l'évaluation des véhicules en cellule climatique, 3 roulages spécifiques ont été reproduits à l'aide d'un robot de conduite pour chacun des véhicules :

- Le cycle véhicule harmonisé mondial (**WHVC**)
- Un roulage représentatif d'un test réalisé sur route dans le cadre de l'évaluation de la conformité en service (**ISC**) d'un véhicule
- Un roulage représentatif d'une utilisation dans le cadre de livraisons urbaines de marchandises (**Urban delivery**)

Le détail de ces cycles en termes de durée, distance, vitesses ou encore répartition selon la conduite urbaine, rurale ou autoroutière est disponible dans le Tableau 7.

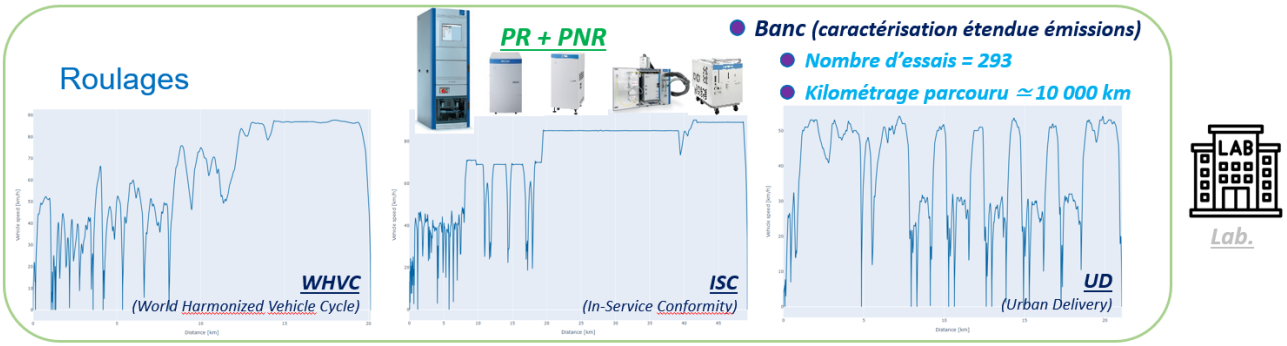


Figure 9 : Illustration des cycles de conduite reproduits en laboratoire et de l'instrumentation utilisée

Cycle [-]	Distance [km]	Durée [h :min :sec]	Vitesse moy. [km/h]	Vitesse max [km/h]	Temps au ralenti [min :sec]	Urbain / Rural / Autoroute [%]
WHVC	19.6	0 :32 :00	36.9	85.4	0 :06 :00	23.4/50.7/25.9
ISC	47.8	0 :52 :00	55.1	87.7	0 :03 :15	35.6/22.6/41.8
Urban delivery	20.5	1 :02 :00	19.8	53.2	0 :20 :30	100 /0/0

Tableau 7 : Détails des cycles de conduite reproduits en laboratoire

Durant ces essais, différentes conditions ont été mises en œuvre, résumées ci-dessous et dans le Tableau 8:

- 3 états de chargement différents sont simulés pour chaque véhicule (10, 50 et 90 % de charge utile)
- 2 conditions de température des fluides du moteur lors du démarrage (froid ou chaud)
- 2 conditions de température ambiante (23 et -7 °C)
- 2 pentes, la plupart des tests étant réalisés avec une pente nulle, 1 test étant également réalisé pour chaque véhicule en simulant une pente de 3 %

Lieu de test	Cycle	Charge	Démarrage	Temp. amb.
Laboratoire	WHVC	50%	A chaud	23°C
				-7°C
	ISC	10%		23°C
		50%		
		90%		
	Urban delivery	10%		
			A froid	-7°C
Route	ISC	~ 50% (Tableau 9)	A chaud	
			A froid	

Tableau 8 : Matrice d'essais

	Load (kg)	Payload (%)
N2 GN OEM#1	10 050	62
N3 GO OEM#3	29 550	50
N3 GO OEM#2	29 550	50
N3 GO B1 OEM#3	29 550	50
N3 GN OEM#2	29 550	50
N2 GO OEM#1	10 000	54
N3 GO PHEV OEM#2	17 250	29
N3 DF OEM#4	29 350	50
Bus GN OEM#1	23 930	48
Bus GN HEV OEM#1	24 070	48

Tableau 9 : Masse embarquée et pourcentage de charge utile des véhicules lors des essais routiers ISC

5.2.2. Evaluations en conditions réelles

Lors de l'évaluation des véhicules sur routes ouvertes, 2 principaux types d'essais ont été réalisés.

Le premier type d'essais consiste à réaliser des roulages représentatifs de tests d'évaluation de la conformité en service (ISC) d'un véhicule, ceux-ci étant de 2 types :

- Un premier roulage reproduit lors de l'évaluation des véhicules de catégories N2, N3 destinés au transport de marchandises, présenté sur la partie gauche de la Figure 10 (le zoom représenté sur le graphique illustre l'adaptation réalisée pour l'un des véhicules en raison de conditions de circulation extrêmement dégradées sur le trajet habituellement effectué)
- Un second roulage choisi quant à lui pour les deux véhicules de catégorie M2, M3 en reproduisant certaines lignes de bus de la métropole Lyonnaise (au centre de la Figure 10).

La charge utile embarquée dans chaque véhicule lors de ces essais (en prenant en compte le conducteur et éventuels passagers, l'ensemble des équipements de mesure ainsi que les lests utilisés), est synthétisée dans le Tableau 9, en termes de masse embarquée et de pourcentage de la charge utile du véhicule.

Le second type d'essais lors du retour des véhicules au sein de leur entreprise d'appartenance après évaluation en laboratoire et sur route puis installation du dispositif de mesure CEMS, consiste en la réalisation par leurs propriétaires de tournées quotidiennes de livraison (régionales et/ou nationales), afin de capter les usages réels de ces véhicules à l'aide d'un protocole simplifié de mesure et enregistrement compatible avec les contraintes des tournées.

Contrairement aux essais ISC précédents, la masse embarquée et le pourcentage de charge utile des véhicules ne sont pas connus.

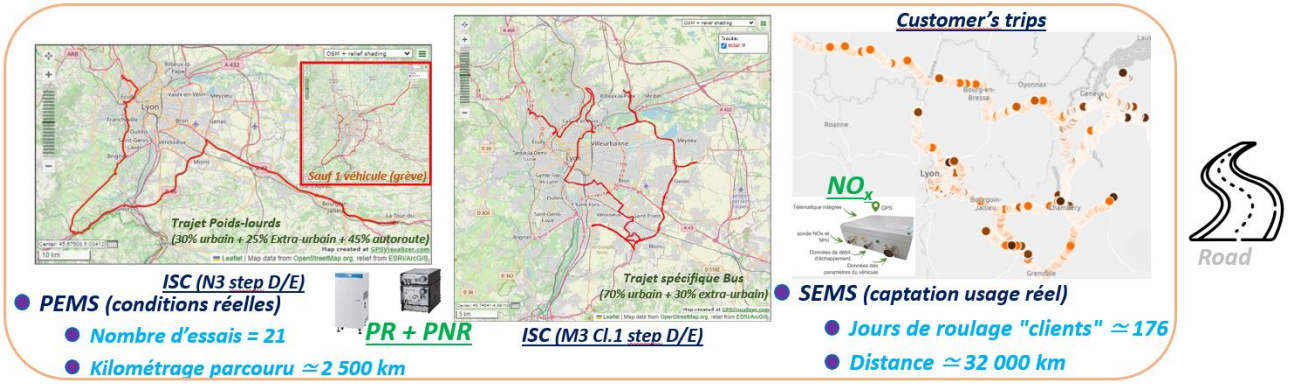


Figure 10 : Illustration des types de roulages réalisés sur routes ouvertes à la circulation

A noter que des essais supplémentaires ont été réalisés sur le véhicule PHEV, N3 GO PHEV OEM#2. Des essais laboratoires sur cycle ISC et Urban delivery ont été réalisés pour différents modes de fonctionnement du système hybride et différents niveaux de charge batterie. Un essai supplémentaire a également été réalisé sur route.

5.3. Description des véhicules et carburants sélectionnés

5.3.1. Analyse des ventes et orientation des choix de véhicules

Afin d'orienter les choix des véhicules, une analyse des nouvelles immatriculations de véhicules de transport de personnes et de marchandises (catégories M et N) entre janvier 2020 et octobre 2022 a été réalisée, soit plus de 900 000 véhicules, en mettant l'accent sur les catégories N3, N2 et M3.

Pour les véhicules N3, destinés au transport de marchandises de plus de 12 tonnes, plus de 95 % des immatriculations concernent des véhicules diesel, tandis que le gaz naturel représente moins de 4 %. Les autres types de motorisation, tels que le biogazole B100 exclusif (B1), B1 : biogazole B100, les dual-fuel diesel/gaz (1A), électrique (EL), éthanol ED95 (ET), et diesel hybride non rechargeable (GH), l'électrique et les hybrides non rechargeables, totalisent moins de 1 %. Les marques dominantes incluent Renault, DAF, Volvo, Scania, Mercedes Benz et Man, chacune ayant plus de 10 % de part de marché. Entre 2020 et 2022, bien que les parts de marché des

carburants alternatifs restent faibles, le biogazole B100 exclusif a progressé pour atteindre 1,7 % des immatriculations de N3 en 2022.

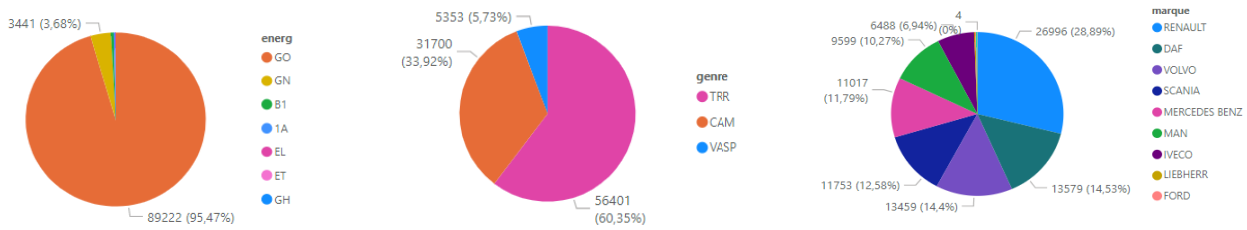
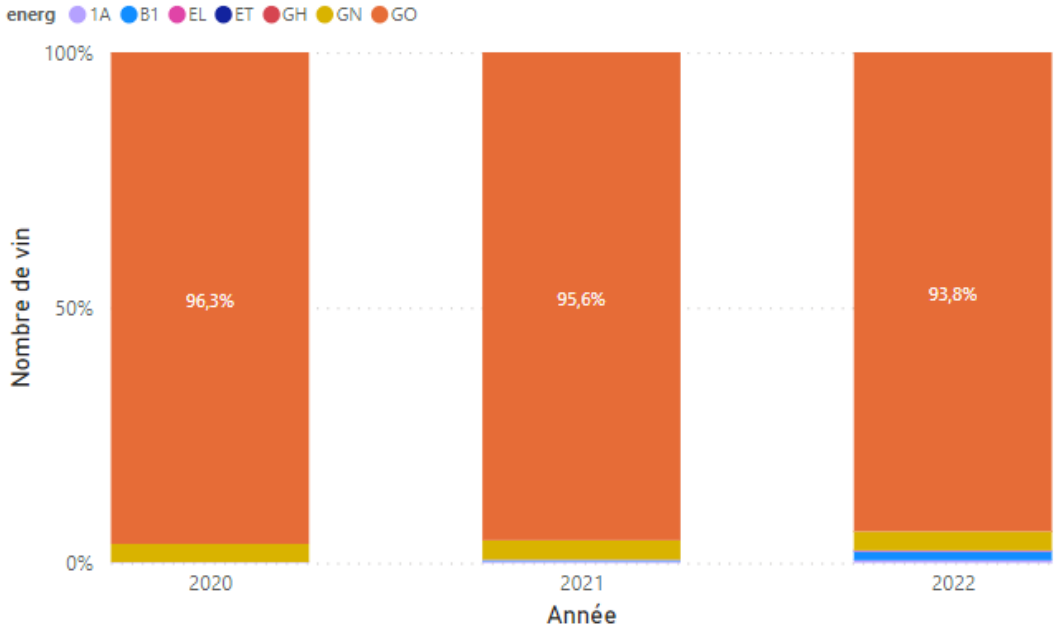


Figure 11 : Répartition des immatriculations de N3 entre 01/2020 et 10/2022, par type d'énergie (à gauche), par genre (au centre) et par marque (à droite)



Année	2020		2021		2022		Total	
cod_categ	Nombre de vin	%TC Nombre de vin	Nombre de vin	%TC Nombre de vin	Nombre de vin	%TC Nombre de vin	**Nombre de vin**	**%TC Nombre de vin**
N3	**35805**	**100,00%**	**37076**	**100,00%**	**20573**	**100,00%**	**93454**	**100,00%**
GO	34475	96,29%	35441	95,59%	19306	93,84%	**89222**	**95,47%**
GN	1278	3,57%	1400	3,78%	763	3,71%	**3441**	**3,68%**
B1			79	0,21%	351	1,71%	**430**	**0,46%**
1A	43	0,12%	123	0,33%	108	0,52%	**274**	**0,29%**
EL	4	0,01%	26	0,07%	42	0,20%	**72**	**0,08%**
ET	5	0,01%	4	0,01%	3	0,01%	**12**	**0,01%**
GH			3	0,01%			**3**	**0,00%**
Total	**35805**	**100,00%**	**37076**	**100,00%**	**20573**	**100,00%**	**93454**	**100,00%**

Figure 12 : Évolution des immatriculations de véhicules N3 par type d'énergie entre 2020 et 2022

Pour les véhicules de catégorie N2, conçus pour le transport de marchandises de plus de 3,5 tonnes et jusqu'à 12 tonnes, les véhicules diesel représentent plus de 84 % des immatriculations, suivis par le gaz naturel avec 15 %. Les autres carburants, y compris l'électrique et les hybrides non rechargeables, totalisent moins de 1 %. Les marques dominantes dans ce segment sont Iveco, Renault et Man, chacune ayant au moins 10 % de part d'immatriculation. Une progression de l'électrique a été observée, atteignant 1,6 % des immatriculations de N2 en 2022, tandis que les modèles hybrides diesel, déjà peu nombreux, disparaissent.

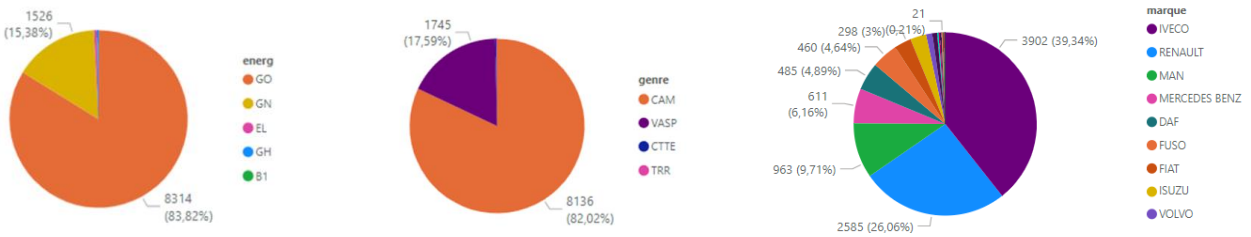
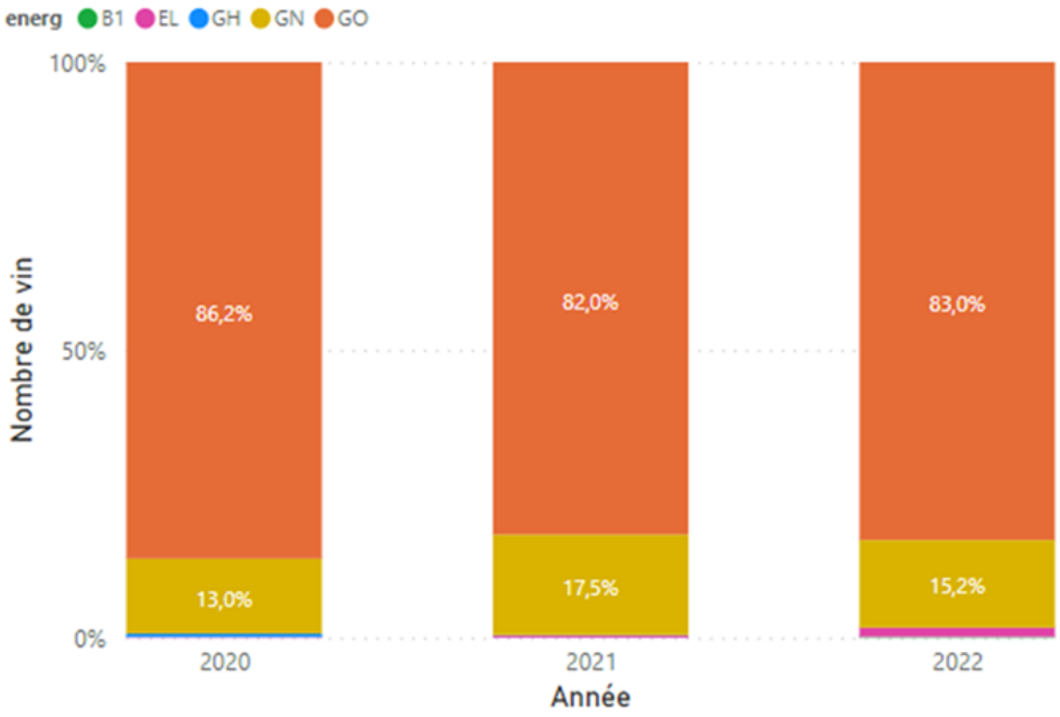


Figure 13 : Répartition des immatriculations de N2 entre 01/2020 et 10/2022, par type d'énergie (à gauche), par genre (au centre) et par marque (à droite)



Année	2020		2021		2022		Total	
cod_categ	Nombre de vin	%TC Nombre de vin	Nombre de vin	%TC Nombre de vin	Nombre de vin	%TC Nombre de vin	**Nombre de vin**	**%TC Nombre de vin**
⊟ **N2**	**3814**	**100,00%**	**4416**	**100,00%**	**1689**	**100,00%**	**9919**	**100,00%**
⊞ **GO**	**3289**	**86,23%**	**3623**	**82,04%**	**1402**	**83,01%**	**8314**	**83,82%**
⊞ **GN**	**497**	**13,03%**	**772**	**17,48%**	**257**	**15,22%**	**1526**	**15,38%**
⊞ **EL**	**6**	**0,16%**	**17**	**0,38%**	**27**	**1,60%**	**50**	**0,50%**
⊞ **GH**	**22**	**0,58%**	**4**	**0,09%**			**26**	**0,26%**
⊞ **B1**					**3**	**0,18%**	**3**	**0,03%**
Total	**3814**	**100,00%**	**4416**	**100,00%**	**1689**	**100,00%**	**9919**	**100,00%**

Figure 14 : Évolution des immatriculations de véhicules N3 par type d'énergie entre 2020 et 2022

Concernant les véhicules de catégorie M3, qui sont conçus pour le transport de personnes avec plus de huit places assises et un poids maximal supérieur à 5 tonnes, les véhicules diesel représentent 66 % des immatriculations, suivis par le gaz naturel avec moins de 22 %. Les véhicules électrifiés constituent 11 % des immatriculations, dont 6 % d'électriques, 4 % d'hybrides diesel-électrique et 1 % d'hybrides gaz-électrique. Les marques dominantes dans ce segment incluent Iveco, Mercedes Benz et Man, chacune ayant plus de 10 % de part d'immatriculation.

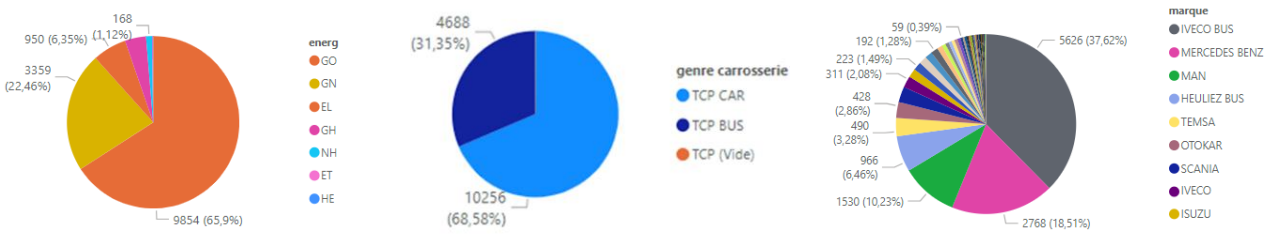
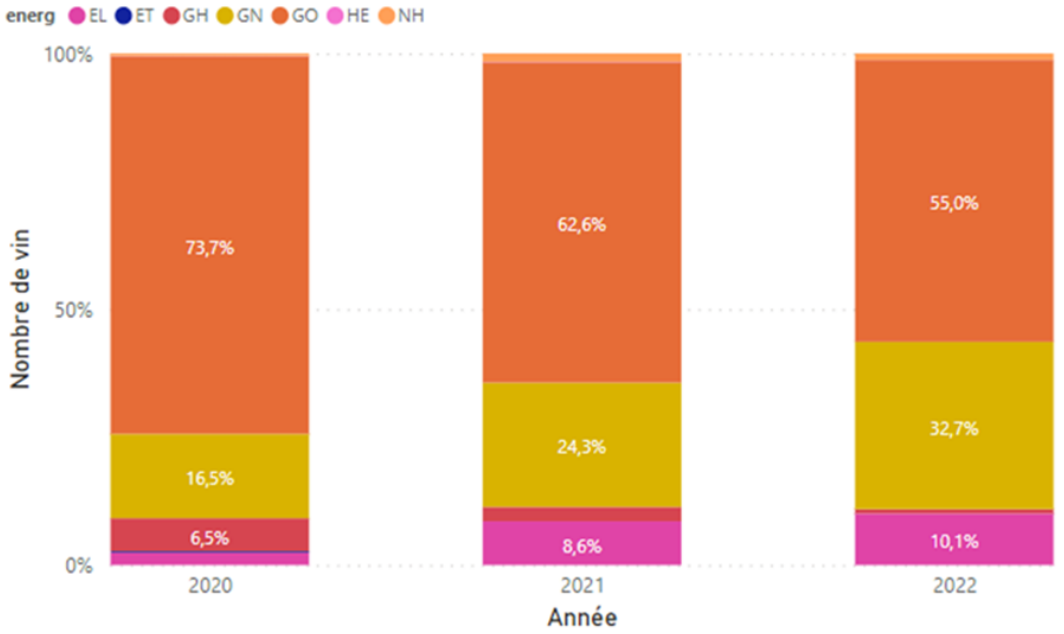


Figure 15 : Répartition des immatriculations de M3 entre 01/2020 et 10/2022, par type d'énergie (à gauche), par genre (au centre) et par marque (à droite)



Année cod_categ	2020 Nombre de vin	%TC Nombre de vin	2021 Nombre de vin	%TC Nombre de vin	2022 Nombre de vin	%TC Nombre de vin	**Total Nombre de vin**	**%TC Nombre de vin**
⊟ **M3**	**5980**	**100,00%**	**6643**	**100,00%**	**2331**	**100,00%**	**14954**	**100,00%**
⊞ GO	4410	73,75%	4161	62,64%	1283	55,04%	**9854**	**65,90%**
⊞ GN	985	16,47%	1612	24,27%	762	32,69%	**3359**	**22,46%**
⊞ EL	146	2,44%	569	8,57%	235	10,08%	**950**	**6,35%**
⊞ GH	386	6,45%	187	2,81%	20	0,86%	**593**	**3,97%**
⊞ NH	31	0,52%	107	1,61%	30	1,29%	**168**	**1,12%**
⊞ ET	16	0,27%					**16**	**0,11%**
⊞ HE	6	0,10%	7	0,11%	1	0,04%	**14**	**0,09%**
Total	**5980**	**100,00%**	**6643**	**100,00%**	**2331**	**100,00%**	**14954**	**100,00%**

Figure 16 : Évolution des immatriculations de véhicules M3 par type d'énergie entre 2020 et 2022

5.3.2. Caractéristiques des véhicules sélectionnés

Les caractéristiques principales des véhicules testés sont synthétisées dans le Tableau 10. Deux porteurs (Catégorie N2) sont testés ainsi que deux TCP (Catégorie M3). Les autres véhicules sont des tracteurs (Catégorie N3).

Marque	Norme	Cat.	Type carb.	Kilométrage (km)	Puiss. MTH (kW)	Puiss. élect. (kW)	Batterie (kWh)
OEM#1	Euro VI – Step D	N2	GN	99 900	150	-	-
OEM#1	Euro VI – Step C	N2	GO	241 000	162	-	-
OEM#3	Euro VI – Step D	N3	GO	404 000	360	-	-
OEM#3	Euro VI – Step E	N3	B1	106 400	360	-	-
OEM#2	Euro VI – Step D	N3	GO	304 000	302	-	-
OEM#2	Euro VI – Step D	N3	GN	125 000	302	-	-
OEM#2	Euro VI – Step E	N3	GL	5 900	265	230	99
OEM#4	Euro VI – Step E	N3	1A	21 000	375	-	-
OEM#1	Euro VI – Step E	M3	GN	82 200	264	-	-
OEM#1	Euro VI – Step E	M3	NH	43 800	264	35	1

Tableau 10 : Caractéristiques des véhicules testés

5.3.3. Description des carburants testés

Les différents véhicules ont été testés avec les carburants suivants (Tableau 11). Le véhicule N3 DF OEM#4 est spécifique car il utilise deux carburants : le GNV (stocké sous forme liquide GNL) en tant que carburant principal et le B7 en tant que carburant secondaire, utilisé pour initier la combustion.

Véhicule	B7	HVO	GTL	B100	GNV
N3 GO OEM#3					
N3 GO OEM#2					
N2 GN OEM#1					
N3 B1 OEM#3					
N3 GN OEM#2					
N2 GO OEM#1					
N3 GO PHEV OEM#2					
N3 DF OEM#4					
Bus GN OEM#1					
Bus GN HEV OEM#1					

Tableau 11 : Carburants testés selon le véhicule

Le Tableau 12 montre les différentes caractéristiques des carburants utilisés.

Carburant	C m/m %	H m/m %	O m/m %	N m/m %	PCI (MJ/kg)	CO_2 (gCO_2/gcarb)	Masse vol. (kg/m^3)
B7	85.6	13.6	0.8	0	42.8	3.14	833.5
HVO	84.8	15.07	<0.1	0.12	43.86	3.11	782.2
GTL	84.5	15.07	<0.1	0.11	43.94	3.11	774
B100	77.3	12.12	10.77	0.09	37.39	2.82	882.7
GNV	75.15	24.85	0	0	49	2.75	0.766

Tableau 12 : Caractéristiques des carburants testés

5.3.4. Comparaisons permises

Les véhicules et carburants testés (Tableau 11 et Tableau 12) permettent différentes comparaisons pertinentes documentées dans le Tableau 13.

Comparaison	Véhicules comparés	Carburant utilisé
Comparaison Diesel vs GNV	N2 GO OEM#1	B7
	N2 GN OEM#1	GNV
	N3 GO OEM#2	B7
	N3 GN OEM#2	GNV
Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel	Idem ci-dessus + N3 DF OEM#4	B7 et GNV
Analyse de l'effet des biodiesels	N2 GO OEM#1	B7/B100/HVO/GTL
	N3 GO OEM#3	
	N3 GO OEM#2	
Comparaison B100 vs B100 exclusif	N3 GO OEM#3	B100
	N3 B1 OEM#3	
Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride	Bus GN OEM#1	GNV
	Bus GN HEV OEM#1	
Diesel PHEV	N3 GO PHEV OEM#2	B7

Tableau 13 : Synthèse des comparaisons réalisées

La comparaison Diesel vs GNV permet de déterminer l'impact de l'utilisation du gaz par rapport au B7. L'analyse est complétée par l'addition du véhicule Dual Fuel, véhicule utilisant le GNV comme carburant principal. L'analyse de l'effet des biodiesels compare les véhicules Diesel testés avec l'ensemble des carburants typés Diesel utilisés au cours de cette étude. La comparaison B100 vs B100 exclusif montre la reproductibilité des résultats entre ces deux cas théoriquement identiques (au véhicule près). L'apport de l'hybridation sur TCP est analysé via la comparaison TCP CNG vs CNG Hybride. Enfin, le véhicule Diesel PHEV est analysé seul afin de déterminer l'impact du mode de roulage sur un véhicule full hybride.

Les différentes comparaisons réalisées sont synthétisées sur la Figure 17.

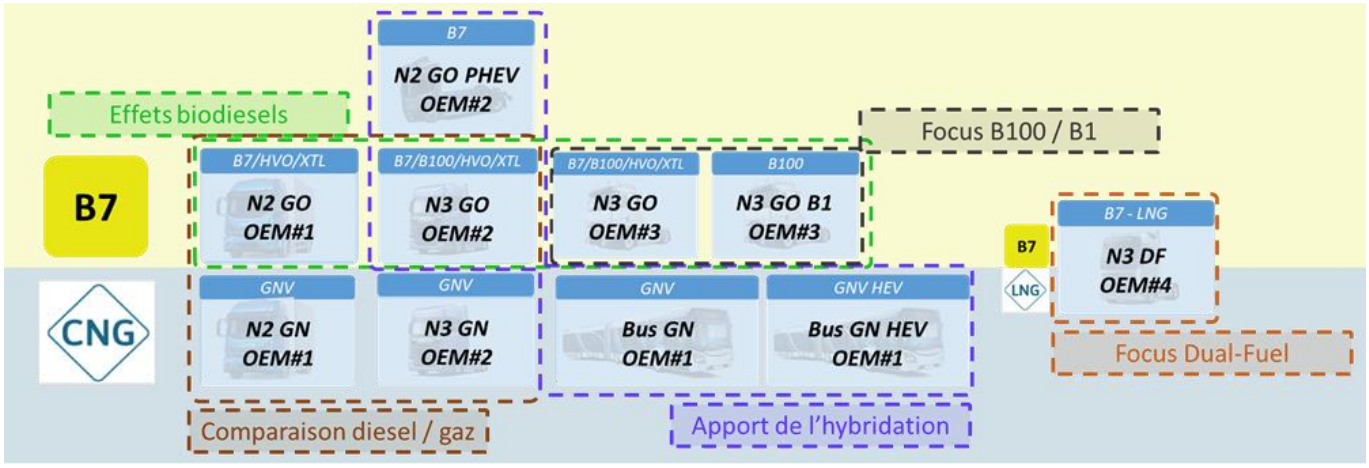


Figure 17 : Comparaisons réalisée - Synoptique

5.4. Description du jeu de données collecté

5.4.1. Quantité de données valides collectées

Lors de cette campagne d'essais, les données de 314 essais ont été récoltées. 297 essais ont été consolidés et validés. Pour chaque essai, de nombreuses acquisitions ont été réalisées, avec notamment jusqu'à une quarantaine de grandeurs relatives aux polluants. Chaque polluant mesuré pour chaque essai a également été validé.

5.4.2. Format de sorties

Deux types de fichiers ont été générés :

- Un fichier de synthèse regroupant les données relatives à tous les essais : grandeurs relatives à la description de l'essai, aux données de puissance, de distance ainsi que tous les cumuls de polluants, par point de mesure, par analyseur, par traitement, par phase et par unité
- Un fichier temporel par essai regroupant toutes les grandeurs de puissance, de vitesse et de polluants (concentration, débit et cumul) après resynchronisation des signaux

5.5. Consolidation des résultats et méthodologies appliquées

5.5.1. Consolidation des résultats

Pour chaque essai, toutes les données de mesures nécessaires à l'analyse (vitesse, polluants, …) ont été consolidées et validées.

Pour les gaz mesurés par des moyens expérimentaux différents (ex : CO_2 sur B5G et CO_2 sur baie FTIR), les mesures ont été validées par comparaison entre les données provenant des différents moyens de mesure. Cette approche a permis de définir une donnée de référence pour chaque gaz analysé.

De même, les émissions de particules ont été validées par comparaison entre les données PN_{23} et les données PN_{10}. En particulier, tous cas où les émissions de PN_{23} sont supérieures aux émissions de PN_{10} a été invalidé.

Ce travail de consolidation a ainsi permis de définir les données exploitables. La suite de ce rapport présente l'analyse de ces données consolidées et validées.

5.5.2. Méthodologies appliquées

Validation des données énergétiques ECU

Pour les essais réalisés au Banc de charge, deux données de puissance sont disponibles :

- Puissance au vilebrequin, estimée par l'ECU du véhicule
- Puissance à la roue, mesurée par le Banc de charge

Le cadre réglementaire demande de normaliser les émissions polluantes par l'énergie au vilebrequin. Il est ainsi nécessaire de valider les données énergétiques provenant de l'ECU. Pour ce faire, un ratio d'énergie $R_{énergie}$ a été calculé :

$$R_{énergie} = \frac{Energie\ roue\ (banc\ de\ charge)}{Energie\ vilebrequin\ (ECU)}$$

La présence d'une transmission entre le vilebrequin et les roues impose $R_{énergie} < 1$. Il est alors possible de définir les quatre cas présentés ci-dessous :

	$R_{énergie} \geq 1$	$R_{énergie} < 1$		
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Détails du cas		L'énergie estimée par l'ECU est physique et aucun consommateur n'est présent	L'énergie estimée par l'ECU est physique et au moins un consommateur est présent	L'énergie estimée par l'ECU n'est pas physique
Validation	Données énergétiques ECU invalidées	Données énergétiques ECU validées	Les cas 3 et cas 4 ne peuvent être discriminés car aucune donnée sur le potentiel consommateur. Pas de statut sur les données énergétiques ECU	

Tableau 14 : Cas de validation des données énergétiques ECU

Pour distinguer le Cas 2 des Cas 3 et Cas 4, le niveau de puissance au vilebrequin au ralenti a été estimé. Dans le Cas 2, cette puissance est proche de zéro. Dans les Cas 3 et Cas 4, cette puissance est élevée.

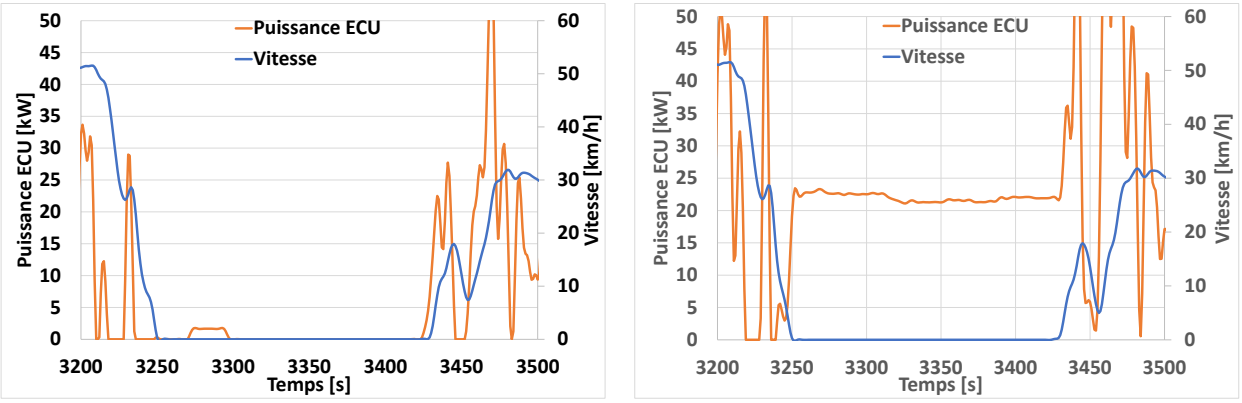


Figure 18 : Puissance ECU au ralenti dans les Cas 2 (gauche) et Cas 3 ou Cas 4 (droite) sur cycle Urban delivery

La Figure 18 montre un exemple de Cas 2 et Cas 3 ou Cas 4. Un Cas 2 est représenté sur la gauche de cette figure, un Cas 3 ou Cas 4 est représenté à droite. On vérifie que la puissance ECU est proche de zéro au ralenti pour le Cas 2. Elle est de l'ordre de 22kW dans pour le Cas 3 ou Cas 4 : soit la puissance ECU est non physique, soit la présence d'un consommateur demande une puissance ECU élevée même au ralenti. La Figure 19 montre une représentation graphique de la validation des données énergétiques ECU de l'ensemble des essais réalisés au cours de cette campagne.

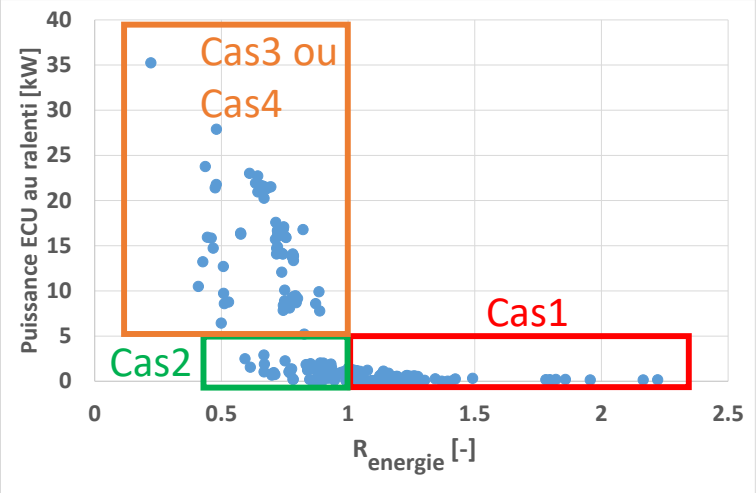


Figure 19 : Validation des donnée énergétiques : représentation de l'ensemble des essais réalisés

Un synoptique de la méthodologie suivie pour valider les données énergétiques ECU est présenté sur la Figure 20.

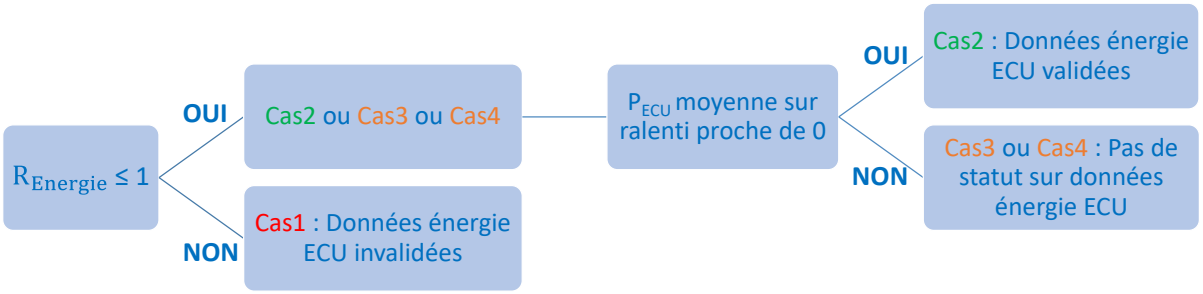


Figure 20 : Méthodologie de validation des données énergétiques ECU : synoptique

Recalage temporel des données

Les données collectées par IFPEN ont été recalées conformément à la norme pour les données relatives aux analyseurs B5G et PEMS. Pour la baie FTIR, le QCL et l'APC, une méthodologie spécifique a été mise en place. Le synoptique représentant la méthodologie suivie pour le recalage temporel des données est présenté sur la Figure 21 pour les essais au Banc de charge et sur la Figure 22 pour les essais sur route.

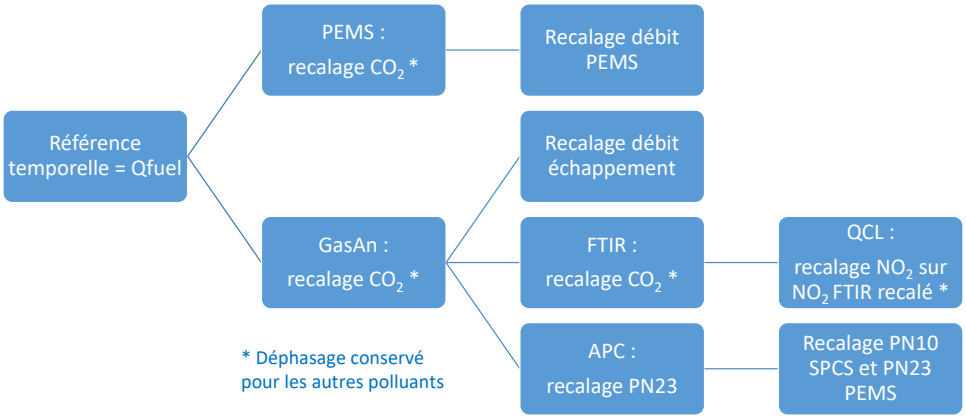


Figure 21 : Recalage temporel des données pour les essais au Banc de charge

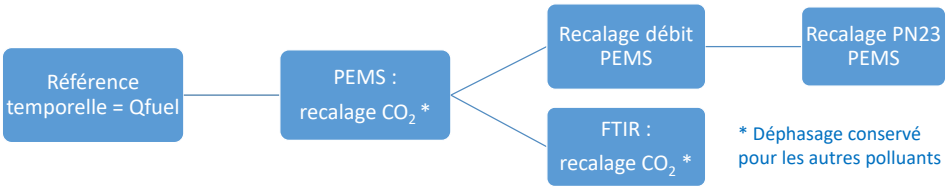


Figure 22 : Recalage temporel des données pour les essais sur route

La référence temporelle est donnée par le débit de carburant estimé par l'ECU. Seul le CO_2 est recalé sur le débit de carburant, les déphasages temporels entre chaque analyseur d'une même baie ont été calculés et pris en compte avant le début de la campagne d'essais. Les autres grandeurs (débits, données FTIR, …) sont ensuite recalées sur le signal de CO_2 recalé, et ainsi de suite, comme spécifié sur les figures ci-dessus.

6. Analyse des résultats expérimentaux

Cette section propose une synthèse des résultats expérimentaux, en se focalisant sur les comparaisons entre technologies et carburants. Les résultats exhaustifs véhicule par véhicule sont fournis en annexe au besoin.

Pour permettre les calculs du pouvoir de réchauffement global (PRG) associé aux émissions de méthane (CH_4) et de protoxyde d'azote (N_2O), les coefficients pris en compte sont ceux proposés par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans son 6eme rapport publié en 2021 [56], à savoir : 29,8 pour le pouvoir de réchauffement global à 100 ans du CH_4 fossile et 273 pour celui du N_2O.

A l'image de la Figure 23, les graphiques sont présentés sous la forme de bargraphes avec des barres d'erreur indiquant les valeurs maximales et minimales de l'échantillon représenté. Un rappel du nombre d'essais réalisés pour chaque regroupement de données est effectué.

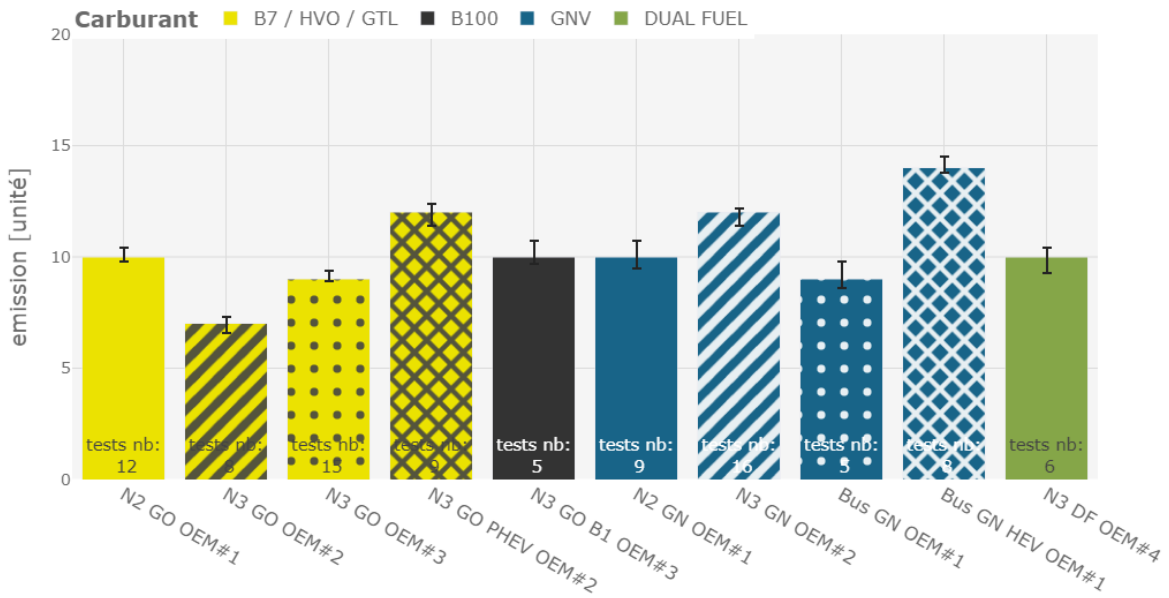


Figure 23 : Exemple de figure d'analyse des émissions

6.1. Comparaison Diesel vs. GNV

A retenir :

Les émissions de CO_2 dépendent peu du carburant, B7 ou GNV. Les émissions de N_2O et de CH_4 sont contenues mais leur contribution à l'émission de GES est non négligeable, notamment sur cycle WHVC, de l'ordre de quelques pourcents.

Les émissions de NO_x sont inférieures sur les véhicules fonctionnant au GNV. Une forte diminution comprise entre 30% et 80% est mesurée. Au contraire, les émissions de PN_{10} sont 2 à 10 fois supérieures dans le cas du GNV par rapport à son homologue fonctionnant au B7. Il est à noter que les véhicules GNV comparés ici ne disposent pas d'un filtre à particules. D'autres véhicules GNV avec FAP ont été testés dans la partie TCP de cette même étude et montrent les émissions de particules les plus faibles du panel.

Concernant les émissions de NH_3, de fortes teneurs, de l'ordre de 10 mg/km.t, sont relevées dans le cas du tracteur GNV par rapport au tracteur Diesel. Ces émissions indésirables sont dues à un manque de

sélectivité du catalyseur et/ou à un pilotage de richesse pas assez précis, en particulier pendant les phases transitoires. Le même constat peut être établi pour des porteurs.

Ces conclusions sont en totale cohérence avec la littérature en ce qui concerne les émissions de GHG et les NO_x. Il existe peu d'études s'intéressant aux émissions d'ammoniac et de PN_{10} des véhicules mais l'arrivée sur le marché de filtres à particules pour les moteurs GNV pour la norme Euro 7 démontre une prise en compte par les constructeurs.

Périmètre :

Tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte. De plus, seuls les essais effectués à partir du B7 sur les véhicules Diesel sont considérés.

CO_2 : Les émissions spécifiques de CO_2 sont proches entre GNV et B7, avec des gains faibles pour l'un ou l'autre des carburants selon les conditions, les sensibilités sont plus fortes sur les cycles ISC faisant intervenir une amplitude de masse embarquée et sur les cycles Urban delivery montrant une sensibilité liée à la température ambiante et aux stratégies constructeur employées pour mettre en action le post-traitement des émissions (Figure 24).

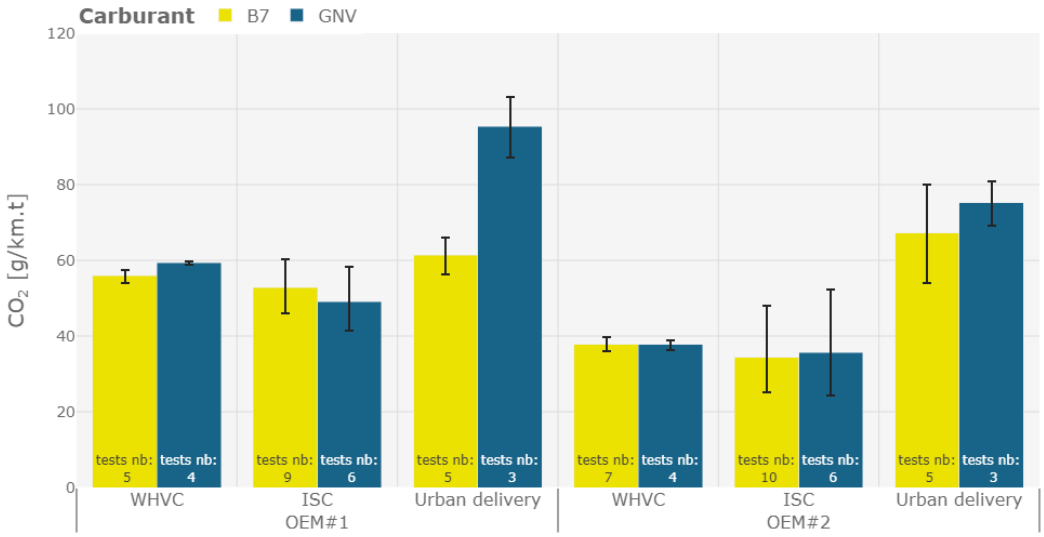


Figure 24 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de CO_2

GES : Les contributions du CH_4 et du N_2O aux émissions de gaz à effet de serre sont de l'ordre de quelques pourcents. Le N_2O est présent sur véhicules Diesel car lié à la conversion des NO_x dans le catalyseur SCR tandis que le CH_4 est émis par les véhicules GNV, notamment lors de phases d'usage à faible charge, plus fortement visible sur les cycles Urban delivery. (Figure 25).

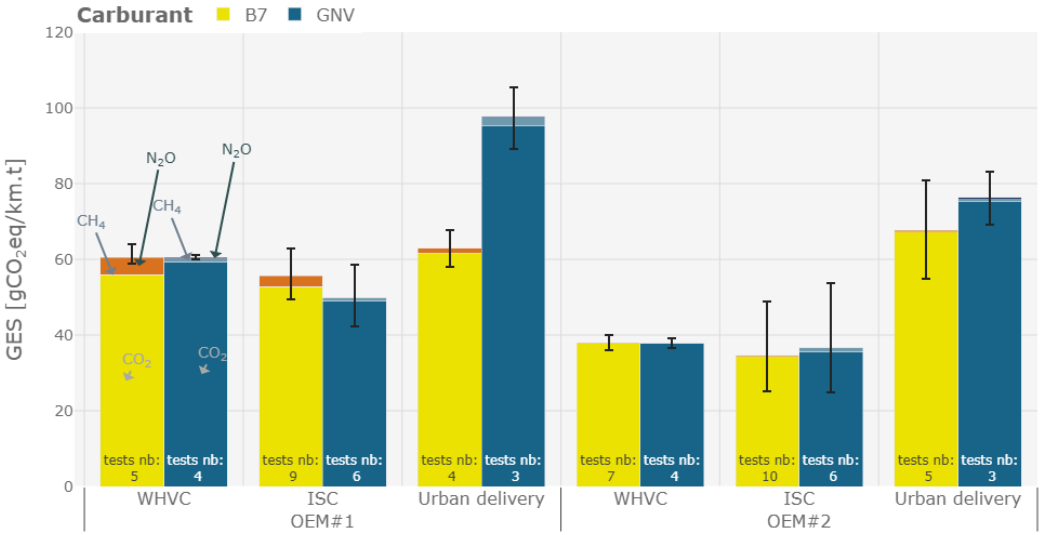


Figure 25 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de GES

$\underline{NO_x}$: Les émissions de NO_x sont significativement plus faibles pour le cas GNV par rapport aux cas Diesel (B7), en particulier sur cycle Urban delivery (Figure 26). Une baisse des émissions comprise entre 30% et 40% est observée sur le véhicule N2 GN OEM#1, sur le véhicule N3 GN OEM#2, les émissions chutent de 40% à 80% pour le cycle urbain lent. Les émissions en sortie moteur sont cependant plus élevées en GNV, de l'ordre de 30% en moyenne, mais le post-traitement 3 voies permet de convertir très efficacement les émissions de NO_x. Les intervalles min/max sont plus larges pour les véhicules Diesel, montrant une sensibilité plus fort à la température en début d'essai. En effet les trajets pris en compte incluent des essais macérés avec démarrage à -7°C ou à 23°C, c'est d'autant plus vrai pour les essais Urban delivery qui sollicitent moins fortement le moteur thermique, ce qui se traduit par une énergie à l'échappement plus faible en comparaisons avec les autres cycles et donc moins d'énergie disponible pour les organes de post-traitement des émissions. La comparaison des résultats de ces véhicules par rapport au seuils normatifs actuels et futurs est détaillée dans les paragraphes 6.8.2 et 12.15.

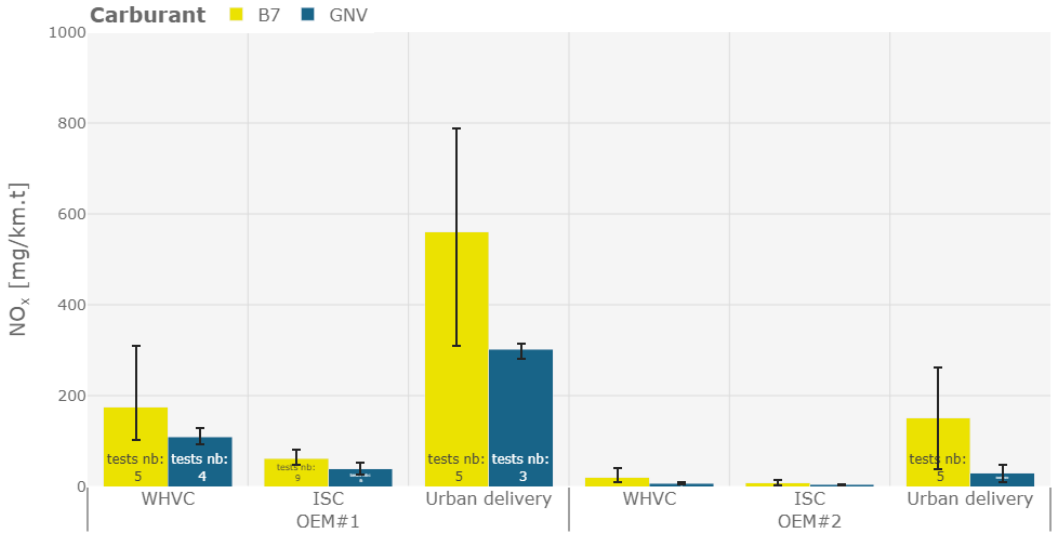


Figure 26 : Comparaison Diesel vs GNV – Émissions spécifiques de NO_x

PN$_{10}$: Les émissions de PN$_{10}$ sont 2 à 10 fois plus élevées dans le cas GNV, N3 GN OEM#2 (Figure 27). A noter qu'aucune donnée validée n'est disponible concernant les émissions de PN$_{10}$ sur le véhicule Diesel, N2 GO OEM#1, ne permettant pas la comparaison avec son homologue GNV, N2 GN OEM#1. Les tendances entre les véhicules Diesel et les véhicules GNV sont les même et montrent la sensibilité des émissions de particules au caractère transitoire de l'essai réalisé. Les cycles WHVC et ISC sont assez comparables en termes de nombre d'accélération et de sévérité de ces accélérations, en revanche le cycle Urban delivery présente plus de phases de décollage depuis l'arrêt, plus fortement émettrices. La présence d'un filtre à particules sur moteur Diesel permet de limiter les émissions de particules par rapport au moteur GNV. La comparaison des résultats de ces véhicules par rapport aux seuils normatifs actuels et futurs est détaillée dans les paragraphes 6.8.2 et 12.15.

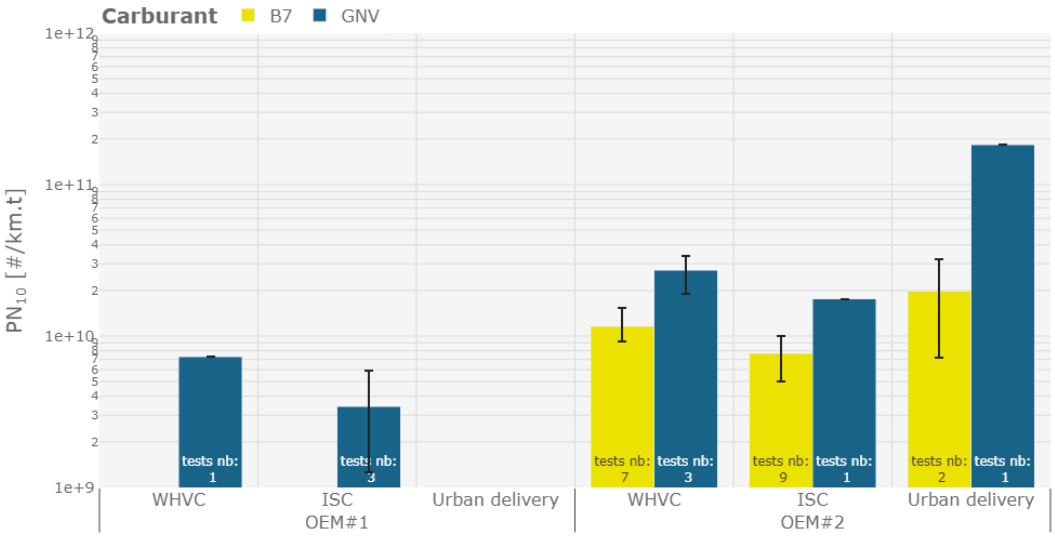


Figure 27 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de PN$_{10}$

$\underline{NH_3}$: Sur le véhicule porteur, les émissions de NH_3 sont similaires entre les cas GNV et B7, N2 GN OEM#1 et N2 GO OEM#1. Au contraire, sur tracteur, les émissions du véhicule GNV, N3 GN OEM#2, sont très significativement supérieures aux émissions du véhicule Diesel, N3 GO OEM#2 (Figure 28). Des émissions de l'ordre de 10 mg/km.t sont relevées. La régulation de la richesse sur ce véhicule n'est pas optimale, avec beaucoup d'excursions en zone riche ce qui favorise la formation de NH_3. Cette problématique n'est pas relevée sur le porteur GNV.

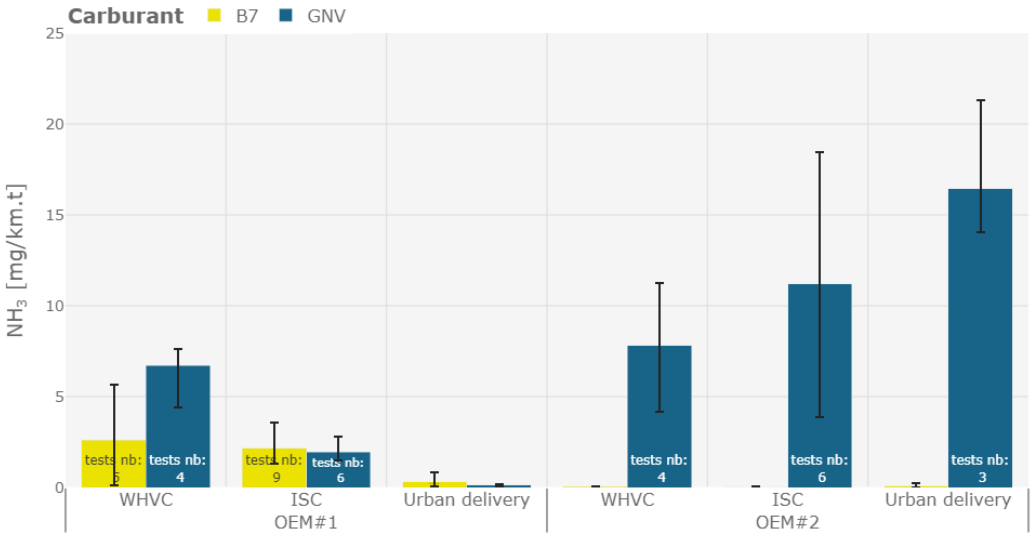


Figure 28 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de NH_3

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.5.

6.2. Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel

A retenir :

Le Dual Fuel est une solution très pertinente en terme de réduction des émissions de CO_2. Une baisse de 14% à 24% est mesurée selon le cycle de test par rapport aux véhicules Diesel (B7) ou GNV. Cette réduction correspond au calcul théorique qui associe le rapport H/C avantageux du GNL au rendement intrinsèque plus élevé du cycle diesel.

Le bilan concernant les émissions de gaz à effet de serre est cependant terni par de fortes émissions de N_2O, comptant pour 10%, et dans une moindre mesure par des émissions de CH_4. Finalement, les émissions de GES du Dual-Fuel sont 7% inférieures au cas Diesel et 20% inférieures au cas GNV.

Les émissions de NO_x sont en moyenne 2 fois plus faibles que celles observées sur véhicule Diesel mais 2.5 fois plus élevées que sur véhicule GNV.
Les émissions de CO du Dual Fuel sont au niveau des véhicules Diesel et bien inférieures à celles obtenues sur véhicule GNV pour les cas à chaud avec une diminution de 70% des émissions.

Les émissions de PN_{23} et surtout de PN_{10} sont élevées par rapport aux autres véhicules de la comparaison. Les émissions de PN_{10} sont entre 2.5 et 7 fois plus élevées sur le Dual Fuel. De même, les émissions de THC sont 20 fois plus élevées que sur les autres véhicules sur cycle urbain.

Le faible kilométrage du véhicule (de l'ordre de 20000 km) peut conduire à une moindre efficacité du système de post-traitement par rapport aux autres véhicules testés et expliquer ainsi les fortes émissions relevées en termes de N_2O, de PN_{10} et de THC. En effet, le catalyseur SCR et le filtre à particules n'ont pas nécessairement atteint leur fonctionnement nominal. La solution Dual-Fuel est une alternative assez peu répandue et assez peu testée dans la littérature. On peut seulement indiquer que le véhicule Dual-Fuel testé dans l'étude ICCT portant sur les NO_x en conditions réelles [15] obtient les niveaux de NO_x les plus faibles du panel Euro VI Step D testé et que le TNO [24] a démontré qu'un véhicule Dual-Fuel permettait d'obtenir un gain CO_2 en moyenne de 19% par rapport à des véhicules Diesel équivalents. Les résultats obtenus lors de cette étude sont donc en cohérence.

Périmètre :

Tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte. De plus, seuls les essais effectués à partir du B7 sur les véhicules Diesel sont considérés.

A noter :

Le véhicule Dual Fuel, N3 DF OEM#4, présente un des plus faibles kilométrages de l'étude (cf. Tableau 10) avec environ 20 000 km au compteur. Ce relativement faible kilométrage peut conduire à un fonctionnement non nominal du système de post-traitement et présenter de plus fortes émissions de N_2O, de PN_{10} et de THC. Un catalyseur SCR récent peut s'avérer trop actif et ne pas être 100% sélectif (une partie des NO_x convertis le sont sous forme de N_2O et non de N_2). Un filtre à particules faiblement kilométré peut quant à lui ne pas avoir encore constitué un lit de suie suffisant synonyme d'une filtration optimale.

CO_2 : Les émissions de CO_2 du N3 DF OEM#4 sont les plus faibles dans cette comparaison (Figure 29). Une baisse des émissions comprise entre 14% et 24% est mesurée. En supposant un même rendement effectif, l'utilisation

de GNV permet en théorie de limiter les émissions de CO_2 de 23% par rapport au B7 grâce à un rapport H/C beaucoup plus élevé (4 vs ~ 1.8). Les résultats de la campagne d'essais correspondent ainsi à la théorie.

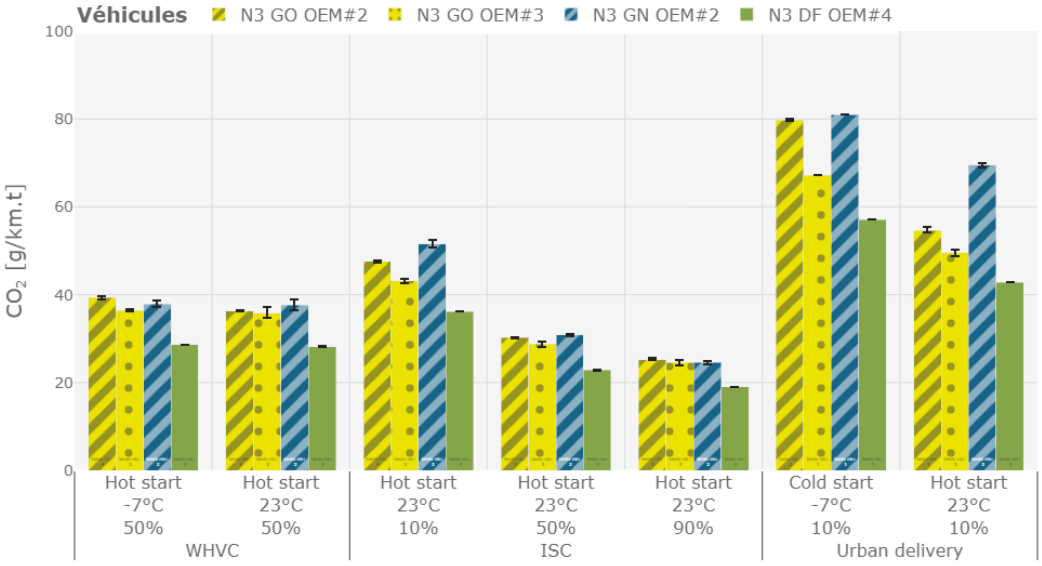


Figure 29 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de CO_2

GES : Le Dual Fuel est le plus performant en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Le niveau élevé d'émissions de N_2O ternit cependant son bilan (Figure 30). Comme annoncé en préambule de ce chapitre, les émissions de N_2O proviennent d'une sélectivité perfectible du catalyseur peu âgé qui transforme les NO_x en N_2O plutôt qu'en azote. Ces émissions comptent pour 10% des émissions de GES. Les émissions de GES sont 7% inférieures au cas Diesel et 20% inférieures au cas GNV.

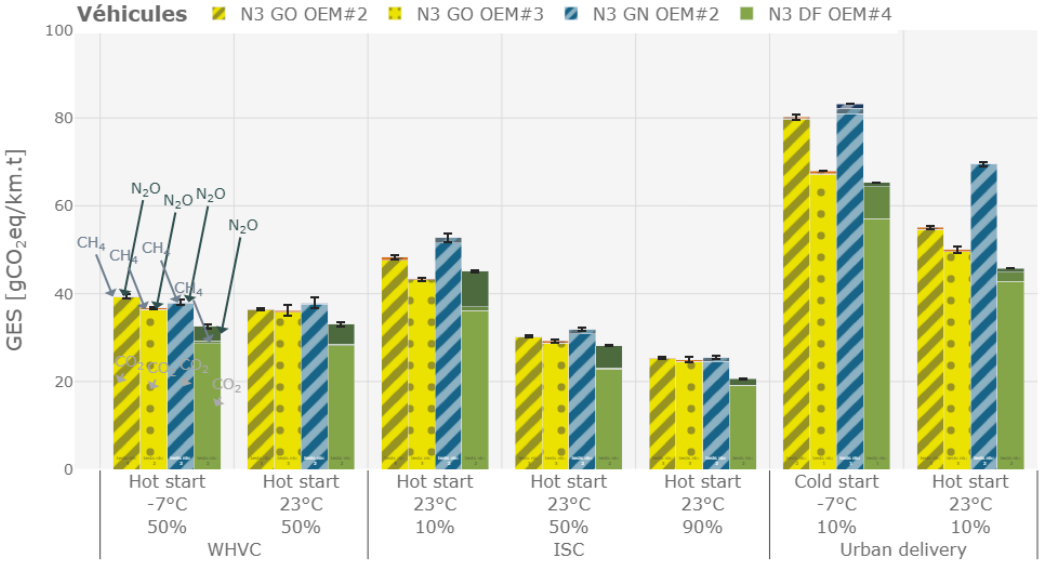


Figure 30 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Émissions spécifiques de GES

$\underline{NO_x}$: Les véhicules GNV et Dual Fuel présentent de très bons résultats d'émissions de NO_x par rapport aux véhicules Diesel (Figure 31). Sur véhicule Dual Fuel, les émissions de NO_x sont en moyenne 2 fois plus faibles que celles observées sur véhicule Diesel mais 2.5 fois plus élevées que sur véhicule GNV.

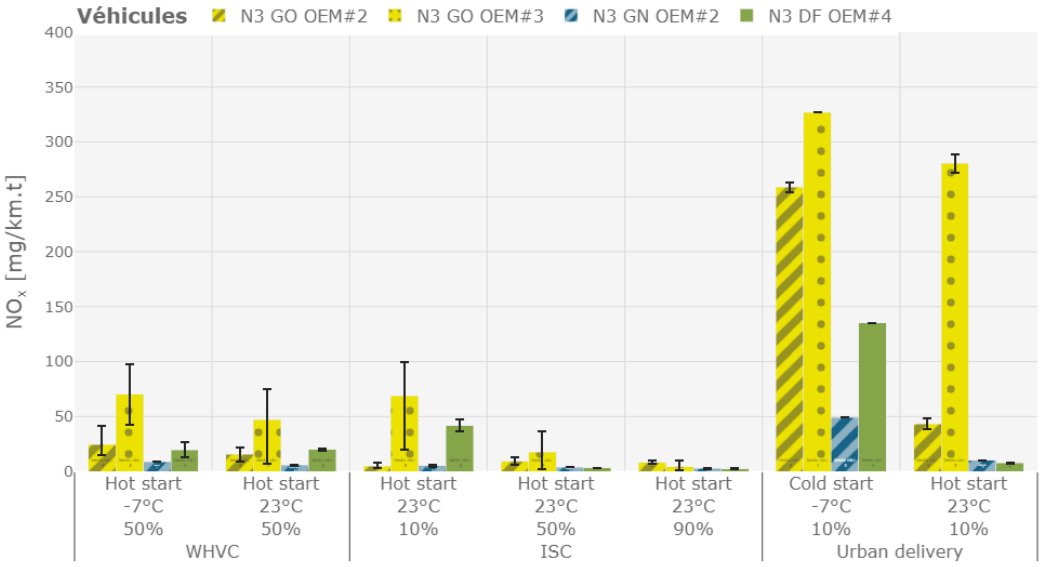


Figure 31 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de NO_x

$\underline{CO}$: Les émissions de CO du Dual Fuel sont au niveau des véhicules Diesel et bien inférieures à celles obtenues sur véhicule GNV pour les cas à chaud (23°C de température ambiante) avec une diminution de 70% des émissions (Figure 32).

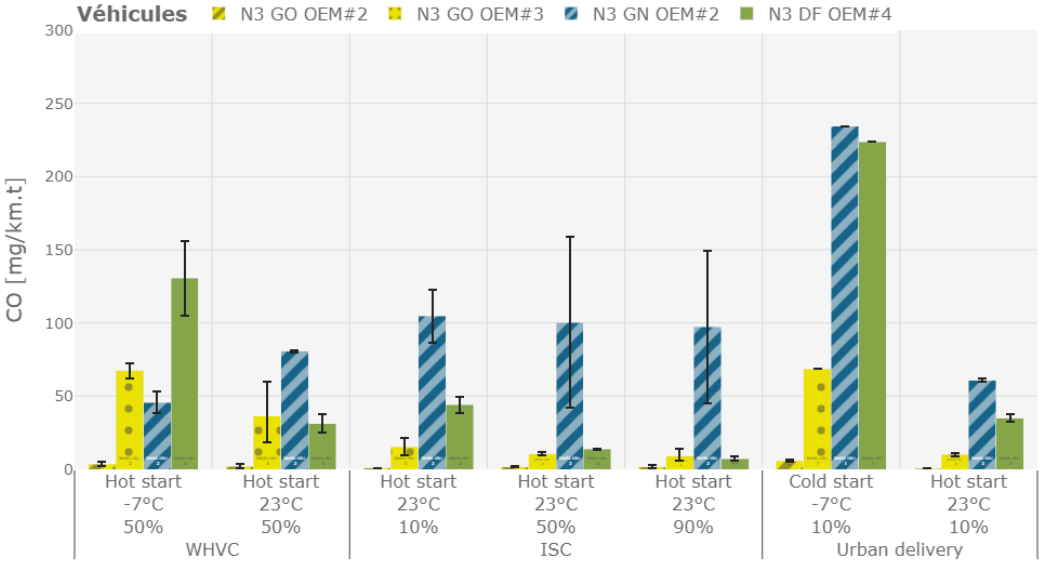


Figure 32 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de CO

$\underline{THC}$: Les émissions de THC du Dual Fuel sont proches de celles du GNV et supérieures aux cas Diesel (Figure 33). Les émissions du Dual Fuel sur cycle Urban delivery sont particulièrement élevées. Elles sont 20 fois plus

élevées que pour les autres véhicules sur ce cycle. Il est possible que l'état neuf du système de post-traitement explique de tels résultats (le véhicule ne compte que 20000km au compteur au moment des tests).

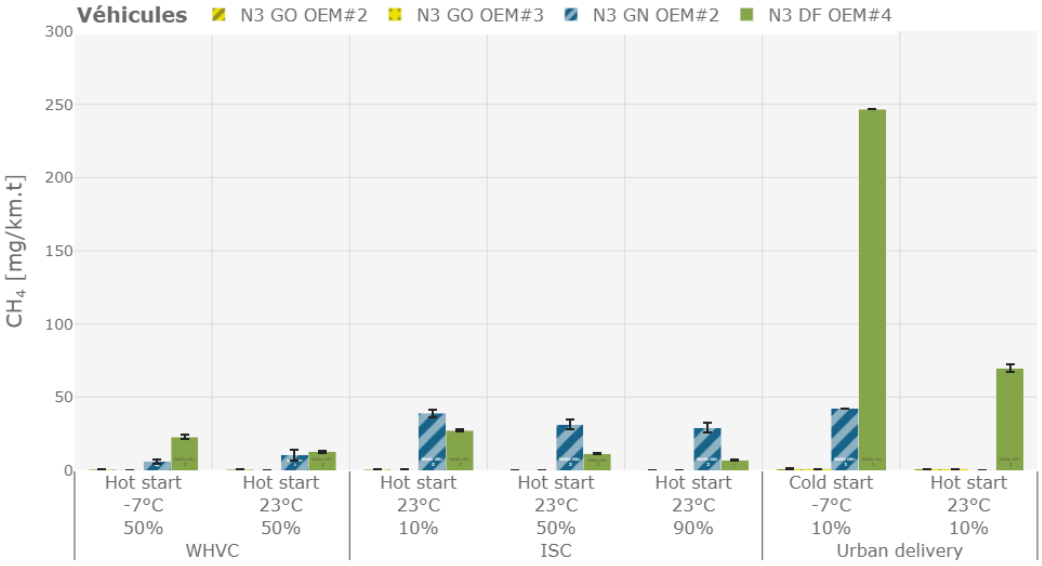


Figure 33 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Émissions spécifiques de THC

PN_{10} : Sur la plupart des cycles, le Dual Fuel présente les émissions de PN_{10} les plus élevées de la comparaison (Figure 34). Les émissions de PN_{10} du Dual Fuel sont 2.5 à 7 fois plus élevées que sur les autres véhicules. Ce résultat peut être en lien avec le faible kilométrage du véhicule énoncé précédemment. En effet, un filtre à particules a besoin d'un certain nombre de cycles de chargement / régénération avant d'atteindre son fonctionnement nominal. Cela est particulièrement sensible sur la filtration des particules les plus fines (PN_{10}). De plus, le système de post-traitement étant celui d'un véhicule Diesel, il est possible que le lit de suies crée par les émissions de particules issues de la combustion du gaz soit plus lent à s'établir et ne permette pas une efficacité de filtration du niveau de celle d'un véhicule Diesel.

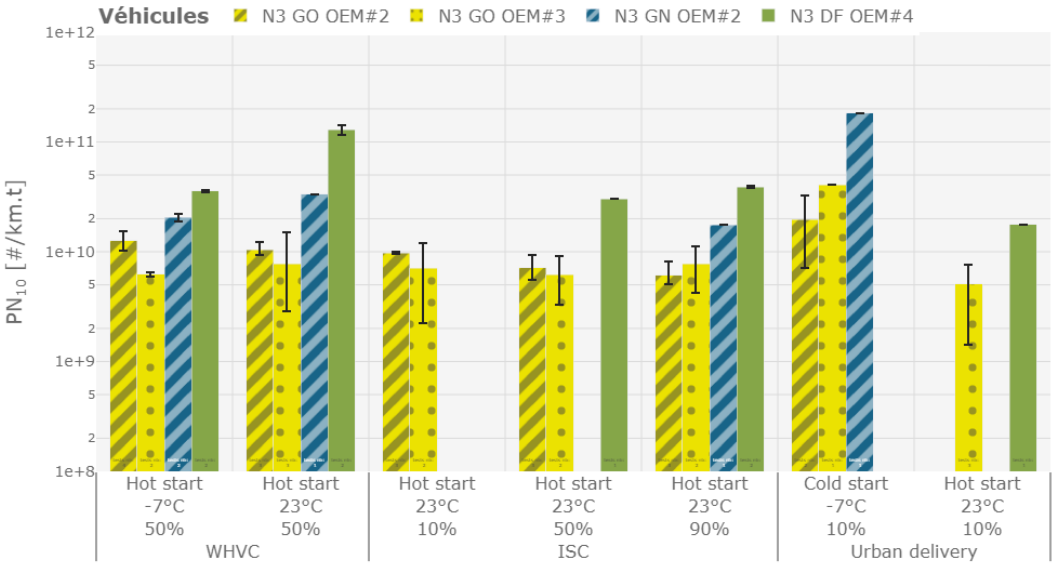


Figure 34 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Émissions spécifiques de PN_{10}

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.6.

La comparaison des résultats de ces véhicules par rapport aux seuils normatifs actuels et futurs est détaillée dans les paragraphes 6.8.2 et 12.15.

6.3. Analyse de l'effet des biodiesels

A retenir :

Les émissions de CO_2 à l'échappement varient de quelques pourcents en fonction des carburants. Le B100 est le carburant le plus émissif, les émissions de CO_2 relatives à ce carburant étant en moyenne 3% plus élevées que pour le B7. Les émissions de CO_2 relatives au GTL ou à l'HVO sont au contraire les plus faibles du panel, avec une diminution moyenne de l'ordre de 3% par rapport au B7. Ces différences correspondent à l'analyse théorique et sont liées aux différences de PCI et de composition des carburants.
Les polluants locaux (NO_x, CO, THC, NH_3, PN_{10}) présentent des niveaux d'émissions proches quel que soit le carburant utilisé. Les émissions polluantes à l'échappement sont beaucoup plus sensibles aux conditions d'utilisation (température ambiante, cycle, charge, état du système de post-traitement) qu'aux propriétés du carburant.

Ces conclusions sont cohérentes avec l'étude bibliographique menée dans le cadre de ce projet. Dans l'ensemble des sources utilisant des résultats obtenus sur route il est remarqué [11], [12], [13], [14], [15], [16], [20], [21], [22], [23] une grande variabilité des niveaux d'émissions en fonction des conditions de roulage. Si cette variabilité est mieux maîtrisée lors des essais sur banc à rouleaux, les résultats obtenus en termes d'émissions de polluants locaux et de gaz à effet de serre ne permettent pas de dégager de hiérarchie nette entre les carburants testés (HVO, GTL, B100) qui sont tous – du réservoir à la roue – des alternatives proches du carburant de référence B7.

Périmètre :

Tous les essais validés réalisés en laboratoire avec les quatre carburants Diesel sont pris en compte.

CO_2 : L'effet du carburant sur les émissions de CO_2 à l'échappement est faible (Figure 35). Les variations sont de l'ordre de quelques pourcents. Ces variations sont plus importantes sur les cycles ISC et Urban delivery dues aux variations de masses embarquées importantes dans le cas des ISC et des variations de températures ambiante dans le cas des Urban delivery (cf. Tableau 8). Ainsi, les valeurs moyennes observées sont toujours comprises dans l'intervalle de confiance représenté sur les bargraphes. En supposant un même rendement effectif (*i.e.* sans impact du carburant sur le rendement), ces variations correspondent à l'analyse théorique (Figure 36).

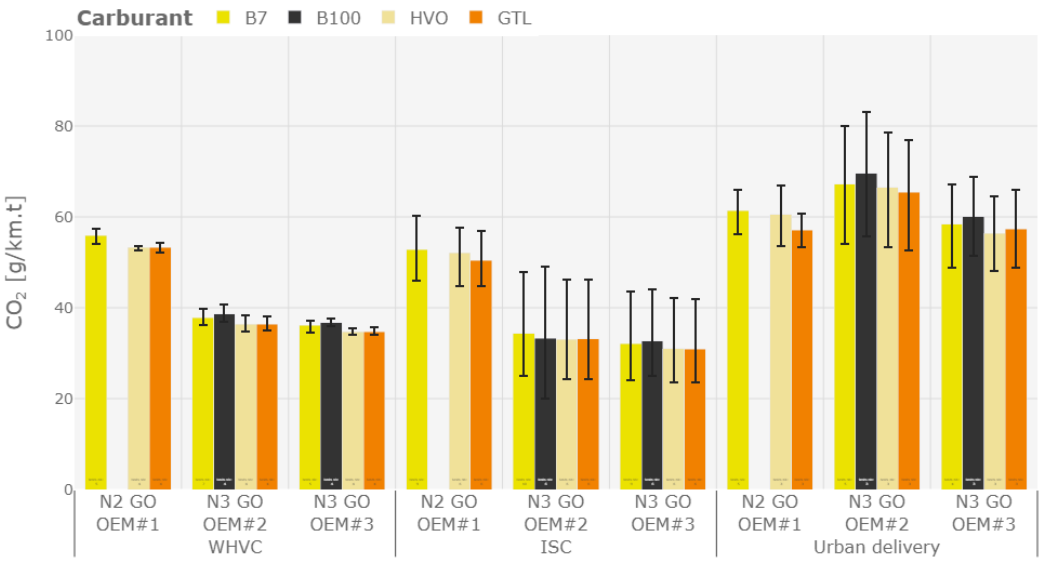


Figure 35 : Analyse de l'effet des biodiesels – Émissions spécifiques de CO_2

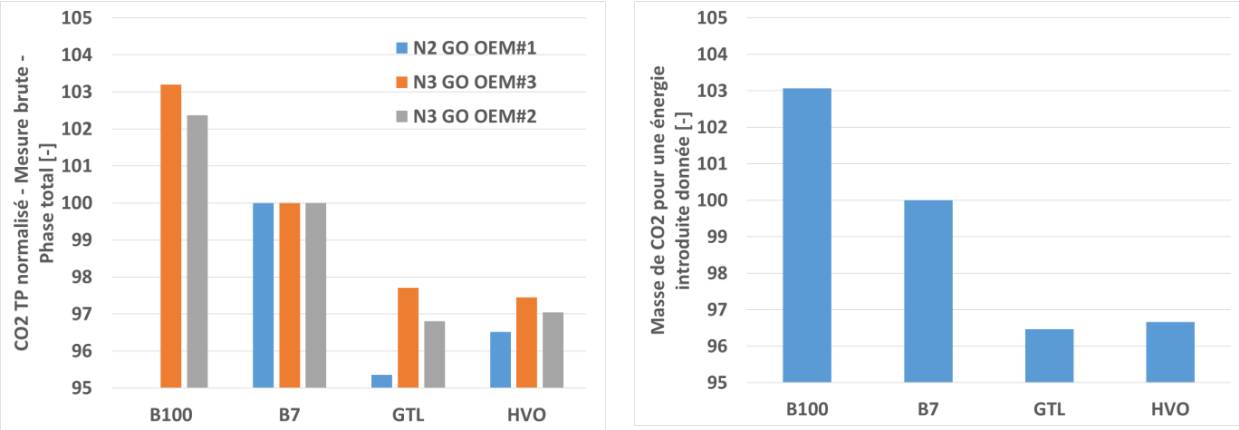


Figure 36 : Analyse de l'effet des biodiesels – Émissions spécifiques de CO_2 (gauche) et calcul théorique (droite) avec Référence = B7

$\underline{NO_x}$: Les émissions de NO_x sont peu dépendantes du carburant. L'impact de la charge, de la température ambiante ou du cycle est significativement plus élevé que celui du carburant (Figure 37). Il est à noter que les véhicules tracteurs, N3 GO OEM#2 et N3 GO OEM#3 présentent des émissions de NO_x plus faibles que le véhicule porteur, N2 GO OEM#1.

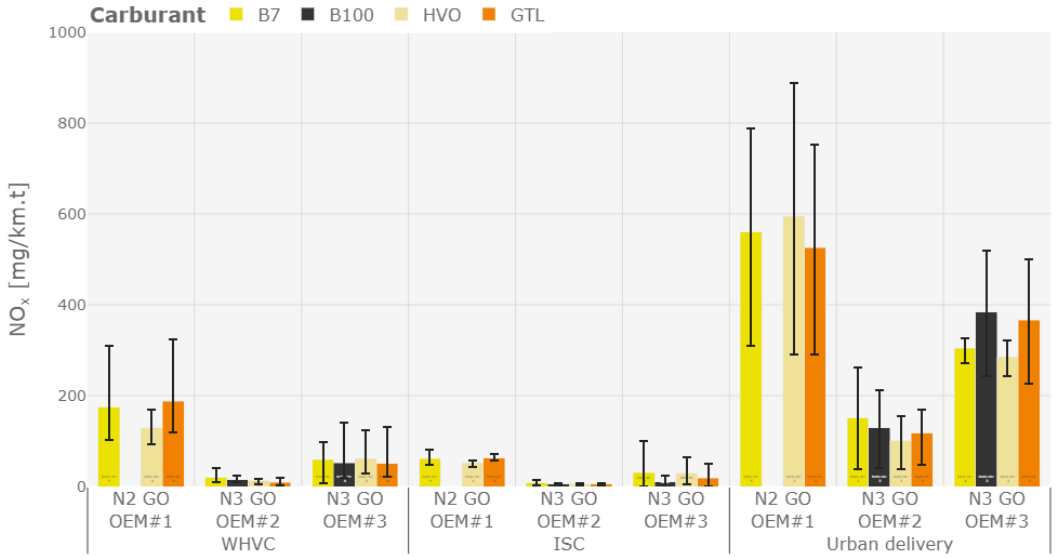


Figure 37 : Analyse de l'effet des biodiesels – Émissions spécifiques de NO_x

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.7.

La comparaison des résultats de ces véhicules par rapport aux seuils normatifs actuels et futurs est détaillée dans les paragraphes 6.8.2 et 12.15.

6.4. Comparaison B100 vs B100 exclusif

A retenir :

Les émissions de polluants et de gaz à effet de serre constatés sur les véhicules Flex fuel, N3 GO OEM#3 (utilisé en B100), et le véhicule B100 exclusif, N3 B1 OEM#3, sont similaires.
C'est un comportement attendu puisque le véhicule B100 exclusif ne présente pas de modification hardware notable vis-à-vis de son homologue flex fuel. Comme illustré dans le paragraphe 6.3, le comportement en combustion et en émission du B100 ne diffère pas fondamentalement du B7, les calibrations de ces 2 véhicules produisent des niveaux d'émissions proches. *Le véhicule « B1 », homologué pour un usage exclusivement avec du carburant B100, ne doit théoriquement pas être utilisé avec du carburant gazole B7 standard (« GO »). Dans un tel cas, le contrôle moteur devrait détecter la présence d'un carburant non conforme car contenant une teneur en biocarburant trop faible par rapport à sa certification originale et dégrader l'agrément moteur afin d'inciter son conducteur à un contrôle afin de retrouver rapidement une utilisation et un fonctionnement conformes.*

Périmètre :

Tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte pour le N3 B1 OEM#3. Seuls les essais avec le carburant B100 sont considérés pour le N3 GO OEM#3.

$\underline{CO_2}$: Les émissions de CO_2 entre les deux véhicules sont très proches (Figure 38).

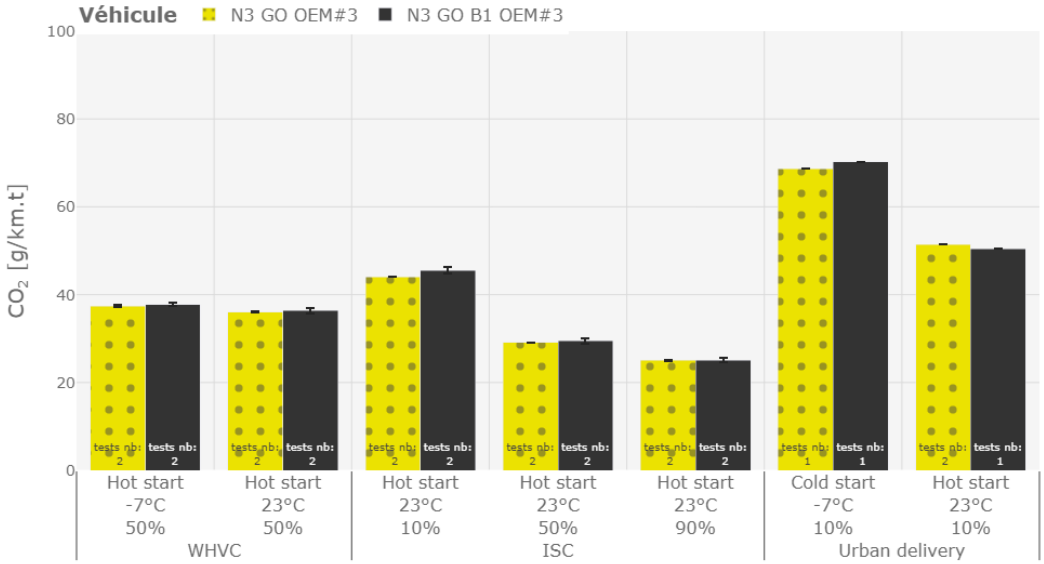


Figure 38 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Émissions spécifiques de CO_2

$\underline{NO_x}$: Les ordres de grandeurs et la sensibilité aux conditions d'usage (cycle, charge) des émissions de NO_x sont conservés entre les deux véhicules (Figure 39).

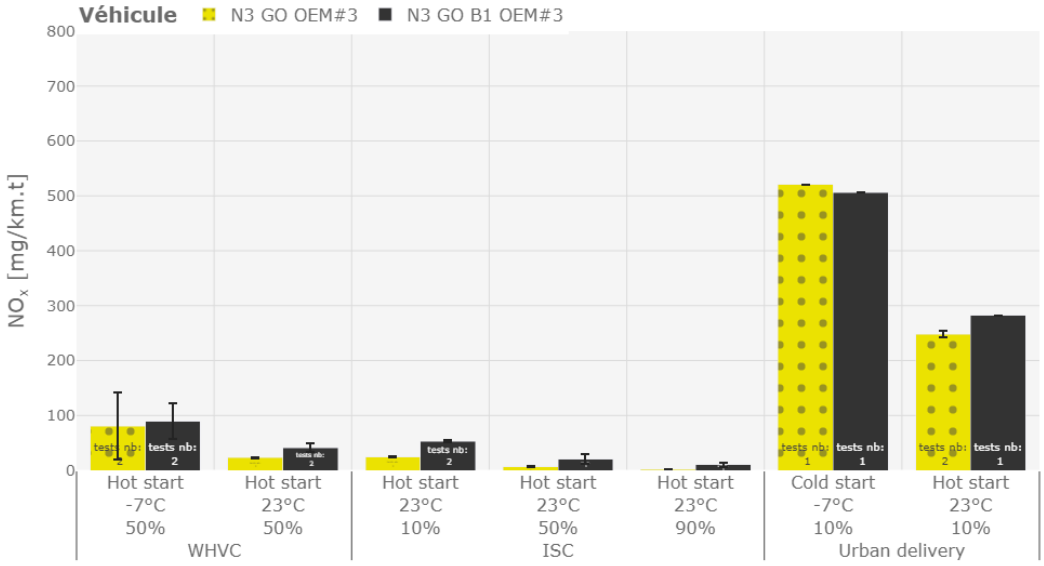


Figure 39 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Émissions spécifiques de NO_x

$\underline{PN_{10}}$: Le véhicule B100 exclusif présente des niveaux de particules inférieures de -25 à 75% au véhicule flex fuel (Figure 40).

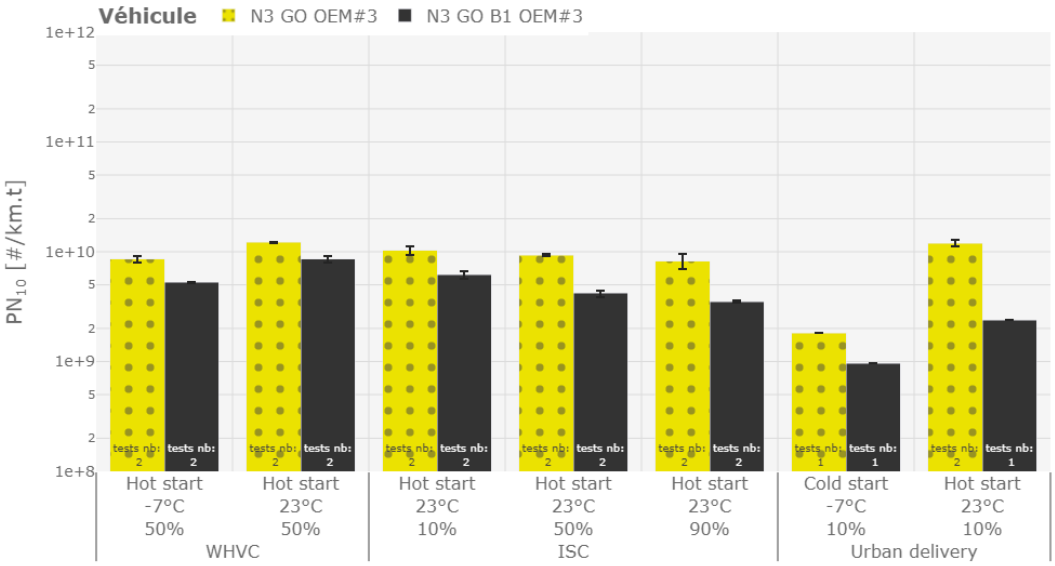


Figure 40 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Émissions spécifiques de PN_{10}

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.8.

La comparaison des résultats de ces véhicules par rapport aux seuils normatifs actuels et futurs est détaillée dans les paragraphes 6.8.2 et 12.15.

6.5. Comparaison bus CNG vs CNG Hybride

A retenir :

L'hybridation permet un gain de CO_2 compris en 4% et 8%. Les émissions des autres gaz à effet de serre sont minimes pour les deux véhicules. Ces résultats sont en retrait par rapport aux annonces commerciales du constructeur qui communique sur un gain jusqu'à 19% de CO_2 [25], mais relativement cohérents vis-à-vis du ratio puissance électrique/ puissance thermique dont dispose le véhicule hybride, Bus GN HEV OEM#1, de l'ordre de 9%, de plus la taille de la batterie est faible, limitant l'usage de la machine électrique.

L'hybridation n'apporte pas de gain significatif concernant les émissions des polluants locaux. Les émissions de ces polluants sont très faibles pour les deux véhicules, à l'exception du NH_3 en conditions urbaines et des THC dans une moindre mesure. Les deux véhicules sont équipés d'un filtre à particules, les émissions de PN_{10} et PN_{23} sont extrêmement faibles.

Périmètre :

Tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte

CO_2 : L'hybridation permet un gain compris entre 4% et 8% (Figure 41). Le véhicule hybride présente un faible taux d'hybridation, associé à une batterie très faible, qui limite l'usage en tout électrique. Cette technologie permet néanmoins de délester le véhicule lors de phases transitoires et offre des gains en consommation à la hauteur de son taux d'électrification (de 9%).

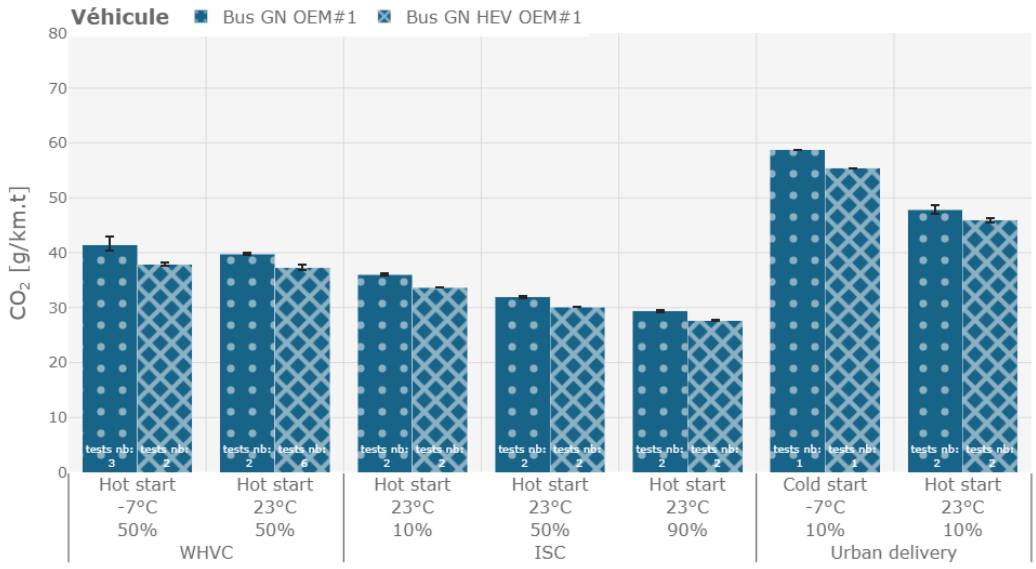


Figure 41 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de CO_2

NH_3 : Les émissions de NH_3 sont faibles pour les deux véhicules, à l'exception des cycles urbains denses, en particulier en conditions froides (Figure 42). Ces véhicules étant des bus urbains destinés à une utilisation à vitesse moyenne réduite et parfois avec peu de passagers, ces résultats montrent pour le NH3 un impact négatif des bus GNV sur la qualité de l'air en ville.

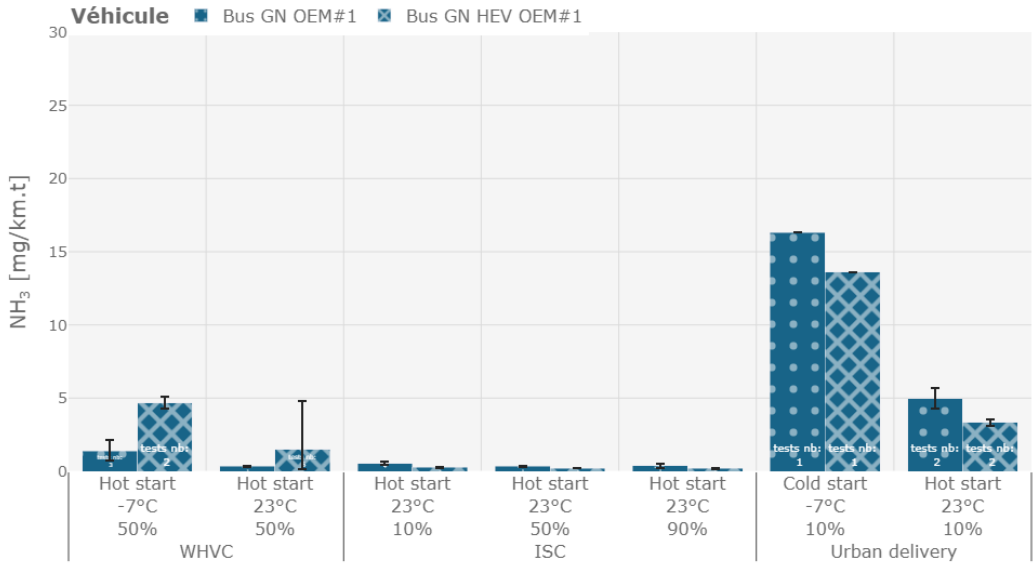


Figure 42 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de NH_3

PN$_{10}$: Grâce au filtre à particules, les émissions de PN$_{10}$ des deux véhicules sont extrêmement faibles (Figure 43). Les émissions sont en moyenne 5 fois plus élevées pour le cas hybride, ce qui peut être dû aux plus nombreuses phases d'arrêt et démarrage moteur et au fonctionnement du moteur à plus faible charge lors des transitoires.

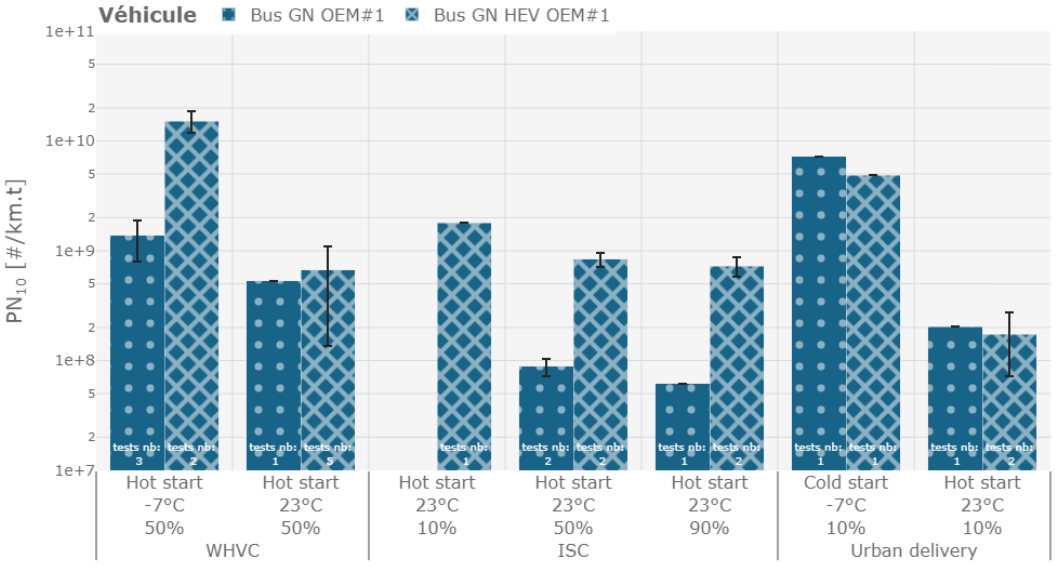


Figure 43 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de PN$_{10}$

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.9.

La comparaison des résultats de ces véhicules par rapport aux seuils normatifs actuels et futurs est détaillée dans les paragraphes 6.8.2 et 12.15.

6.6. Diesel PHEV

A retenir :

Les émissions de CO_2 sont très sensibles au mode d'utilisation. Le mode « recharge » est particulièrement énergivore et émissif. Une augmentation des émissions de CO_2 comprise entre 30% et 200% est mesurée par rapport au mode de maintien de charge. Concernant les émissions de NO_x, il existe un compromis en mode « épuisement de charge » entre les émissions nulles en mode ZEV et les pics d'émissions observés lors des redémarrages moteur. En mode « recharge », les émissions de NO_x restent maîtrisées, de même que les émissions de particules. Les émissions des autres polluants (CO, THC, NH_3, N_2O et CH_4) sont très faibles.

Les gains de CO_2 seront donc – à l'image des véhicules particuliers PHEV – très dépendants de l'utilisation qui sera faite de ce camion qui permet d'effacer grâce au mode ZEV les usages urbains, de manœuvre, de chargement / déchargement qui sont les plus émissifs.

Périmètre :

Tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte, à l'exception des essais sur cycle WHVC et les essais avec démarrage à froid. En effet, pour ces conditions, seuls des essais en mode « maintien de la charge » ont été réalisés, ne permettant pas de déterminer l'impact du mode de roulage sur les émissions.

CO_2 : Le mode « épuisement de charge » permet de fortement limiter les émissions de CO_2, en particulier sur cycle urbain (Figure 44 – gauche). Une baisse des émissions (en g/km.t) de l'ordre de 10% est obtenue par rapport au mode maintien de charge sur cycle ISC. Ces émissions peuvent chuter de 60% à 70% sur cycle urbain. Au contraire, le mode « recharge » conduit à une augmentation des émissions comprise entre 30% et 200%.

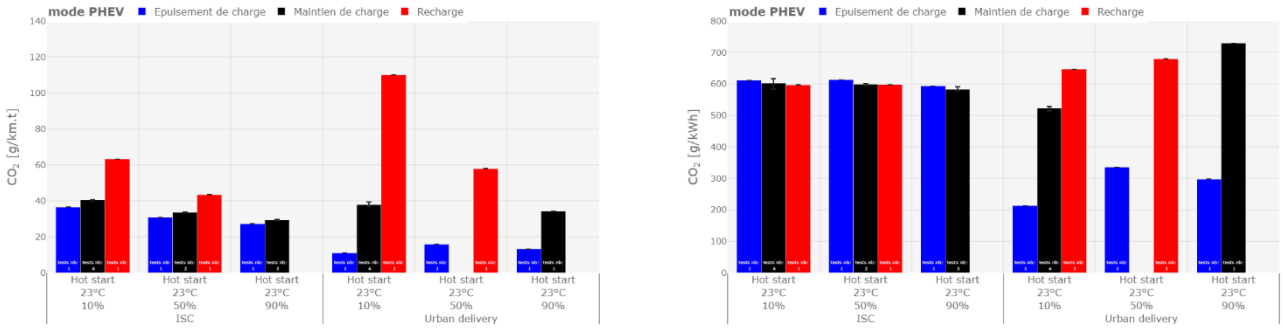


Figure 44 : Diesel PHEV – Emissions spécifiques de CO_2 en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

En cas d'analyse des émissions de CO_2 par unité d'énergie (en g/kWh), les résultats sont différents (Figure 44 – droite) : sur cycle ISC aucune différence n'est observée, sur cycle urbain les émissions de CO_2 sont très significativement inférieures pour le mode « épuisement de charge ». Une baisse de 60% des émissions est mesurée par rapport au mode maintien de charge. Les émissions augmentent en mode « recharge » : la recharge batterie s'effectue en partie sur des points de fonctionnement de mauvais rendement.

Compromis CO_2 vs NO_x : La Figure 45 représente les émissions des NO_x en vis-à-vis des émissions de CO_2 en distinguant les différents modes d'usage (couleurs) et les masses embarquées en % (taille des marqueurs). L'abaissement de la demande énergétique au moteur thermique en mode « épuisement de charge » n'œuvre pas

en faveur d'une limitation des émissions de NO_x sur cycle Urban delivery (Figure 45). Le meilleur compromis est trouvé pour une faible charge de 10%.

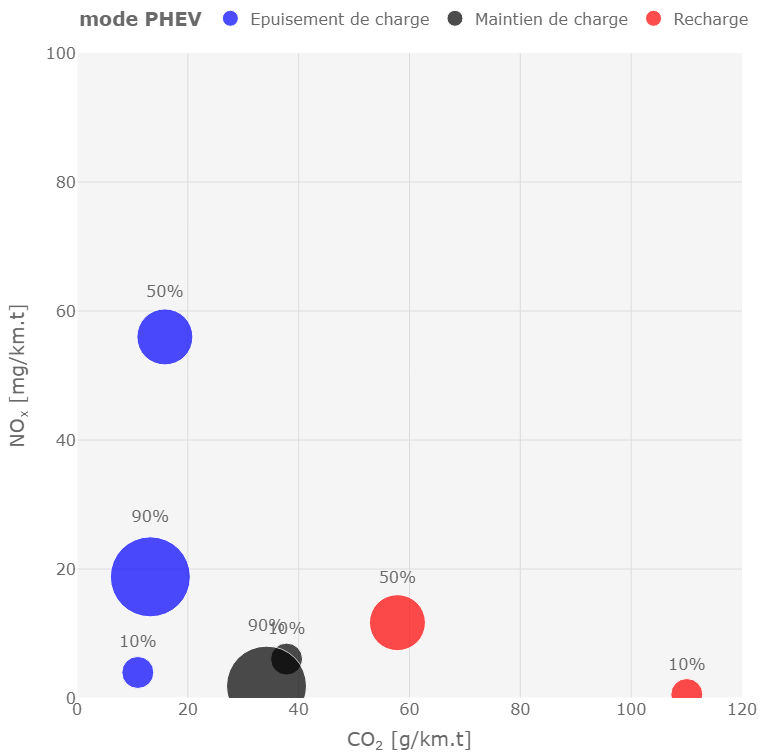


Figure 45 : Diesel PHEV – Compromis CO_2 vs NO_x – Cycle Urban delivery – Tamb = 23°C

NO_x : Les émissions de NO_x augmentent fortement en mode « épuisement de charge », elles peuvent être jusqu'à 20 fois supérieures à celles mesurées en mode maintien de charge, en effet, en mode « épuisement de charge », le roulage est avant tout effectué en tout électrique, le post-traitement n'est quant à lui pas activé car il ne reçoit pas d'énergie thermique. Chaque sollicitation sur le moteur thermique va donc être difficilement captée par le post-traitement (SCR dans le cas des NO_x). C'est d'autant plus vrai lorsque le moteur démarre, et exacerbé sous forte charge. Les émissions de NOx restent maitrisées en mode « recharge » (Figure 46) ; c'est-à-dire que la thermique échappement et l'efficacité du post-traitement dans ce mode compense les émissions supérieures à la source provoquée par l'augmentation de charge moteur.

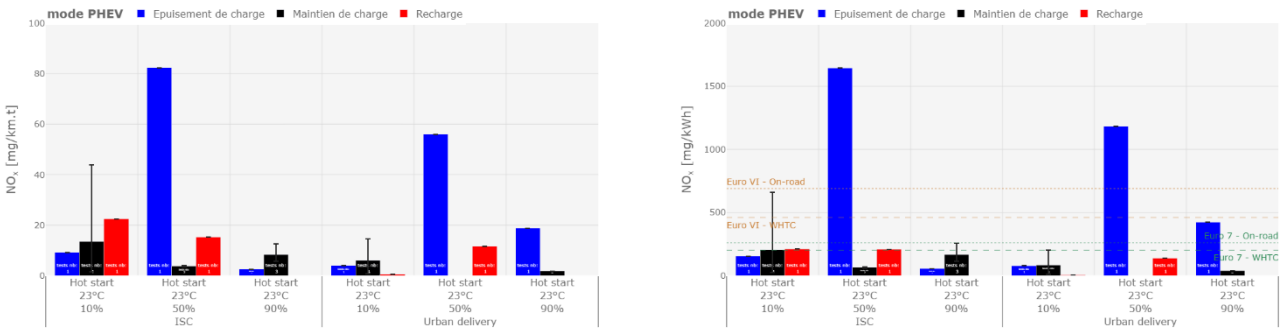


Figure 46 : Diesel PHEV – Emissions spécifiques de NO_x en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

PN_{10} : Les émissions de particules restent très contenues même en mode « recharge » (Figure 47).

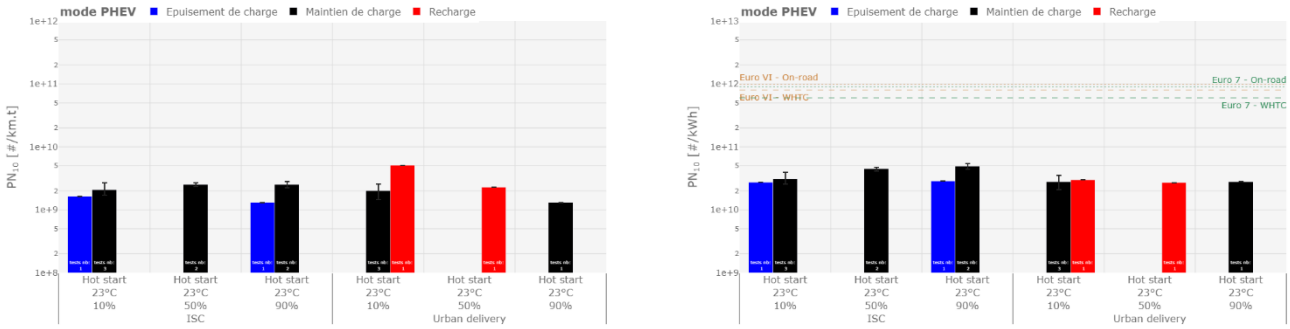


Figure 47 : Diesel PHEV – Émissions spécifiques de PN_{10} en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.10.

6.7. Émissions en usage réel : analyse de la sensibilité aux conditions d'usages

A retenir :

La mise en place d'un système autonome de mesure et de collecte de données par télémétrie a permis une analyse poussée sur plusieurs mois d'usage en conditions réelles. Ces mesures couplées à un enrichissement par de la simulation véhicule offre la possibilité de recalculer les émissions massiques en usage réel. Environ 32 000 km, sur des trajets moyens de 27 km (1165 trajets) ont été parcouru.

L'usage réel peut être distingué entre N2, N3 et M3 avec des temps de trajets moyens, des distances moyennes et des vitesses moyennes différentes entre ces familles.
D'un point de vue émissions de NO_x, il ressort que quelques usages bien que limités (moins de 3.7% de la distance totale parcourue), contribuent pour 17% des émissions massiques et se caractérisent principalement par des phases à kilométrage faible avec un temps d'arrêt très important durant lequel le moteur est au ralenti. La pente est aussi un facteur important sur la quantité de NO_x émise ainsi que la fenêtre de température du système de post-traitement des NO_x ([250-350°C] pour le Diesel et [350-600°C] pour le GNV).

La comparaison entre les mesures CEMS, en laboratoire et sur route (ISC) montre des comportements proches pour les véhicules Diesel et des écarts plus importants pour les véhicules gaz. Ces résultats s'expliquent par un écart dans les conditions couvertes par les essais CEMS notamment avec des conditions avec une part urbaine plus importante que sur l'échantillon laboratoire avec une occurrence plus importante des plages de températures post-traitement peu favorables à l'efficacité du système SCR.

La comparaison des résultats obtenus avec l'approche des facteurs d'émission fournis par COPERT montre des tendances correctement représentées mais une sous-estimation pouvant aller jusqu'à 80% par COPERT, liée au manque d'informations telles que la pente, ou la dynamique de conduite dans l'estimation des émissions.

Ces résultats montrent donc l'importance de la prise en compte des comportements de conduite et d'usage en général vis-à-vis de la réduction des émissions.

Périmètre :

Tous les véhicules testés en B7 pour les véhicules Diesel, B100 pour le véhicule B100 exclusif et en GNV pour les véhicules GNV et Dual Fuel. Tous les essais effectués en laboratoire, sur route (ISC) et en condition réelle d'utilisation (CEMS)

6.7.1. Introduction et enrichissement des données en usage réel

Les données en usage réel sont collectées par le système CEMS (Continuous Emissions Measurement System) sur l'ensemble des 10 véhicules. Cette technologie, largement utilisée dans de nombreuses campagnes de mesure sur divers types de machines et véhicules, garantit une précision et une continuité des informations. Les données mesurées par le système CEMS, couplées aux données CAN J1939, sont transmises par télématique à une fréquence de 1 Hz, offrant ainsi une vue détaillée et en temps réel des paramètres d'émission.

L'objectif principal de cette campagne est de compléter les résultats des essais réglementaires, habituellement réalisés dans des conditions contrôlées. Ces essais, bien qu'indispensables, ne reflètent pas toujours la complexité

des environnements réels de conduite, qu'ils soient urbains ou ruraux. Par exemple, les cycles de conduite standards ne prennent pas systématiquement en compte les arrêts fréquents, les embouteillages, les manœuvres ou les variations de vitesse caractéristiques des trajets réels. Dans ce contexte, les signaux collectés par le système offrent une richesse d'informations, incluant :

- **GPS :** date, latitude, longitude, vitesse et altitude.
- **CAN J1939 :** consommation de carburant, vitesse, consigne de couple (indiqué, effectif, frottement), température moteur, rapport engagé, régime du moteur.
- **CEMS :** concentrations de NO_x, teneur en oxygène, températures d'échappement et divers indicateurs de diagnostic des sondes.

Ces mesures sont enrichies par l'utilisation d'une sonde de NO_x installée dans l'échappement. Celle-ci permet de mesurer les teneurs en oxygène et les NO_x, bien que ses mesures incluent également le NH_3.

À partir des données brutes récupérées, des signaux dérivés peuvent être calculés, comme le couple moteur, la puissance demandée, la masse embarquée, ou encore le débit des gaz et des émissions NO_x. Grâce aux modèles de simulation énergétique, il est possible d'estimer la masse embarquée dans le véhicule. Cette information est précieuse, comme illustré dans les paragraphes 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 ou encore 6.6, et difficilement récupérable in-situ. Ces signaux sont ensuite intégrés au processus de *map-matching*, une méthode qui aligne les données GPS avec le réseau routier. Ce procédé permet d'améliorer la précision des trajectoires et de fournir des informations fiables sur la vitesse, la pente ou encore le type de route emprunté. Toutefois, certains trajets en « manœuvre », comme ceux effectués dans des zones privées, ne sont pas *map-matchés*.

6.7.2. Analyse de l'usage réel

En total il y a eu 1 165 trajets réalisés, couvrant près de 900 heures et plus de 32 000 km, décrits dans le Tableau 15, avec une répartition équilibrée du temps passé dans les zones urbaines, rurales et autoroutières. Cette diversité permet de mieux comprendre l'impact des émissions selon les types de trajets. Notamment, 11,5 % des usages concernent des trajets en manœuvre (zones privées), souvent très courts (environ un km).

Tableau 15: Descripteurs macroscopiques de l'usage réel pour chaque véhicule.

Véhicule	Nombre de trajets	Durée totale (h)	Distance totale (km)	Distance moyenne (km)	Temps l'arrêt (%)	Nombre de trajets en manœuvre	Zone urbaine (%)
N2 GO OEM#1	26	21	844	31	9,5	1	46,6
N3 GO OEM#3	145	96	3 425	23	31,9	2	51,6
N3 B1 OEM#3	114	106	5 360	47	22,4	13	28,5
N3 GO OEM#2	154	194	10 024	65	21,3	26	27,4
N3 GO PHEV OEM#2	204	169	5 882	29	34,2	19	45,8
N2 GN OEM#1	26	20	1 108	41	12,7	1	33,5
N3 GN OEM#2	256	160	3 628	14	52,2	61	52,6
Bus GN OEM#1	3	27	483	121	35,4	0	88,9
Bus GN HEV OEM#1	9	34	564	56	37,0	0	86,4
N3 DF OEM#4	219	63	755	3	9,1	12	16,7
Total	**1165**	**890**	**32 072**	**27**	**30,3**	**135**	**42,2**

De plus, chaque segment de véhicule (N2, N3, M3) présente des comportements distincts : les N2 et M3 opèrent principalement en zones urbaines, tandis que les N3 affichent une plus grande polyvalence comme affiché sur le Tableau 16.

Tableau 16: Descripteurs macroscopiques de l'usage réel par segment du véhicule.

	N2	N3	M3
Distance moyenne (km)	36.14	26.5	74.77
Distance totale (km)	1951	29014	1046
Temps moyen (min)	45	44	270
Vitesse moyenne (km/h)	20.74	36.61	36.39
Temps à l'arrêt (%)	35.58	30.28	16.94
Temps urbaine lente (%)	10.2	5.4	39.1
Temps urbaine (%)	30.7	35.1	48.7
Temps rurale (%)	35.5	34.0	12.2
Temps autoroute (%)	23.6	25.4	0.0

6.7.3. Analyse des émissions en usage réel

L'objectif de cette section est de réaliser une analyse approfondie des émissions de NO_x et de leur corrélation avec l'usage réel. Une première analyse globale peut être menée en étudiant les émissions de NO_x totales, normalisées par rapport à la distance, présentées dans la Figure 48(a). On observe que certains trajets sont particulièrement émetteurs, mais ce résultat peut être biaisé par la normalisation selon la distance parcourue : le véhicule n'a pas eu suffisamment de temps pour activer son système de post-traitement. Afin d'obtenir une vision plus complète de ces niveaux d'émissions, la Figure 48(b) illustre également la variation (médiane et interquartile [du 25ème au 75ème percentile]) des émissions instantanées, lorsqu'elles ne sont pas nulles.

En ce qui concerne un véhicule qui semble très émetteur au premier abord, comme le véhicule N3 GO OEM#2, il apparaît en réalité que ses émissions instantanées et son pourcentage de temps à émissions nulles (efficacité de conversion de 100 %) sont comparables à ceux du véhicule N3 GO OEM#3. De plus, la valeur médiane des émissions

est inférieure pour le véhicule N3 GO OEM#2. Cela signifie que ce sont des trajets spécifiques qui produisent des valeurs particulièrement élevées.

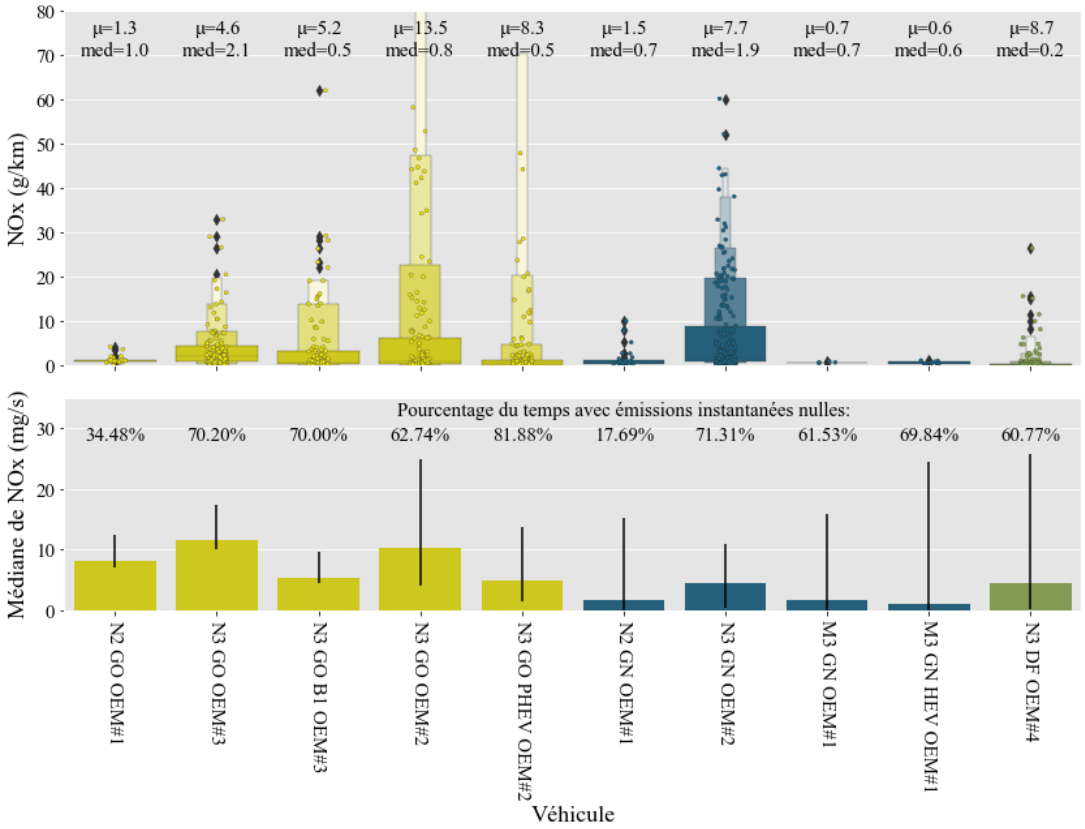


Figure 48: (a) Distribution des émissions de NO_x par véhicule.
(b) Emissions médianes instantanées et écart interquartile.
En jaune les véhicules diesel ; en bleu les véhicules gaz et en vert le véhicule dual fuel

En fait, les trajets fortement émetteurs se caractérisent non seulement par une distance limitée, inférieure à 10 km, mais aussi par un temps important passé au ralenti avant le démarrage effectif du véhicule, contribuent de manière disproportionnée aux émissions globales. Et, bien qu'ils ne représentent que 3,77 % des kilomètres totaux sur les 10 véhicules, ils génèrent 17 % des émissions massiques. Inversement, les trajets longs, dominant en distance parcourue, affichent des émissions spécifiques beaucoup plus faibles grâce à l'activation du post-traitement comme affiché sur le Tableau 17.

Tableau 17: Répartition du temps, de la distance et des émissions en fonction de la distance totale parcourue pour chaque trajet par carburant.

Indicateur	Diesel				Gaz naturel			
	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)
$d \leq 1\ km$	3.7	0.2	4.8	17.1	10.3	0.4	5.7	11.3
$1 < d \leq 5\ km$	3.6	0.7	7.2	6.2	7.5	1.8	7.8	3.7
$5 < d \leq 10\ km$	2.8	1.1	5.8	3.4	4.4	2.4	5.6	2.0
$10 < d \leq 50\ km$	28.6	20.9	35.2	1.1	38.9	43.0	46.8	0.9
$d > 50\ km$	61.3	77.1	47.0	0.4	38.9	52.5	34.1	0.5

Au-delà de la distance, d'autres axes d'analyse enrichissent cette étude, comme l'impact du type de route. Par exemple, la Figure 49 présente la contribution des émissions (anneau extérieur), le temps passé (anneau central) et la distance totale parcourue (anneau intérieur) par type de route. Les données montrent une répartition contrastée du temps passé et de la contribution aux émissions de NO_x en fonction des types de zones et de motorisation.

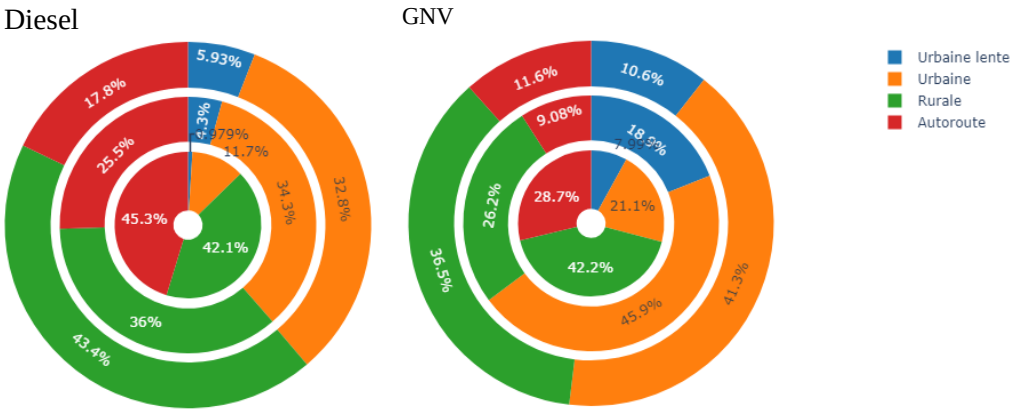


Figure 49: Contribution des émissions NO_x (anneau extérieur), répartition des catégories de roulage en fonction du temps (anneau central) et en fonction de la distance totale (anneau intérieur) par carburant.

Cette classification par zones (urbaine lente, urbaine, rurale et autoroute) révèle que les zones urbaines lentes concentrent une part importante des émissions, malgré des distances réduites. En comparaison, les zones rurales et autoroutières, bien qu'elles couvrent des distances significatives, présentent des émissions spécifiques nettement inférieures. Les zones urbaines classiques se situent dans une position intermédiaire.

La pente constitue un autre facteur clé. En classifiant les pentes en cinq catégories (forte descente, descente modérée, plat, montée modérée, forte montée) affichées dans le Tableau 18, les données montrent une corrélation marquée entre les niveaux de pente et les émissions. Les montées, bien qu'occasionnelles, augmentent significativement les émissions spécifiques, tandis que les descentes, peu sollicitées en termes moteurs, affichent des niveaux très faibles. Les conditions de plat, stables, se traduisent par des émissions modérées. Cependant, il n'existe pas de compensation entre montées et descentes, les émissions accrues en montée n'étant pas équilibrées par les réductions en descente.

Tableau 18: Répartition du temps, de la distance et des émissions en fonction du niveau de pente par carburant.

Indicateur	Diesel				Gaz naturel			
	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)
Forte descente	3.8	3.9	1.6	0.2	7.1	6.1	2.7	0.4
Descente	29.2	29	21.7	0.5	26.4	25.6	21.9	0.7
Plat	32.6	33.6	31.1	0.6	31.7	35.9	32.8	0.7
Montée	26.5	24.6	30.4	0.8	23.2	21.3	23	0.8
Forte montée	7.9	8.8	15.2	1.1	11.6	11.2	19.7	1.4

Enfin, les conditions de température influencent considérablement les émissions, en particulier au début des trajets. Afin de mieux comprendre l'impact, dans la Figure 50, la surface colorée indique l'intervalle interquartile (du 25e au 75e percentile) des émissions instantanées pour chaque intervalle de la température du système de post-traitement. Les véhicules Diesel montrent des émissions élevées à des températures inférieures à 200 °C, tandis que ceux à gaz naturel réduisent nettement leurs émissions à des températures supérieures à 250 °C.

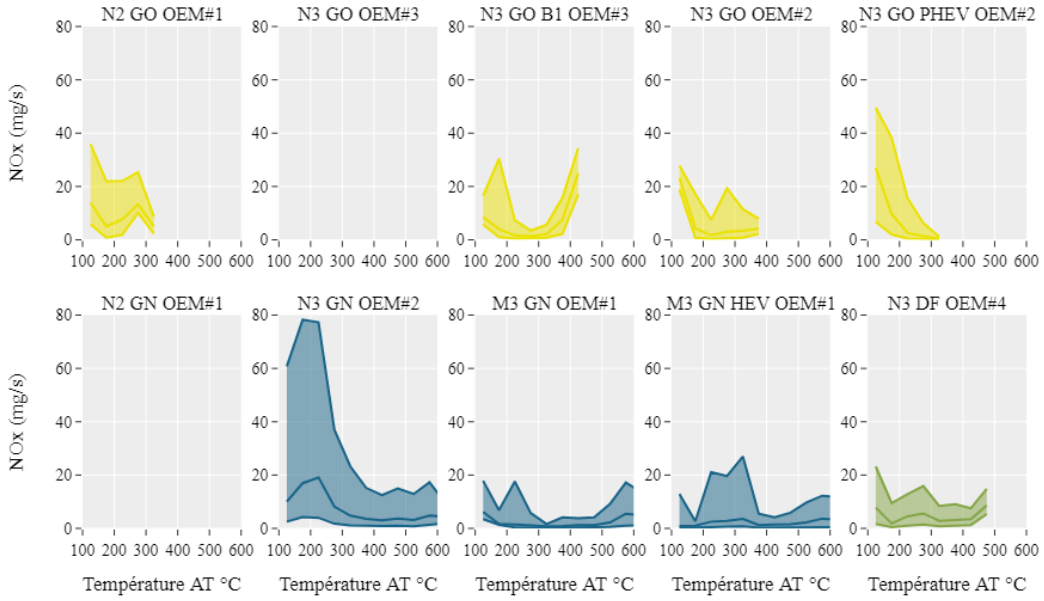


Figure 50: Distribution des émissions instantanées corrélées à la température post-traitement. L'aire représente l'écart interquartile (25e à 75e percentiles).

Une analyse par charge moteur souligne que les véhicules diesel et GNV opèrent majoritairement à faible charge moteur (<40%), où les émissions de NO_x restent modérées. Le GNV se distingue par des émissions spécifiques globalement plus faibles, même à des charges élevées. Toutefois, les zones de forte charge (>60%) montrent une montée des émissions pour les deux carburants, soulignant les limites des systèmes de post-traitement dans ces conditions.

6.7.4. Comparaison avec les essais laboratoires

Il est pertinent d'explorer les différences de mesure entre les usages réels et les essais expérimentaux. Les résultats obtenus dans des conditions de laboratoire peuvent souvent diverger significativement de ceux observés dans la réalité quotidienne des usagers. L'objectif est de comprendre si cet écart est principalement expliqué par des facteurs liés à l'usage, tels que les conditions de conduite, les comportements des conducteurs ou les caractéristiques des trajets effectués, plutôt que par une disparité dans les méthodes de post-traitement des émissions. La distance minimale parcourue lors des essais expérimentaux est de plus de 19 km. Après avoir examiné l'impact des émissions normalisées par rapport à la distance, il est donc intéressant de se concentrer sur les mêmes types de trajets. Ainsi, compte tenu de la différence de nature entre les mesures CEMS et les essais expérimentaux, il est également pertinent d'ajouter la masse de NH3 dans les essais expérimentaux pour être dans le même axe référentiel. Cette comparaison est affichée dans la Figure 51.

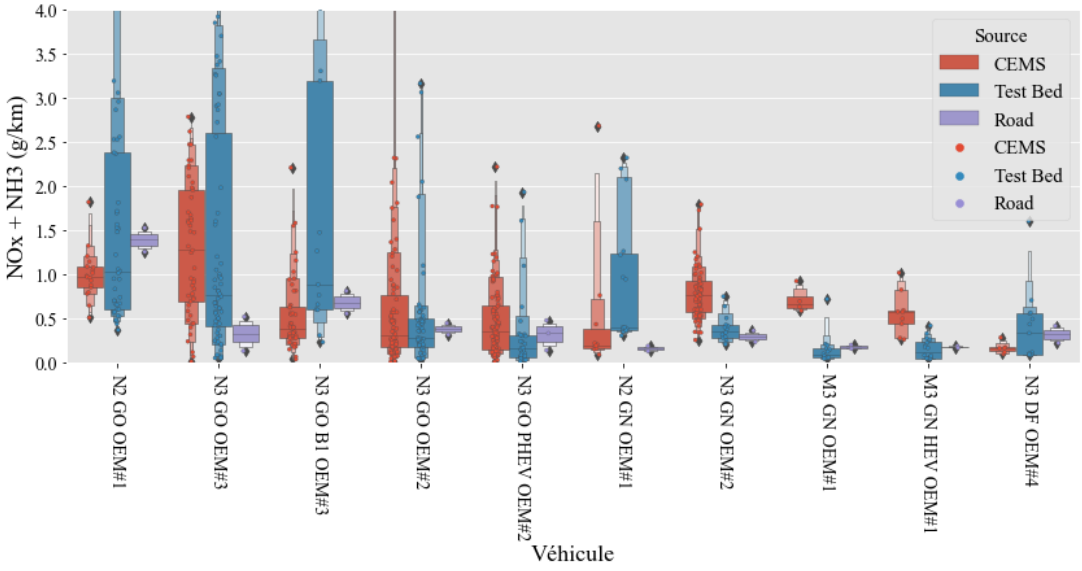


Figure 51: Distribution des émissions de NO_x par véhicule pour les trajets supérieurs à 19 km parcourus. Addition de NH3 pour les essais laboratoires et essais sur route.

Sur la Figure 51, l'amplitude des résultats des essais laboratoires (boxplots bleus) s'explique par la relative diversité des cycles et conditions pris en compte (températures ambiantes et au démarrage + masse embarquée). Pour les essais route (boxplots violets), c'est le comportement inverse, ces essais sont des ISC sur route réalisés dans des conditions similaires sur un faible échantillon de résultats, sans variation de la masse embarquée, ni de conditions de température (répétitions effectuée sur des journées consécutives). Pour les véhicules Diesel, la tendance sur les émissions semble respectée entre essais laboratoires et CEMS. Pour les véhicules gaz, les résultats des essais CEMS présentent des émissions plus importantes. La Figure 52 retranscrit la distribution d'émissions en usage réel et dans les essais laboratoires en fonction de la température du post traitement afin de comprendre cet écart. Les distributions des véhicules gaz dont les écarts sur les résultats sont les plus forts (N3 GN OEM#2, M3 GN OEM#1 et M3 GN HEV OEM#1) présentent le plus de différence avec une partie portée sur les températures inférieure à 200°C plus forte, traduisant des essais avec démarrage à foid et/ou avec des vitesses faibles et/ou avec peu de chargement embarqué. Les trois véhicules les plus émetteurs dans l'usage réel sont aussi les trois véhicules qui ont passé plus de temps en zone urbaine affiché dans le Tableau 15.

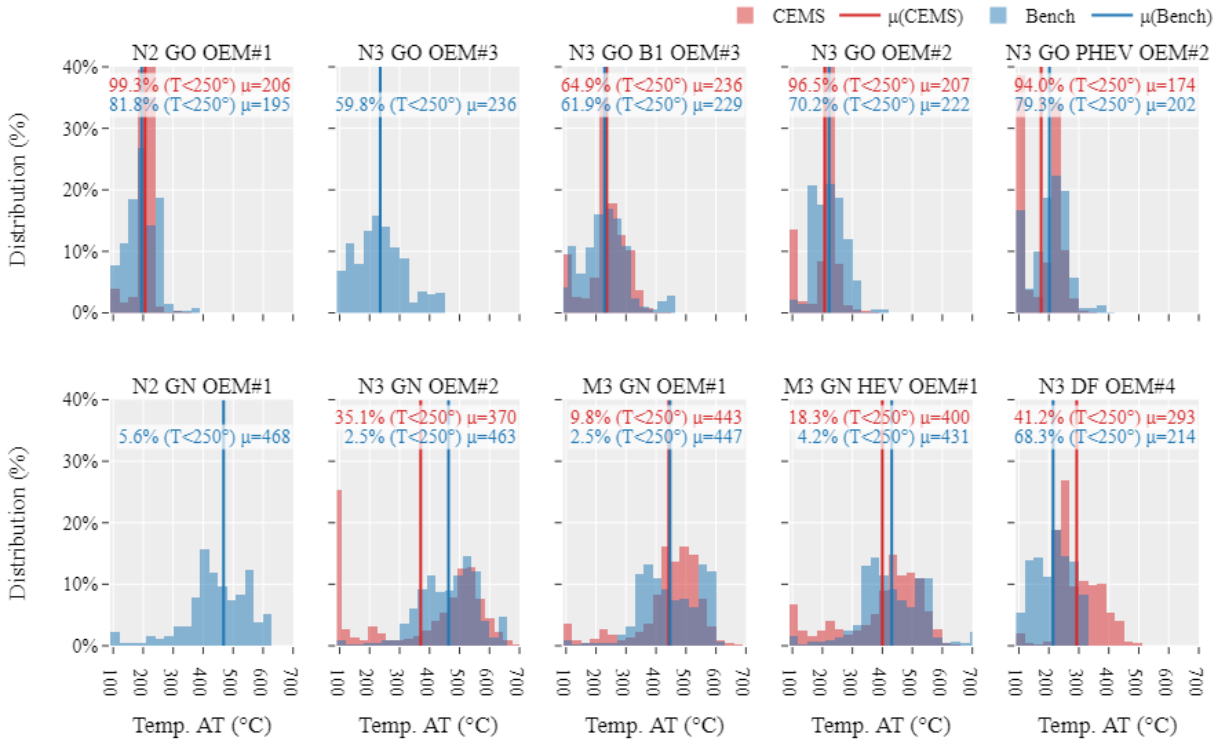


Figure 52: Comparaison de la distribution de la température à la sortie du post-traitement entre les essais CEMS et laboratoires, μ=valeur moyenne.

Ainsi, ces résultats montrent que les émissions les plus importantes sont souvent le reflet de conditions d'usage sévères de type roulage en condition urbaines avec un post-traitement faiblement chargé thermiquement qui fonctionne donc dans une zone non optimale de conversion. Ces paramètres d'usage, tels que la vitesse instantanée et la proportion de temps passée en zones à faible vitesse doivent être pris en compte pour mieux comprendre et réduire les émissions en conditions réelles en adéquation avec les technologies mises en œuvre.

6.7.5. Comparaison avec l'état de l'art

L'état de l'art, COPERT, largement utilisé pour les évaluations à grande échelle, simplifie les estimations des émissions en s'appuyant sur la vitesse moyenne comme entrée principale, en s'appuyant sur les données récupérées des mesures ainsi que du HBEFA est une base de données fournissant des facteurs d'émission spécifiques en g/km. Cette approche néglige des facteurs critiques tels que la variation de pente instantanée de la route, le style de conduite et les comportements dynamiques tels que l'accélération et la décélération, qui ont un impact significatif sur les niveaux d'émissions.

La Figure 53 illustre les émissions moyennes de trois véhicules diesel articulés appartenant à la même catégorisation COPERT, mettant en lumière les limites et les atouts des approches basées sur l'état de l'art. Comme cela a été

rapporté dans la littérature, les trajets avec des vitesses moyennes faibles tendent à être plus polluants, une tendance clairement corroborée par les données mesurées.

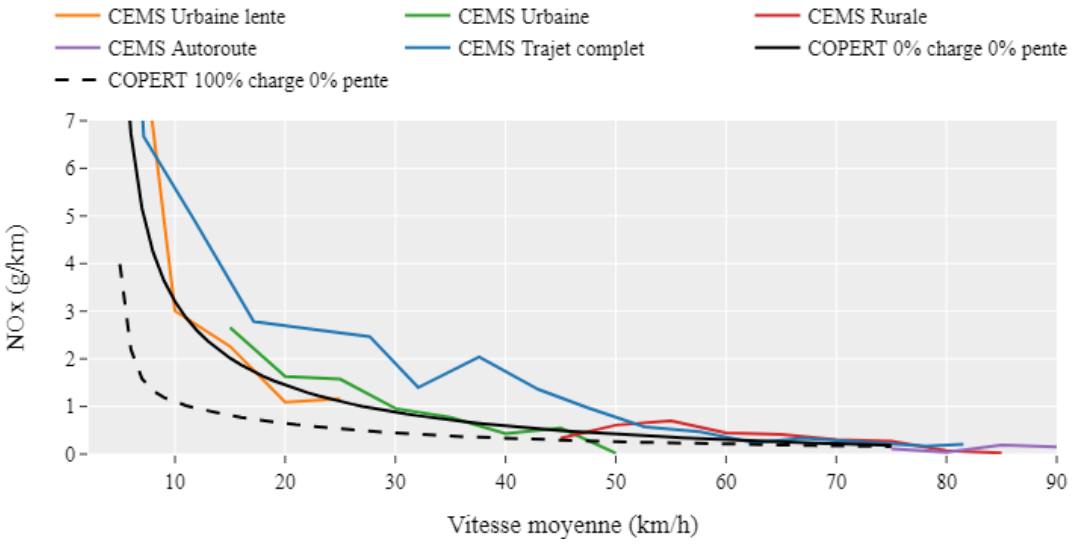


Figure 53: Comparaison de l'impact de vitesse moyenne sur le niveau d'émissions à chaud en usage réel par trajet complet et par type de zone contre l'état de l'art COPERT à 0% et 100% de charge pour la catégorie poids lourds diesel articulés 40 -50 T.

Dès lors que les trajets sont segmentés par type de route (urbain, rural, autoroute), l'impact de la vitesse moyenne est mieux capturé par l'état de l'art. Néanmoins, l'approche standard de l'état de l'art repose souvent sur une vitesse moyenne unique pour l'ensemble du trajet et dans ce cas-là, l'écart est particulièrement marqué, atteignant plus de 80 % de sous-estimation par rapport aux résultats agrégés sur les 10 véhicules.

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.13.

6.8. Comparaisons chiffrées

6.8.1. Comparaison aux résultats d'homologation de chaque véhicule

A retenir :

Un effort a été porté afin de récupérer les valeurs d'homologation des 10 véhicules testés. Cependant toutes les valeurs ne sont pas disponibles pour chacun des véhicules testés.

Les valeurs d'homologation sont mesurées sur un cycle WHTC, réalisé sur banc moteur (sans véhicule). Le cycle WHVC a été développé pour s'en rapprocher mais n'est pas reconnu d'un point de vue homologation.

Les données énergétiques provenant de l'ECU sont prises en référence malgré les réserves portées sur certains véhicules (paragraphe 5.5.2), seuls les ordres de grandeurs sont comparés.

Il ressort tout de même de cette analyse, que les émissions mesurées sont globalement proches de celles déclarées lors de l'homologation des véhicules, à l'exception des émissions de NO_x, plus élevées lors de cette étude, principalement sur les porteurs N2 GO OEM#1 et N2 GNV OEM#1. Dans le cas du véhicule N3 DF OEM#4 les émissions de particules sont significativement plus élevées.

Du point de vue du CO_2, les ordres de grandeurs sont conformes aux résultats WHTC.

Cette analyse met en évidence finalement une assez bonne corrélation entre les essais WHTC et WHVC.

Périmètre :

Les données de l'étude prises en compte concernent uniquement les essais sur cycle WHVC avec Tamb = 23°C pour correspondre au cycle normatif WHTC. De plus, seules les données correspondant au Step d'homologation des véhicules sur la phase de calcul normatif sont utilisées.
Pour les véhicules Diesel, les données concernant le carburant B7 sont prises en compte.

Pour chaque véhicule, il est possible de comparer les données mesurées au cours de cette étude et les valeurs officielles déclarées lors de l'homologation.

Les données officielles déclarées lors de l'homologation sont calculées sur cycle WHTC. Pour les véhicules GNV, les données concernant un carburant gaz type Gr sont utilisées.

Il est à noter que les données concernant l'homologation sont relatives à l'énergie et non à la distance. Les données énergétiques provenant de l'ECU ont été invalidées pour la majeure partie des véhicules, ainsi seuls les ordres de grandeurs peuvent être comparés. Les différences relevées sont correctes, sauf pour les émissions de NO_x, ainsi que pour les émissions de PN_{23} dans le cas du N3 DF OEM#4.

La Figure 54 montre l'écart relatif entre les données collectées et les données d'homologation concernant les émissions de CO_2. Ces écarts sont corrects, avec des émissions significativement plus élevées lors des essais pour les véhicules N2 GO OEM#1 et N3 GO OEM#2.

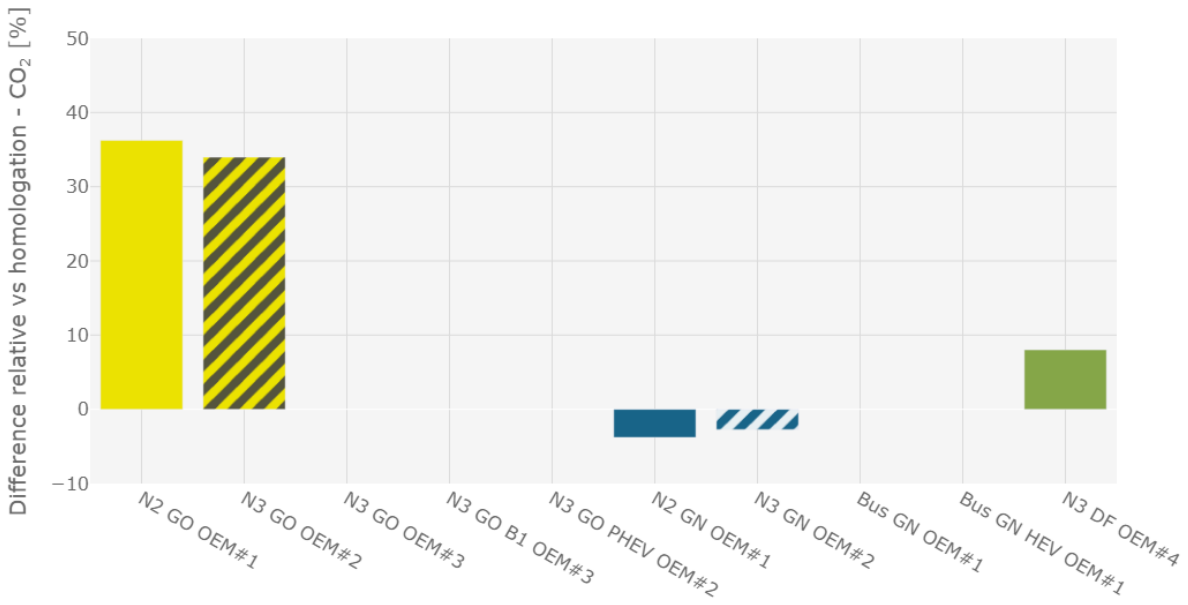


Figure 54 : Comparaison à l'homologation – CO_2

Concernant les émissions de NO_x (Figure 55), les émissions mesurées lors de cette campagne sont significativement supérieures aux valeurs d'homologation pour les deux porteurs, N2 GO OEM#1 et N2 GNV OEM#1 ainsi que pour le véhicule N3 B1 OEM#3. Les émissions de particules sont très élevées dans le cas du N3 DF OEM#4 (Figure 56).

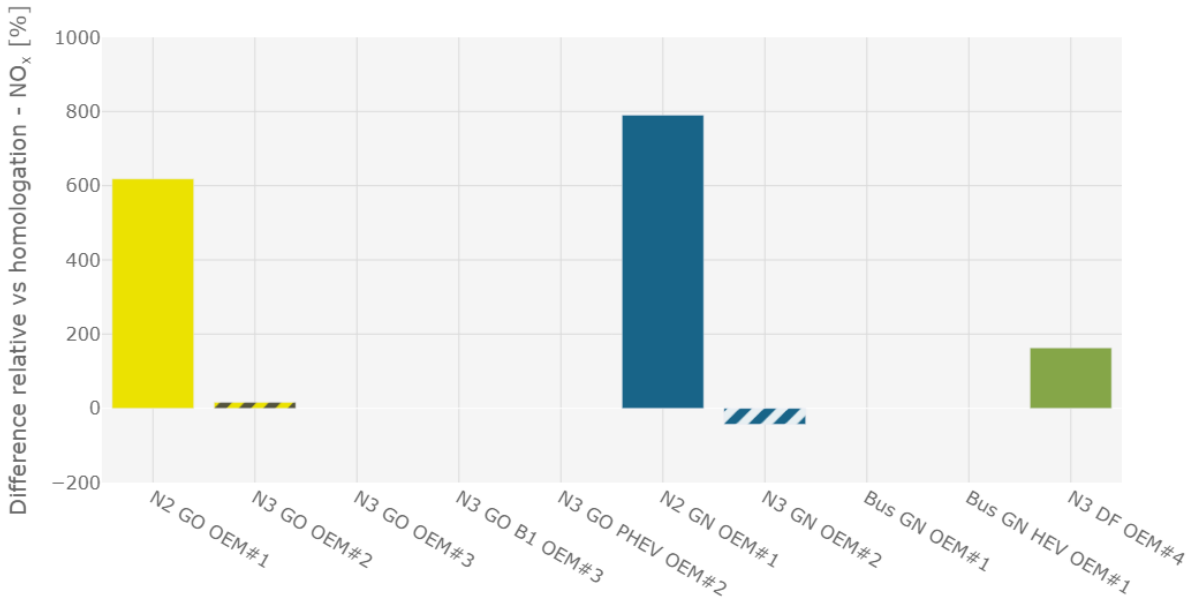


Figure 55 : Comparaison à l'homologation – NO_x

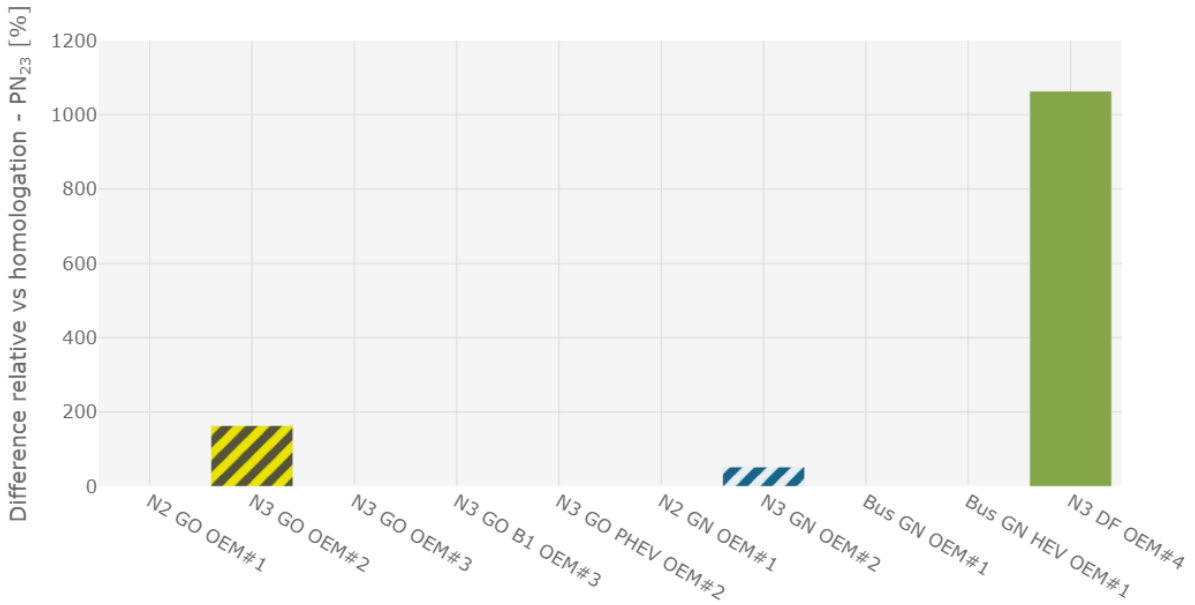


Figure 56 : Comparaison à l'homologation – Particules

6.8.2. Comparaison aux seuils normatifs Euro VI et Euro 7

A retenir :

De la même manière que les données peuvent être comparées aux valeurs d'homologation (paragraphe 6.8.1), les résultats ont été comparés aux seuils normatifs Euro VI et Euro 7.

Les données énergétiques provenant de l'ECU sont prises en référence malgré les réserves portées sur certains véhicules (paragraphe 5.5.2), seuls les ordres de grandeurs sont comparés.

Les limites normatives sont globalement respectées par les différents véhicules pour les différents polluants. Il existe toutefois des exceptions ponctuelles pour les émissions de NO_x d'un véhicule diesel et de particules du véhicule dual-fuel.

Périmètre :

Pour cette comparaison, seuls les essais WHVC tels que Tamb = 23°C sont pris en compte. De plus, chaque véhicule est comparé à la norme en fonction du step normatif qui lui est associé (Step C, Step D ou Step E). Seuls les essais avec le B7 sont pris en compte pour les véhicules Diesel, sauf pour le N3 GO B1 OEM#3.

Il est également possible de comparer les données mesurées avec les limites normatives. De la même façon que précédemment, pour respecter la norme, les données énergétiques provenant de l'ECU sont prises en référence malgré les réserves portées sur certains véhicules. Seuls les ordres de grandeurs peuvent être analysés.

Les limites normatives Euro VI sont globalement respectées par les différents véhicules. Seul le véhicule N2 GO OEM#1 pour les émissions de NO_x (Figure 57) et le véhicule N3 DF OEM#4 pour les émissions de particules (PN_{10} ou PN_{23}) (Figure 58) dépassent fortement les limites autorisées.

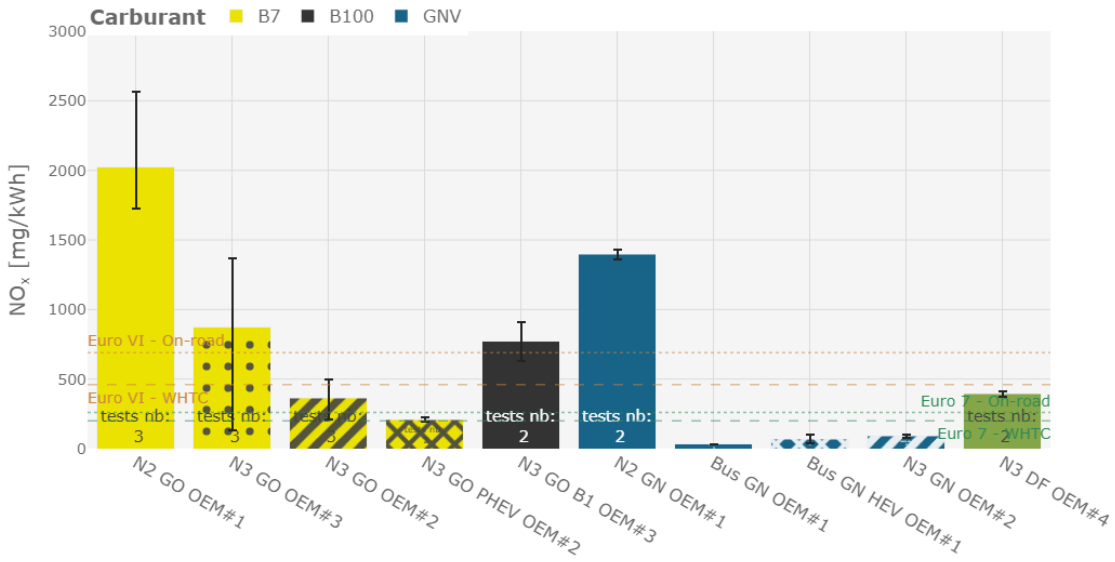


Figure 57 : Comparaison aux seuils normatifs – NO_x

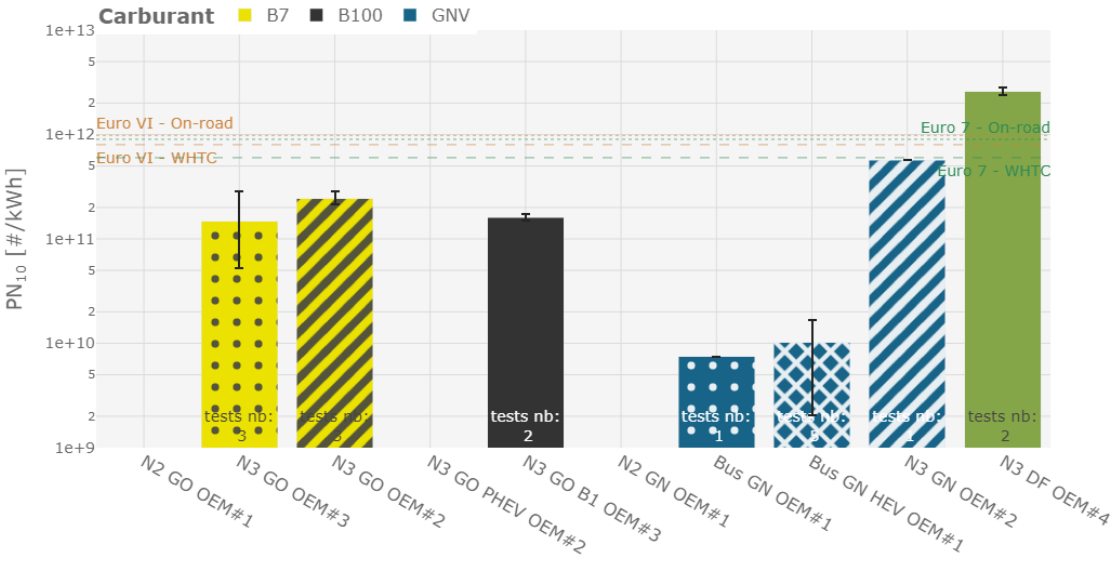


Figure 58 : Comparaison aux seuils normatifs – PN_{10}

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.15.

6.8.3. Comparaison à la littérature

A retenir :
Une étude bibliographique exhaustive a été réalisée sur une sélection de papiers ou rapports scientifiques (cf. Tableau 1).
Ces études ont été utiles pour définir les protocoles d'essai et de dépouillement et également comme base de comparaison sur les véhicules testés.

Une analyse des études les plus significatives est proposée en Annexe (Paragraphe 12.2). Sont retenus en particulier :

- Le projet EQUILIBRE qui vise à évaluer les performances économiques et environnementales des véhicules diesel et gaz dans des conditions réelles d'exploitation. L'étude se distingue des projets similaires en se concentrant sur la perspective du transporteur, examinant les facteurs tels que la route, le trafic et la météo. Sont retenus en particulier : la grande variabilité de la consommation et des émissions, l'impact significatif de l'usage urbain sur les émissions, l'importance des phases de livraison (manœuvres, opérations chez le client, stop & go). 86% des émissions de NOx d'un camion de distribution sont réalisées en conditions urbaines ou périurbaines (36 à 51% pour un camion grand routier). L'étude AirParif publiée en 2021 et financée par Île de France Mobilités sur des bus Diesel, Diesel hybrides et GNV de différentes générations qui permet de tirer des conclusions importantes sur les émissions réelles des bus en circulation en Île-de-France. On vérifie que les bus Euro VI émettent significativement moins de CO (facteur 2,5) et NOx (facteur 80) que les bus Euro IV. L'hybridation Euro VI a principalement un impact sur les émissions de CO2 (-17%). Au-delà de la norme et donc la technologique associée, la vitesse moyenne et le mode de conduite influencent fortement les émissions. Enfin, il est montré que les bus GNV Euro VI permettent de diminuer les NOx d'un facteur 7 par rapport aux bus Diesel Euro VI. Les particules fines GNV sont légèrement supérieures.
- Plusieurs études de l'ICCT, du CRMT et du JRC qui viennent appuyer ces résultats et mettent en avant l'importance des méthodes d'essai.

En ce qui concerne l'influence des carburants alternatifs :

- Les niveaux d'émissions obtenus avec HVO ou B100 sont proches de ceux du diesel. Il est difficile de discriminer leurs influences, en particulier en se limitant à des essais sur route.
- La motorisation GNV présente quand à elle un net avantage en comparaison à la motorisation diesel sur les émissions de NOx, en particulier en conditions urbaines. Les émissions d'hydrocarbures imbrûlés, de CO et dans une moindre mesure de PN sont quand à elle plus élevées dans le cas GNV. Les émissions de GES sont quant à elles similaires entre les deux moteurs : le gain du GNV via son rapport H/C plus favorable est contrebalancé par un rendement plus faible et d'éventuelles émissions de CH4 imbrûlé.

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.2.

6.9. Effet du traitement normatif et de la phase

6.9.1. Effet du traitement normatif

A retenir :

Des évolutions de traitement des mesures ont été appliquées à la norme Euro VI au fur et à mesure de son application, ces évolutions sont dénommées Step, et plus précisément Step C, Step D et Step E pour les véhicules testés.

Parmi les modifications de traitement se trouve la prise en compte des émissions à froid, c'est-à-dire lorsque la température d'eau moteur est inférieure à 70°C pour le Step D et 30 °C pour le Step E.

Ces critères ont été comparés aux émissions brutes, sans traitement appliqué afin de juger de l'effet de ces traitements sur les résultats annoncés. Il en résulte que des écarts importants sont visibles, notamment sur les NOx et le CO, ces écarts pouvant aller jusqu'à un facteur 5.

Trois traitements des émissions sont étudiés :

- Traitement brut : pas de filtre spécifique, les données brutes sont utilisées
- Traitement normatif Step D
- Traitement normatif Step E

La prise en compte des émissions selon le traitement normatif conduit à ne pas prendre en compte une partie du cycle : les polluants émis tels que la température d'eau est inférieure à 70°C (Step D) ou 30°C (Step E) ne sont pas comptabilisés. Ainsi, pour les essais avec démarrage à froid, les émissions calculées sur tout le cycle ou calculées selon la norme (Step D ou Step E) sont différentes. Une baisse des émissions calculées selon la norme est observée : une partie significative des émissions a lieu durant la phase froide et n'est pas prise en compte par la norme. Un exemple est montré sur la Figure 59 pour le CO et la Figure 60 pour les NO_x. Les polluants les plus impactés par le traitement normatif sont : le CO, les THC, le CH_4 et les NO_x. A noter que cette différence est plus faible en Step E qu'en Step D car la température d'eau seuil est plus faible.

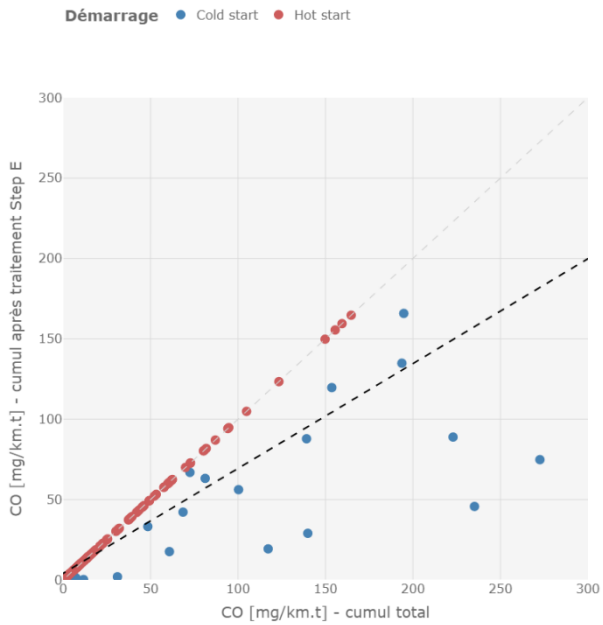


Figure 59 : Effet du traitement normatif – CO – Toute donnée laboratoire validée est prise en compte

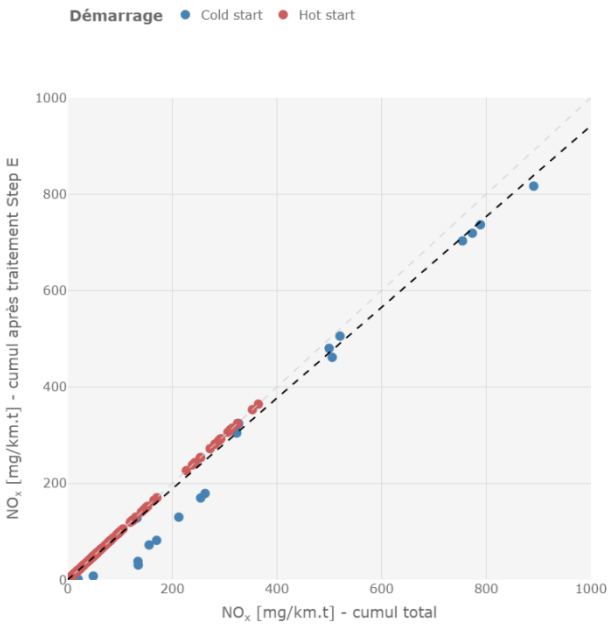


Figure 60 : Effet du traitement normatif – NO_x – Toute donnée laboratoire validée est prise en compte

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.11.

6.9.2. Effet de la phase

A retenir :

L'analyse des émissions selon un découpage du cycle par phases, soit basé sur la température d'eau moteur (froid, chaud), soit basé sur la vitesse véhicule (urbain, rural, autoroutier) montre que la majorité des émissions de polluants CO, NO_x se situent sur les phases froides et les phases urbaines.

Pour la phase froide, le moteur n'étant pas chaud, des réglages spécifiques pour favoriser sa montée en température peuvent dégrader les émissions, de plus le système de post-traitement n'est pas en température non plus et fonctionne hors de sa zone optimale, laissant passer une importante quantité d'émissions à l'échappement.

Pour la phase urbaine, il s'agit de conditions peu favorables aux systèmes de post traitement avec des fonctionnement généralement très transitoire du moteur, ce qui a tendance à augmenter les émissions à la source et peu d'énergie thermique emmagasinée par le post-traitement du fait de fonctionnement à faible vitesse et donc à charge moteur réduite. Ainsi, dans ce cas aussi le système de post-traitement fonctionnera hors de sa zone optimale.

Sept phases sont déterminées :

- Chaud : seules les émissions en phase chaude du cycle sont prises en compte
- Froid : seules les émissions en phase froide du cycle sont prises en compte
- Urbain : sont prises en compte les émissions pour la partie du cycle à faible vitesse
- Rural : sont prises en compte les émissions pour la partie du cycle à vitesse intermédiaire

- Autoroutier : sont prises en compte les émissions pour la partie du cycle à haute vitesse
- Cumul normatif : les émissions sont comptabilisées selon le traitement normatif associé (Step C, Step D ou Step E)
- Total : tout le cycle est pris en compte

Une forte augmentation des émissions durant la phase froide est observée pour tous les polluants, sauf pour NH_3 et les particules. La Figure 61 montre l'importance des émissions durant la phase froide du cycle dans le cas du CO, et la Figure 62 illustre les émissions par phases pour les NO_x. Ce niveau d'émissions est principalement dû à une faible efficacité du système de post-traitement.

Figure 61 : Effet de la phase – CO – Tout essai laboratoire validé est pris en compte

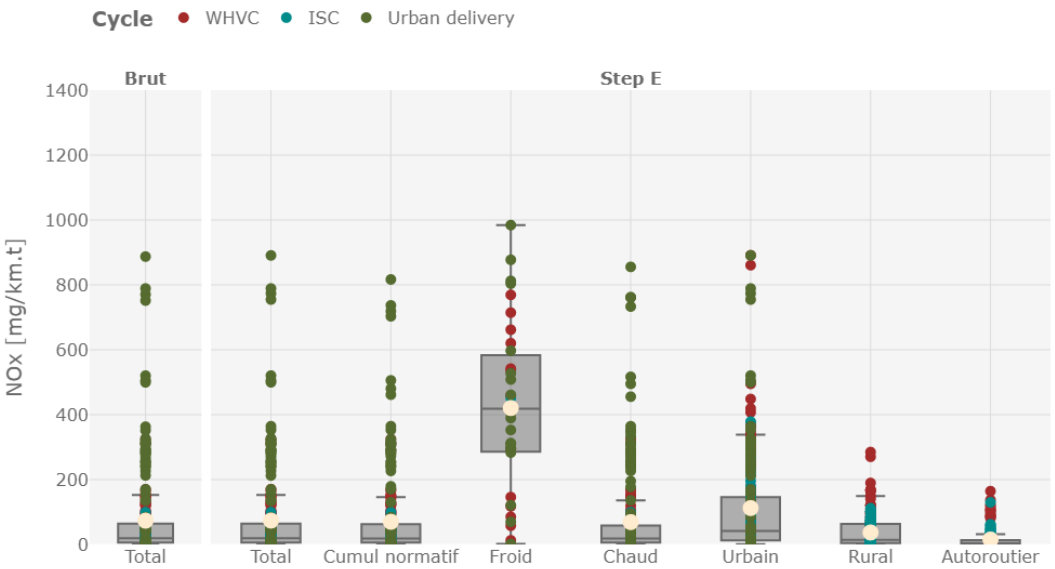


Figure 62 : Effet de la phase – NO_x – Tout essai laboratoire validé est pris en compte

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.11.

6.10. FOCUS - Efficacité des systèmes de dépollution

A retenir :
De la même manière que pour l'analyse des émissions menées dans le paragraphe 6.8.2, l'analyse des efficacités des systèmes de post-traitement des émissions (DOC ou 3W pour le CO, SCR pour les NOx, DPF ou GPF pour les PN) corrobore le constat que les conditions les plus défavorables sont les fonctionnements à froid (moteur et post-traitement froid consécutivement à un arrêt prolongé) et les phases urbaines, et notamment urbaines avec peu de charge embarquée.

L'analyse de l'efficacité des systèmes de dépollution montre une forte diminution de la capacité à convertir les polluants durant la phase froide du cycle, lorsque celle-ci existe. Tous les polluants sont impactés, sauf les particules. Un exemple est donné sur la Figure 63 pour le CO.

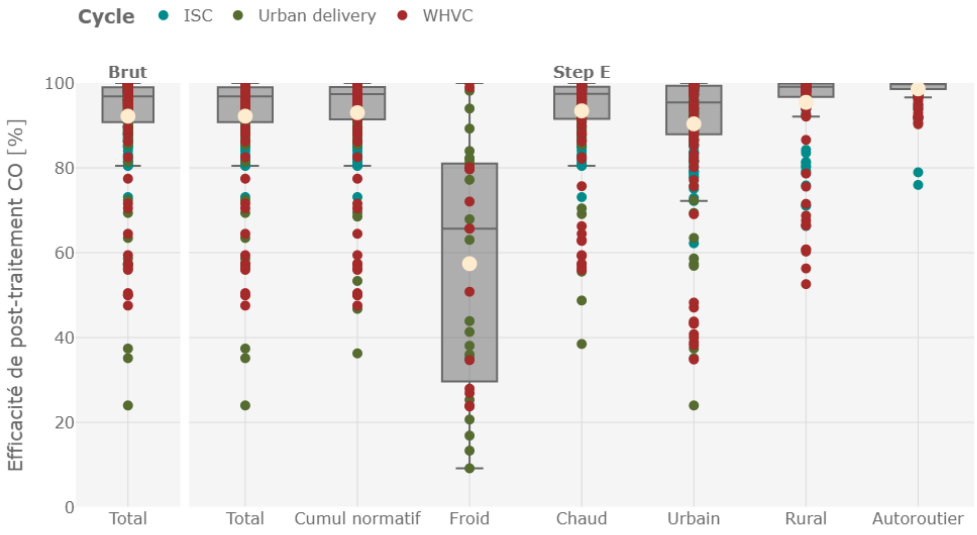


Figure 63 : Efficacité des systèmes de dépollution – CO – Tout essai laboratoire validé est pris en compte

Le CH_4 est un polluant qui peut être particulièrement difficile à catalyser. Comme pour les autres polluants (excepté les particules), une diminution de l'efficacité de post-traitement est observée pour la phase froide du cycle (Figure 64), cela est vrai aussi pour les NO_x (Figure 65). Il est également à noter que pour certains essais, l'efficacité de post-traitement est négative, *i.e.* les émissions de CH_4 sont supérieures en sortie de système de post-traitement. Ces cas sont exclusivement rencontrés dans le cas de véhicules Diesel (Figure 68). Il est possible que les NMHC soit partiellement catalysés en CH_4, conduisant à une augmentation de ces émissions en sortie de système de post-traitement.

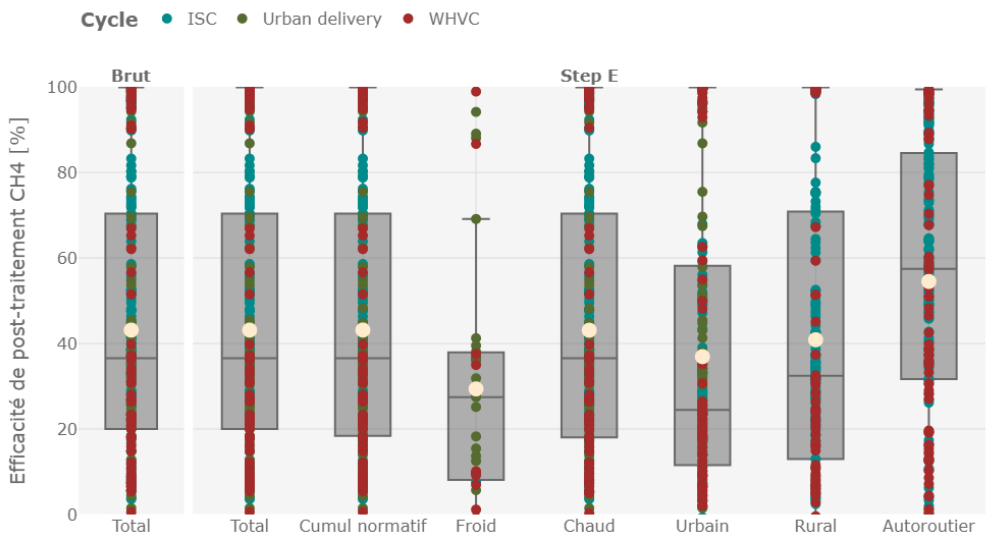


Figure 64 : Efficacité des systèmes de dépollution – CH_4 – Tout essai laboratoire validé est pris en compte

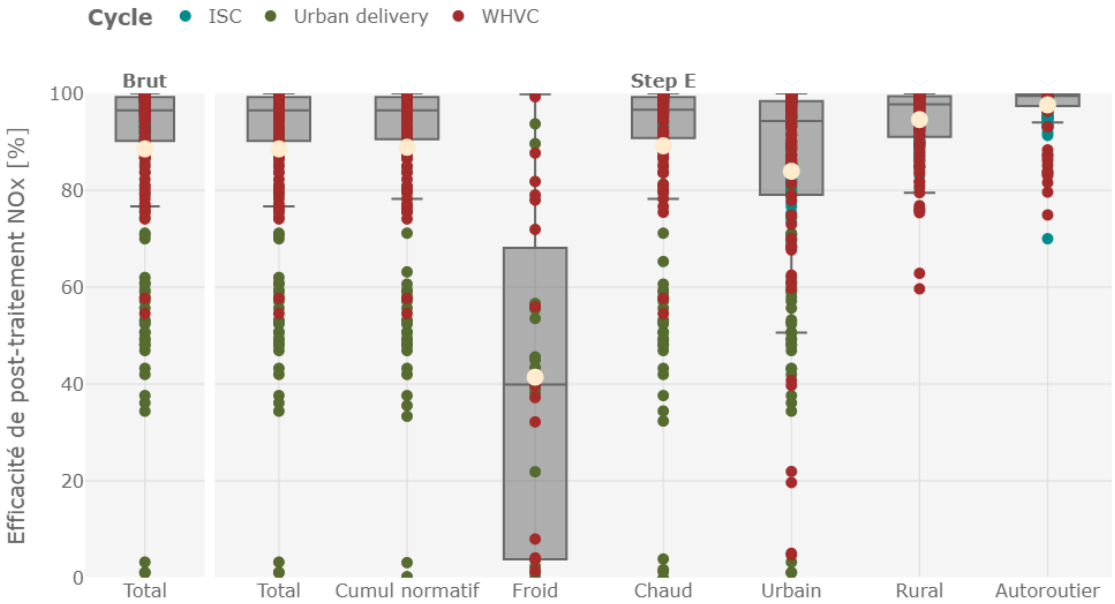


Figure 65 : Efficacité des systèmes de dépollution – NO_x – Tout essai laboratoire validé est pris en compte

Les Figure 66, Figure 67 , Figure 68 comparent les efficacités à froid en comparaison des efficacités à chaud pour respectivement, le CO, les NO_x et les CH_4. Ces figures illustrent ces tendances en séparant les véhicules et notamment les type de véhicules. On peut notamment remarquer que les écarts sont généralement plus importants pour tous les véhicules Diesel testés. C'est en bonne partie dû aux recours à des systèmes actifs et pas uniquement passifs (SCR par exemple dans le cas des NOx) ; ces systèmes actifs couplés à des stratégies de

contrôle différentes de mise en œuvre montrent ainsi une grande dispersion d'efficacité à froid des véhicules Diesel vis-à-vis des véhicules gaz.

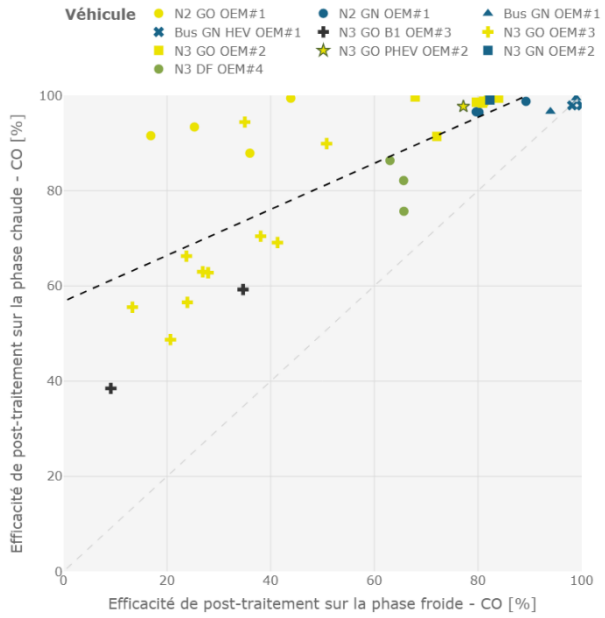


Figure 66 : Efficacité des systèmes de dépollution – Froid vs Chaud – CO – Tout essai laboratoire validé possédant une phase froide est pris en compte

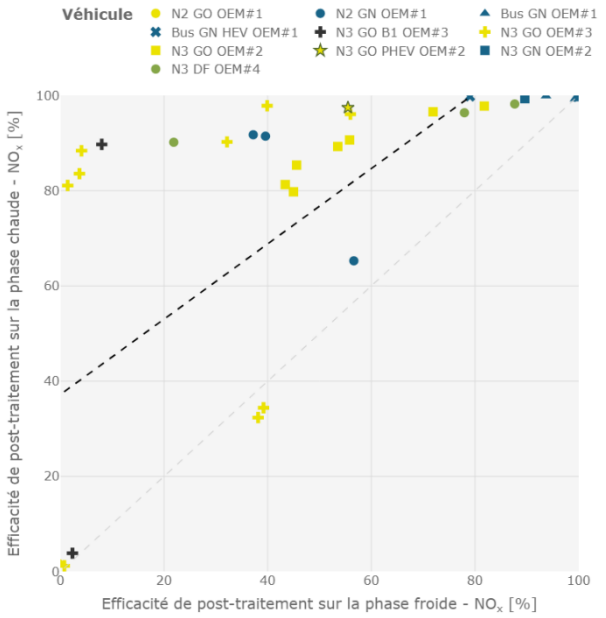


Figure 67 : Efficacité des systèmes de dépollution – Froid vs Chaud – NO_x – Tout essai laboratoire validé possédant une phase froide est pris en compte

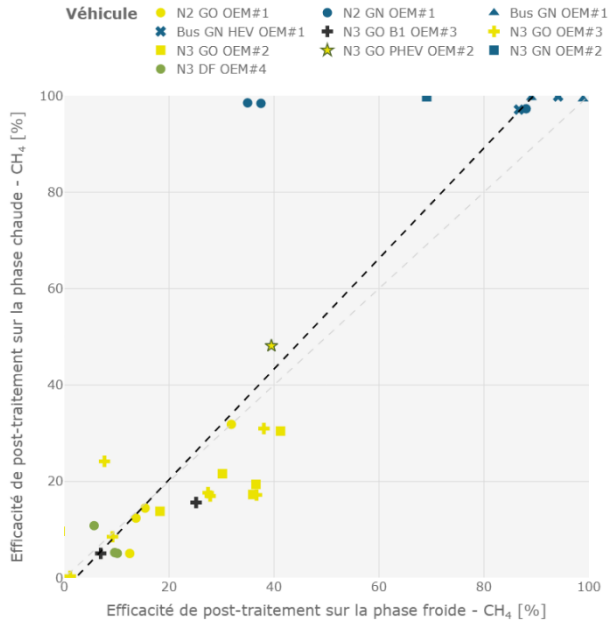


Figure 68 : Efficacité des systèmes de dépollution – Froid vs Chaud – CH_4 – Tout essai laboratoire validé possédant une phase froide est pris en compte

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.12.

6.11. FOCUS - PN_{10} vs PN_{23}

A retenir :

L'analyse en termes de comportement PN_{23} vs PN_{10} permet de mettre en avant la technologie de traitement des particules, le DPF dans le cas des véhicules diesel et le GPF dans le cas de véhicules gaz, pour ceux qui en sont équipés.

Parmi les véhicules testés, seuls les véhicules N2 GN OEM#1 et N3 GN OEM#2, qui sont des véhicules homologués Euro VI step D et n'étaient de ce fait pas soumis à la réglementation sur les particules, ne sont pas équipés d'un filtre à particules.

Globalement les véhicules testés présentent des ratio PN_{10}/PN_{23} relativement faibles, de l'ordre de 2 pour la plupart des véhicules de catégories N2 et N3 et entre 6 et 15 pour les bus (M3) .

Les 2 bus testés, fonctionnant tous deux au gaz naturel et équipés d'un filtre à particules, présentent les émissions en nombre de particules solides (PN) les plus faibles. Le ratio important de PN_{10} / PN_{23} est toutefois à prendre avec précautions compte-tenu de leurs émissions de Méthane (CH_4) supérieures, susceptibles de favoriser la prise en compte de particules volatiles.

La Figure 69 synthétise les émissions de particules relevées pour 9 des 10 véhicules évalués, les mesures du véhicule dénommé « N2 GN OEM#1 » (de catégorie N2, fonctionnant au gaz naturel et de la marque référencée n°1) ne permettant malheureusement pas leur prise en compte dans cette comparaison : les résultats obtenus en ce qui concerne la métrique de référence PN_{23} s'avérant non conformes sur ce premier véhicule évalué au cours de la campagne.

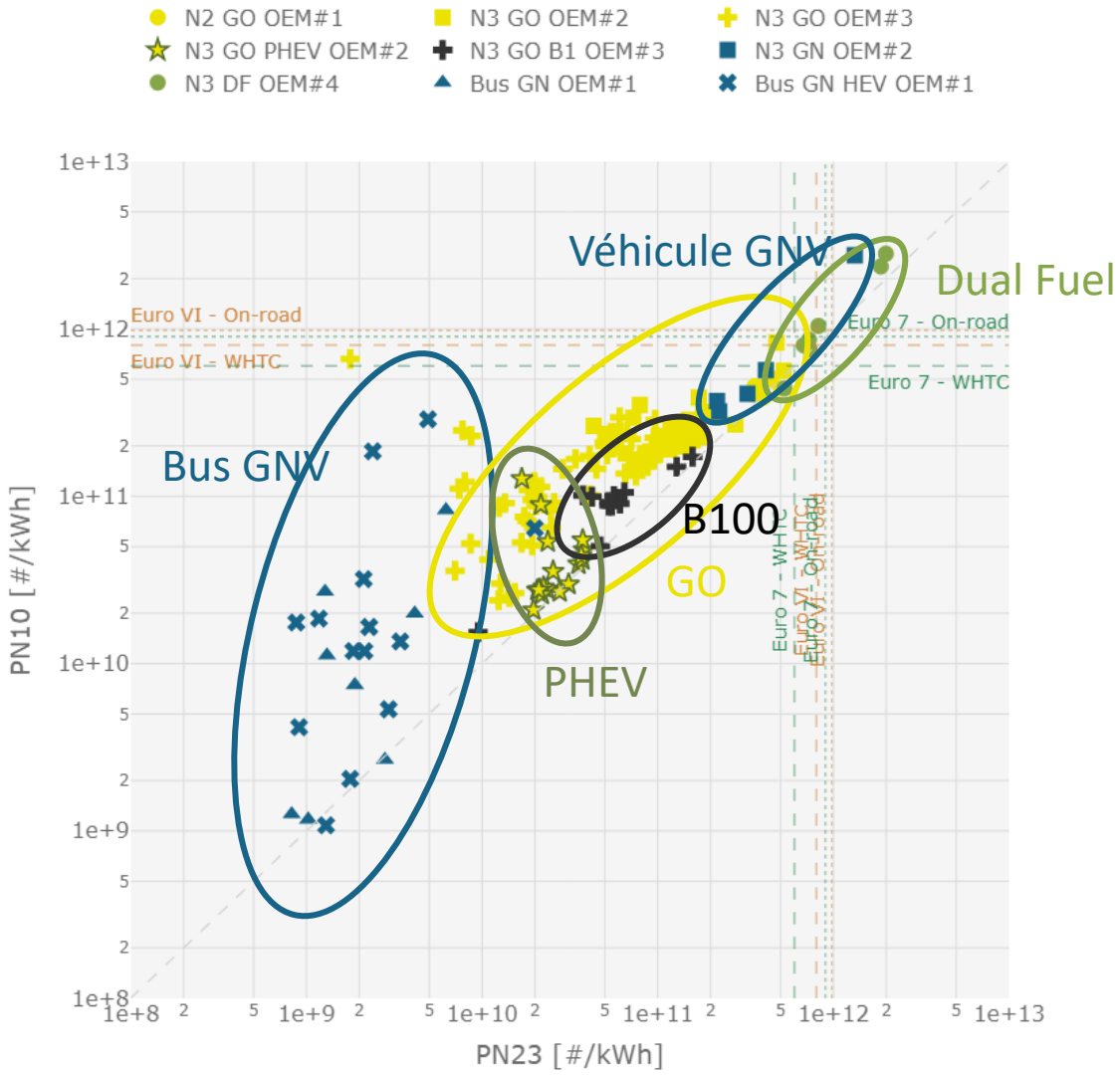


Figure 69 : Emissions de particules exprimées en nombre (PN_{23} selon norme Euro VI et PN_{10} selon norme Euro 7)

Cette figure met tout d'abord en évidence les émissions de particules en nombre (PN_{23}) plus faibles des 2 bus évalués durant la campagne, provenant tout deux du même constructeur (OEM#1) :

- l'un étant équipé d'une motorisation thermique fonctionnant au gaz naturel (GN),
- le second de la même motorisation en version hybride (HEV),
- tous deux étant équipés d'un filtre à particules contribuant assurément à ces excellents résultats.

Les ratios PN_{10}/PN_{23} suggérant une contribution prépondérante des particules les plus petites doivent être considérés avec précaution, l'analyse approfondie de l'ensemble des émissions gazeuses associées faisant apparaître des émissions de Méthane (CH_4) très supérieures à celles des autres véhicules (cas les plus extrêmes des 2 véhicules notamment). Ces émissions supérieures pourraient alors favoriser la prise en compte de particules volatiles, les conditions de dilution du SPCS étant inchangées pour l'ensemble des véhicules.

Cette figure fait également apparaître des émissions de particules en nombre (PN_{23} et PN_{10}) du véhicule de catégorie N3 du constructeur n°2 (N3 GN OEM#2) fonctionnant également au gaz naturel, très supérieures à celles des 2 bus, ce véhicule dont l'usage diffère n'étant pas équipé d'un filtre à particules. Celles du véhicule de catégorie N3 équipé

d'une motorisation Dual-Fuel du constructeur n°4 (N3 DF OEM#4) s'avèrent très proches, avec cependant un ratio PN_{10}/PN_{23} moindre.

La Figure 69 montre enfin entre ces extrêmes, des émissions des véhicules Diesel s'étendant sur deux ordres de grandeur (d'environ 1.10^{10} à 1.10^{12} part/kWh) et semblant évoluer différemment selon le véhicule considéré en termes de variabilité et/ou de ratios PN_{10}/PN_{23}. Les 2 véhicules présentant les variabilités les plus faibles (tant en termes de concentration que de ratio) étant également ceux présentant les plus faibles nombres d'essais considérés conformes à l'issue du post-traitement des données, l'interprétation globale de tels écarts est délicate, d'autant que l'état de chargement du filtre à particules, l'occurrence d'une régénération active de ce dernier d'une part [38], ou les modalités d'injection d'AdBlue liée au traitement des oxydes d'azote (NO_x), variant tous d'un cycle à l'autre, sont susceptibles d'influer sur ces résultats.

Plus de détails sur cette analyse sont disponibles en annexe, paragraphe 12.12.

7. Extension des constats : autres technologies, analyses de cycle de vie et filières énergétiques

L'intérêt des biocarburants réside dans leur potentiel de décarbonation en considérant les émissions du puit à la roue. Aussi, bien que le cœur de l'étude réside dans la comparaison des émissions véhicules à l'échappement, il était nécessaire de faire un statut sur la comparaison des différents technologies et vecteurs énergétiques à cette échelle plus large. Au-delà donc des mesures opérées à l'échappement, une synthèse est proposée dans ce chapitre sur des aspects plus généraux et nécessaires à la comparaison de technologies faisant face à des défis intrinsèquement très différents. Ainsi, la comparaison a été élargie en incluant les véhicules électriques et hydrogènes (pile à combustible et moteur à combustion) et en considérant les impacts environnementaux (GES) sur le cycle de vie complet, les aspects coûts totaux d'usage et des considérations sur les filières énergétiques (maturité, disponibilité matière première, concurrence entre secteurs).

7.1. Considérations sur les filières bas carbone

Toute filière énergétique se caractérise par la combinaison de trois éléments : la ressource, le procédé de transformation et le carburant qui en résulte. Les transports dits longue distance que sont l'aérien, le maritime et le poids lourds sont par nature reconnus comme étant les plus difficiles à décarboner et s'appuieront très probablement dans les décennies à venir sur l'essor de filières bas carbone. Il apparaît dès lors que le développement de ces filières devra répondre aux besoins de ces différents secteurs avec une priorisation qui pourra être fonction de multiples paramètres incluant par exemple : la compatibilité du produit final avec l'usage, le coût du produit ou encore la disponibilité locale des ressources et des procédés de transformation associés. Dans ce contexte, cette section vise à synthétiser les principales caractéristiques des filières bas carbone pouvant être pertinentes pour un usage poids lourds. Il est d'abord question de préciser les ressources, procédés et produits potentiels largement cités dans la littérature tout en soulignant leur maturité. Une synthèse sur la disponibilité éventuelle de ces produits sera ensuite proposée avant de conclure sur les interactions identifiées entre les secteurs.

7.1.1. Filières énergétiques pour la production de carburants bas carbone

Plusieurs références sont disponibles dans la littérature pour synthétiser les filières énergétiques pertinentes pour les transports. La synthèse réalisée par le Concawe [57] se focalise sur les carburants liquides à destination des poids lourds (i.e. à destination d'un moteur à allumage par compression). L'étude distingue deux catégories de produits : les carburants disponibles aujourd'hui (esters méthyliques d'acide gras – EMAG, et les carburants parafiniques), et ensuite des carburants issus de filières moins matures.

La production d'EMAG s'appuie essentiellement sur la transestérification d'huiles et de graisses. Il s'agit d'une technologie éprouvée depuis plusieurs décennies. Parmi les ressources disponibles, il est possible de lister les huiles végétales (EMHV), les graisses animales (EMHA) ou les huiles usagées (EMHU). La réglementation distingue aujourd'hui les ressources conventionnelles également appelées de 1ère génération et les ressources avancées. Ces dernières, peu disponibles aujourd'hui, sont identifiées comme étant dissociées de la filière alimentaire ce qui contribue notamment à accroître leur coût. A noter que le rendement matière de la transestérification dépasse globalement les 90% en masse.

La production de carburants paraffiniques inclut aujourd'hui essentiellement l'hydrotraitement des huiles et en particulier les graisses animales et les huiles de cuisson usagées (HCU). L'hydrotraitement s'avère être le principal

procédé employé pour produire des carburants paraffiniques. Le secteur aéronautique est cependant le principal utilisateur de ces produits identifiés comme « avancés ». Outre ces filières établies et en plein de développement pour l'aérien, la production de carburants paraffiniques pourraient également s'appuyer sur :

- la fermentation de biomasse pour la production d'alcools puis leur transformation via des étapes de déshydratation et oligomérisation.
- L'hydrotraitement de cultures intermédiaires non comestibles et/ou à destination de production d'énergie tel que le miscanthus.
- Le procédé *Power to Liquid* (PtL) ou e-fuel visant notamment à la transformation du dioxyde de carbone et du dihydrogène en carburants à l'aide aujourd'hui d'une étape de *Reverse Water Gas Shift* (RWGS).
- La gaséification de la biomasse pour la production de gaz de synthèse suivi d'un procédé Fischer-Tropsch (BtL – Biomass to Liquid)
- L'approche combinée e-BtL visant à inclure du dihydrogène dans le procédé de conversion du gaz de synthèse pour doubler le rendement massique de la filière BtL en convertissant plus efficacement le carbone biogénique.

A noter que ces différentes voies restent à déployer et leur destination finale pourrait être largement orientée vers le secteur aéronautique compte tenu des objectifs d'incorporation de produits bas carbone croissants à 2050. Cela sera brièvement discuté section 7.2.2.

En marge de ces produits, d'autres filières sont citées dans la littérature et une synthèse extraite de l'étude du Concawe est proposée Figure 70. Ces résultats soulignent à la fois la diversité des ressources potentielles (résidus de biomasse, cultures dédiées, dioxyde de carbone) et les principaux procédés associés (fermentation, transformation thermochimique essentiellement catalytique, transestérification, etc). Cela conduit à la production d'une grande diversité de molécules incluant des structures chimiques oxygénées (esters, éthers, alcools). La synthèse ci-dessous propose également un classement des ressources, procédés et produits en soulignant respectivement leur pertinence, maturité et compatibilité avec l'usage. Il en ressort que la principale difficulté identifiée sur ces filières repose sur l'incompatibilité des produits énergétiques avec l'usage.

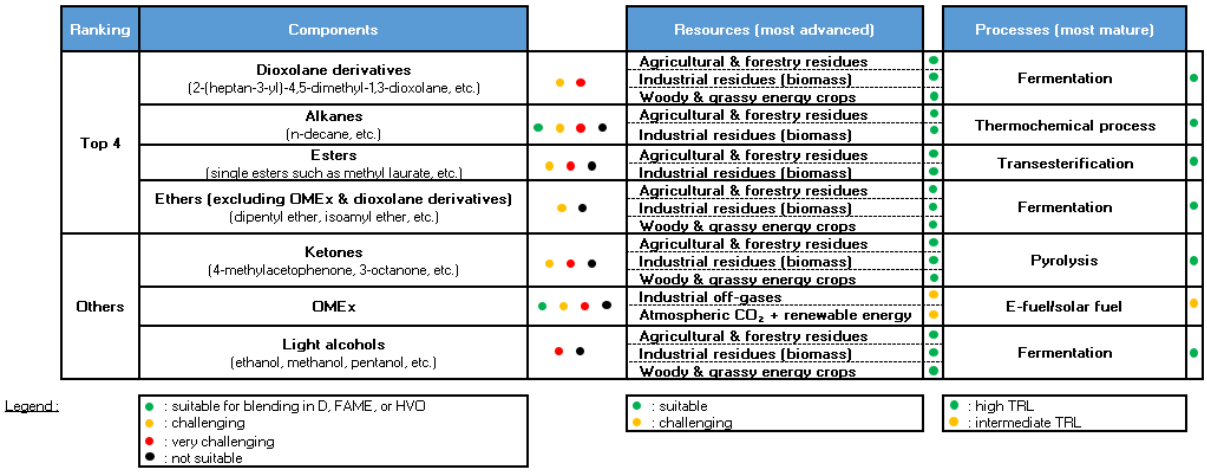


Figure 70 : Illustration des filières énergétiques à un niveau de maturité intermédiaire ou faible répondant au besoin de production de carburants à usage moteur à allumage par compression [57]

L'intérêt pour certains de ces carburants a été souligné par ailleurs dans le cadre du projet européen LONGRUN [58]. Ce projet, finalisé début 2024, visait à identifier des options technologiques et carburants permettant de réduire les émissions de dioxydes de carbone pour les applications poids lourds et bus. Le projet a ainsi préalablement envisagé des alcools (méthanol, 1-octanol), des éthers (DME, OME), des produits gazeux (H_2 et CH_4)

ainsi que des produits paraffiniques. Malgré des gains potentiels en émissions de dioxyde de carbone sur le cycle de vie complet de ces carburants, des verrous majeurs ont été soulignés pour la plupart de ces filières. Cela concerne en particulier :

- La nécessité d'adapter le système de combustion avec par exemple une approche bi-carburants pour le méthanol.
- Une réduction de la densité énergétique du produit
- Le manque de normes pour assurer la qualité produit

Il en ressort ainsi que le principal produit énergétique envisagé dans cette étude pour décarboner les flottes étudiées concerne les composés paraffiniques pour leur grande compatibilité avec la chaine logistique et l'application. Ces produits sont essentiellement générés aujourd'hui via l'hydrotraitement des graisses animales et huiles de cuisson usagées, une ressource limitée. Ils pourraient cependant se développer via le déploiement des filières BtL, e-BtL, fermentaires couplées au procédé *Alcohol to Fuel* voire e-carburant de type *Power to Liquids*. A noter que la filière e-fuel pourrait contribuer à générer une multitude de produits notamment de l'hydrogène, de l'ammoniac ou des hydrocarbures oxygénés ou non (méthane, éthers ou des structures chimiques similaires aux dérivés fossiles). Chaque produit généré est alors associé à un besoin énergétique différent et une compatibilité variable selon les applications ciblées.

Ainsi, les carburants bas carbone contribuant actuellement à la décarbonation des transports poids lourds et bus incluent essentiellement les esters méthyliques d'acides gras, les produits paraffiniques et le biogaz. Des proportions très variables de ces produits peuvent être constatés à l'échelle Européenne selon les contraintes et stratégies locales.

7.1.2. Disponibilité des produits énergétiques

Le développement des filières énergétiques durables intègre de nombreux paramètres qui ne se limitent pas aux émissions de dioxyde de carbone. La stratégie nationale bas carbone [59] rappelle notamment le besoin d'étudier de manière plus systématique la disponibilité des ressources, la protection de la biodiversité et la gestion de l'eau. Les évolutions politiques et économiques en matière de soutien au développement de ces filières contribuent également à orienter le déploiement des filières.

L'évaluation du statut des filières énergétiques à 2050 est une tâche très complexe. Il est cependant possible de s'appuyer sur les capacités de production actuelles ainsi que sur les réglementations européennes mises en place pour tenter de quantifier les ressources et produits nécessaires pour atteindre les objectifs de décarbonation. La contribution des secteurs longues distances que sont le maritime et l'aéronautique est de premier ordre compte tenu des contraintes associées (durée de vie des systèmes, compatibilité des produits énergétiques avec la logistique et l'engin, gestion des risques, etc).

Comme évoqué préalablement, les principaux carburants bas carbone disponibles dans le monde sont l'éthanol, l'EMAG et le HVO. Les capacités de production pour ces trois produits en 2023 sont présentées Tableau 19.

Tableau 19 : Capacités de production pour les principaux carburants bas carbone disponibles en France, UE et dans le monde (IHS / S&P Global)

	Monde	UE	France
Ethanol (millions de litres)	111477	5261	1090
EMAG (millions de tonnes)	44,69	10,9	0,9
HVO (millions de tonnes)	12,45	3,34	< 0,3

Il est nécessaire de souligner que les filières éthanol et EMAG conventionnels ne bénéficient pas d'une dynamique de croissance aussi importante que les produits paraffiniques tel que le HVO. La capacité de production pour ce dernier a en effet quasiment doublé en l'espace de trois ans. Elle s'appuie sur l'essor des filières basées sur l'utilisation des graisses animales et des huiles de cuisson usagées. Quant aux produits conventionnels, également nommés agrocarburants, ils s'appuient sur des technologies éprouvées et une chaîne de valeur établie. Leur croissance se trouve cependant limitée aujourd'hui du fait que les ressources employées ne sont pas considérées réglementairement comme des déchets et résidus dissociés de la filière alimentaire. Cela contribue à empêcher leur usage dans les secteurs maritime et aéronautique. Leur développement, notamment en France, n'est pas envisagé compte tenu des ressources impliquées et des impacts annexes que cela pourrait générer (e.g changement d'affectation des sols, disponibilité en eau, etc.).

Les perspectives de développement des carburants paraffiniques incluent les filières suivantes :

- *Alcohol to fuel (AtF)*
- *Biomass to Liquid* (BtL) et e-BtL
- E-carburant basée notamment aujourd'hui sur un procédé Fischer Tropsch

Assurer la disponibilité des ressources et soutenir le développement des infrastructures sont des enjeux importants pour permettre à ces filières de se déployer. Plusieurs études tentent d'éclairer le débat en quantifiant les ressources à destination de ce type de procédé. C'est notamment le cas d'une étude de l'*Imperial College* [60] portant sur l'estimation de la biomasse disponible issue de l'agriculture, des déchets et résidus forestiers à l'échelle européenne. Seule les types de biomasse répondant aux exigences de l'annexe IX de la RED II étaient alors considérés (partie A et B). Cette étude a été reprise dans le rapport du Concawe préalablement cité et visant à discuter de la disponibilité de carburants à destination du poids lourds à l'horizon 2030. Les résultats selon les hypothèses de mobilisation basse et élevée de biomasse sont illustrés ci-dessous.

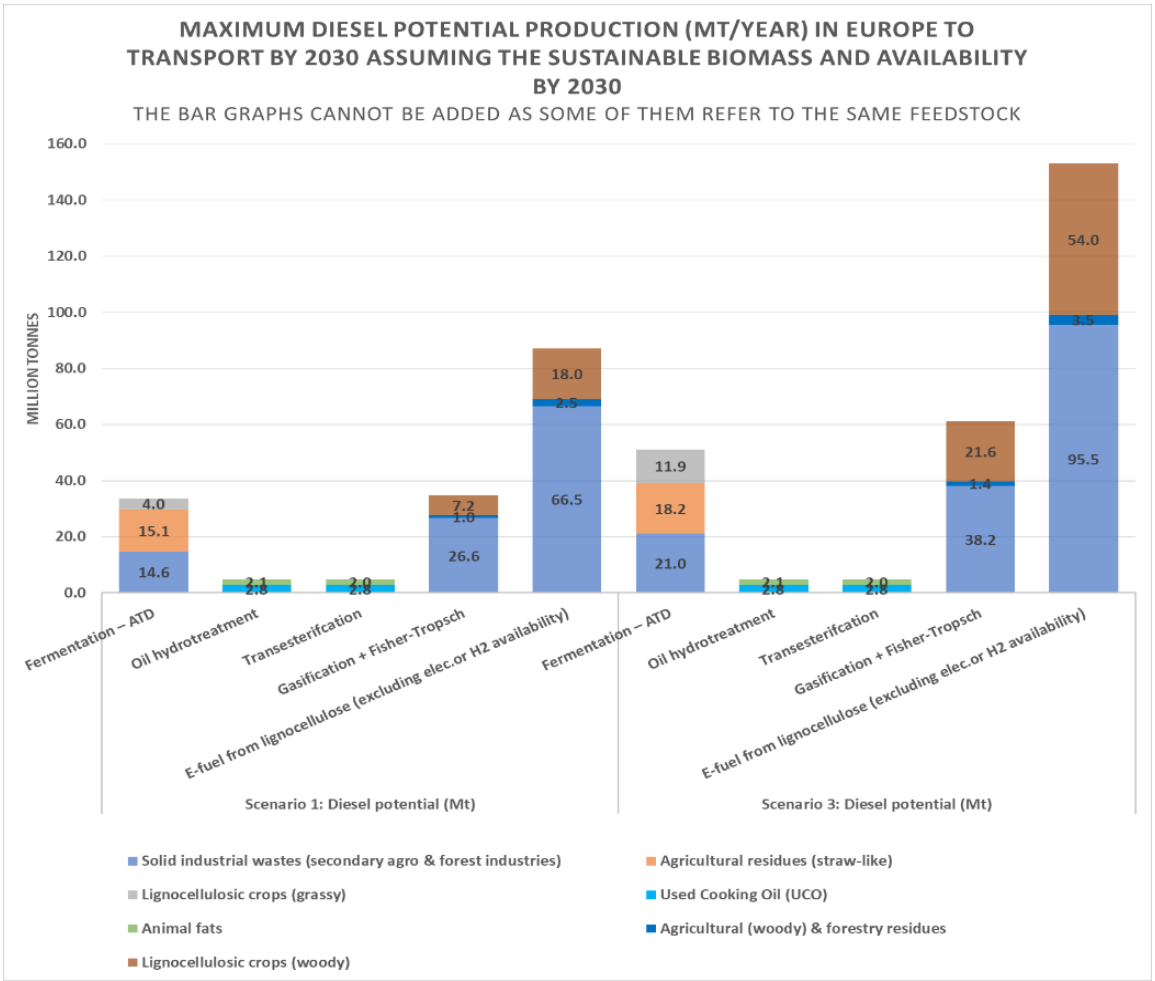


Figure 71 : Potentiel de production théorique de distillats moyens en 2030 pour différentes filières énergétiques à partir des ressources listées dans la RED II/2018 Annexe IX parties A et B. Les colonnes ne peuvent généralement pas être ajoutées les unes aux autres compte tenu du fait qu'elles s'appuient sur les mêmes ressources.

Avec une demande en distillats (kérosène & diesel) supérieure à 250 Mt/an en Europe, ces estimations suggèrent un potentiel de mobilisation relativement significatif selon les filières considérées. A noter que la compétition sur les ressources est claire dans la mesure où les barres ne peuvent être ajoutées les unes aux autres. A titre d'exemple, la valorisation d'huiles de cuisson usagées peut se faire soit via l'hydrotraitement soit la transestérification. Ces estimations sont également associées à plusieurs défis et notamment :

- La mobilisation de la biomasse en particulier en France et/ou en Europe. L'import de matières premières reste significatif.
- Les infrastructures permettant leur valorisation ne sont pas encore disponibles à grande échelle.

Il est intéressant dans ce contexte de visualiser une synthèse réalisée par l'EASA (Cf. Figure 72) et portant sur le nombre de communications autour de nouvelles infrastructures associées aux filières HVO (ou HEFA), AtF (noté AtJ pour Alcohol to Jet), BtL (G + FT pour gaséification + Fischer Tropsch) et e-fuel (PtL). Ces annonces datent de 2022 et visent essentiellement une production de carburants à l'horizon 2028 – 2030. A noter que ce graphe n'est plus d'actualité tant les annonces dans ce domaine évoluent très rapidement que ce soit suite à l'abandon d'un projet ou pour annoncer une nouvelle installation. Il est évident cependant que la dynamique est présente autour de ces filières avec un objectif principal qui est de répondre aux besoins du secteur aéronautique.

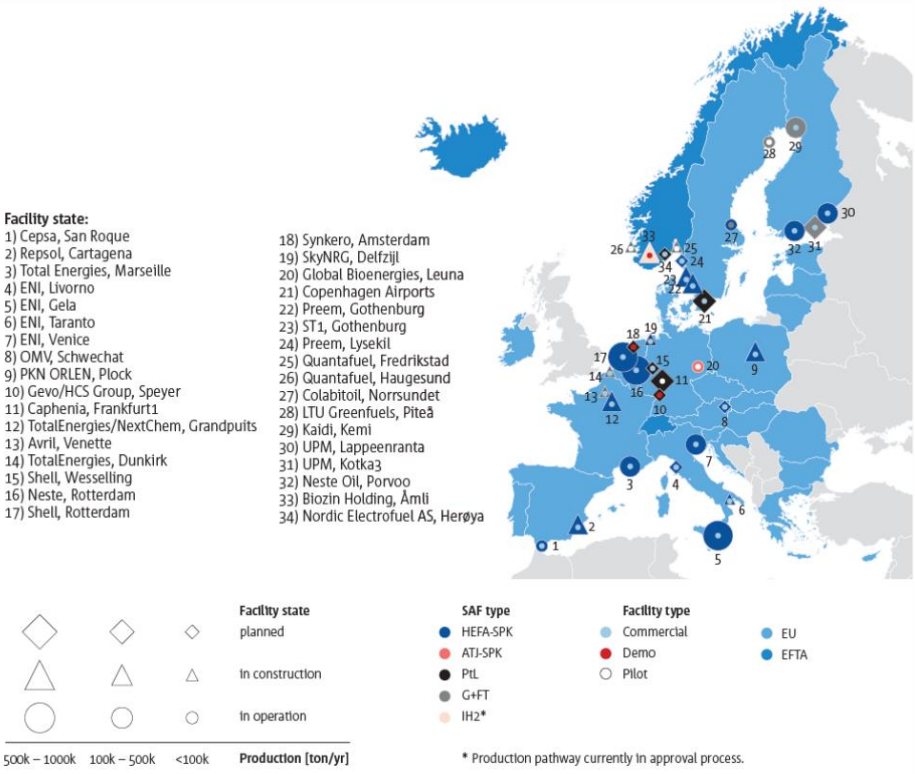


Figure 72 : Projets de développement de carburants aéronautiques durables en Europe (EASA [61], 2022)

Afin d'insister sur le périmètre Français, les principales communications visant à développer des sites de production de HVO et des approches e-fuel ou e-BtL sont illustrées. Si ces communications se concrétisent, la capacité de production en France pourrait ainsi atteindre 350kt/an de carburéacteur bas carbone soit environ 5% de la demande actuelle en France.

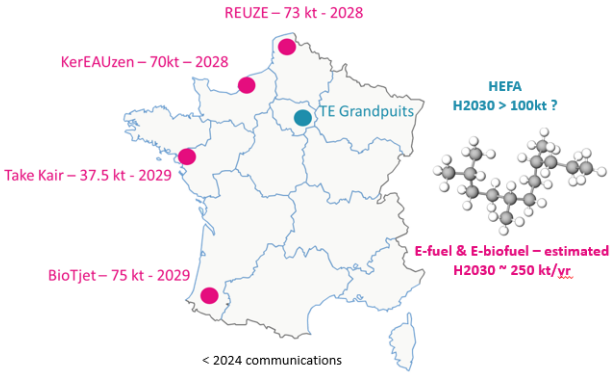
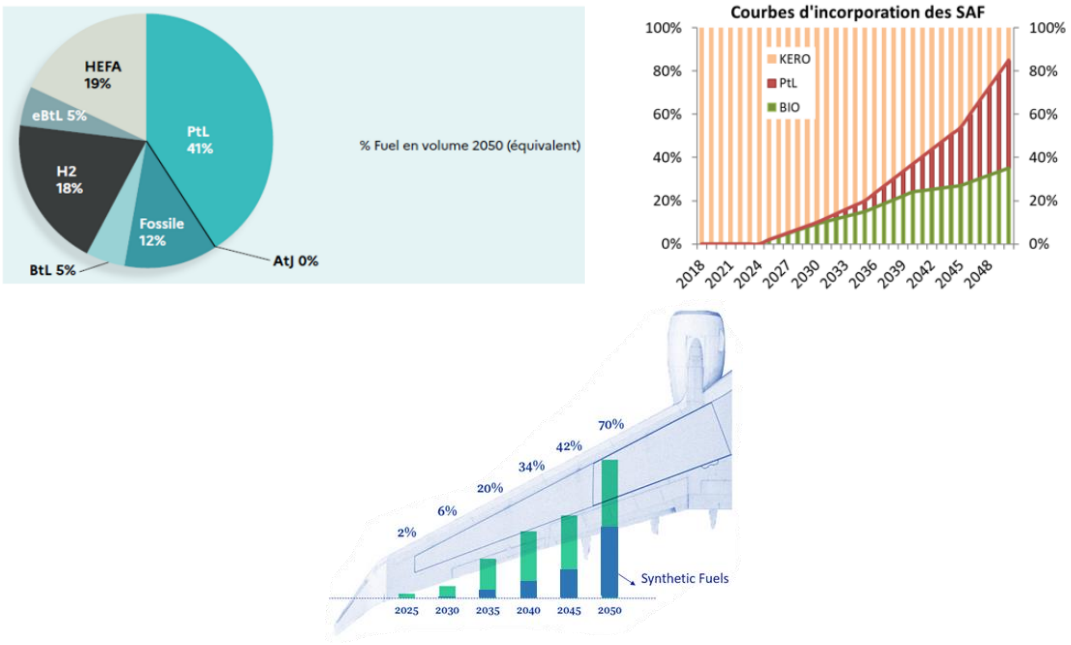


Figure 73 : Projets de développement de carburants aéronautiques durables en France (communications antérieures à 2024).

Selon le règlement Refuel EU aviation [62] ainsi que la feuille de route de décarbonation du secteur aérien en France [63], cette dynamique doit s'amplifier que ce soit au niveau Français ou Européen. La Figure 74 illustre ainsi une trajectoire d'incorporation de carburants aéronautiques durables (CAD ou SAF) ainsi que les principales filières y contribuant. Ce scénario est le plus optimiste en termes d'accroissement des capacités de production. Cela peut être mis en parallèle du règlement Européen sur cette même figure où les taux d'incorporation en carburant durable augmente progressivement jusqu'à 2050 pour atteindre 70%.

Figure 74 : Illustration du scénario de décarbonation du secteur aérien en France selon l'hypothèse « accélération » (haut) et objectifs d'incorporation de carburants biogéniques et synthétiques selon le règlement Refuel EU aviation (bas).



Le secteur aérien pourrait donc contribuer à accroître significativement les capacités de production en distillats moyens. La question de la génération de co-produits à destination d'autres secteurs (routier, maritime, industrie) reste à étudier tout comme la capacité des infrastructures et produits associés à générer des carburants compatibles avec l'application poids lourds et bus.

Le même raisonnement est plus compliqué du côté maritime. Ce secteur nécessiterait aujourd'hui un volume de carburant durable équivalent au secteur aérien à l'échelle de la planète. Cependant, les contraintes opérationnelles ne sont pas harmonisées pour l'ensemble des acteurs et de la flotte. Des options tel que le méthanol (≈ 8% des ventes de navires en tonnage en 2023) ont cependant émergé ces dernières années. Des carburants paraffiniques de type HVO ainsi que des esters (EMAG) sont également employés. L'usage de biogaz est finalement évoqué. Cependant, les contraintes du coût, associé à ces produits ainsi que des éventuelles compétitions sur les ressources et les carburants sont des défis que doit relever le secteur. Une approche est de se pencher sur des co-produits issus de filières associées à l'aéronautique ou encore de développer des filières spécifiques dans la mesure où un procédé de transformation peu coûteux et s'appuyant sur des ressources disponibles est envisageable. Il est donc difficile de définir des liens clairs à ce stade entre le développement de filières carburants pour le secteur maritime et celui du transport poids lourds et bus.

7.1.3. Complémentarités et concurrences au sein des transports longue distance

Compte tenu des difficultés associées à la décarbonation des secteurs aéronautiques, maritimes et poids lourds, une attention particulière doit être portées aux éventuelles complémentarités ou concurrences. Aujourd'hui, l'utilisation de biocarburants conventionnels est exclusivement destinée au transport terrestre avec la possibilité notamment d'employer des produits de type « B100 » (100% EMAG) et HVO100 (100% de produits paraffiniques) en poids lourds. En effet, les secteurs maritime et aéronautique se limitent aujourd'hui à l'utilisation de filières avancées. Qu'il s'agisse de filières conventionnelles ou avancées, les notions de complémentarités et concurrences sont multiples incluant la disponibilité des ressources à une échelle donnée, le développement de capacités de

production adaptées, potentiellement flexibles et en nombre suffisant, la production de carburants compatibles avec les contraintes opérationnelles.

Si l'on s'en tient aux engagements réglementaires actuels ainsi qu'à la dynamique constatée sur la production de carburants bas carbone, le secteur aéronautique semble guider les principaux déploiements d'infrastructures ainsi que l'exploitation des ressources associées aujourd'hui au procédé d'hydrotraitement (huiles de cuisson usagées et graisses animales). Ces ressources, difficilement mobilisables aujourd'hui dans certaines régions du globe, pourraient encore croître comme illustré Figure 71 (un potentiel d'environ 5 millions de tonnes de distillats moyens estimés à l'échelle européenne en 2030). La concurrence sur ces matières premières est a priori limitée dans la mesure où l'aéronautique est le secteur pour lequel la filière se structure.

Cependant, cette filière n'est pas suffisante pour atteindre les objectifs de décarbonation du secteur aéronautique à moyen et long terme. Si l'on suit les scénarios proposés au niveau Français (cf. Figure 74), les filières BtL, e-Btl, e-fuel (PtL) voire AtJ (noté à 0% sur ce scénario) pourraient contribuer à atteindre l'objectif annoncé de décarbonation. Ces filières s'appuient non seulement sur des ressources biogéniques peu ou pas mobilisées aujourd'hui (ressources « avancées » de types résidus, déchets, culture dédiée, etc.) et sur une production d'énergie bas carbone encore en développement.

Elles doivent également pouvoir bénéficier de nouvelles infrastructures permettant la conversion de ces ressources en carburants. Or des difficultés existent pour le financement de ces infrastructures et l'identification de leur localisation optimale compte tenu des impacts environnementaux et sociétaux mais également économiques.

Finalement, la combinaison de ces ressources avec un ou plusieurs procédés conduira à des produits variables pouvant répondre aux besoins de différents secteurs. Par exemple, une matière organique de type lignocellulose pouvant potentiellement être transformée à moindre coût pour un usage côté maritime ou subir une transformation importante pour respecter les contraintes de la mobilité terrestre ou aéronautique.

Outre ces considérations sur les éventuelles concurrences à différentes étapes et échelles, des complémentarités pourraient également apparaître. Les procédés bas carbone par exemple contribuent rarement à la production d'un carburant unique. Le rendement matière conduit généralement à distribuer les hydrocarbures générés sur des coupes plus ou moins larges permettant ainsi d'alimenter d'autres secteurs. Cela pourrait notamment être le cas avec des filières e-fuel de type PtL où l'utilisation d'un procédé Fischer Tropsch peut éventuellement contribuer à la production de distillats incompatibles avec le secteur aéronautique. Cette notion de co-produit pourrait prendre de l'ampleur tant pour promouvoir le développement de certaines infrastructures que pour soutenir l'effort de décarbonation de différents secteurs.

7.2. Comparaisons des solutions technologiques et filières : WtT, WtW, ACV et TCO

7.2.1. Comparaison des facteurs d'émissions du puit au réservoir WTT des différents vecteurs énergétiques

Pour évaluer précisément les émissions de gaz à effet de serre (GES) des différents vecteurs énergétiques dans le transport routier, il est essentiel d'adopter une approche complète qui dépasse la seule phase d'utilisation (Tank-to-Wheel, TtW). En effet, les vecteurs énergétiques présentent des caractéristiques et des enjeux très différents en matière de production, distribution et utilisation. Par exemple, l'électricité ou l'hydrogène nécessitent des infrastructures spécifiques et des procédés de production variés (électrolyse, reformage, etc.), tandis que les biocarburants incluent des étapes critiques liées à la captation et au stockage du CO_2 (BECCS) ou à l'utilisation de

matières premières durables. Ces différences rendent indispensable l'analyse du cycle complet Well-to-Wheel (WtW), qui inclut les phases Well-to-Tank (WtT) pour la production et la distribution d'énergie, et Tank-to-Wheel (TtW) pour l'utilisation dans le véhicule.

Les travaux de référence en Europe sur ces méthodologies sont portés par le consortium JEC (JRC-EUCAR-Concawe), qui publie depuis les années 2000 des analyses détaillées sur le cycle de vie énergétique et climatique des carburants et des technologies de propulsion. Le rapport JEC Well-to-Wheels v5 [66] constitue une base robuste pour évaluer les émissions WtW en intégrant les dernières avancées technologiques et les scénarios prospectifs.

Dans ce contexte, les termes WtT, TtW et biocredits (crédits carbone liés à l'origine renouvelable des carburants ou à la captation du CO_2) permettent de quantifier de manière détaillée les contributions spécifiques de chaque étape. De manière plus détaillée :

- WtT (Well-to-Tank) : Inclut les émissions associées à l'extraction, la production, la transformation, et la distribution du vecteur énergétique. Par exemple, pour le diesel, il s'agit des émissions liées à l'extraction du pétrole brut, son transport, et son raffinage.
- TtW (Tank-to-Wheels) : Émissions dues à la combustion ou à l'utilisation du vecteur dans le véhicule. Par exemple, pour le diesel, il s'agit de CO_2 et autres gaz à effet de serre émis directement par le moteur à combustion.
- Biocredit : Représente les émissions "négatives" ou les crédits carbone attribués aux biocarburants en raison de leur captation de CO_2 lors de la croissance des matières premières ou de leur production à partir de déchets.

Les figures suivantes illustrent ces analyses pour les carburants "diesel-like" et gazeux, offrant une vision comparative essentielle pour identifier les vecteurs énergétiques les plus adaptés à la décarbonation du secteur.

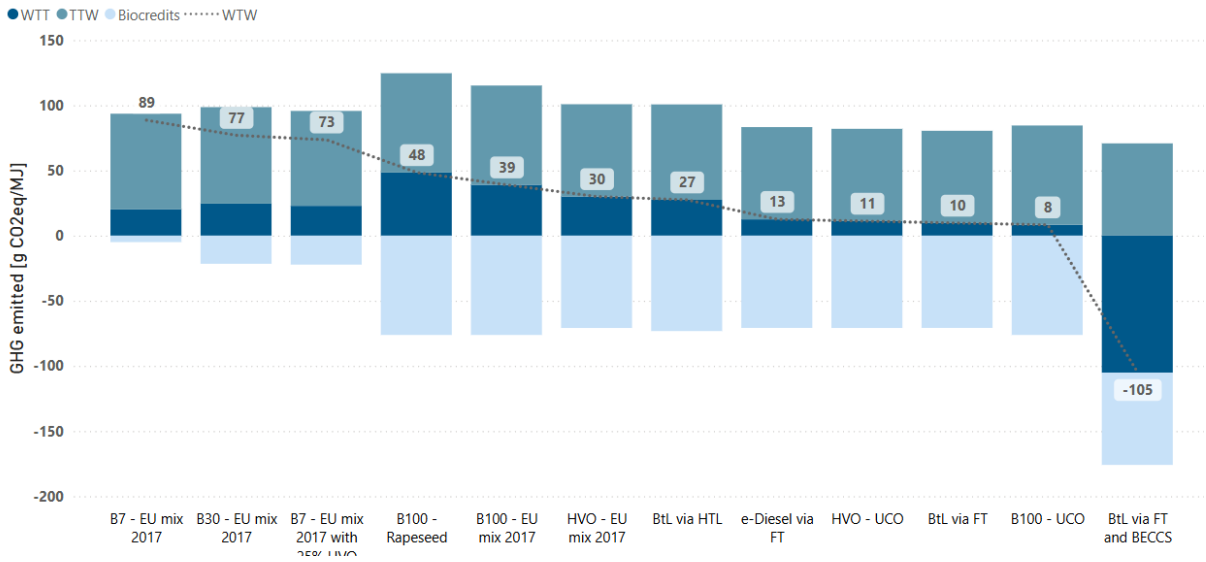


Figure 75 : Facteurs d'émissions WtW des carburants "diesel-like"

Cette figure présente les émissions de gaz à effet de serre (GES) Well-to-Wheels (WtW) pour différents carburants "diesel-like", incluent :

- Les carburants fossiles comme le B7 (EU mix) affichent des émissions élevées (~89 gCO_2/MJ), dominées par la combustion (TtW).

- Les biocarburants avancés (HVO, BtL) réduisent les émissions grâce à des WtT favorables et des crédits carbone liés à leur origine renouvelable. Par exemple, le BtL via FT (Fischer-Tropsch) atteint 10 gCO_2/MJ.
- Les carburants avec BECCS (ex. : BtL + CCS) présentent des émissions négatives (-105 gCO_2/MJ), car le CO_2 capturé et stocké dépasse les émissions générées sur le cycle de vie. Cela ne prend pas en compte les aspects économiques ou d'autres impacts environnementaux. Pour plus de détail, il est conseillé de se référer au rapport spécial de l'IPCC 2018 [73] concernant les mécanismes de compensation de CO_2 et le rapport JEC v5 [66] pour plus de détails.

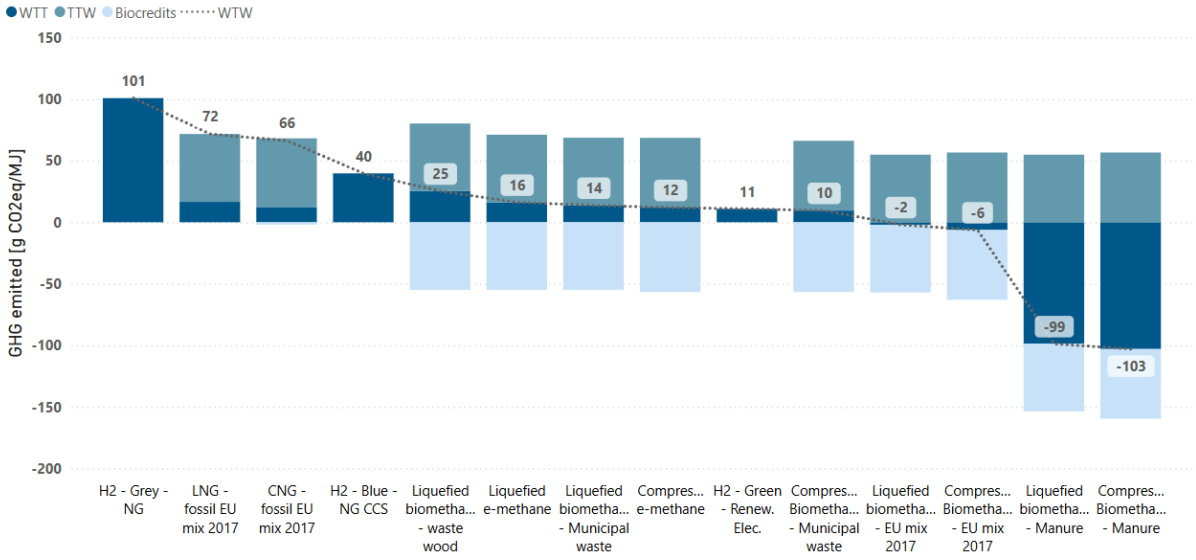


Figure 76 : Facteurs d'émissions WtW des carburants gazeux

Cette figure détaille les émissions WtW pour des carburants gazeux, y compris :

- Hydrogène : produit par reformage du méthane (gris), captage et stockage de carbone (bleu) ou électrolyse avec électricité renouvelable (vert).
- Gaz naturel fossile : CNG et LNG.
- Biogaz liquéfié ou comprimé : produit à partir de bois, déchets municipaux, ou fumier. Les biogaz issus de déchets organiques ou de fumier affichent des émissions négatives grâce à la récupération du méthane qui aurait autrement été libéré dans l'atmosphère.

7.2.2. Comparaison des émissions des gaz à effet de serre sur le cycle de vie pour les technologies considérées

Le secteur du transport routier, et en particulier celui des véhicules utilitaires lourds, est confronté à une complexité croissante dans l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (GES). Cette difficulté provient de plusieurs facteurs : la diversité des technologies de propulsion (ICE, BEV, FCEV, PHEV), l'évolution rapide des vecteurs énergétiques (biocarburants, hydrogène, électricité), et la nécessité de considérer des cycles de vie complets, incluant la fabrication, l'utilisation et le recyclage. De plus, l'incertitude sur les trajectoires futures (mix énergétique, efficacité des technologies) oblige à envisager une multitude de scénarios. Chaque scénario doit intégrer des hypothèses variées, comme les conditions d'utilisation, la durée de vie des véhicules, les intensités carbones des

vecteurs énergétiques, les coûts environnementaux de production des organes clefs et notamment des batteries, etc.

Dans ce contexte, des travaux menés par IFPEN pour le CONCAWE et décrits dans le rapport

[64] proposent une méthodologie et un outil pour répondre à ces défis. En permettant la prise en compte d'un grand nombre d'hypothèses et la simulation de scénarios spécifiques à façon, cet outil offre une approche adaptée pour évaluer les émissions GES dans un environnement mouvant. Il permet notamment d'explorer les impacts des technologies émergentes et des solutions transitoires dans différents contextes opérationnels, soutenant ainsi les décideurs dans l'identification des stratégies optimales pour décarboner le secteur.

Le dimensionnement des véhicules considérés reprend les catégories typiques du marché européen des poids lourds et des bus. Cinq segments représentatifs ont été définis : camions longue distance (44 tonnes), camions de livraison (19 tonnes), autobus urbains (12 m), autocars interurbains et camions de collecte des déchets (26 tonnes). Chaque segment inclut plusieurs technologies de propulsion, notamment les moteurs à combustion interne (ICEV), les véhicules hybrides (HEV, PHEV), les véhicules électriques à batterie (BEV) et à pile à combustible (FCEV). Les spécifications techniques (masse, charge utile, caractéristiques aérodynamiques) ont été basées sur des données de l'industrie et des standards européens.

Pour valider la fiabilité des simulations, une comparaison a été effectuée avec l'outil européen VECTO, qui est une référence pour l'estimation de la consommation d'énergie des véhicules lourds. Les mêmes spécifications de véhicules et cycles de conduite ont été utilisées dans les deux modèles, et les résultats ont montré une concordance élevée. Cette validation a confirmé la robustesse des estimations obtenues dans l'étude.

Dans ces travaux, les bornes des hypothèses et les valeurs par défaut sont définies pour couvrir un panel réaliste de scénarios. Les bornes sont basées sur des données issues de la littérature scientifique, des constructeurs et des opérateurs. Les valeurs par défaut, quant à elles, représentent le scénario moyen le plus probable en Europe. Elles sont déterminées à partir de moyennes pondérées des données réelles, validées par des acteurs industriels et des bases de données reconnues (JEC v5, VECTO). Par exemple, une charge utile de 60-70 % de la capacité maximale, une température ambiante de 20°C, et une durée de vie de 1,2 million de km sont utilisées comme références pour les simulations.

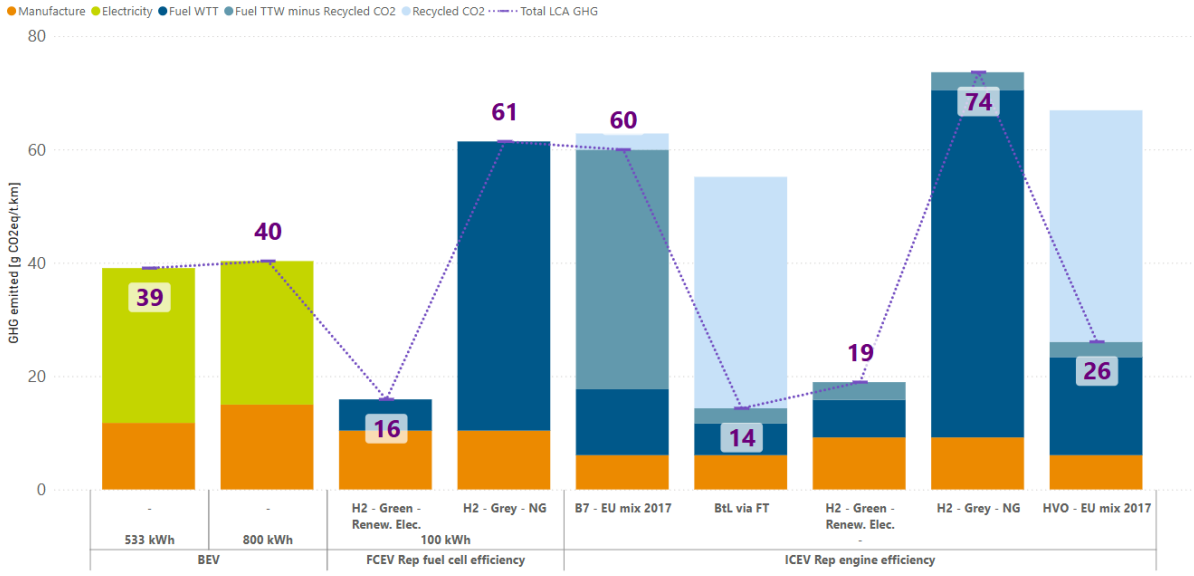


Figure 77 : Evaluation des émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie complet pour un long-routier 44T selon les technologies et vecteurs énergétiques retenus. Source : outil « HDV CO_2 comparator » https://hdvco2comparator.eu/

La figure montre les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie (LCA) pour différentes technologies et vecteurs énergétiques, exprimées en grammes de CO_2 équivalent par kilomètre par tonne ($gCO_2eq/t.km$). Les différents segments du graphique décomposent les émissions en plusieurs phases : fabrication, Well-to-Tank (WtT), Tank-to-Wheel (TtW), recyclage, et les éventuels crédits de CO_2.

Les véhicules électriques à batterie (BEV) présentent des émissions faibles (39-40 gCO_2eq/km), dominées par la phase de fabrication, en particulier des batteries. Les émissions WtT et TtW sont presque nulles lorsqu'un mix électrique renouvelable est utilisé, faisant des BEV une solution clé pour les cycles urbains et régionaux.

Les véhicules à hydrogène montrent des résultats contrastés. Avec de l'hydrogène vert, les émissions LCA sont parmi les plus faibles (16 gCO_2eq/km). En revanche, l'hydrogène gris produit à partir de gaz naturel atteint 74 gCO_2eq/km, principalement à cause des émissions WtT, soulignant la nécessité de passer à un hydrogène décarboné pour maximiser son potentiel.

Les biocarburants avancés, comme le BtL (14 gCO_2eq/km) et le HVO (26 gCO_2eq/km), offrent des réductions significatives des émissions grâce aux crédits carbone associés à leur origine renouvelable. Cependant, le biodiesel standard (B7) affiche des émissions de 60 gCO_2eq/km, proches de celles des carburants fossiles, en raison des émissions directes lors de la combustion.

Enfin, les moteurs diesel optimisés restent parmi les plus émetteurs, même avec un mélange biodiesel, affichant des émissions similaires à celles des biocarburants standards. Cette analyse confirme que, pour atteindre les objectifs climatiques, les BEV et l'hydrogène vert sont les solutions privilégiées, tandis que les biocarburants jouent un rôle transitoire dans la réduction des émissions des flottes existantes.

Bien entendu, et c'est bien ce qui motive la mise en place d'outil interactif comme celui-ci, ces évaluations sont hautement sensibles aux nombreuses hypothèses retenues. Voici celle retenues pour cet exemple:

- Pour les BEV, capacités de batterie de 533 kWh et 800 kWh, deux cycles de remplacement de batterie sur la durée de vie de 750 000km, et une empreinte carbone de production des batteries fixée à 86 $kgCO_2eq/kWh$.

- Pour les FCEV, la capacité en hydrogène est fixée à 70 kg, et la production des piles à combustible et des réservoirs est évaluée respectivement à 40 $kgCO_2eq/kW$ et 25 $kgCO_2eq/kg$
- cycles d'usage définis via des profils standards de VECTO (longue distance, régional, urbain), avec une charge utile variable (faible, représentative, maximale).
- l'intensité carbone du mix électrique est à 335 gCO_2eq/kWh (moyenne européenne 2019, Scarlat et al., 2022)
- trois types de production d'hydrogène considérés : hydrogène bleu (avec CCS), hydrogène vert (renouvelable), et hydrogène gris (gaz naturel).

Le lecteur intéressé aura tout loisir de jouer des scénarios à façon en utilisant cet outil mis à disposition.

Ces résultats illustrent que la transition énergétique du transport routier lourd nécessite une combinaison de technologies adaptées aux usages spécifiques et aux disponibilités énergétiques. Les véhicules électriques à batterie (BEV) et à hydrogène vert (FCEV) présentent les plus faibles émissions sur l'ensemble du cycle de vie, mais leur adoption dépend de la décarbonation du mix énergétique et du déploiement d'infrastructures adaptées. Les biocarburants avancés, comme le HVO et le BtL, jouent un rôle clé en tant que solutions transitoires pour réduire rapidement les émissions des flottes existantes. Les carburants fossiles, même optimisés, restent parmi les plus émetteurs, soulignant la nécessité d'une transition accélérée vers des technologies bas-carbone. Le rapport met également en évidence l'importance de scénarios personnalisés, tenant compte de l'évolution technologique et des politiques publiques, pour guider les choix stratégiques en vue d'atteindre les objectifs climatiques de 2050.

7.2.3. Considérations TCO : nécessité de prise en compte des usages spécifiques

L'évaluation du coût d'usage global (ou TCO, Total Cost of Ownership) est indispensable dans le cadre de la transition énergétique des flottes de poids lourds. En effet, les enjeux économiques liés à l'adoption de nouvelles motorisations et technologies sont multiples et complexes. Ils englobent non seulement le coût initial d'achat des véhicules, mais également les dépenses liées au carburant ou à l'énergie, à l'entretien, à la fiscalité et aux éventuelles subventions ou incitations financières. Ces paramètres varient considérablement selon les technologies (diesel, gaz, électrique, hydrogène) et les profils d'utilisation des véhicules. Une approche tenant compte de ces différentes dimensions mais spécifique à chaque cas est donc essentielle pour garantir des choix technologiques économiquement viables et alignés avec les objectifs de transition écologique.

L'outil "**Verdir ma flotte**", cocrée sous la coordination de la Fabrique de la logistique avec des contribution technique de l'IFPEN et la contribution financière de l'ADEME, répond à ce besoin. Il inclue l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre directes (production et distribution de carburant et d'électricité, mais pas de prise en compte de la construction des véhicules (camions, batteries…) et des infrastructures (routes, entrepôts, stations d'avitaillement...), et personnalise ces analyses pour un utilisateur spécifique, en intégrant des paramètres tels que le profil d'usage (urbain, interurbain, longue distance) et le taux de chargement moyen. En addition des impacts environnementaux, cet outil va plus loin en proposant une évaluation des **coûts totaux d'usage (TCO)**. Il prend en compte des éléments financiers déterminants tels que le coût d'achat, les dépenses en carburant ou en énergie, les frais de maintenance, la fiscalité, ainsi que les éventuelles subventions ou incitations financières disponibles. Cette double évaluation, à la fois économique et environnementale, permet d'établir une comparaison complète entre les différentes options technologiques, qu'il s'agisse de diesel, gaz naturel, électrique, hydrogène ou hybride.

Ces évaluations dépendant fortement des silhouettes et usages spécifiques considérés (ce qui justifie cette approche de mettre à disposition un outil dans les mains des exploitants), il est ici fourni des exemples de résultats plutôt que des constats généraux (Figure 78 et Figure 79).

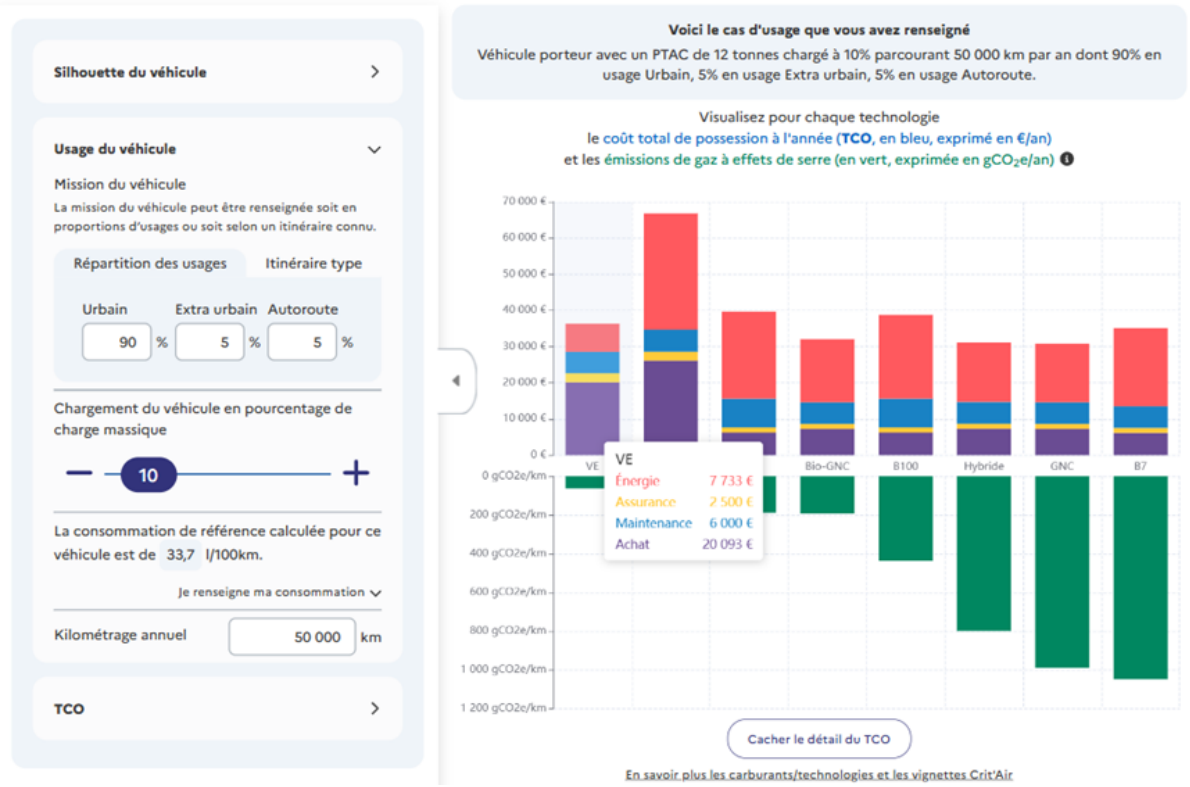


Figure 78 : Exemple d'évaluation des couts totaux d'usages et des émissions de GES pour un véhicule 12T sur un usage urbain, 10 ans de durée de vie, 50 000 km annuels, Source : outil "Verdir ma flotte"

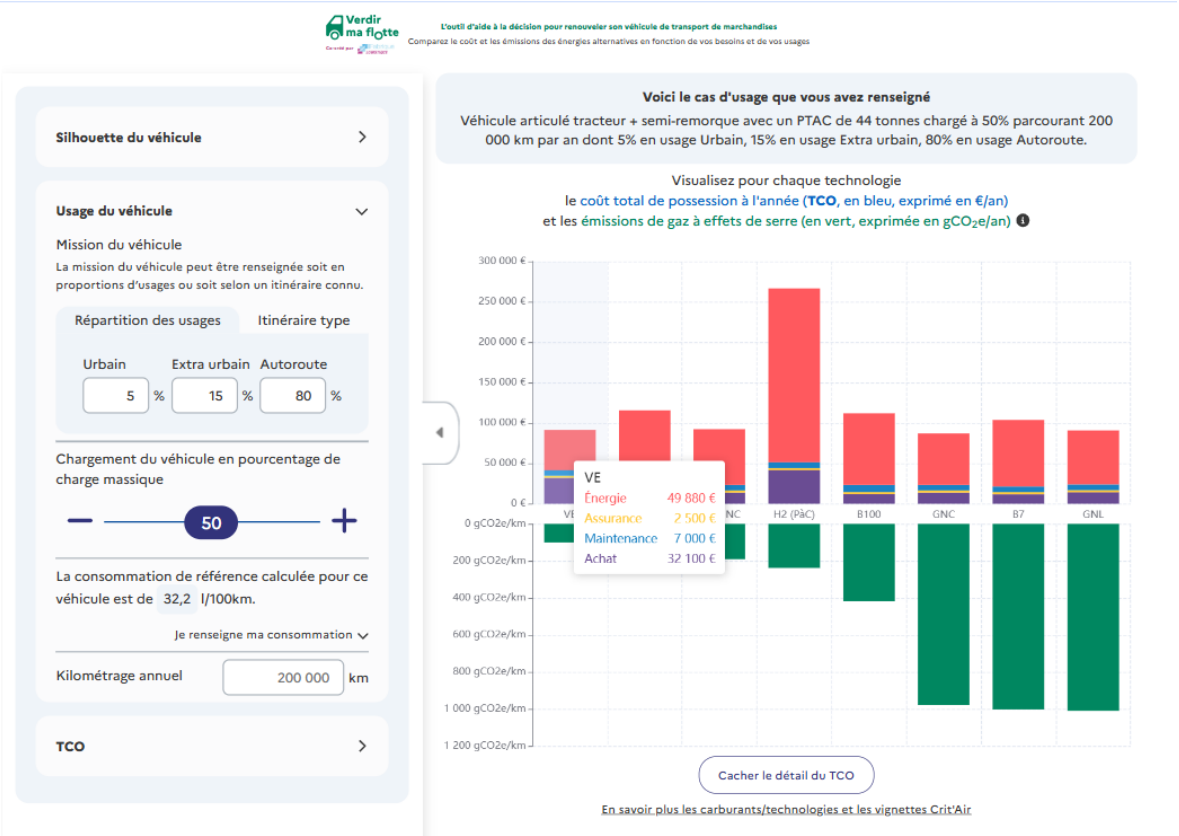


Figure 79 : Exemple d'évaluation des couts totaux d'usages et des émissions de GES pour un véhicule 44T sur un usage principalement autoroutier, 10 ans de durée de vie, 200 000 km annuels, Source : outil "Verdir ma flotte"

7.2.4. Synthèse : Panorama des solutions technologiques, vecteurs énergétiques et défis associés

Tableau 20 : Synthèse des défis techniques, économiques et environnementaux des technologies/vecteurs énergétiques

Technologie de propulsion	Vecteur énergétique	Défis techniques	Défis économiques	Défis environnementaux	Sources
Moteur à combustion interne (ICE)	Diesel	Réduction des émissions polluantes, amélioration du rendement thermique (~40%)	Coûts croissants des systèmes de post-traitement, vulnérabilité aux taxes carbone	Émissions de GES élevées (~85-100 gCO_{2e}/MJ), pollution locale persistante	[68][66]
	Biodiesel (FAME, HVO)	Compatibilité variable avec les moteurs, stabilité des mélanges riches en biodiesel	Coût élevé des biocarburants avancés (HVO), disponibilité limitée	Risque de ILUC, incertitude sur l'impact global de certaines filières	[65][71]
	Biogaz	Réduction des émissions polluantes, Infrastructure de stockage/distribution spécifique, variations de qualité	Coût des infrastructures spécifiques, compétition avec d'autres usages du biométhane	Fuites de méthane dans la chaîne d'approvisionnement, émissions fugitives	[68][70]
	Gaz naturel (CNG, LNG)	Réduction des émissions polluantes, Optimisation des réservoirs cryogéniques, limitation des fuites de méthane	Conversion coûteuse des flottes, risque de réglementation stricte sur le méthane	Fuites de méthane, dépendance prolongée aux combustibles fossiles	[68][72]
	Hydrogène	Contrôle des NO_x, optimisation du rendement inférieur aux FCEV	Coût des infrastructures spécifiques et rendement inférieur aux piles	Fuites d'hydrogène et émissions NO_x, efficacité WtW inférieure aux piles	[68][72]
Véhicule électrique à batterie (BEV)	Électricité (batterie)	Amélioration de la densité énergétique des batteries (~250 Wh/kg), infrastructure de recharge rapide	Coût élevé des batteries (~100-150 $/kWh), dépendance aux matières premières critiques	Impact environnemental de l'extraction/recyclage des matériaux, mix non décarboné	[71][67]
Véhicule hybride rechargeable (PHEV)	Électricité + carburant fossile	Optimisation thermique/électrique, gestion intelligente de l'énergie	Coût supérieur aux ICE, dépendance à la recharge régulière par l'utilisateur	Réduction limitée des émissions WtW si le mode électrique est sous-utilisé	[68][72]
Pile à combustible (FCEV)	Hydrogène	Amélioration de la durabilité des piles, densité énergétique des réservoirs	Coût élevé de l'hydrogène vert (~4-6 $/kg), dépendance aux subventions	Disponibilité limitée d'hydrogène vert, perte d'efficacité dans la chaîne	[68][71]

8. Extension des constats : modélisation des impacts sur les territoires

Ce chapitre synthétise l'utilisation des nouvelles données expérimentales générées dans le cadre de ce projet pour alimenter la chaîne d'outils digitaux développée par IFPEN visant à évaluer les impacts locaux du transport routier.

8.1. État de l'art des modèles d'émissions

Les modèles d'émissions du trafic routier, tels que COPERT, HBEFA et PHEM, sont des outils essentiels pour estimer les émissions de polluants, mais ils se heurtent à des limites importantes. Ces modèles fournissent des facteurs d'émission (FE) pour estimer les polluants générés par des véhicules spécifiques sur des tronçons de route spécifiques. Cependant, leur facilité d'utilisation et leur précision sont façonnées par le type et la granularité des données d'entrée requises pour récupérer ces FE.

HBEFA introduit une sensibilité aux conditions de circulation, offrant une granularité améliorée par rapport à COPERT. Cependant, son applicabilité est principalement adaptée aux contextes d'Europe centrale, ce qui limite sa pertinence et sa reproductibilité dans d'autres régions où les modèles de trafic ou les environnements réglementaires sont différents.

PHEM, capable de produire des estimations d'émissions à haute résolution, seconde par seconde, excelle en termes de précision. Cependant, il nécessite de nombreuses données spécifiques aux véhicules et des ressources de calcul élevées, ce qui rend difficile l'évolutivité pour des applications plus importantes ou des flottes de véhicules diversifiées.

Pour l'exploitation des données dans les outils digitaux, comme l'impact des émissions sur les territoires, ainsi que les études d'évaluation énergétique économique et environnementale, puisse fournir des résultats et des suggestions pertinents, un modèle microscopique de consommation de carburant et émissions.

Ce modèle doit prédire avec une précision suffisante la consommation de carburant et les émissions au cours d'une mission, en tenant compte de toutes les influences contributives et de leur interaction : caractéristiques du poids lourds (catégorie, résistance à l'avancement, technologie et performance du groupe motopropulseur), caractéristiques de la mission (charge utile), itinéraire (contraintes d'infrastructure et pente de la route) et style de conduite.

D'autre part, le fait que ce modèle soit appliqué à l'échelle d'un territoire ou des évaluations génériques, le modèle doit aussi être suffisamment générique impose des spécifications supplémentaires sur la simplicité du modèle, sur la paramétrisation simplifiée du modèle. La contribution de cette section consiste à présenter un modèle quasi-statique haute fréquence (1 Hz) visant à estimer la consommation de carburant le long d'un profil de mission.

8.2. Présentation et calibration des modèles IFPEN

L'approche basée sur le modèle est décrite par :

- Une phase de réglage du modèle est effectuée avant l'estimation de la consommation et des émissions, afin de calibrer les paramètres du modèle.
- La modélisation véhicule qui estime le couple moteur instantané et la vitesse du moteur à partir d'un modèle longitudinal pour estimer la puissance demandée à la roue et une loi de passage pour estimer le rapport engagé.

- Le modèle de moteur estime la consommation de carburant instantanée, en fonction également de la température du moteur qui est estimée parallèlement.
- Le modèle des émissions sortie moteur en fonction du point de fonctionnement du moteur.
- Le modèle des émissions post-traitement calcule une efficacité de conversion SCR pour les NO_x et DOC pour les CO et HC.

Le modèle prend comme paramètres d'entrée des spécifications macroscopiques du véhicule, telles que les dimensions de la carrosserie, les caractéristiques macroscopiques du moteur, les informations sur la transmission. Pour ce qui concerne les modèles hybrides, ces véhicules sont toujours en cours d'exploration.

La calibration de ces modèles repose sur une approche de calibration à partir des mesures issues des essais laboratoires pour gérer l'impact de la pente et le poids. Ensuite, ces données seront analysées sur les essais en usage réel afin de capturer les variations observées en usage réel. La calibration des modèles est faite en trois sections : modèle longitudinal, modèle sortie moteur et post-traitement.

Calibration du modèle de la dynamique longitudinal

Le modèle de dynamique longitudinale est basé sur la première loi de Newton :

$$\frac{m * dv}{dt} = F_t - F_{res}$$

Où :

- $\frac{m*dv}{dt}$ est le terme inertiel, avec m représentant le poids du véhicule ainsi que les masses primaires et secondaires d'inertie.
- F_t est la force de traction générée par le moteur.
- F_{res} représente les forces résistives s'opposant au mouvement du véhicule, qui peuvent être détaillées comme suit :

$$F_{res} = F_{aero} - F_{inertial} - F_{rolling}$$

- F_{aero} est la force aérodynamique, fonction de la vitesse instantanée du véhicule, de la vitesse du vent et du coefficient aérodynamique.
- $F_{inertial}$ est la force gravitationnelle, fonction du poids du véhicule et de la pente.
- $F_{rolling}$ est la résistance au roulement, fonction du coefficient de résistance au roulement, du poids du véhicule et de la pente.

Pour chaque poids lourd, il y a besoin de calibrer le coefficient de résistance au roulement qui impacte de forme constante tout au long du trajet, puis le coefficient de coefficient aérodynamique essentiel pour capter l'impact des fortes vitesses.

La force résistive permet de calculer le couple demandé à la roue, auquel il faut additionner la puissance des auxiliaires pour avoir le couple demandé au moteur :

$$T_{engine} = \frac{T_{wheel}}{k * \eta_{trans}} + \frac{P_{aux}}{\omega_{engine}}$$

La puissance consommée par les systèmes auxiliaires (climatisation, compresseurs, etc.) varie selon les conditions de fonctionnement et a un impact notable à faibles vitesses. Sa calibration est cruciale pour ajuster le couple moteur

Grâce aux mesures, les coefficients liés aux forces résistives et les puissances des auxiliaires sont trouvés afin de minimiser l'écart entre le modèle et la mesure de la puissance demandée. En conservant les autres paramètres du modèle fixes et en utilisant les données associées à chaque véhicule, la calibration permet une modélisation réaliste et fiable de la consommation instantanée et des performances dynamiques, avec une correspondance directe avec les mesures réelles.

La Figure 80 illustre la comparaison entre les émissions simulées et mesurées pour un trajet de type WHVC. Ce cycle est composé de segments variés, incluant des portions stabilisées en autoroute et des sections dynamiques en milieu urbain, ce qui en fait un exemple représentatif pour montrer les performances du modèle dans des conditions d'usage variées.

Pour ce trajet, le modèle reproduit correctement la tendance instantanée des émissions, capturant ainsi les variations associées aux transitions entre les différentes phases du cycle. Cette cohérence dans la modélisation des émissions instantanées se traduit également par une correspondance satisfaisante des valeurs cumulées tout au long du trajet.

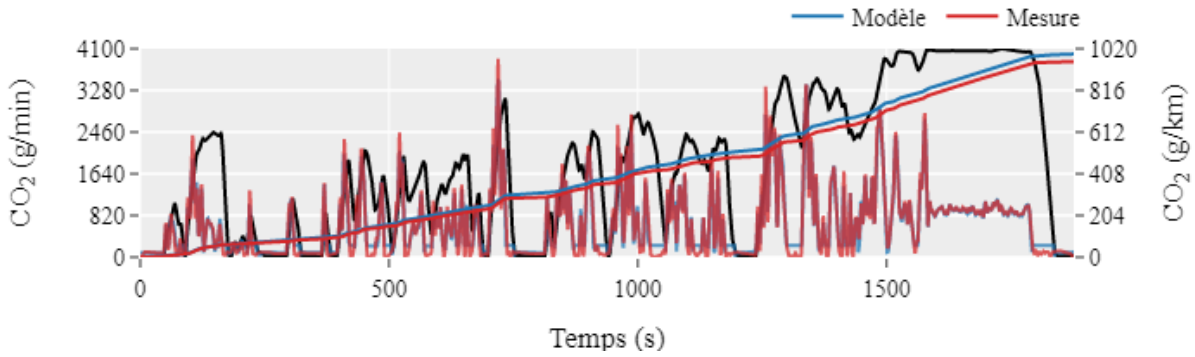


Figure 80 : Comparaison illustrative entre le modèle et la mesure des émissions CO_2.

Calibration des émissions polluants sortie moteur

Les émissions à la sortie moteur NO_x sont basés par le modèle de Gartner [77], il s'agit de ce modèle simplifié qui dépend du débit de carburant (Q_{fuel}), le débit de gaz d'échappement (BGR) en recirculation et puis la masse enfermée dans le cylindré (M_{closed}) :

$$NO_x = Q_{fuel} * e^{\alpha+\beta*BGR+\gamma*M_{closed}}$$

Dans cette approche, le coefficient à calibrer c'est alpha qui permettra de trouver la bonne tendance sur les émissions quasi statiques à la sortie du moteur, tout en partant d'une consommation et un BGR bien simulés. Dans la Figure 81 s'affiche un exemple illustratif afin de montrer la bonne tendance des émissions au fils de temps avec la calibration unique de alpha entre le modèle et la mesure.

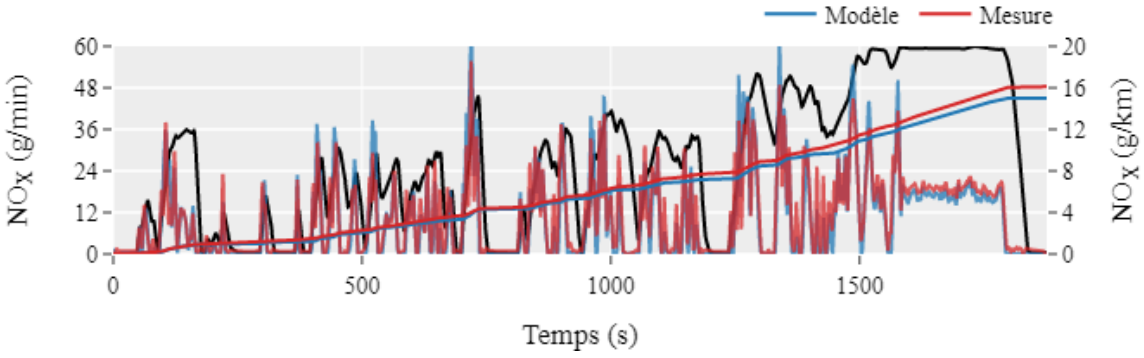


Figure 81 : Comparaison illustrative entre le modèle et la mesure des émissions NO_x sortie moteur

Pour les émissions CO et HC, pour chaque cas, une cartographie des émissions 2D quasi-statique est apprise. Elle est en fonction du point de fonctionnement (régime, couple). Dans ce cas-là, il est important d'avoir une bonne précision du point de fonctionnement. Dans la Figure 82, un exemple illustratif des émissions du niveau de performance.

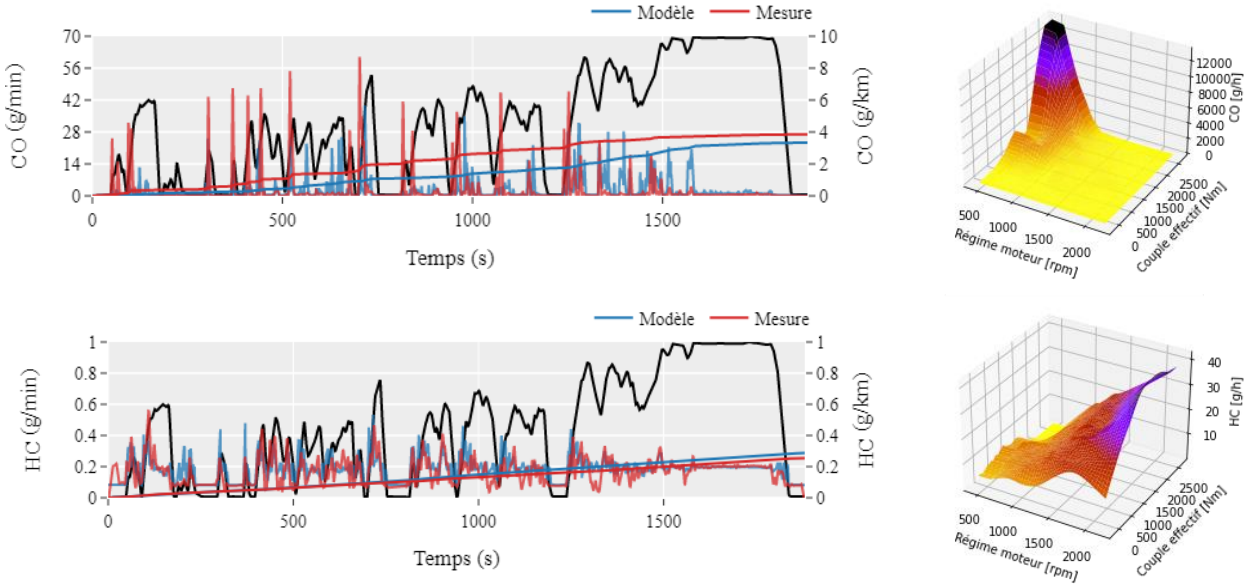


Figure 82 : (a) Comparaison illustrative entre le modèle et la mesure des émissions CO sortie moteur et cartographie apprise, (b) Comparaison illustrative entre le modèle et la mesure des émissions HC sortie moteur et cartographie apprise

Calibration du modèle de post-traitement

La modélisation du post-traitement, qu'il s'agisse d'un système SCR ou DOC, repose sur une approche simplifiée pour garantir sa reproductibilité à divers véhicules. Ce modèle générique met l'accent sur la calibration comme étape cruciale pour reproduire les valeurs mesurées. La cartographie du modèle par défaut intègre plusieurs variables clés : la température post-traitement, la vitesse des gaz d'échappement, les émissions en entrée et la richesse du mélange. Ces paramètres influencent directement l'efficacité des réactions chimiques dans le système de post-traitement.

La calibration se concentre sur deux aspects principaux. D'une part, il s'agit d'ajuster la dynamique thermique du système pour refléter avec précision la montée et la descente en température observées dans les mesures. D'autre part, la cartographie d'efficacité de conversion est optimisée pour minimiser les écarts entre les émissions simulées et mesurées, en prenant en compte les variations des conditions réelles. Une fois le modèle calibré sur un trajet

spécifique, l'objectif est de généraliser cette calibration à l'ensemble des données pour valider le comportement global du modèle.

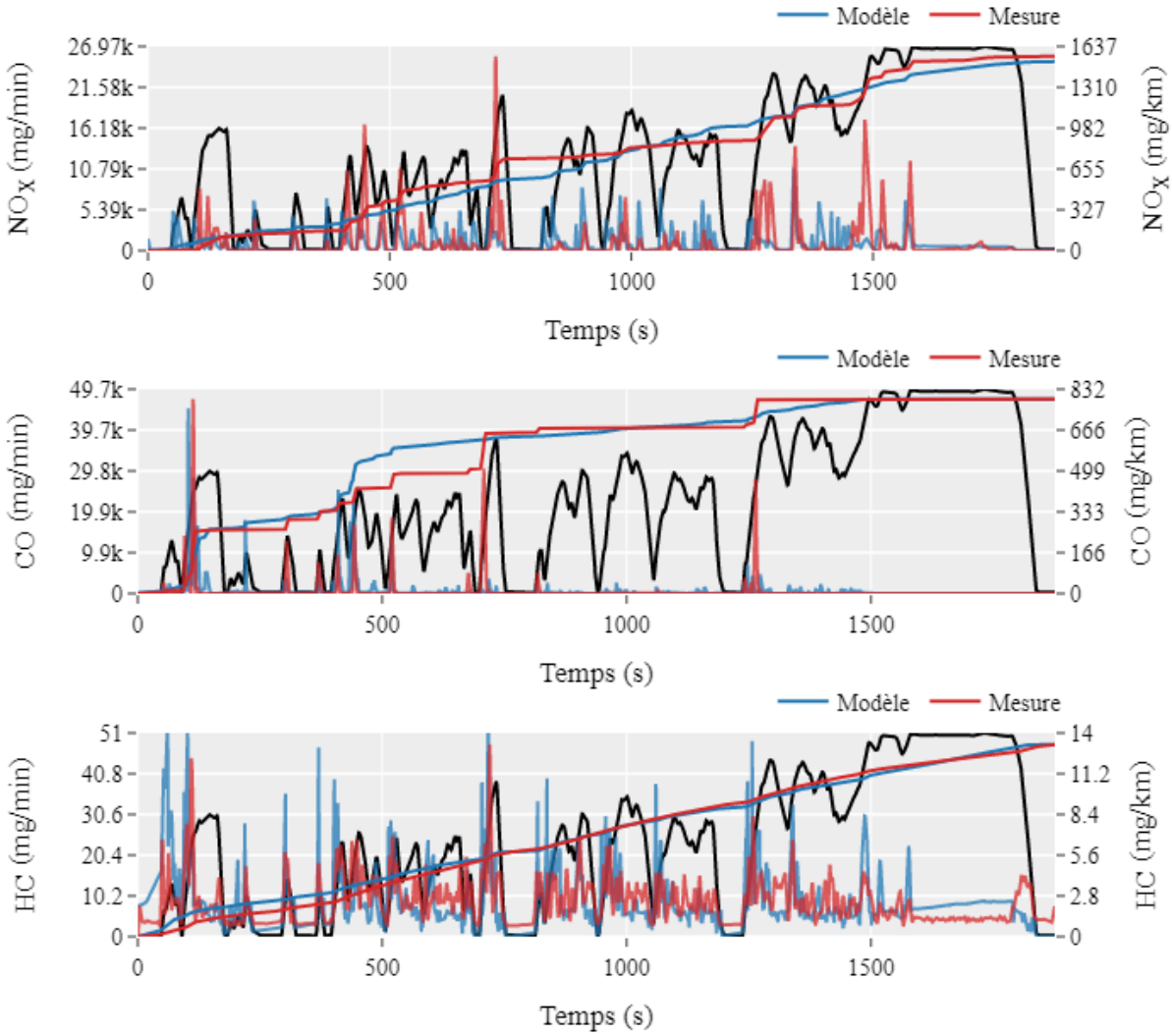


Figure 83 : Comparaison illustrative entre le modèle et la mesure des émissions sortie-échappement

Une limitation apparaît lorsque des variations non modélisées influencent les émissions pour une même mission (vitesse, pente, température, charge) ; c'est alors le comportement moyen qui est appris. Donc, ces variations restent exclues du modèle, ce qui peut introduire des écarts dans les projections.

8.3. Validation des modèles microscopiques

La validation des modèles a été réalisée pour l'ensemble des trajets effectués sur banc à rouleaux. Cette étape est essentielle pour vérifier la capacité des modèles à reproduire les émissions mesurées dans des conditions contrôlées avant de les extrapoler à des situations en usage réel. Pour chaque véhicule, la calibration a été effectuée sur un trajet unique, puis les émissions simulées ont été comparées aux émissions cumulées mesurées à la sortie du post-traitement sur l'ensemble des trajets.

Les résultats sont présentés sous forme de plot de parité avec une densité hexagonale dans la Figure 84, une représentation qui facilite l'évaluation de la performance du modèle. Sur ce graphique, les émissions mesurées sont représentées en abscisse, tandis que les émissions modélisées sont affichées en ordonnée. La couleur des points permet de distinguer les types de cycles étudiés : orange pour les missions urbaines, vert pour les cycles ISC et

rouge pour les cycles WHVC. La forme du symbole représente la charge lors du test (triangle pour le 10%, étoile pour 50% et circule pour le 90%). Pour ce qui concerne les lignes pointillées, ce sont les limites de tolérance de l'écart entre le modèle et la mesure.

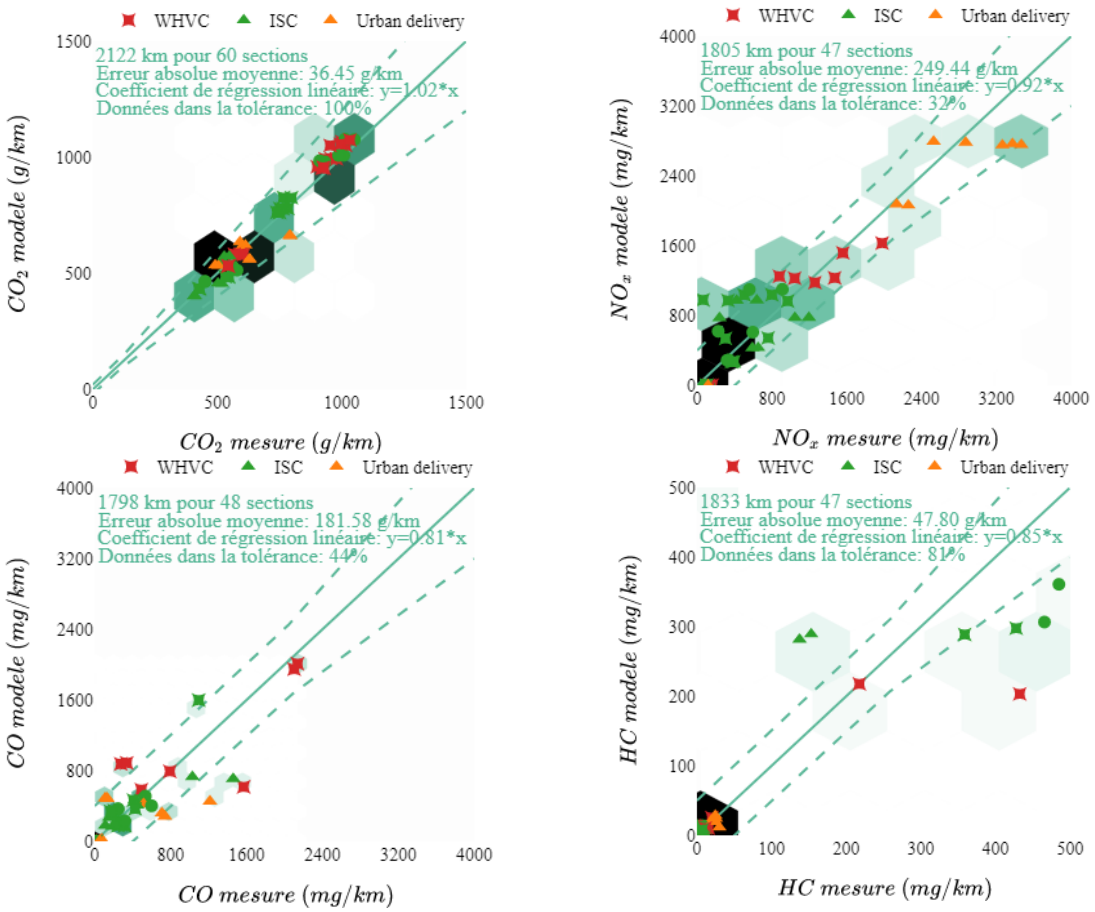


Figure 84 : Comparaison du modèle contre la mesure des émissions cumulées sortie post-traitement dans un plot de parité avec une densité hexagonale.

Pour la consommation et les émissions de CO_2, le modèle montre une très bonne performance en capturant les tendances globales. Cette précision s'explique par la modélisation correcte de la demande en couple moteur et l'application rigoureuse de la loi de passage de couple aux roues.

À iso mission, le niveau d'émissions de CO_2 reste stable et prévisible, sans variations significatives. Cela s'explique par l'absence de phénomènes transitoires majeurs ou de dépendances complexes, comme la sensibilité à la température des systèmes de post-traitement observée pour les polluants, permettant au modèle de reproduire les valeurs mesurées dans une large gamme de conditions.

Pour les émissions polluantes, le modèle démontre une capacité correcte à reproduire les tendances globales, mais il présente des limites dans des conditions spécifiques. Les cycles dynamiques, comme le WHVC, et les températures ambiantes basses accentuent les écarts entre les émissions simulées et mesurées, suggérant une sous-estimation systématique des émissions pour des scénarios complexes. Ces disparités soulignent la nécessité d'affiner la modélisation des phénomènes transitoires et des impacts environnementaux sur le système de post-traitement.

Dans d'autres situations, la dispersion des résultats peut provenir de phénomènes non pris en compte dans le modèle. Par exemple, sur tous les poids lourd diesel segment N3 testé sur la même mission normalisée (WHTC, charge à 50 %, sans pente, 23°C et démarrage à chaud), les émissions mesurées varient considérablement entre

183 à 565 mg/km. Ce qui génère un coefficient de variabilité de 40%, bien que la dépense énergétique et la consommation de carburant diffèrent de 10%. Ces résultats montrent qu'au-delà des variables explicites incluses dans le modèle, d'autres facteurs aléatoires ou non modélisés, comme des variations liées au fonctionnement interne du système de post-traitement ou des incertitudes de mesure, peuvent avoir une influence notable sur les émissions.

Pour résumer, le Tableau 21 montre les émissions moyennes et l'écart-type du modèle et de la mesure sur l'ensemble de trajets utilisés pour la validation et qui sont aussi affichés sur le plot de parité.

Tableau 21 : Emissions moyennes et écart type sur les essais de validation du modèle.

	Mesure		Modèle		Ecart entre moyennes
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
CO_2 (g/km)	701	199	708	222	-8
NO_x (mg/km)	895	939	898	838	-3
CO (mg/km)	438	512	413	445	25
HC (mg/km)	180	341	175	278	5

8.4. Outils digitaux d'aide à la décision

La plateforme interne proposé R-TAMS intègre des données du monde réel sur le comportement de conduite, les pentes et les modèles de trafic, fournissant une représentation plus dynamique et plus précise des émissions. Cette approche va également au-delà des limites géographiques et des problèmes d'évolutivité de en exploitant des modèles d'IA formés sur des mesures de conduite approfondies et réelles.

R-TAMS va au-delà de l'état de l'art en matière d'estimation des émissions du trafic routier en s'attaquant aux principales limites des modèles existants. Malgré les contributions de l'état de l'art, ces modèles partagent des inconvénients communs. Ils ont du mal à s'adapter à la dynamique du trafic en temps réel, manquent d'évolutivité et fournissent un support limité aux technologies émergentes. Ces modèles existent souvent sous forme de bases de données ou de feuilles de calcul complexes, nécessitant une expertise spécialisée pour intégrer les paramètres de l'infrastructure routière, ce qui en fait principalement des outils pour les ingénieurs des transports.

Les principales innovations comprennent : Identification améliorée des sources de polluants :

- R-TAMS fournit des données d'émissions très précises et en temps réel, identifiant les sources de polluants avec une plus grande granularité que les modèles traditionnels. À l'aide de l'IA, R-TAMS s'ajuste en fonction de variables telles que la pente et le comportement de conduite, afin de fournir des informations spécifiques au contexte pour les zones urbaines. Les données des enregistrements détaillés des appels (CDR) et l'intégration SIG permettent une cartographie précise des émissions.
- Modélisation de scénarios pour la mise à l'essai de politiques : La plateforme offre des capacités de simulation pour modéliser l'impact des mesures de contrôle de la pollution (par exemple, les zones à faibles émissions), permettant aux décideurs de comparer les stratégies et de reproduire des politiques efficaces dans toutes les régions.
- Architecture adaptative basée sur le cloud : R-TAMS est basé sur le cloud et adaptable à divers territoires avec un développement minimal. Le tableau de bord personnalisable permet également de visualiser et d'interagir facilement avec les données, ce qui favorise l'accessibilité et la convivialité pour les parties prenantes.
- Tableau de bord interactif convivial : Tous les développements de R-TAMS sont intégrés dans un tableau de bord interactif et convivial qui permet aux utilisateurs de naviguer sans effort dans les émissions

modélisées, les données sur la qualité de l'air et divers scénarios. Ce tableau de bord permet aux parties prenantes d'explorer les émissions et les impacts des politiques de manière dynamique, rendant les données complexes accessibles et exploitables. Le tableau de bord est développé dans le cadre des projets H2020 de l'UE OLGA et MAGPIE, garantissant l'alignement sur les normes européennes avancées en matière de visualisation de données et de conception d'interface utilisateur, ce qui améliore la convivialité pour les autorités locales, les urbanistes et d'autres décideurs.

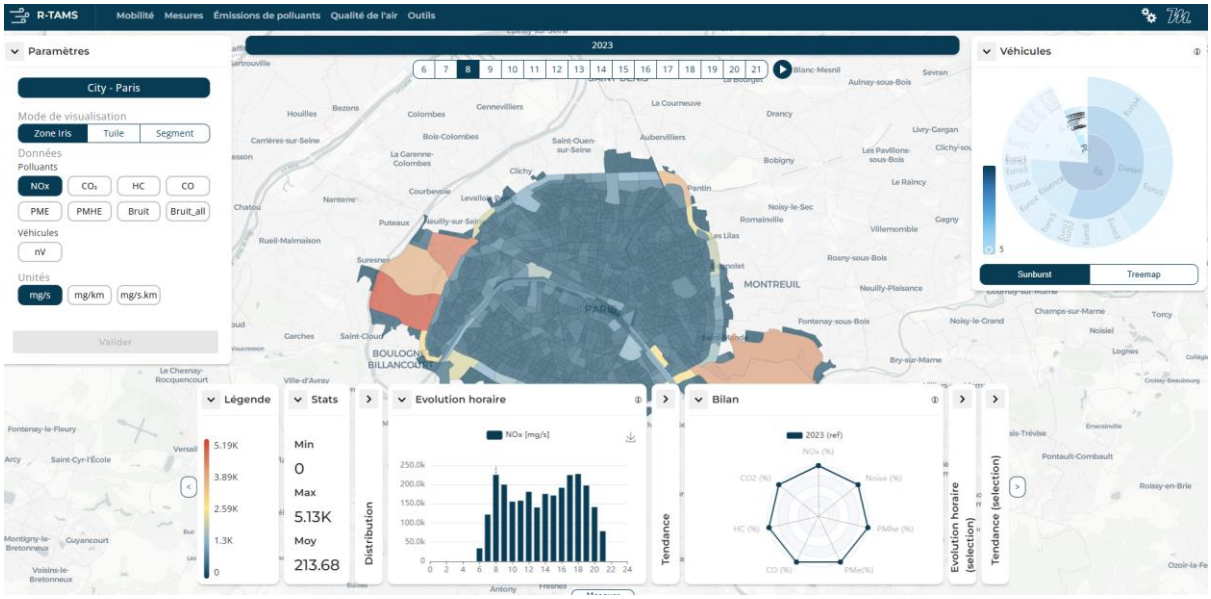


Figure 85 : Exemple d'affichage disponible sur R-TAMS.

Dans la version précédente, les connaissances sur les émissions des poids lourds en usage réel étaient limitées. Les améliorations apportées grâce à la collecte de données plus approfondie permettent désormais d'améliorer ces deux aspects. Concernant les émissions, les phénomènes liés à l'usage réel sont mieux identifiés, ainsi que l'intégration de nouveaux véhicules utilisant des carburants alternatifs au diesel.

En ce qui concerne l'usage réel, la base de données de trajets repose désormais sur les données collectées lors de la campagne CEMS. Cette approche offre une meilleure compréhension des dynamiques des poids lourds à différents chargements, permettant une analyse plus représentative des conditions réelles.

9. Conclusion

Dans un contexte de diversification des technologies de propulsion et des vecteurs énergétiques adressant les enjeux de décarbonation et de réduction des émissions des poids-lourds, la présente étude a permis :

- D'établir de manière publique et transparente un bilan transverse des émissions de gaz à effet de serre (GES), polluants réglementés (PR) et non réglementés (PNR) des véhicules lourds :
  - Sur un panel de solutions technologies actuelles le plus large possible
  - Dans des conditions d'utilisation variées y compris critiques
- De positionner ce constat par rapport aux normes actuelles et à venir pour guider les pouvoirs publics
- D'apporter un éclairage au-delà des émissions à l'échappement, en considérant les filières énergétiques en amont et plus globalement des analyses sur le cycle de vie des véhicules

Un total de 10 véhicules a été testé : porteurs, tracteur et bus, couvrant des motorisations diesel (testées en B7, B100, HVO et GTL), gaz, bicarburation diesel gaz et hybridés électriquement (rechargeable et non). Les essais ont été réalisé sur banc véhicule pour reproduire des conditions répétables entre les différentes configurations, ainsi que sur route ouverte avec des essais de type suivi de conformité (ISC) et en exploitation réelle. Une instrumentation poussée était mise en œuvre.
Les résultats obtenus ont permis de mener plusieurs analyses comparatives :

Comparaison PL diesel vs. GNV (4 véhicules comparables 2 à 2):

Les **émissions de GES sont très proches** pour les deux types de carburants, avec des contributions du N_2O et CH_4 non négligeables de l'ordre de quelques pourcents.

Les émissions de NO_x sont nettement inférieures en GNV (entre -30% et -80% en fonction des véhicules et type d'essais). Au contraire, **les émissions de PN_{10} sont 2 à 10 fois supérieures en GNV** par rapport à son homologue fonctionnant au B7. Il est à noter que les véhicules GNV comparés ici ne disposent pas de filtre à particules. D'autres véhicules GNV avec FAP ont été testés dans la partie TCP de cette même étude et montrent les émissions de particules les plus faibles du panel. De fortes émissions de NH_3, de l'ordre de 10 mg/km.t, sont relevées dans le cas d'un tracteur GNV, nettement supérieures aux émissions en Diesel. Elles semblent être due à un manque de sélectivité du catalyseur et/ou à un pilotage de richesse pas assez précis, en particulier pendant les transitoires.

Ces conclusions sont en totale cohérence avec la littérature en ce qui concerne les émissions de GES et les NO_x. Il n'existe peu d'études s'intéressant aux émissions d'ammoniac et de PN_{10} des véhicules mais l'arrivée sur le marché de filtres à particules pour les moteurs GNV pour la norme Euro 7 indique que cette problématique a été prise en compte par les constructeurs.

Apport de la bicarburation diesel-gaz (1 véhicule testé)

En fonction des conditions, une baisse de 14% à 24% des émissions de CO_2 est mesurée par rapport aux véhicules Diesel (B7) et GNV, permise par l'association du rapport H/C avantageux du GNV au rendement intrinsèque plus élevé du cycle diesel. Le gain en **émissions de GES**, terni par de fortes émissions de N_2O, est de **7% par rapport au Diesel et de 20% par rapport au GNV**. En revanche, les **émissions de PN_{23} et surtout de PN_{10} sont les plus élevées du panel**. De même, les émissions de THC sont 20 fois plus élevées que sur les autres véhicules sur cycle urbain.

Effets des carburants bas-carbones diesel (1 porteur et 2 tracteurs testés)

Les émissions de CO_2 à l'échappement varient de quelques pourcents en fonction des carburants B7, B100, HVO et GTL testés. Ces différences sont liées aux différences de PCI et de composition des carburants.

Les polluants locaux (NO_x, CO, THC, NH_3, PN_{10}) présentent des **niveaux d'émissions proches** quel que soit le carburant utilisé. Les émissions polluantes à l'échappement sont beaucoup plus sensibles aux conditions d'utilisation (température ambiante, cycle, charge, état du système de post-traitement) qu'aux propriétés du carburant. Ces conclusions sont cohérentes avec les études antérieures : les carburants testés (**HVO, GTL, B100**) sont tous – du réservoir à la roue - des **alternatives proches au carburant de référence B7**.

Par ailleurs, les émissions de polluants et de GES constatés sur les véhicules N3 GO OEM#3 (utilisé en B100) et N3 GO B1 OEM#3 sont similaires.

Apport de l'hybridation électrique sur bus GNV (2 bus équivalents conventionnel et hybride non rechargeable testés):

L'hybridation permet un gain de CO_2 compris en 4% et 8%. Ces résultats sont en retrait par rapport aux annonces commerciales du constructeur qui communique sur un gain jusqu'à 19% de CO_2 [25]. L'hybridation n'apporte pas de gain significatif concernant les émissions des polluants locaux, celles-ci étant très faibles pour les deux véhicules, à l'exception du NH_3 en conditions urbaines. A noter que les deux bus GNV étant équipés d'un filtre à particules, les émissions de PN_{10} et PN_{23} sont extrêmement faibles.

Apport de l'hybridation rechargeable sur porteur N3 :

Les émissions de CO_2 sont très sensibles au mode d'utilisation. Le mode recharge est sans surprise énergivore et émissif avec des émissions de CO_2 en hausse de +30% à +200% par rapport au mode de maintien de charge. Les émissions polluantes sont pour autant maitrisées dans ce mode. Les émissions de NO_x sont en augmentation en mode « épuisement de charge » : malgré les émissions nulles en mode ZEV les pics d'émissions observées lors des redémarrages moteur sont fortement émissifs.

Les **gains de CO_2** seront donc – à l'image des véhicules particuliers PHEV **– très dépendants de l'utilisation** qui sera fait de ce camion qui permet d'effacer grâce au mode ZEV les usages urbains, de manœuvre, de chargement / déchargement qui sont les parmi les plus critiques en termes d'émissions polluantes.

Comparaison aux scores à l'homologation et aux seuils normatifs

Dans des conditions comparables à celles de l'homologation, les **limites normatives Euro VI sont globalement respectées** par les différents véhicules et les émissions mesurées sont globalement proches de celles déclarées lors de l'homologation des véhicules, à l'exception des émissions de NO_x, plus élevées lors de cette étude, et des émissions de particules dans le cas du Dual-Fuel.

Mesure en exploitation réelle

Des mesures en exploitation réelle ont permis de collecter plus de 30 000 km de données dans des situations variées d'utilisation. Il est mis en évidence que les trajets courts, à l'instar des véhicules particuliers mais de manière plus surprenante, sont fréquents et particulièrement émissifs. Sur les trajets plus longs les mesures sont cohérentes avec les mesures conduites en laboratoire.

L'intérêt des carburant bas carbone réside dans le potentiel de décarbonation en considérant les émissions du puit à la roue. Aussi, bien que le cœur de l'étude réside dans la comparaison des émissions véhicules à l'échappement, il était nécessaire de faire un statut sur la comparaison des différents technologies et vecteurs énergétiques à cette échelle plus large. Ce bilan est proposé en élargissant les solutions technologiques

considérées (électrique et hydrogène), et en considérant l'ensemble du cycle de vie des véhicules (émissions directes, production et fin de vie des véhicules, production énergétique). Il se base sur les données de référence du JEC et sur des travaux antérieurs menés par IFPEN avec le CONCAWE. Il apparaît : que l'électrique a un fort potentiel de décarbonation toutefois sensible à l'intensité carbone du mix électrique local et à l'impact de production de la batterie, que l'apport de l'hydrogène (FCEV ou ICEV) est également fortement dépendant de son origine, et enfin que les biocarburants avancés (carburants de synthèse avec CCS) peuvent permettre d'atteindre les bilans sur cycle de vie parmi les plus bas. Il faut toutefois indispensable de prendre en considérations les contraintes et limitations liées aux filières énergétiques : maturité et coût des process, disponibilité des matières premières et concurrences entre secteurs.

10. Glossaire

CO_2 – *Dioxyde de carbone*
CO – *Monoxyde de carbone*
NO_X – *Oxydes d'azote*
NO – *Monoxyde d'azote*
NH_3 – *Ammoniac*
NO_2 – *Dioxyde d'azote*
N_2O – *Protoxyde d'azote* (gaz à effet de serre, ayant un PRG de 273)
(T)HC – *Hydrocarbures imbrûlés*
CH_4 – *Méthane fossile* (gaz à effet de serre, ayant un PRG de 29,8)
NMHC – *Hydrocarbures non méthaniques*
NMOG - Non-Methane Organic Gases (composés gazeux organiques non méthaniques)
FSN – Fuel Smoke Number (indice de fumée utilisé initialement pour la mesure des émissions de particules Diesel)
PM – *Particulate Mass* (Masse de particules)
PN – *Particle Number* (Nombre de particules, pouvant être exprimé de 2 façons selon la norme considérée : PN_{23} dans le cas d'Euro 6 ou PN_{10} pour Euro 7, le nombre faisant référence à la taille minimale de particules prise en compte dans la mesure exprimée en nm)
PRG - *Potentiel de Réchauffement Global* d'un gaz (masse de CO_2 qui produirait un impact équivalent sur l'effet de serre)
GES – *Gaz à Effet de Serre*
EATS – *Exhaust After-Treatment System* (dispositif anti-pollution destiné à la réduction des émissions polluantes du moteur et pouvant être composé de divers éléments parmi lesquels : 3WC, DOC, LNT, SCR, ASC)
LNT – *Lean NOx Trap* (piège à NO_x)
TWC - *Three Way Catalyst* (catalyseur trois voies destiné à traiter les émissions de CO, HC et NO_x)
DPF – *Diesel Particulate Filter* (filtre à particules pour véhicule diesel)
GPF - *Gasoline Particulate Filter* (filtre à particules pour véhicule essence)
c/raw - *coated* (catalysé) ou *raw* (non-catalysé), dans le cas par exemple d'un filtre à particules
ASC - Ammonia Slip Catalyst (catalyseur destiné à traiter les rejets éventuels d'ammoniac issus de l'injection d'urée dans un dispositif SCR)
SCR – *Selective Catalytic Reduction* (réduction catalytique sélective destinée au traitement des émissions d'oxydes d'azote)
CC/UF - *Close-Coupled* (positionnement proche moteur du dispositif anti-pollution) ou *Under-Floor* (positionnement sous plancher plus éloigné)
ECU – *Engine Control Unit* (unité de contrôle du moteur)
OBD – *On Board Diagnostic* (diagnostic embarqué ; désigne l'ensemble des éléments de diagnostic répondant à des exigences règlementaires, mis en œuvre par les constructeurs des véhicules afin de contrôler le bon fonctionnement des composants susceptibles d'affecter notamment les émissions polluantes du véhicule au cours de sa vie)
CAN - Controller Area Network (réseau interne propre au véhicule sur lequel circulent des données relatives au fonctionnement des différents systèmes le composant)
IDE - *Injection Directe Essence* PFI - *Port Fuel Injection (injection indirecte essence)*
CNG – *Compressed Natural Gas*
Turbo/Atmo – Moteur suralimenté en air par turbocompresseur (*turbo*) ou non (*atmo*)
HEV – *Hybrid Electric Vehicle*

PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*
ZFE – Zone à Faibles Emissions
Euro – Dénomination des normes d'émissions Européennes
BàR – Banc à rouleaux
WHSC – *Worldwide Harmonized Steady-State Cycle* (Cycle stabilisé harmonisé mondial)
WHTC – *Worldwide Harmonized Transient Cycle* (Cycle transitoire harmonisé mondial)
WHVC – *Worldwide Harmonized Vehicle Cycle* (Cycle véhicule harmonisé mondial)
TA – *Type Approval* (homologation initiale des véhicules en vue de leur mise sur le marché)
ISC – *In-Service Conformity* (conformité en service au cours de la vie utile des véhicules)
RDE – *Real Driving Emissions* (évaluation des émissions en conditions réelles)
PEMS – *Portable Emission Measurement System* (système de mesure normalisé des émissions utilisé lors d'essais routiers RDE)
NDIR – *Non-Dispersive InfraRed* (spectroscopie infrarouge non dispersive utilisée pour la mesure du CO et du CO_2)
CLD – *Chemiluminescence Detector* (Détecteur à chimiluminescence utilisé pour la mesure des NO_x)
FID – *Flame Ionization Detector* (Détecteur à ionisation de flamme utilisé pour la mesure des HC et du CH_4)
FTIR – *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier permettant l'analyse d'une gamme étendue de composés gazeux, fonction de la motorisation évaluée et par voie de conséquence de la bibliothèque choisie : gaz/Diesel)
APC – *AVL Particle Counter* (instrument utilisé pour la mesure du nombre de particules PN_{23} selon le protocole défini pour Euro VI)
OBS-ONE – *HORIBA On-Board emissions measurement System* (instrument utilisé lors d'essais routiers, pour la mesure des émissions gazeuses et particulaires PN_{23} selon le protocole ISC défini pour Euro VI)
SPCS – *Solid Particle Counting System* ((instrument utilisé pour la mesure du nombre de particules PN_{10} selon le protocole défini pour Euro 7)
CEMS – *Continuous Emissions Measurement System* (système de mesure continue des émissions)
EFM – *Exhaust Flow Meter* (Dispositif de mesure du débit échappement)
GPS – *Global Positioning System* (Système de positionnement par satellite)
SVM – Small Volume Manufacturer
USVM – Ultra Small Volume Manufacturer
CS – *Charge Sustaining*, mode de fonctionnement en maintien de charge des véhicules PHEV
CD – *Charge Depleting*, mode de fonctionnement en épuisement de charge des véhicules PHEV

11. Références bibliographiques

[1] CITEPA (2020), Secten 2020 : Répartition des émissions de GES et polluants en France.

[2] DataLab (2019), Bilan annuel des transports.

[3] Agence européenne pour l'environnement (AEE, 2020), Monitoring CO_2 emissions from heavy-duty vehicles.

[4] AEE, 2022, Briefing, «Reducing greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles in Europe », https://www.eea.europa.eu/publications/co2-emissions-of-new-heavy

[5] Ministère de la Transition écologique (2022), Les émissions de GES du secteur des transports.

[6] SNBC2, https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf

[7] SNBC 3, https://concertation-strategie-energie-climat.gouv.fr/les-grands-enjeux-de-la-snbc-3

[8] ICCT POLICY UPDATE – Euro 7: The new emission standard for light-duty and heavy-duty vehicles in the European Union (2024)

[9] « Principaux avantages (en vert) et inconvénients ou freins (en orange) des différentes options de décarbonation pour les poids lourds sur longue distance, de manière qualitative », Aurélien Bigo, Polytechnique insights, https://www.polytechnique-insights.com/tribunes/industrie/transport-de-marchandises-tout-ce-quil-faut-faire-pour-sortir-du-petrole/#note-17

[10] Feuille de route TLF « Quelle transition énergétique pour le Transport Routier de Marchandise ? », 2020

[11] Rapport CRMT *BG P1725D CAMPAGNE DE MESURES DE POLLUANTS SUR ROUTE AUTOCARS SCANIA ETHANOL, DIESEL ET GNV*. 2018.

[12] Rapport CRMT *BG P1729 P1731 Résultats des mesures d'émissions sur ligne des autocars MAN Gazole, HVO et GNV*. 2018

[13] Rapport CRMT *P1990A CAMPAGNE DE MESURES DE POLLUANTS SUR ROUTE, TRACTEUR MAN Carburants B7, B100*. 2019

[14] Rapport du projet Equilibre : *Analyse des consommations et émissions de véhicules Gaz et Diesel*, Livrable Final. Coordonné par l'IFSTTAR.2019

[15] ICCT WORKING PAPER 2021-26*, Real world NOx performance of Euro VI-D trucks and recommendations for Euro VII*. F. Rodriguez and H. Badshah. 2021.

[16] Airparif et Île-de-France Mobilités. *Mesures des émissions des bus en conditions réelles d'exploitation : comparaisons et facteurs d'influence*. 2021

[17] ICCT (opéré par le VTT – Finlande). An in depth analysis of postprocessing methods on heavy duty Euro VI exhaust emissions. R. Pettinen. 2022

[18] *Effects of the Use of 100% Biodiesel (B100) Obtained from Used Vegetable Oils on the Consumption, Emissions, and Performance of Vehicles and Equipment.* Luis Serrano, Nuno Clara, Diogo Silva, Paulo Matos Carvalho. Conference Paper. 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2023)

[19] *Real world emissions performance of heavy-duty Euro VI diesel vehicles*, T. Grigoratos, G. Fontaras, B. Giechaskiel, N. Zacharof, Atmos. Environ., 201 (2019), pp. 348-359, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.042

[20] ICCT WORKING PAPER 2022-23, Recommendations for the next generation of China's heavy-duty vehicle emission standard based on testing of China VI vehicles. T. Niu and F. Rodriguez. 2022

[21] *Real-world particulate, GHG, and gaseous toxic emissions from heavy-duty diesel and natural gas vehicles*, Zisimos Toumasatos et al., Atmospheric Environment 327 (2024) 120512, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120512

[22] *Assessment of on-road emissions of refuse collection vehicles,* Gioria, R.; Martini, G.; Perujo Mateos Del Parque, A.; Giechaskiel, B.; Carriero, M.; Zappia, A.; Cadario, M.; Forloni, F.; Lähde, T.; Selleri, T.; Terenghi, R.; Bissi, L.M., EUR 30268 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-19837-6, doi:10.2760/622589, JRC120963

[23] ICCT WORKING PAPER 2023-08, *Emissions performance of Euro VI-D buses and recommendations for Euro 7 standards*, Felipe Rodríguez, Sina Kazemi Bakhshmand, Tianlin Niu, 2023

[24] TNO report | TNO 2019 R10193, Emissions testing of a Euro VI LNG-diesel dual fuel truck in the Netherlands, R. J. Vermeulen, 2019

[25] Communiqué de presse IVECO BUS : https://www.iveco.com/france/Decouvrir-IVECO/Presse/Communiques-de-presse/2022/La-technologie-hybride-nouvelle-generation-dIVECO-BUS-soutient-la-mobilite-durable-tout-en-confortant-le-TCO

[26] https://dieselnet.com/standards/eu/hd.php

[27] Document 32011R0582 - Commission Regulation (EU) No 582/2011 of 25 May 2011 (2011)

[28] Document 02011R0582-20221210 - Consolidated text: Commission Regulation (EU) No 582/2011 of 25 May 2011 (2022)

[29] Euro 7 – New rules for vehicle emissions. Presentation of the proposal COM(2022) 586, M. Guillou, P. Dilara (2022)

[30] European Parliament Legislative Observatory – 2022/0365(COD] – Type-approval of motor vehicles and engines with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) (2022)

[31] COM(2022)0586 - REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009 (2022)

[32] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION GENERAL APPROACH - Regulation on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) General approach (2023)

[33] EUROPEAN PARLIAMENT POSITION - P9_TA(2023)0394 - Type-approval of motor vehicles and engines with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) - Amendments adopted by the European Parliament on 9 November 2023 (2023)

[34] EUROPEAN PARLIAMENT LEGISLATIVE RESOLUTION of 13 March 2024 on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009 (COM(2022)0586 – C9-0375/2022 – 2022/0365(COD))

[35] VOTING RESULT REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL - ST_8943_2024_INIT - on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7), amending Regulation (EU) 2018/858 of the European Parliament and of the Council and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EU) 582/2011, Commission Regulation (EU) 2017/1151, Commission Regulation (EU) 2017/2400 and Commission Implementing Regulation (EU) 2022/1362 Adoption of the legislative act 4017th meeting of the COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION (Economic and Financial Affairs) 12 April 2024, Luxembourg

[36] EUROPEAN UNION EUR-Lex Access to European Union Law – PROCEDURE 2022/0365/COD

[37] 2024/1257 - REGULATION (EU) 2024/1257 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 24 April 2024 on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7), amending Regulation (EU) 2018/858 of the European Parliament and of the Council and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EU) No 582/2011, Commission Regulation (EU) 2017/1151, Commission Regulation (EU) 2017/2400 and Commission Implementing Regulation (EU) 2022/1362

[38] ICCT POLICY UPDATE – Euro 7: The new emission standard for light-duty and heavy-duty vehicles in the European Union (2024)

[39] ACEA – The Automobile Industry Pocket Guide 2024/2025 (2024)

[40] PHINIA – Worldwide Heavy-Duty and Off-Road Emission Standards 2024/2025 (2024)

[41] AVL Website - AMA-i60

[42] HORIBA Website - QCL

[43] HORIBA Website - FTIR

[44] AVL Website – AVL APC+

[45] HORIBA Websiste – HORIBA SPCS

[46] HORIBA Website – HORIBA PEMS OBS-ONE

[47] BORGWARNER - On and Off-highway Commercial Vehicles Emissions Standards Booklet 2021/2022 (2022)

[48] Impact of engine warm-up and DPF active regeneration on regulated & unregulated emissions of a Euro 6 Diesel SCR equipped vehicle, M Leblanc, L Noël, B R'Mili, A Boréave, B D'Anna, S Raux, J. Earth Sci. Geotech. Eng 6, 29-50 (2016)

[49] Arrêté du 21 juin 2016 établissant la nomenclature des véhicules classés en fonction de leur niveau d'émission de polluants atmosphériques en application de l'article R. 318-2 du code de la route

[50] Arrêté du 9 février 2009 relatif aux modalités d'immatriculation des véhicules – Liste des sources d'énergie (Annexe VI)

[51] Comité ministériel Qualité de l'air en ville – Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (2024)

[52] Mission « flash » sur les mesures d'accompagnement de la création de zones à faibles émissions mobilité – Assemblée nationale, Commission du développement durable et de l'aménagement du territoire (2022)

[53] Rapport d'information « zones à faibles émissions mobilité (ZFE-m) : sortir de l'impasse (2023)

[54] Acceptabilité des ZFE : enseignements à tirer de l'expérience des pays européens (2023)

[55] ZFE : 25 propositions pour allier transition écologique et justice sociale (2023)

[56] IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896

[57] Concawe Future diesel-like renewable fuels – A literature review, 2022

[58] Longrun, H2020 Project, Development of efficient and environmental friendly long distance powertrain for heavy duty trucks and coaches. https://h2020-longrun.eu/partners/

[59] Premières grandes orientations de la Stratégie nationale bas-carbone n°3 – horizon 2030 – Novembre 2024

[60] Concawe, Sustainable biomass availability in the EU, to 2050. https://www.concawe.eu/publication/sustainable-biomass-availability-in-the-eu-to-2050/

[61] https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/figures-and-tables, consulté 11/2024

[62] Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation)

[63] Feuille de route « Article 301 » de décarbonation de l'aérien, 2023

[64] Concawe Rpt-24_3-2 : 'A life-cycle assessment tool for heavy-duty vehicles', basé sur les travaux d'IFPEN.

[65] Concawe Rpt-22-18 : Rapport sur les biocarburants diesel, détaillant leurs performances environnementales en cycle de vie.

[66] JEC Well-to-Wheels v5 : Joint Research Centre (JRC), EUCAR, Concawe. Analyse puits-à-roue des carburants et technologies émergentes en Europe.

[67] D1.16 Final Roadmap CO_2 Emissions Reduction, livrable du projet européen LONGRUN.

[68] ICCT (2023) : 'A comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of European heavy-duty vehicles and fuels'.

[69] ICCT (2021) : 'A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars'.

[70] EEA (2024) : 'Monitoring of CO_2 emissions from heavy-duty vehicles - Regulation (EU) 2018/956', Agence européenne pour l'environnement.

[71] ERTRAC (2024) : 'Decarbonizing Freight Transport with available green energy'.

[72] ERTRAC (2022) : 'Fuels & Powertrains Research Needs Mapping'.

[73] Rapport spécial du GIEC (IPCC 2018) : 'Global Warming of 1.5°C'.

[74] JRC (2020) : 'JEC Well-to-Wheel Report v5.1: Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context'.

[75] JRC (2021) : 'EU Reference Scenario 2020: Energy, Transport and GHG Emissions Trends to 2050'.

[76] JRC (2019) : 'A Framework to Estimate the Greenhouse Gas Emissions of Heavy-Duty Vehicles Using VECTO'.

[77] Gärtner, U., Hohenberg, G., Daudel, H., Oelschlegel, H. (2004). Development and Application of a Semi-Empirical NOx Model to Various HD Diesel Engines. In: Whitelaw, J.H., Payri, F., Arcoumanis, C., Desantes, J.M. (eds) Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines 2. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-10502-3_14

12. Annexes

12.1. Lotissement détaillé de l'étude et planning réalisé

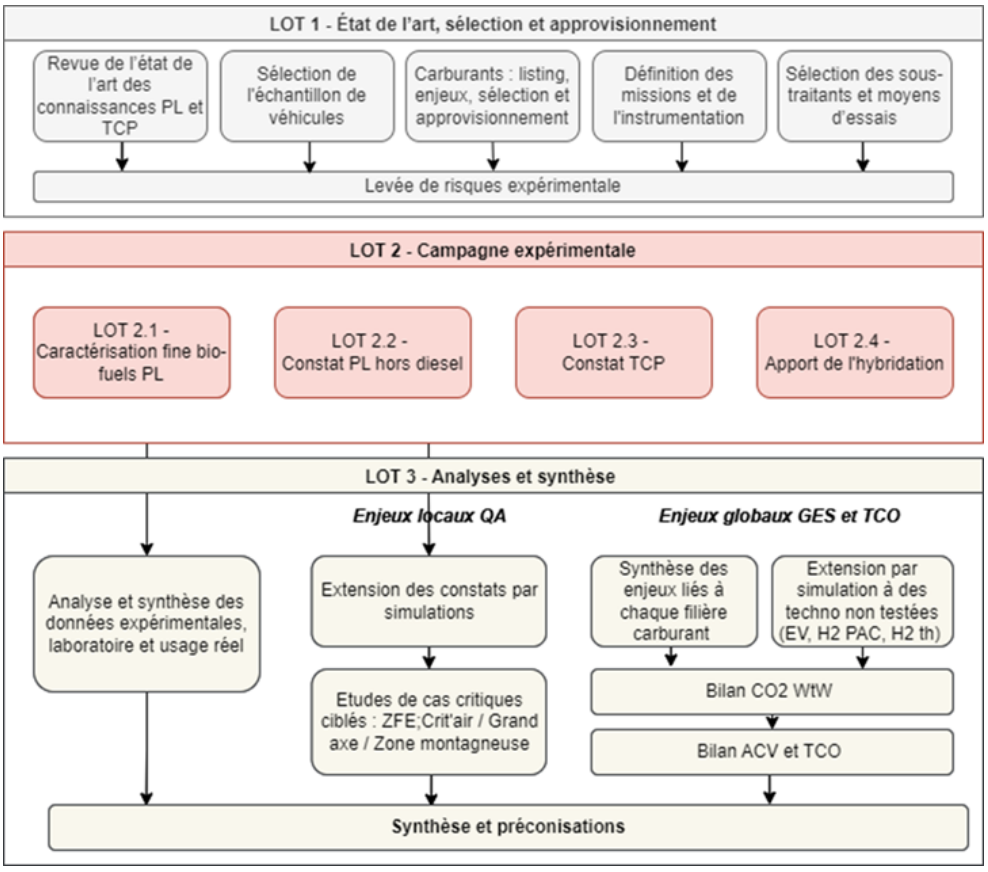


Figure 86 : Structuration de l'étude

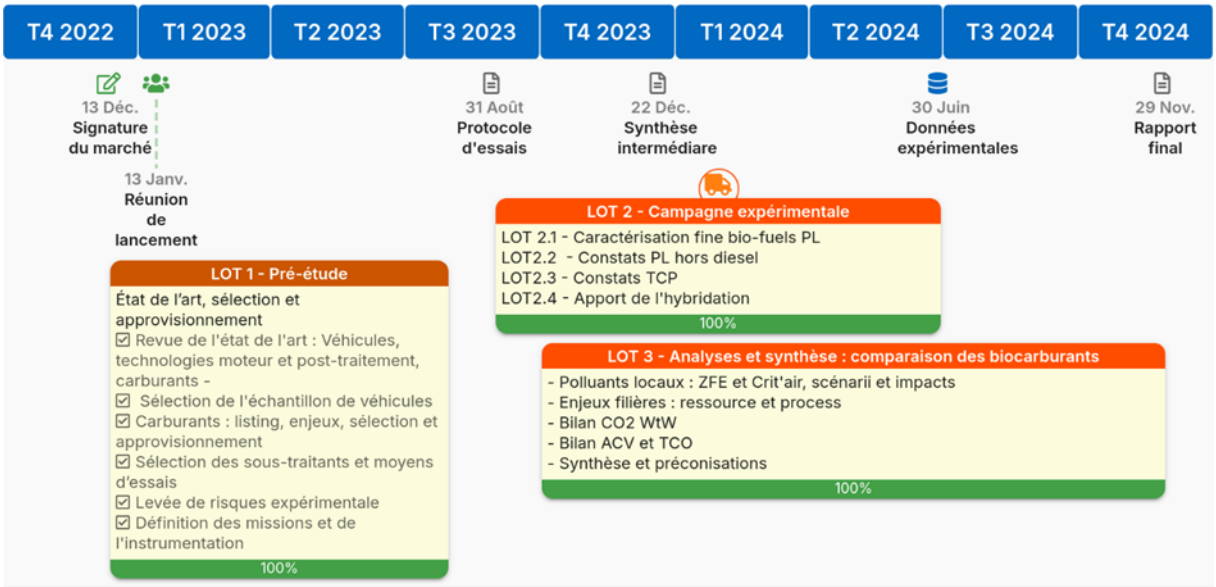


Figure 87 : Macro-planning de déroulement de l'étude

12.2. Analyse bibliographique

12.2.1. Introduction

Par la suite est proposée une analyse bibliographique des études publiques les plus marquantes dans un périmètre proche de notre étude.

12.2.2. Equilibre [14]

Le projet EQUILIBRE vise à évaluer les performances économiques et environnementales des véhicules diesel et gaz dans des conditions réelles d'exploitation. L'étude se distingue des projets similaires en se concentrant sur la perspective du transporteur, examinant les facteurs tels que la route, le trafic et la météo.

Ce projet, qui s'est déroulé de 2011 à 2017, a été lancé à l'initiative de transporteurs avec un soutien financier de l'ADEME ainsi que de GRDF. Il est structuré en deux parties principales : la mesure embarquée en exploitation (pilotée par le CRMT) et la valorisation de ces données (modélisation) portée par l'Université Gustave Eiffel (UGE, ex-IFSTTAR).

Principaux résultats de mesure :

Grande variabilité de la consommation et des émissions : Le rapport met en évidence que la consommation de carburant et les émissions de NO_x varient considérablement en fonction de facteurs tels que le type de route, le profil altimétrique, le trafic, les conditions météorologiques et les manœuvres.

Impact significatif de l'usage urbain sur les émissions : L'étude souligne que la conduite en milieu urbain, caractérisée par des arrêts fréquents, des ralentissements et des accélérations, entraîne une consommation de carburant et des émissions de NO_x beaucoup plus élevées que la conduite sur autoroute.

Importance des phases de livraison : Les opérations effectuées chez le client, telles que les manœuvres, les arrêts moteur et les redémarrages, contribuent de manière significative à la consommation globale de carburant et aux émissions, en particulier pour les missions de distribution.

Cela peut être illustré à l'aide de la Figure suivante, qui donne la répartition des émissions de NO_x pour 6 véhicules 44t affectés sur des missions de distribution ou des missions « long-courrier » en fonction du type de zone traversée, de la zone urbaine dense à l'autoroute.

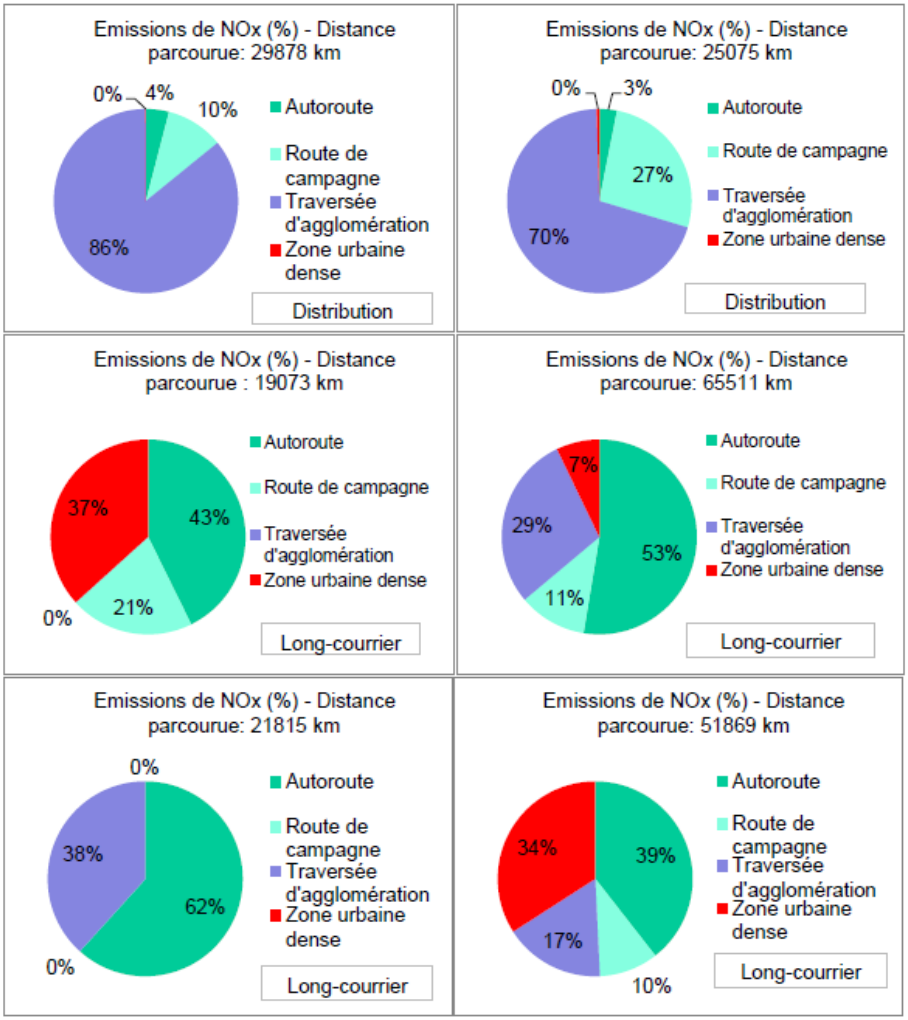


Figure 88 : Répartitions des émissions de NO_x – six mois de données

On s'aperçoit qu'une grande partie des émissions de NO_x est réalisée en conditions urbaine ou périurbaine : jusqu'à 86% pour un camion affecté à la distribution et de manière plus étonnante entre 36 et 51% pour un tracteur avec des missions « long-courrier ».

Exploitations proposées :

Catégorisation des routes : L'IFSTTAR propose une catégorisation des routes basée sur leur impact présumé sur la consommation et les émissions. Cette catégorisation, qui prend en compte des facteurs tels que l'urbanisation et les limitations de vitesse, s'avère pertinente pour expliquer la variabilité des résultats.

Développement de modèles de prédiction : un modèle de prédiction de la consommation de carburant est proposé, basé sur des facteurs tels que la classe de route, le profil altimétrique et le poids total en charge. Est également explorée la possibilité de générer des cycles de vitesse représentatifs de l'usage réel des poids lourds.

Comparaison des motorisations :

Consommation : Les résultats montrent des consommations de carburant similaires pour les véhicules diesel et gaz, les faibles écarts pouvant être attribués à des différences dans les conditions d'exploitation.

Emissions de NO_x : Les véhicules gaz présentent un net avantage en termes d'émissions de NO_x par rapport aux véhicules diesel, en particulier dans des conditions de circulation difficiles, comme les conditions urbaines lentes.

Le rapport souligne l'importance de la concentration des émissions de NO_x en zone urbaine et remet en question la pertinence de la norme Euro VI, qui établit une moyenne des émissions sur différents types de routes. Il suggère que des mesures plus ciblées pourraient être nécessaires pour réduire l'impact des émissions de NO_x sur la santé publique.

12.2.3. AirParif [16]

Cette étude publiée en 2021, menée par AirParif et financée par Île de France Mobilités sur des bus Diesel, Diesel hybrides et GNV de différentes générations a permis de tirer des conclusions importantes sur les émissions réelles des bus en circulation en Île-de-France.

Concernant l'impact de la norme Euro :

Les bus répondant à la norme Euro VI émettent significativement moins de polluants que ceux de la norme Euro IV. Les émissions de particules fines sont réduites d'un facteur 80, les oxydes d'azote (NO_x) d'un facteur 4 et le monoxyde de carbone (CO) d'un facteur 2,5 en moyenne.

La consommation de carburant et les émissions de CO_2 associées sont réduites de 7 % entre les bus Euro IV et Euro VI.

Les bus hybrides Euro VI présentent des émissions de particules fines et de NO_x comparables à celles des bus diesel Euro VI, tout en consommant 17% de carburant en moins. Ils émettent également 2,5 fois moins de CO que les bus Euro VI non hybrides [2].

Concernant les facteurs d'influence :

La technologie du véhicule (norme Euro) est un facteur déterminant, les bus de norme Euro VI étant moins polluants.

Le bon fonctionnement des systèmes de dépollution est crucial, car des dysfonctionnements, même rares, peuvent entraîner une augmentation significative des émissions de NO_x comme cela a pu être constaté dans l'étude.

La température d'échappement doit rester supérieure à 200°C pour garantir l'efficacité du système de dépollution des NO_x (SCR). Ainsi, la température ambiante a un impact significatif sur les émissions, notamment pour les NO_x. Les émissions ont tendance à augmenter lorsque la température baisse, en particulier pour les bus Euro IV. Les bus Euro VI hybrides ou conventionnels, sont moins sensibles à ce facteur.

La vitesse moyenne du bus influence les émissions. Plus la vitesse est élevée, plus les émissions de particules fines, de NO_x et de CO sont faibles, en particulier pour les bus Euro IV. Les bus Euro VI sont moins sensibles à ce paramètre.

Le mode de conduite a également un impact. Une conduite nerveuse, avec des accélérations et des freinages fréquents, entraîne une augmentation de la consommation de carburant et des émissions de CO_2, et ce pour tous les types de bus.

Concernant les bus GNV (ou GNC) :

Les bus GNC Euro VI émettent en moyenne 7 fois moins de NO_x que les bus diesel Euro VI. En revanche, leurs émissions de particules fines sont légèrement supérieures.

Les émissions de CO_2 des bus GNC sont similaires à celles des bus diesel Euro VI.

Concernant les facteurs d'émission du modèle COPERT V :

Le modèle COPERT V, utilisé pour estimer les émissions du trafic routier, sous-estime les émissions de NO_x des bus Euro IV et Euro VI. En revanche, il surestime les émissions de CO des bus Euro VI.

Bien que perfectible car influencé uniquement par la vitesse et non les autres facteurs d'influence, le modèle COPERT V fournit une estimation raisonnable des émissions des bus dans l'ensemble.

Quelles sont les suites proposées à cette étude:

- Affecter les bus les plus anciens, plus sensibles à la vitesse, aux lignes fluides avec une vitesse moyenne élevée.
- Privilégier les bus hybrides et GNC dans des conditions de circulation difficiles, avec des vitesses moyennes faibles, ou par temps froid.
- Encourager une conduite souple, avec des accélérations et des freinages progressifs, pour tous les types de bus.
- Veiller au bon fonctionnement des systèmes de dépollution, notamment en prêtant attention au réservoir d'urée et à l'injection d'urée.

Les études AirParif soulignent l'importance de poursuivre les efforts de renouvellement du parc de bus afin de réduire les émissions de polluants atmosphériques. Elles mettent également en évidence la nécessité de prendre en compte les conditions réelles d'exploitation dans l'évaluation des performances environnementales des bus.

12.2.4. Autres éléments de littérature scientifique [15][17][19][20][23][20]

Les sources fournissent des informations sur les études menées par l'ICCT (International Council on Clean Transportation), VTT Technical Research Centre of Finland Ltd et le Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC) sur les émissions des poids lourds (PL). Voici les principales conclusions de ces études :

Les PL Euro VI produisent généralement de faibles émissions de polluants réglementés, tels que le CO, les HC et les PN. Cela démontre l'efficacité des technologies de réduction des émissions utilisées dans ces véhicules. Cependant, il existe des différences significatives dans les émissions de NO_x entre les différents PL Euro VI, certains véhicules présentant des émissions de NO_x plus élevées, en particulier dans des conditions de faible charge ou à basse vitesse.

Les émissions de NO_x ont tendance à être plus élevées dans les conditions de conduite en ville, qui impliquent des vitesses plus faibles et des périodes d'inactivité plus longues, ce qui peut affecter l'efficacité des systèmes de réduction des émissions. Cela souligne la nécessité de tenir compte d'un éventail plus large de conditions de conduite, y compris les conditions de faible charge et à basse vitesse, lors de l'évaluation des émissions des PL.

Les méthodes d'analyse et les paramètres réglementaires utilisés pour évaluer les émissions des PL peuvent avoir un impact significatif sur les résultats des émissions. Par exemple, l'inclusion ou l'exclusion des émissions au démarrage à froid et les différents seuils de température du liquide de refroidissement peuvent entraîner des différences dans les valeurs d'émissions signalées.

Les études de l'ICCT suggèrent que les limites d'émissions proposées pour la norme Euro VII devraient être fixées au moins au niveau HD3 proposé par le consortium CLOVE, afin de maximiser les réductions des

émissions de NO_x. Les limites HD3 représentent un scénario plus strict que les limites HD2 et nécessiteraient des améliorations supplémentaires des technologies de réduction des émissions.

Les résultats des émissions de PN_{23} obtenus à l'aide de différents instruments de mesure peuvent varier, ce qui indique qu'il est nécessaire d'améliorer la précision et la cohérence des équipements de mesure des PN. Les sources soulignent les incohérences observées entre un dispositif PEMS PN et les dispositifs CPC PN, ce qui suggère une incertitude potentielle dans les mesures des PN.

En résumé, les études de l'ICCT, de VTT et du JRC fournissent des informations précieuses sur les performances en matière d'émissions des PL Euro VI, en soulignant à la fois les progrès réalisés dans la réduction des émissions et les domaines à améliorer. Les conclusions de ces études ont des implications importantes sur le développement de futures réglementations sur les émissions, telles qu'Euro VII, et soulignent la nécessité de tenir compte d'un éventail plus large de conditions de conduite et d'améliorer les méthodes d'essai afin de garantir que les PL contribuent à améliorer la qualité de l'air et à atténuer les effets du changement climatique.

12.2.5. Comparaison Diesel / GNV

Technologies

Il est important de rappeler que les technologies de moteur sont significativement différentes entre les combustion de B7 et de GNV. En effet, les moteurs de type diesel utilisent un cycle de combustion à allumage par compression associé à de forts rapports volumétriques alors que les véhicules GNV présentés dans cette partie utilisent un cycle à allumage commandé (type « essence »). Cette différence implique un avantage en rendement à l'avantage du cycle diesel.

Les systèmes de post-traitement sont également différents : les véhicules GNV sont équipés de catalyseurs 3W, extrêmement efficaces sur HC, CO, NO_x si le catalyseur est chaud (température supérieure à la température d'amorçage) et que la richesse est très proche de la stœchiométrie (richesse 1). Les véhicules diesel sont quant à eux équipés de catalyseurs d'oxydation, de catalyseurs SCR, de filtres à particules et de catalyseurs d'ammoniac. Cela les rend très performants sur les PN et sur HC, CO, NO_x si les températures d'amorçages sont dépassées.

Émissions Polluantes

NO_x : Les sources montrent systématiquement que les moteurs GNV émettent beaucoup moins d'oxydes d'azote (NO_x) que les moteurs Diesel, en particulier en conditions urbaines [11][12][16]. Ceci est attribué à la combustion plus propre du gaz naturel et à l'efficacité des systèmes de post-traitement des moteurs GNV [AirParif]. Cependant, il est important de noter que les émissions de NO_x des moteurs Diesel ont été considérablement réduites avec les normes Euro VI, grâce au progrès des technologies comme la réduction catalytique sélective (SCR) [16].

Particules : Les moteurs Diesel, en particulier les modèles plus anciens, sont connus pour leurs émissions de particules fines [16]. Les sources montrent que les moteurs GNV produisent une masse de particule (PM) bien inférieure à celle des Diesel, mais que leurs émissions de particules ultrafines (PN) peuvent être plus élevées dans certaines conditions [16].

CO et HC : Les moteurs GNV peuvent émettre plus de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures (HC) que les moteurs Diesel, en particulier lors des phases de démarrage à froid ou de transitoires [BG 1725D, BG P1729, AirParif]. Ceci est dû à la difficulté de gérer le rapport air-carburant dans ces conditions. Cependant, les sources

notent que les moteurs GNV modernes sont équipés de catalyseurs trois voies dédiés aux moteurs GNV qui réduisent considérablement ces émissions [AirParif].

Émissions de Gaz à Effet de Serre

CO_2 : En termes d'émissions de dioxyde de carbone (CO_2), les moteurs GNV et Diesel présentent des résultats similaires [11][12][16]. Les moteurs GNV ont un léger avantage en raison de leur rapport hydrogène-carbone plus élevé, ce qui conduit à une combustion plus complète [11][12][16]. Cependant, l'efficacité énergétique globale des moteurs Diesel est légèrement meilleure et compense tout ou partie de l'avantage lié à la nature du carburant [11][12].

Autres Points Importants

Impact du cycle de vie : Les sources soulignent que l'impact environnemental global des véhicules doit prendre en compte l'ensemble du cycle de vie, du "puits à la roue" [12][16]. Cela inclut la production, le transport et la distribution du carburant, ainsi que les émissions du véhicule.

Variabilité : Les sources soulignent la grande variabilité des émissions en fonction de facteurs tels que la technologie du moteur, le système de post-traitement, le style de conduite, les conditions de circulation et la qualité du carburant [12][16].

Conclusion

Les moteurs GNV présentent un avantage significatif en termes d'émissions de NO_x dans la mesure ou la richesse de combustion est bien maîtrisée. Cependant, les fortes réductions de NO_x peuvent être associées à de la production d'ammoniac dans certaines conditions. Les niveaux de particules des moteurs gaz sont intrinsèquement faibles et sont proches dans la plupart des cas à celles des diesel Euro VI équipés de filtres à particules efficaces. Cependant, ils peuvent émettre plus de CO et de HC dans certaines conditions. En ce qui concerne les émissions de CO_2, les deux technologies présentent des résultats similaires. Il est essentiel de considérer l'ensemble du cycle de vie et la variabilité des émissions pour une évaluation complète de l'impact environnemental.

12.3. Caractéristiques détaillées des moyens de mesures

- ***Evaluations en laboratoire***

Ce paragraphe synthétise les principales caractéristiques des équipements analytiques mis en œuvre en cellule d'essais.

- *Baie d'analyse de gaz AVL AMA i60 (mesure amont et aval EATS simultanée de polluants gazeux règlementés)*

Channel name	ppm_CO2_AMAi60_L1, ppm_COL_AMAi60_L1, ppm_COH_AMAi60_L1, ppm_O2_AMAi60_L1, ppm_THC_AMAi60_L1, ppm_CH4_AMAi60_L1, ppm_NOx_AMAi60_L1, ppm_NO_AMAi60_L1
Sensor ID	AMAi60_1 Ligne 1
Sensor type	AVL - AMA i60 Cutter FID i60 HHD CLD i60 Combi i60
Range	FID: THC 3000ppm (ppm_C3_wet), CH4 1000ppm (ppm_C1_wet) CLD: NOx 5000ppm (ppm_wet), NO 5000ppm (ppm_wet) IRD: CO2 200000ppm (ppm dry), COH 50000ppm (ppm dry), COL 250#1 5000#2 (ppm dry), O2 220000ppm (ppm dry)
Precision	≤ 2% of reading or (10 to 100% FS) or ≤1% FS (smaller tolerance)

Tableau 22 : AVL AMA i60 (voie amont EATS) : caractéristiques techniques [..]

Channel name	ppm_CO2_AMAi60_L2, ppm_COL_AMAi60_L2, ppm_THC_AMAi60_L2, ppm_CH4_AMAi60_L2
Sensor ID	AMAi60_1 Ligne 2
Sensor type	AVL - AMA i60 Cutter FID i60 HHD IRD i60
Range	FID: THC 3000ppm (ppm_C3_wet), CH4 1000ppm (ppm_C1_wet) IRD: CO2 200000ppm (ppm dry), COL 1000#1 5000#2 (ppm dry), O2 220000ppm (ppm dry)
Precision	≤ 2% of reading or (10 to 100% FS) or ≤1% FS (smaller tolerance)

Tableau 23 : AVL AMA i60 (voie aval EATS) : caractéristiques techniques [..]

- *Analyseur HORIBA QCL (mesure aval EATS de polluants gazeux règlementés et non-règlementés (NO, NO_2, NH_3, N_2O)*

Channel name	ppm_NO2_QCL, ppm_NO_QCL, ppm_N2O_QCL, ppm_NH3_QCL
Sensor ID	MEXA_1
Sensor type	HORIBA - QCL MEXA ONE
Range	NO: 0-100ppm / 100-5000ppm (ppm wet) NO2: 0-50 / 50- 2000ppm (ppm wet) N2O: 0-100ppm / 100-2000ppm (ppm wet) NH3: 0-50ppm / 50-2000ppm (ppm wet)
Precision	Accuracy : [0 ; 10] %FS : ±0.2% FS [10 ; 50] %FS: ±2% of reading scale [50 ; 100] %FS: ±1% of reading scale

Tableau 24 : HORIBA QCL (aval EATS) : caractéristiques techniques [..]

- *Baie d'analyse FTIR (mesure aval EATS de polluants gazeux règlementés et non-règlementés)*

La baie FTIR disposant de librairies (c'est-à-dire de bibliothèques de composés gazeux mesurés) spécifiques adaptées aux différentes motorisations évaluées selon qu'elles fonctionnent entre autres au carburant Diesel ou gaz, les 2 bibliothèques utilisées dans le cadre de cette étude sont présentées ci-après. Ainsi, l'ensemble des véhicules équipés de motorisations Diesel sont évalués en utilisant la librairie dénommée « Diesel » ci-après, les véhicules fonctionnant au gaz étant quant à eux évalués via la librairie dénommée « CNG ». Enfin, le véhicule équipé de la technologie « Dual-Fuel », utilisant à la fois du carburant Diesel et du gaz mais fonctionnant très majoritairement avec ce dernier, est évalué en recourant à la librairie « CNG ».

Channel name	**Base humide :** ppm_**C2H4**_FTIR, ppm_**C2H6**_FTIR, ppm_**C3H8**_FTIR, ppm_**CH4**_FTIR, ppm_**CO2**_FTIR, ppm_**CO**_FTIR, ppm_**H2O**_FTIR, ppm_**HCHO**_FTIR, ppm_**HCOOH**_FTIR, ppm_**N2O**_FTIR, ppm_**NH3**_FTIR, ppm_**NO2**_FTIR, ppm_**NO**_FTIR, ppm_**SO2**_FTIR, ppm_1.3_C4H6_FTIR, ppm_**iso_C4H8**_FTIR, ppm_**C6H6**, ppm_**C7H8**_FTIR, ppm_**C3H6**_FTIR
Sensor ID	FTIR
Sensor type	HORIBA FTIR – Mesure en base humide
Range	Librairie Diesel : CO : 200ppm / 1000ppm / 50000ppm CO2 : 20% NO : 200ppm / 1000ppm / 5000ppm NO2 : 200ppm N2O : 200ppm H2O : 24% NH3 : 100ppm / 1000ppm SO2 : 200ppm HCHO : 500ppm HCOOH : 100ppm CH4 : 500ppm C2H4 : 500ppm C2H6 : 200ppm C3H8 : 200ppm C3H6 : 200ppm C6H6 : 500ppm C7H8 : 500ppm Iso_C4H8 : 200ppm 1.3_C4H6 : 200ppm
Precision	+/-1% of reading scale

Tableau 25 : HORIBA FTIR (aval EATS) : caractéristiques techniques et librairie « Diesel » [..]

Channel name	**Base humide :** ppm_**C2H4**_FTIR, ppm_**C2H6**_FTIR_CNG, ppm_**C3H8**_FTIR_CNG, ppm_**CH4**_FTIR, ppm_**CO2**_FTIR, ppm_**CO**_FTIR, ppm_**H2O**_FTIR, ppm_**HCHO**_FTIR, ppm_**HCOOH**_FTIR, ppm_**N2O**_FTIR, ppm_**NH3**_FTIR, ppm_**NO2**_FTIR, ppm_**NO**_FTIR, ppm_**SO2**_FTIR, ppm_iso_C4H10_FTIR_CNG, ppm_n_C4H10_FTIR_CNG
Sensor ID	FTIR
Sensor type	HORIBA FTIR – Mesure en base humide
Range	Librairie CNG: CO : 200ppm / 1000ppm / 50000ppm CO2 : 20% NO : 200ppm / 1000ppm / 5000ppm NO2 : 200ppm N2O : 200ppm H2O : 24% NH3 : 100ppm / 1000ppm SO2 : 200ppm HCHO : 100ppm HCOOH : 100ppm CH4 : 500ppm / 2000ppm C2H4 : 200ppm C2H6 : 500ppm C3H8 : 200ppm Iso_C4H10 : 100ppm N_C4H10 : 100ppm
Precision	<1%

Tableau 26 : HORIBA FTIR (aval EATS) : caractéristiques techniques et librairie « CNG » [..]

- *Analyseurs AVL APC+ (mesures amont et aval EATS du nombre de particules PN_{23} ; selon règlementation Euro VI)*

Channel name	pccm_PartNumber_corrected_APC (with dilution and Particle Concentration Reduction Factor)
Sensor ID	APC_1
Sensor type	AVL - APC PLUS 489 CPC AVL (d50 = 23nm) VPR (tube évaporateur)
Range	0-30000 p/cm3 particle size >23nm - 2.5µm
Precision	≤ 1%

Tableau 27 : AVL APC+ (amont EATS) : caractéristiques techniques [..]

Channel name	pccm_PartNumber_corrected_APC_2 (with dilution and Particle Concentration Reduction Factor)
Sensor ID	APC_2
Sensor type	AVL - APC PLUS 489 CPC AVL (d50 = 23nm) VPR (tube évaporateur)
Range	0-30000 p/cm3 particle size >23nm - 2.5µm
Precision	≤ 1%

Tableau 28 : AVL APC+ (aval EATS) : caractéristiques techniques [..]

- *Analyseur HORIBA SPCS (mesure aval EATS du nombre de particules PN_{10} ; selon règlementation Euro 7)*

Channel name	pccm_PartNumber_CompPCRF_SPCS (with dilution and Particle Concentration Reduction Factor)
Sensor ID	SPCS
Sensor type	MEXA-2300SPCS VPR (catalytic stripper) - CPC d50 - 10nm
Range	(0 to 10000) up to (0 to 50000) particles/cm3 (after internal dilution) particle size >10nm - 2.5µm
Precision	

Tableau 29 : HORIBA SPCS (aval EATS) : caractéristiques techniques [..]

Le Tableau ci-dessous synthétise les taux de dilution appliqués sur les 3 instruments de mesure des particules en nombre (APC+ et SPCS), compte-tenu de leur adaptation à la localisation de la mesure (amont/aval), à la métrique (PN_{10}/PN_{23}), ainsi qu'aux émissions potentielles des différents véhicules en fonction des conditions d'évaluation spécifiques à chaque essai.

	1er dil.	2nd dil.	Total	1er dil.	2nd dil.	Total	1er dil.	2nd dil.	Total
N2 GN OEM#1	300	10	3000	150	10	1500	300	10	3000
N3 GO OEM#3	300	10	3000	150	10	1500	150	10	1500
N3 GO OEM#2	300	10	3000	150	10	1500	150	10	1500
N3 GO B1 OEM#3	300	10	3000	150	10	1500	150	10	1500
N3 GN OEM#2	300	10	3000	150	10	1500	150	10	1500
N2 GO OEM#1	300	10	3000	150	10	1500	150	10	1500
N3 GO PHEV OEM#2	200	10	2000	50	10	500	150	10	1500
N3 DF OEM#4	700	10	7000	50	10	500	150	10	1500
Bus GN OEM#1	50	10	500	50	10	500	150	10	1500
Bus GN HEV OEM#1	100	10	1000	50	10	500	150	10	1500

Tableau 30 : Synthèse des conditions de dilution utilisées pour les systèmes de comptage de particules PN_{23} et PN_{10}

- ***Evaluations en conditions réelles***

Ce paragraphe synthétise tout d'abord les principales caractéristiques des équipements analytiques mis en œuvre lors des essais routiers en conditions proches de leur évaluation en service (ISC).

  - *Système portable de mesure des émissions HORIBA OBS-ONE (mesure aval EATS simultanée de polluants gazeux et particulaires règlementés ; selon règlementation Euro VI)*

Channel name	PN Concentration, GA_COConc, GA_CO2Conc, GA_H2OConc, GA_NOConc, GA_NOxConc, GA_NO2Conc, GA_THCConc, GA_CH4Conc, GA_NMHCConc
Sensor ID	PEMS
Sensor type	**HORIBA PEMS PN :** VPR (tube évaporateur) CPC d50 – 23nm **HORIBA PEMS GA :** CO/CO2 : Heated NDIR NO/NOx : Heated CLD THC : Heated FID
Range	CO : 0,5% / 10% CO2 : 5% / 20% NO/NOx : 100ppm / 3000ppm THC : 100ppm / 10000ppm PN : 5.10^7pcm3 particle size >23nm - 2.5µm
Precision	PN : +/-10% GA : 1%

Tableau 31 : HORIBA OBS-ONE (aval EATS) : caractéristiques techniques [..]

Certains des éléments constitutifs du système de mesure embarqué (PEMS) mis en œuvre au cours de la campagne pouvant différer d'un véhicule à l'autre en raison de certaines spécificités véhicules ou de contraintes et aléas ponctuels (liés notamment à la possibilité de mise en œuvre ou à leur état de fonctionnement au moment des tests), le tableau suivant résume les informations essentielles permettant de les distinguer.

		Module Gaz	Module THC/CH_4	Module PN_{23}	Tube EFM	Capteur EFM
n°1	N2 GN OEM#1	SK7WCS5A	THC	RSDYS21W	220701EHE3	SK7WCS5A
n°2	N3 GO OEM#3	T9FDJ6FT	CH_4+NMHC	T9FDJ6FT	150901F	T9FDJ6FT
n°3	N3 GO OEM#2	T9FDJ6FT	CH_4+NMHC	T9FDJ6FT	150901F	T9FDJ6FT
n°4	N3 GO B1 OEM#3	T9FDJ6FT	CH_4+NMHC	T9FDJ6FT	150901F	T9FDJ6FT
n°5	N3 GN OEM#2	Y6P5AVU8	THC	T9FDJ6FT	150901F	UXPXBD7L
n°6	N2 GO OEM#1	T9FDJ6FT	CH_4+NMHC	T9FDJ6FT	180203FH	T9FDJ6FT
n°7	N3 GO PHEV OEM#2	T9FDJ6FT	CH_4+NMHC	T9FDJ6FT	180203FH	T9FDJ6FT
n°8	N3 DF OEM#4	T9FDJ6FT	CH_4+NMHC	T9FDJ6FT	180203FH	T9FDJ6FT
n°9	Bus GN OEM#1	T9FDJ6FT	CH_4+NMHC	Y2S9TB2E	180203FH	T9FDJ6FT
n°10	Bus GN HEV OEM#1	Y6P5AVU8	THC	Y2S9TB2E	180203FH	UXPXBD7L

Tableau 32 : HORIBA OBS-ONE (aval EATS) : principales différences de configuration entre véhicules

La suite de ce paragraphe se concentre quant à elle sur la présentation des caractéristiques principales du protocole mis en œuvre lors des essais routiers destinés à la captation des conditions d'usage des véhicules, lors de leur utilisation par leurs propriétaires, après installation de la solution d'enregistrement de données.

12.4. Résultats expérimentaux véhicule par véhicule

Dans cette section, tous les essais validés réalisés en laboratoire et sur route sont pris en compte. Aucun traitement normatif n'est appliqué sur les émissions TP et tout le cycle est considéré.

12.4.1. N2 GN OEM#1

Ci-dessous sont présentés les principaux résultats sur le véhicule N2 GN OEM#1. Les données sont normalisées par la distance parcourue.

Lieu du test	Cycle test	Amb.	Demar.	Load	Fuel	CO2 [g/km]	CO [mg/km]	THC [mg/km]	CH4 [mg/km]	NOx [mg/km]	N2O [mg/km]	NH3 [mg/km]	PN10 [#/km]	PN23 [#/km]
Road	ISC		Cold start	0,62	GNV	505	1 330	115	80	143	4	37		2,4E+010
			Hot start	0,62	GNV	457	277	95		89				1,1E+010
TestBed	ISC	23	Hot start	0,10	GNV	428	424	141	118	371	1	12	9,3E+009	
				0,50	GNV	450	406	382	333	369	1	15	5,5E+010	
				0,90	GNV	660	755	478	412	302	1	34	3,9E+010	
	Urban delivery	-7	Cold start	0,10	GNV	760	1 952	577	493	2 313	7	1		
		23	Hot start	0,10	GNV	646	840	687	588	2 132	8	1		
	WHVC	-7	Hot start	0,50	GNV	562	865	155	137	878	5	71	6,9E+010	
		23	Cold start	0,50	GNV	557	1 779	410	355	1 179	19	55		

Figure 89 : N2 GN OEM#1 – Synthèse des émissions mesurées

12.4.2. N2 GO OEM#1

Ci-dessous sont présentés les principaux résultats sur le véhicule N2 GO OEM#1. Les données sont normalisées par la distance parcourue.

Lieu du test	Cycle test	Amb.	Demar.	Load	Fuel	CO2 [g/km]	CO [mg/km]	THC [mg/km]	CH4 [mg/km]	NOx [mg/km]	N2O [mg/km]	NH3 [mg/km]	PN10 [#/km]	PN23 [#/km]
Road	ISC		Cold start	0,53	B7	595	31	11	2	1 431	236	89		3,6E+011
			Hot start	0,53	B7	540	11	9	2	1 172	218	78		3,0E+011
TestBed	ISC	23	Hot start	0,10	B7	485	7	8	3	502	82	17		
					GTL	463	16	15	3	544	79	16		
					HVO	466	12	13	3	408	69	13		
				0,50	B7	512	9	7	2	616	109	22		
					GTL	489	17	17	2	617	146	28		
					HVO	491	9	14	3	497	91	18		
				0,90	B7	673	10	8	2	701	125	25		
					GTL	517	15	16	2	687	141	26		
					HVO	521	8	14	3	580	114	21		
	Urban delivery	-7	Cold start	0,10	B7	535	1 043	71	21	6 338	51	2		
					GTL	494	492	46	13	6 111	39	2		
					HVO	544	251	34	9	7 212	23	1		
		23	Hot start	0,10	B7	463	35	17	8	2 775	32	3		
					GTL	434	88	31	6	2 438	34	4		
					HVO	440	44	28	9	2 460	32	3		
	WHVC	-7	Hot start	0,50	B7	560	51	18	10	2 262	166	20		
					GTL	532	65	15	6	2 401	203	38	2,3E+011	1,9E+011
					HVO	526	50	21	7	1 585	239	49	2,1E+011	2,1E+011
		23	Hot start	0,50	B7	540	11	12	5	1 168	171	31		
					GTL	518	29	21	5	1 300	204	46	2,4E+011	2,7E+011
					HVO	523	15	19	5	951	140	24		

Figure 90 : N2 GO OEM#1 – Synthèse des émissions mesurées

12.4.3. N3 GO OEM#3

Ci-dessous sont présentés les principaux résultats sur le véhicule N3 GO OEM#3. Les données sont normalisées par la distance parcourue.

Lieu du test	Cycle test	Amb.	Demar.	Load	Fuel	CO2 [g/km]	CO [mg/km]	THC [mg/km]	CH4 [mg/km]	NOx [mg/km]	N2O [mg/km]	NH3 [mg/km]	PN10 [#/km]	PN23 [#/km]
Road	ISC		Cold start	0,59	B7	1 016	436	19	3	509	47	4		8,9E+010
			Hot start	0,59	B7	931	145	5	2	122	36	3		9,7E+010
TestBed	ISC	23	Hot start	0,10	B100	528	131	8	2	285	2	0	1,2E+011	3,3E+010
					B7	517	184	10	4	826	11	0	8,5E+010	1,9E+010
					GTL	500	81	10	3	487	2	0	4,4E+010	1,6E+010
					HVO	501	138	12	3	690	4	0	3,5E+010	1,1E+010
				0,50	B100	762	191	7	2	169	50	0	2,4E+011	6,4E+010
					B7	753	276	8	4	453	46	0	1,6E+011	3,8E+010
					GTL	718	201	9	3	332	12	0	9,8E+010	2,2E+010
					HVO	720	222	10	3	505	11	0	1,2E+011	2,3E+010
				0,90	B100	2 121	128	7	2	462	51	28	3,3E+011	9,4E+010
					B7	2 221	380	9	4	587	98	32	1,0E+012	4,1E+011
					GTL	1 990	251	10	3	439	54	10	1,5E+011	3,3E+010
					HVO	1 993	330	7	3	540	57	20	6,4E+011	5,6E+011
	Urban delivery	-7	Cold start	0,10	B100	823	1 201	84	11	6 235	15	1	2,2E+010	1,3E+010
					B7	911	792	67	12	5 049	24	2	4,0E+011	3,1E+010
					GTL	789	973	103	18	5 987	26	1	1,8E+010	1,0E+010
					HVO	773	580	77	16	3 846	2	1	1,7E+010	8,7E+009
		23	Hot start	0,10	B100	617	99	21	7	2 969	6	2	1,4E+011	8,5E+010
					B7	595	124	24	9	3 365	17	2	6,1E+010	2,9E+010
					GTL	586	115	26	9	2 786	16	3	9,1E+010	4,9E+010
					HVO	577	98	22	10	2 980	11	1	8,1E+010	4,6E+010
	WHVC	-7	Hot start	0,50	B100	980	1 117	20	6	2 094	26	0	2,2E+011	4,5E+010
					B7	955	1 765	20	8	1 837	27	0	1,6E+011	1,1E+010
					GTL	926	1 814	34	7	2 108	26	0	1,2E+011	1,8E+010
					HVO	922	1 846	26	9	2 469	13	0	3,3E+011	1,2E+010
		23	Hot start	0,50	B100	945	431	11	5	599	14	0	3,2E+011	1,2E+011
					B7	938	950	15	9	1 239	32	1	2,0E+011	6,8E+010
					GTL	894	244	10	5	563	32	1	1,8E+011	7,6E+010
					HVO	896	258	10	5	773	32	0	1,9E+011	7,4E+010

Figure 91 : N3 GO OEM#3 – Synthèse des émissions mesurées

12.4.4. N3 GO B1 OEM#3

Ci-dessous sont présentés les principaux résultats sur le véhicule N3 GO B1 OEM#3. Les données sont normalisées par la distance parcourue.

Lieu du test	Cycle test	Amb.	Demar.	Load	Fuel	CO2 [g/km]	CO [mg/km]	THC [mg/km]	CH4 [mg/km]	NOx [mg/km]	N2O [mg/km]	NH3 [mg/km]	PN10 [#/km]	PN23 [#/km]
Road	ISC		Cold start	0,60	B100	901	104	6	3	804	17	2		3,8E+010
			Hot start	0,60	B100	884	58	5	3	546	19	1		2,8E+010
TestBed	ISC	23	Hot start	0,10	B100	532	172	10	3	621	9	0	7,3E+010	4,6E+010
				0,50	B100	767	188	8	3	530	11	0	1,1E+011	6,3E+010
				0,90	B100	1 624	243	8	3	410	22	0	1,4E+011	8,5E+010
	Urban delivery	-7	Cold start	0,10	B100	822	1 627	110	25	5 910	30	0	1,1E+010	6,9E+009
		23	Hot start	0,10	B100	589	73	30	12	3 300	16	0	2,8E+010	2,6E+010
	WHVC	-7	Hot start	0,50	B100	984	1 757	32	15	2 329	35	0	1,4E+011	5,5E+010
		23	Hot start	0,50	B100	947	306	13	6	1 069	28	0	2,2E+011	2,0E+011

Figure 92 : N3 GO B1 OEM#3 – Synthèse des émissions mesurées

12.4.5. N3 GO OEM#2

Ci-dessous sont présentés les principaux résultats sur le véhicule N3 GO OEM#2. Les données sont normalisées par la distance parcourue.

Lieu du test	Cycle test	Amb.	Demar.	Load	Fuel	CO2 [g/km]	CO [mg/km]	THC [mg/km]	CH4 [mg/km]	NOx [mg/km]	N2O [mg/km]	NH3 [mg/km]	PN10 [#/km]	PN23 [#/km]
Road	ISC		Cold start	0,59	B7	892	241	23	2	439	46	1		1,5E+011
			Hot start	0,59	B7	849	133	9	3	308	25	1		1,5E+011
TestBed	ISC	23	Hot start	0,10	B100	589	0	15	7	34	21	0	1,6E+011	9,3E+010
					B7	572	11	13	5	57	31	0	1,2E+011	6,0E+010
					GTL	553	8	19	8	36	9	1	1,2E+011	5,8E+010
					HVO	552	11	15	6	41	13	0	1,2E+011	6,1E+010
				0,50	B100	804	1	16	7	164	6	1	2,3E+011	1,3E+011
					B7	791	41	14	6	235	10	0	1,9E+011	9,0E+010
					GTL	766	35	18	9	176	2	1	1,8E+011	1,0E+011
					HVO	763	29	16	7	192	6	0	1,8E+011	1,0E+011
				0,90	B100	1 032	4	14	6	267	5	1	3,5E+011	2,3E+011
					B7	1 452	63	13	5	331	8	0	2,5E+011	1,2E+011
					GTL	980	118	16	8	247	2	0	2,5E+011	1,6E+011
					HVO	979	97	13	6	251	2	0	2,7E+011	2,0E+011
	Urban delivery	-7	Cold start	0,10	B100	998	140	43	11	2 554	15	1	4,0E+011	3,7E+011
					B7	958	70	42	13	3 107	18	2	2,4E+011	1,3E+011
					GTL	923	70	62	12	2 044	5	1	2,2E+011	2,0E+011
					HVO	943	66	37	12	1 871	25	1	2,4E+011	2,0E+011
		23	Hot start	0,10	B100	672	1	24	11	539	6	1		
					B7	656	7	24	11	519	20	0		
					GTL	648	4	42	15	786	3	0	6,7E+010	3,9E+010
					HVO	654	1	27	13	548	4	0	5,5E+010	3,6E+010
	WHVC	-7	Hot start	0,50	B100	1 058	9	32	8	570	20	1	3,3E+011	7,6E+010
					B7	1 031	96	37	11	645	11	1	3,3E+011	7,1E+010
					GTL	986	56	46	10	413	7	0		
					HVO	994	54	33	9	461	2	1	3,6E+011	2,6E+011
		23	Hot start	0,50	B100	969	2	22	12	236	6	3	3,4E+011	2,6E+011
					B7	951	54	20	10	411	10	1	2,7E+011	1,5E+011
					GTL	920	65	26	14	81	5	3	2,8E+011	1,7E+011
					HVO	915	34	23	11	197	5	2	2,6E+011	1,6E+011

Figure 93 : N3 GO OEM#2 – Synthèse des émissions mesurées

12.4.6. N3 GN OEM#2

Ci-dessous sont présentés les principaux résultats sur le véhicule N3 GN OEM#2. Les données sont normalisées par la distance parcourue.

Lieu du test	Cycle test	Amb.	Demar.	Load	Fuel	CO2 [g/km]	CO [mg/km]	THC [mg/km]	CH4 [mg/km]	NOx [mg/km]	N2O [mg/km]	NH3 [mg/km]	PN10 [#/km]	PN23 [#/km]
Road	ISC		Cold start	0,60	GNV	837	848	225	195	297	14	58		1,6E+012
			Hot start	0,60	GNV	841	925	72	64	134	1	91		2,0E+012
TestBed	ISC	23	Hot start	0,10	GNV	610	1 239	533	461	59	1	183		
				0,50	GNV	806	2 622	955	820	99	0	253		
				0,90	GNV	1 512	3 738	2 186	1 880	110	0	272	7,1E+011	5,6E+011
	Urban delivery	-7	Cold start	0,10	GNV	957	2 770	595	500	577	45	166	2,2E+012	1,0E+012
		23	Hot start	0,10	GNV	822	721	6	4	117	0	23		
	WHVC	-7	Hot start	0,50	GNV	989	1 194	165	161	228	0	144	5,4E+011	3,4E+011
		23	Hot start	0,50	GNV	983	2 111	324	276	143	0	264	8,8E+011	6,4E+011

Figure 94 : N3 GN OEM#2 – Synthèse des émissions mesurées

12.4.7. N3 GO PHEV OEM#2

Ci-dessous sont présentés les principaux résultats sur le véhicule N3 GO PHEV OEM#2. Les données sont normalisées par la distance parcourue.

Lieu du test	Cycle test	Amb.	Demar.	Load	Fuel	Mode Roulage	CO2 [g/km]	CO [mg/km]	THC [mg/km]	CH4 [mg/km]	NOx [mg/km]	N2O [mg/km]	NH3 [mg/km]	PN10 [#/km]	PN23 [#/km]
Road	ISC		Cold start	0,37	B7		532	117	1	1	398	31	0		2,5E+011
			Hot start	0,37	B7		615	176	2	2	132	74	1		5,3E+011
TestBed	ISC	23	Hot start	0,10	B7	ECO	581	1	5	1	624	27	0	2,4E+010	2,1E+010
						POW	580	0	6	3	99	20	0	2,6E+010	2,0E+010
						Recharge	900	0	4	2	320	23	4E-5		
						Standard	553	0	5	1	60	32	0	3,1E+010	2,6E+010
				0,50	B7	Recharge	846	0	4	2	296	30	0		
						Standard	636	0	5	1	582	31	0	4,9E+010	4,1E+010
				0,90	B7	Recharge	718	1	5	2	312	61	2E-5		
						Standard	987	0	4	1	168	42	0	5,2E+010	4,0E+010
	Urban delivery	-7	Cold start	0,10	B7	Standard	1 024	105	18	4	1 927	88	0	7,0E+010	3,1E+010
		23	Hot start	0,10	B7	ECO	527	4	12	3	11	33	0	2,1E+010	2,0E+010
						POW	559	1	11	3	24	26	0		
						Recharge	1 568	1	14	3	8	135	0	7,2E+010	7,5E+010
						Standard	409	0	6	2	122	18	0	3,3E+010	2,4E+010
				0,50	B7	Recharge	1 126	1	16		227	51	2E-5	4,5E+010	4,6E+010
						Standard	309	8	7	1	1 090	25	0		
				0,90	B7	Recharge	845	23	17	6	45	64	2E-5	3,2E+010	2,7E+010
						Standard	327	1	6	1	464	20	3E-5		
	WHVC	-7	Cold start	0,50	B7	Standard	786	1	7	2	102	77	0	1,4E+011	2,4E+010
		23	Hot start	0,50	B7	Standard	683	1	6	2	264	55	0		

Figure 95 : N3 GO PHEV OEM#2 – Synthèse des émissions mesurées

12.4.8. N3 DF OEM#4

Ci-dessous sont présentés les principaux résultats sur le véhicule N3 DF OEM#4. Les données sont normalisées par la distance parcourue.

Lieu du test	Cycle test	Amb.	Demar.	Load	Fuel	CO2 [g/km]	CO [mg/km]	THC [mg/km]	CH4 [mg/km]	NOx [mg/km]	N2O [mg/km]	NH3 [mg/km]	PN10 [#/km]	PN23 [#/km]
Road	ISC		Cold start	0,50	GNV	681	1 434	373	292	404	234	5		2,1E+012
			Hot start	0,50	GNV	659	987	319	233	212	191	3		1,5E+012
TestBed	ISC	23	Hot start	0,10	GNV	428	520	409	322	494	352	0		
				0,50	GNV	596	360	370	292	83	482	1	7,9E+011	7,6E+011
				0,90	GNV	768	296	357	284	90	216	3	1,6E+012	1,2E+012
	Urban delivery	-7	Cold start	0,10	GNV	674	2 641	3 775	2 913	1 597	41	1		
		23	Hot start	0,10	GNV	506	413	1 060	825	92	37	0	2,1E+011	2,5E+011
	WHVC	-7	Hot start	0,50	GNV	746	3 410	724	590	513	315	0	9,4E+011	7,9E+011
		23	Hot start	0,50	GNV	734	813	422	334	515	435	2	3,4E+012	2,5E+012

Figure 96 : N3 DF OEM#4 – Synthèse des émissions mesurées

12.4.9. Bus GN OEM#1

Ci-dessous sont présentés les principaux résultats sur le véhicule Bus GN OEM#1. Les données sont normalisées par la distance parcourue.

Lieu du test	Cycle test	Amb.	Demar.	Load	Fuel	CO2 [g/km]	CO [mg/km]	THC [mg/km]	CH4 [mg/km]	NOx [mg/km]	N2O [mg/km]	NH3 [mg/km]	PN10 [#/km]	PN23 [#/km]
Road	ISC		Cold start	0,48	GNV	828	1 371	176	154	83	23	110		1,0E+010
			Hot start	0,48	GNV	823	1 235	80	72	65	14	84		1,7E+010
TestBed	ISC	23	Hot start	0,10	GNV	706	452	148	135	30	0	11		
				0,50	GNV	775	378	185	171	35	0	8	2,1E+009	1,1E+009
				0,90	GNV	848	418	170	157	60	0	11	1,8E+009	1,6E+009
	Urban delivery	-7	Cold start	0,10	GNV	1 152	3 010	329	275	393	42	320	1,4E+011	1,1E+010
		23	Hot start	0,10	GNV	938	965	19	17	75	0	98	4,0E+009	4,2E+009
	WHVC	-7	Hot start	0,50	GNV	1 004	460	79	72	120	0	34	3,3E+010	3,9E+009
		23	Hot start	0,50	GNV	964	336	59	54	60	0	8	1,3E+010	3,3E+009

Figure 97 : Bus GN OEM#1 – Synthèse des émissions mesurées

12.4.10. Bus GN HEV OEM#1

Ci-dessous sont présentés les principaux résultats sur le véhicule Bus GN HEV OEM#1. Les données sont normalisées par la distance parcourue.

Lieu du test	Cycle test	Amb.	Demar.	Load	Fuel	CO2 [g/km]	CO [mg/km]	THC [mg/km]	CH4 [mg/km]	NOx [mg/km]	N2O [mg/km]	NH3 [mg/km]	PN10 [#/km]	PN23 [#/km]
Road	ISC		Cold start	0,48	GNV	688	1 102	166	150	80	16	100		8,0E+009
			Hot start	0,48	GNV	627	650	145	132	56	9	105		3,7E+009
TestBed	ISC	23	Hot start	0,10	GNV	662	297	65	59	34	0	5	3,5E+010	2,3E+009
				0,50	GNV	731	225	91	82	35	0	5	2,0E+010	2,9E+009
				0,90	GNV	1 192	467	109	99	141	0	25	2,1E+010	1,9E+009
	Urban delivery	-7	Cold start	0,10	GNV	1 212	2 866	581	495	320	14	291	1,3E+011	4,6E+010
		23	Hot start	0,10	GNV	903	602	9	9	98	0	66	3,4E+009	1,4E+009
	WHVC	-7	Hot start	0,50	GNV	920	967	218	196	131	1	114	3,7E+011	5,7E+009
		23	Hot start	0,50	GNV	905	455	65	61	110	1	36	1,6E+010	3,6E+009

Figure 98 : Bus GN HEV OEM#1 – Synthèse des émissions mesurées

12.5. Comparaison Diesel vs GNV

Comparaison des résultats entre les véhicules suivants :

- N2 GO OEM#1 – Carburant B7
- N2 GN OEM#1 – Carburant GNV
- N3 GO OEM#2 – Carburant B7
- N3 GN OEM#2 – Carburant GNV

Les données présentées ci-dessous sont sans traitement normatif (brut) et prennent en compte tout le cycle. Tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte.

Les données énergétiques ECU des véhicules N3 GO OEM#2 et N2 GO OEM#1 ne sont pas valides. Ainsi, les résultats sont présentés en g/km.t. Les émissions spécifiques en g/km sont normalisées par la masse totale du véhicule (masse à vide + masse utile transportée).

Compromis NO_x vs CO_2 : Sur cycle ISC, l'écart d'émissions de CO_2 entre les cas GNV et B7 n'est pas significatif (Figure 99). Les véhicules GNV permettent cependant de limiter les émissions de NO_x par rapport à leur homologue Diesel.

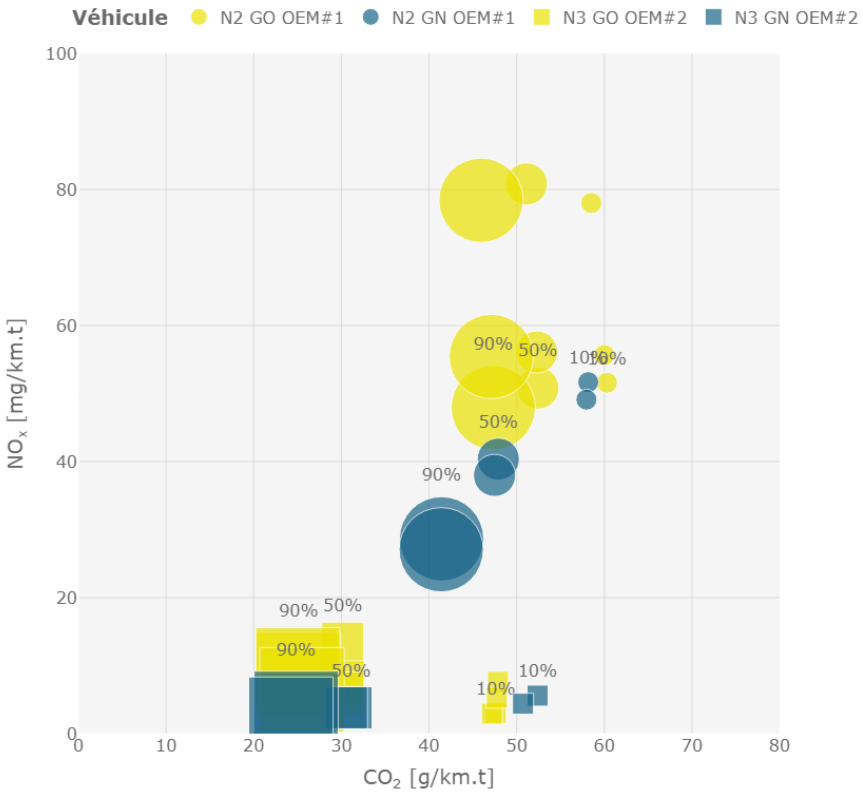


Figure 99 : Comparaison Diesel vs GNV – Compromis NO_x vs CO_2 – ISC – Tamb = 23°C

Sur cycle urbain, les gains en émissions de NO_x observés sur GNV sont conservés, cependant les émissions de CO_2 sont alors plus élevées que dans le cas B7 (Figure 100).

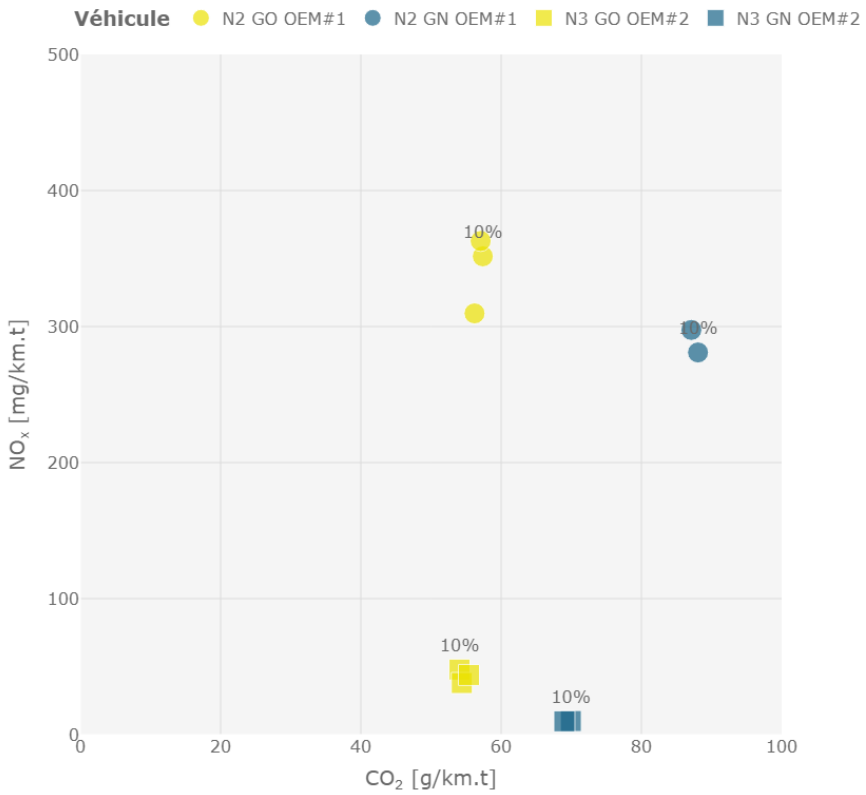


Figure 100 : Comparaison Diesel vs GNV – Compromis NO_x vs CO_2 – Urban delivery – Tamb = 23°C

CO_2 : Les émissions spécifiques de CO_2 sont proches entre GNV et B7, avec des gains faibles pour l'un ou l'autre des carburants selon les conditions (Figure 101).

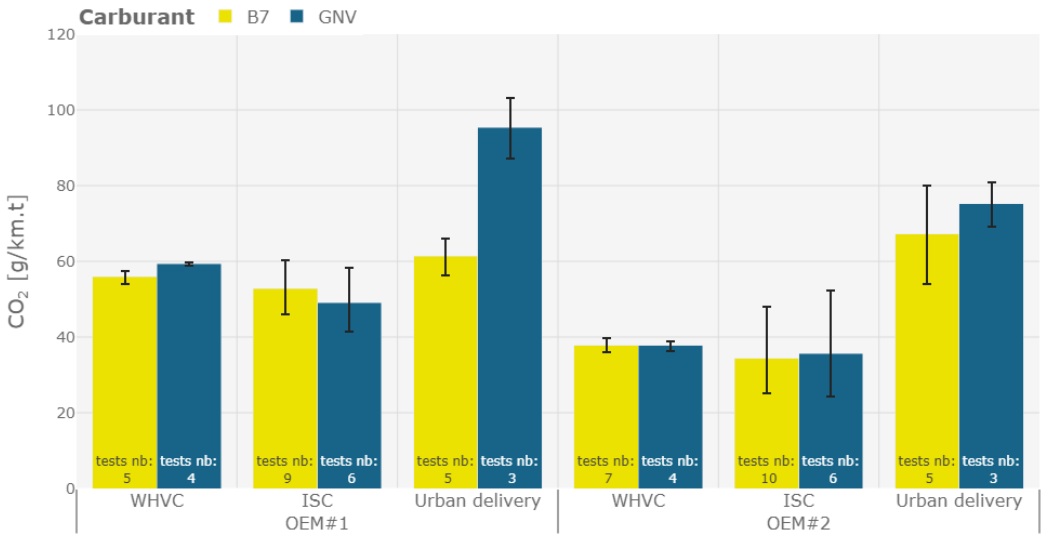


Figure 101 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de CO_2

$\underline{CH_4}$: Les émissions de CH_4 sont très significativement supérieures dans le cas GNV, avec des niveaux très variables selon les conditions (Figure 102).

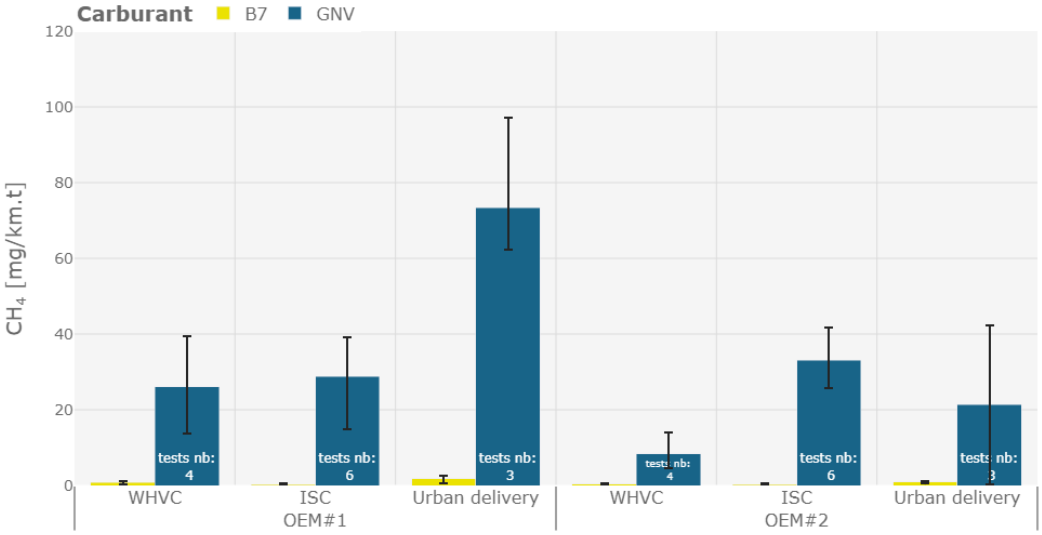


Figure 102 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de CH_4

$\underline{N_2O}$: Les émissions de N_2O sont très significativement supérieures dans le cas Diesel (B7), avec des niveaux très variables selon les conditions (Figure 103).

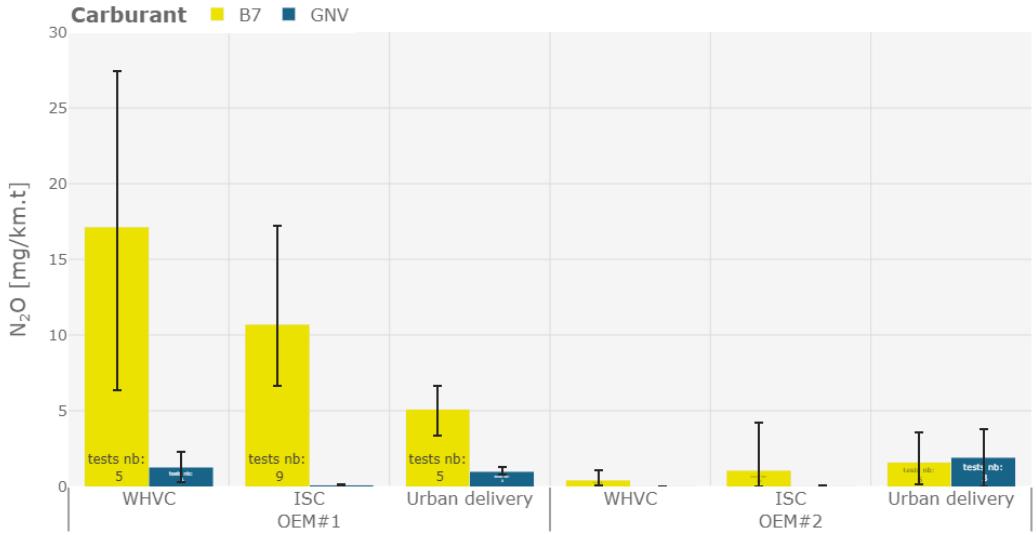


Figure 103 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de N_2O

$\underline{GES}$: Les contributions du CH_4 et du N_2O aux émissions de gaz à effet de serre sont de l'ordre de quelques pourcents. Comme énoncé précédemment, le N_2O est présent sur véhicules Diesel tandis que le CH_4 est émis par les véhicules GNV (Figure 104).

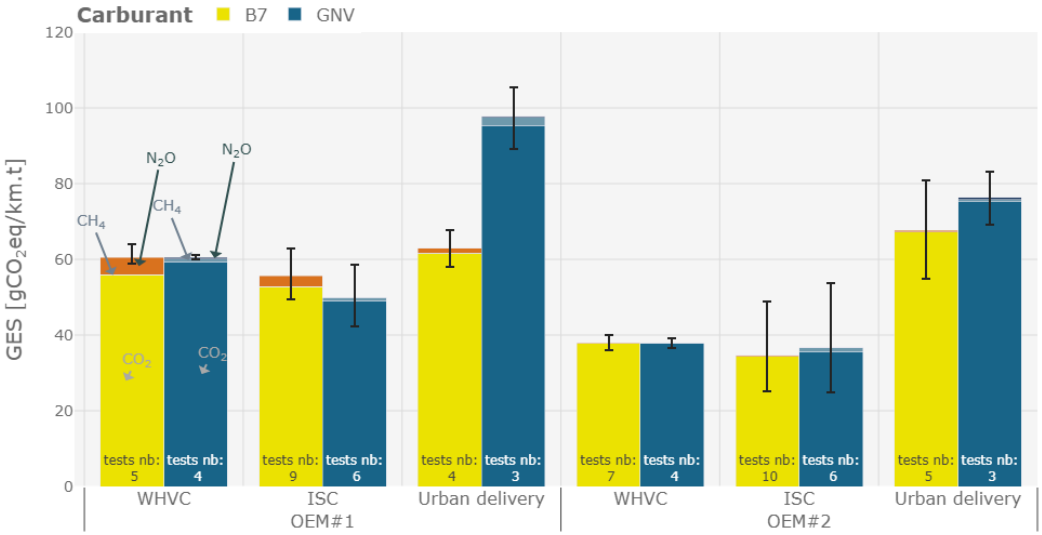


Figure 104 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de GES

NO$_x$: Les émissions de NO$_x$ sont significativement plus faibles pour le cas GNV par rapport aux cas Diesel (B7), en particulier sur cycle Urban delivery (Figure 105). Une baisse des émissions comprise entre 30% et 40% est observée sur le poids lourds GNV. Sur le PL B7, les émissions chutent de 40% à 80% pour le cycle urbain lent. Les émissions en sortie moteur sont cependant plus élevées en GNV (Figure 106), de l'ordre de 30% en moyenne, mais le post-traitement 3 voies permet de convertir très efficacement les émissions de NO$_x$.

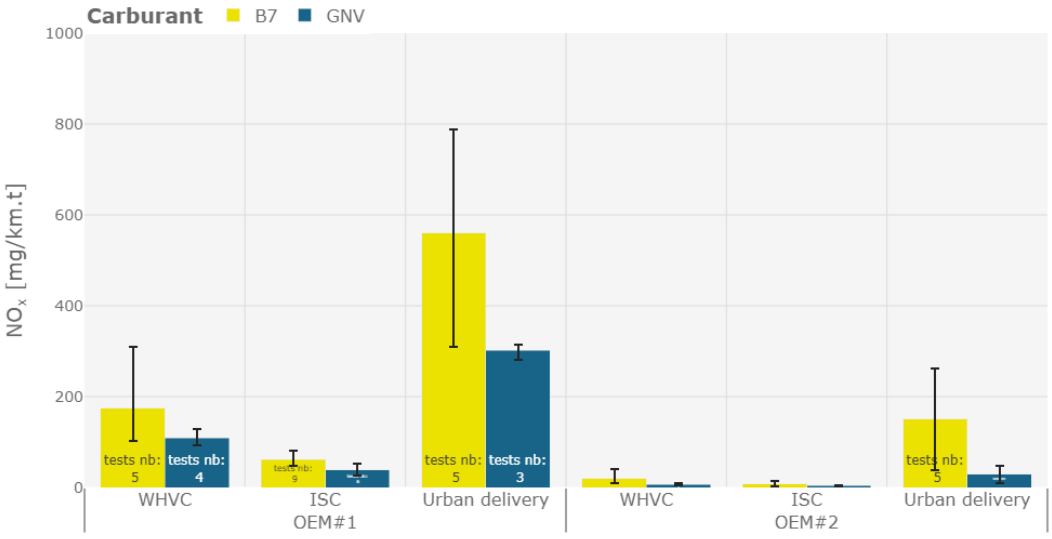


Figure 105 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de NO$_x$

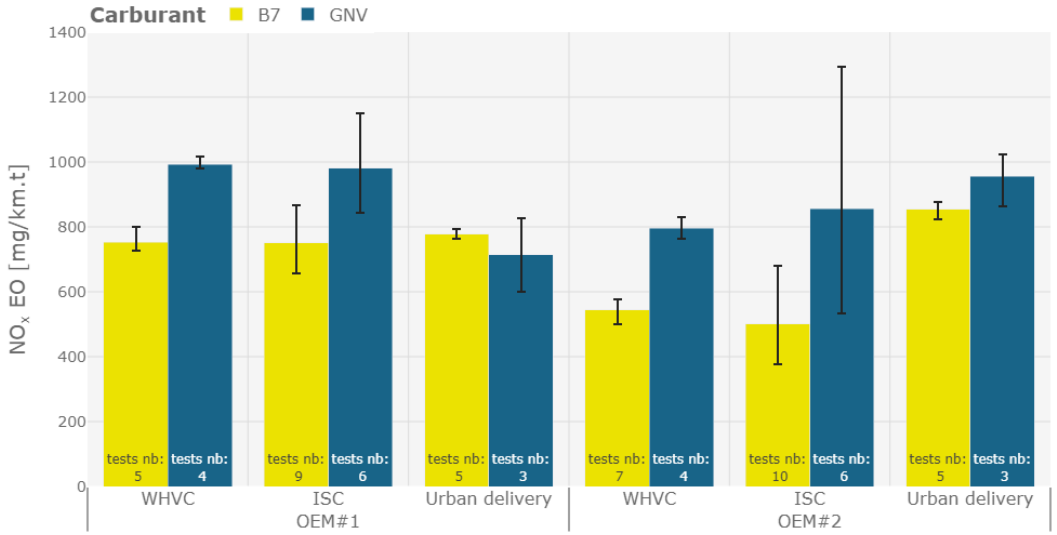


Figure 106 : Comparaison Diesel vs GNV vs – Emissions spécifiques de NO_x en sortie moteur (EO)

CO : Les émissions de CO sont beaucoup plus élevées dans le cas GNV par rapport à son homologue Diesel (Figure 107).

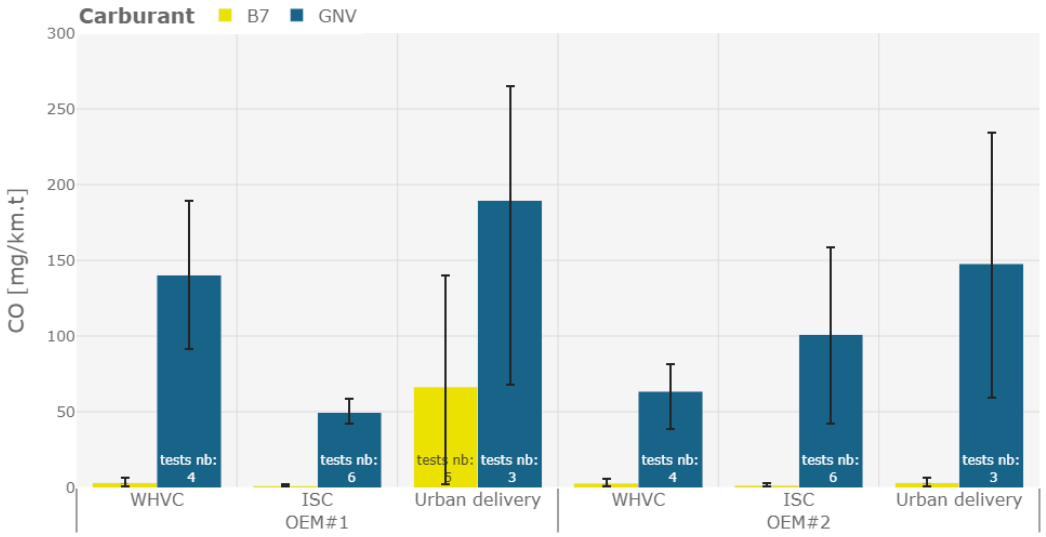


Figure 107 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de CO

THC : De la même façon que pour le CO, les émissions de THC sont nettement supérieures dans le cas GNV (Figure 108).

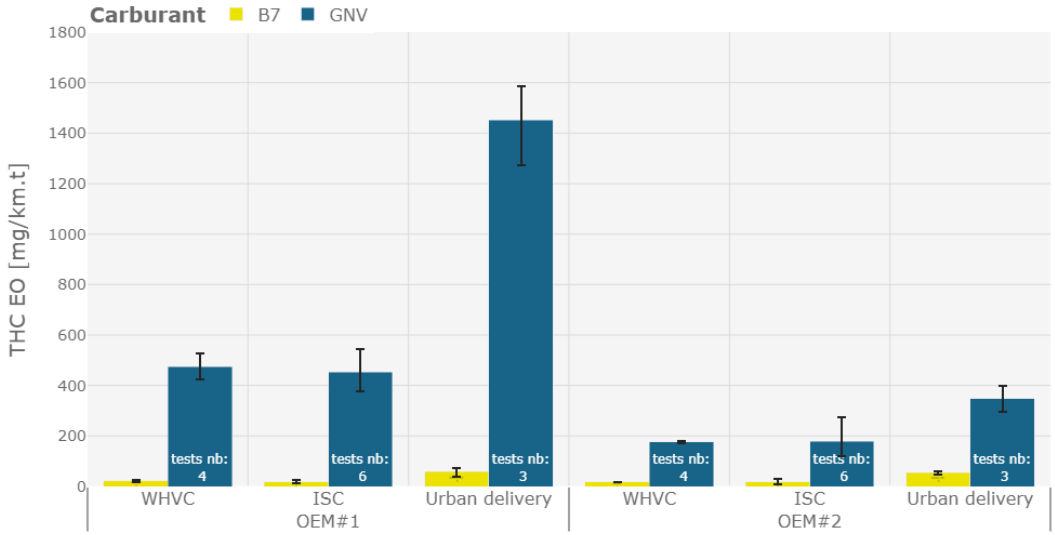


Figure 108 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de THC

NH_3 : Sur le véhicule porteur, les émissions de NH_3 sont similaires entre les cas GNV et B7. Au contraire, sur tracteur, les émissions du véhicule GNV sont très significativement supérieures aux émissions du véhicule Diesel (Figure 109). Des émissions de l'ordre de 10 mg/km.t sont relevées. La régulation de la richesse sur ce véhicule n'est pas optimale, avec beaucoup d'excursion en zone riche ce qui favorise la formation de NH_3. Cette problématique n'est pas relevée sur le porteur GNV.

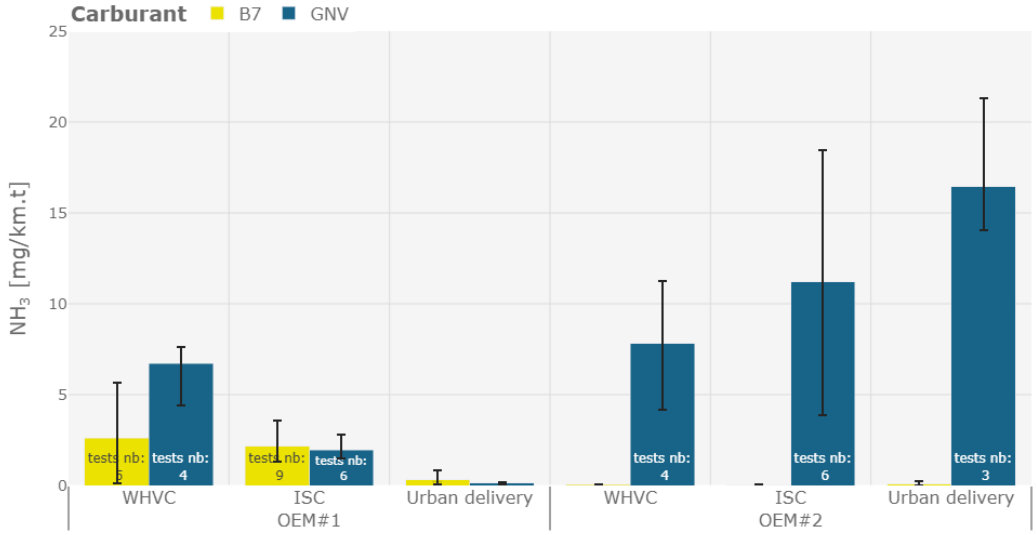


Figure 109 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de NH_3

PN_{23} : Les émissions de PN_{23} sur le véhicule de l'OEM#2 ont tendance à être plus élevées dans le cas du GNV (Figure 110). A noter que les données relatives aux émissions de PN_{23} sur les véhicules de l'OEM#1 ne sont pas valides. En sortie moteur, les émissions de PN_{23} sur le véhicule de l'OEM#2 dans le cas Diesel sont

significativement supérieures (Figure 111). La présence d'un filtre à particules sur ce véhicule permet de fortement limiter les émissions à l'atmosphère.

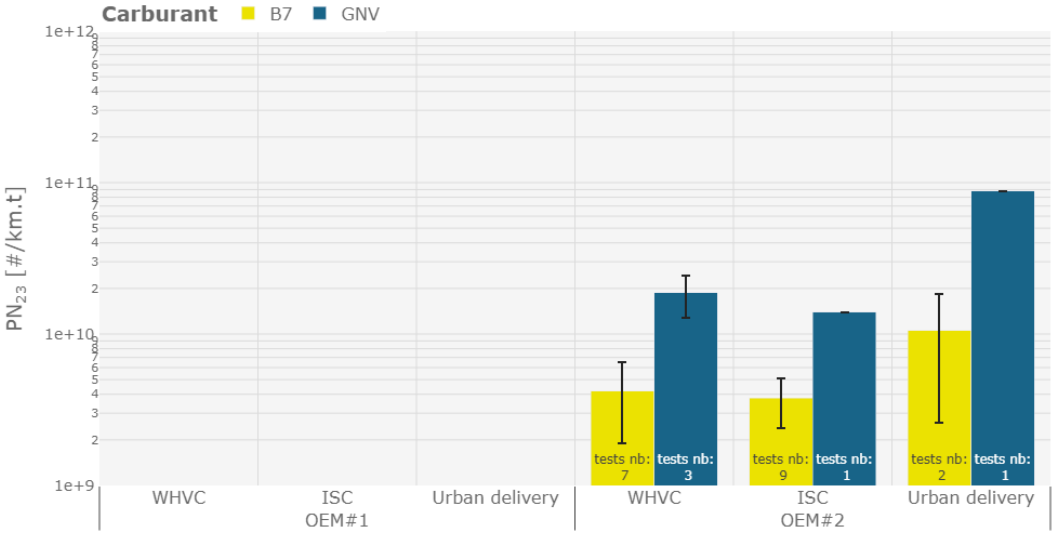


Figure 110 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de PN_{23}

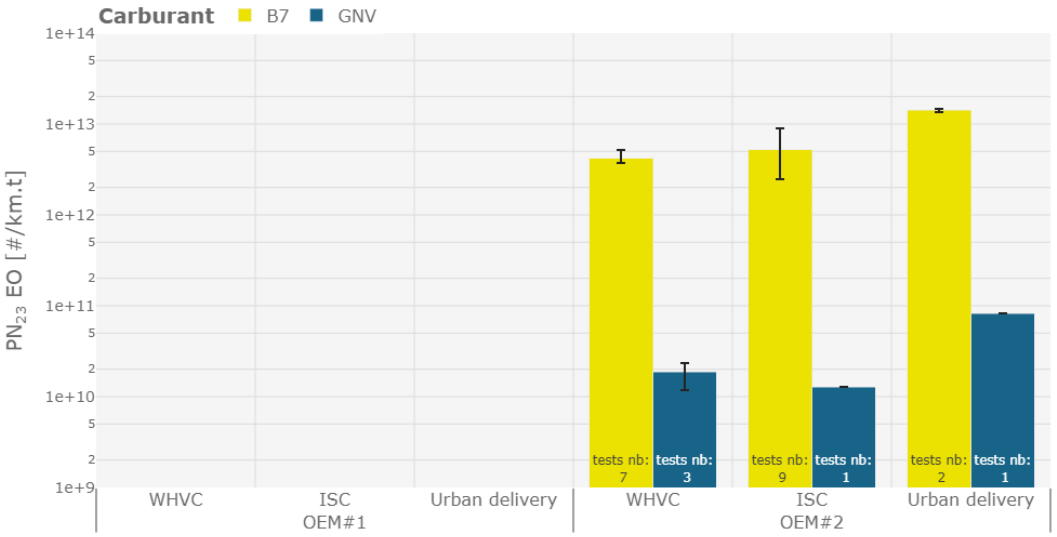


Figure 111 : Comparaison Diesel vs GNV vs – Emissions spécifiques de PN_{23} en sortie moteur (EO)

PN_{10} : Sur les véhicules de l'OEM#2, comme pour les émissions de PN_{23}, les émissions de PN_{10} sont plus élevées dans le cas GNV (Figure 112), entre 2 et 10 fois plus élevées. A noter qu'aucune donnée validée n'est disponible concernant les émissions de PN_{10} sur le N2 GO OEM#1.

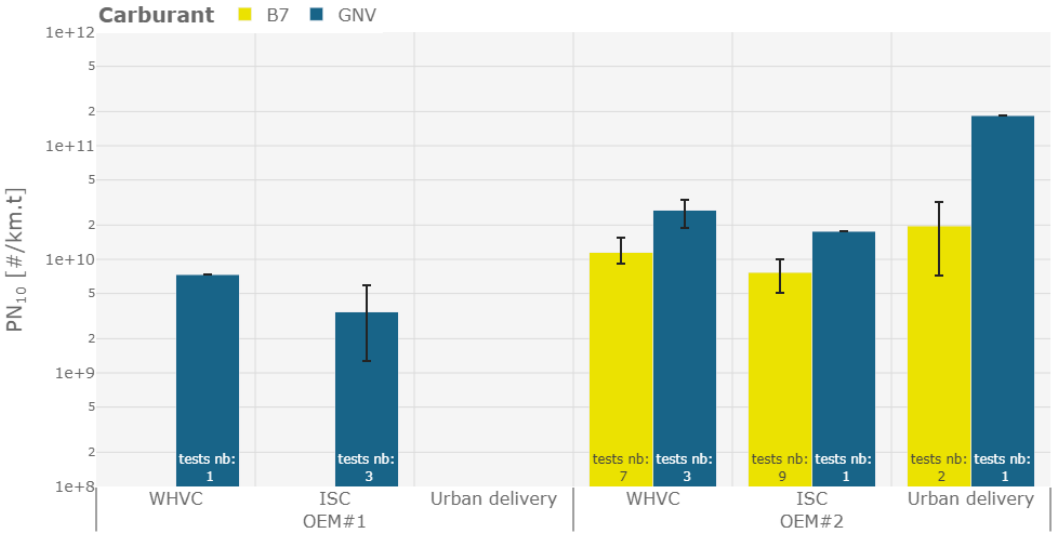


Figure 112 : Comparaison Diesel vs GNV – Emissions spécifiques de PN_{10}

12.6. Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel

Comparaison des résultats entre les véhicules suivants :

- N3 GO OEM#3 – Carburant B7
- N3 GO OEM#2 – Carburant B7
- N3 GN OEM#2 – Carburant GNV
- N3 DF OEM#4 – Carburants GNV (carburant principal)

Les données présentées ci-dessous sont sans traitement normatif (brut) et prennent en compte tout le cycle. Tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte.

Les données énergétiques ECU des véhicules de l'OEM#2 et OEM#4 ne sont pas valides. Ainsi, les résultats sont présentés en g/km.t. Les émissions spécifiques en g/km sont normalisées par la masse totale du véhicule (masse à vide + masse utile transportée).

Compromis NO_x vs CO_2 : Le N3 DF OEM#4 présente des émissions CO_2 bien inférieures aux véhicules GNV et FLEX (Figure 113 et Figure 114). L'association gaz / Diesel dans un moteur Diesel permet de profiter des hauts rendements effectifs des moteurs Diesel ainsi que du rapport H/C élevé du gaz.

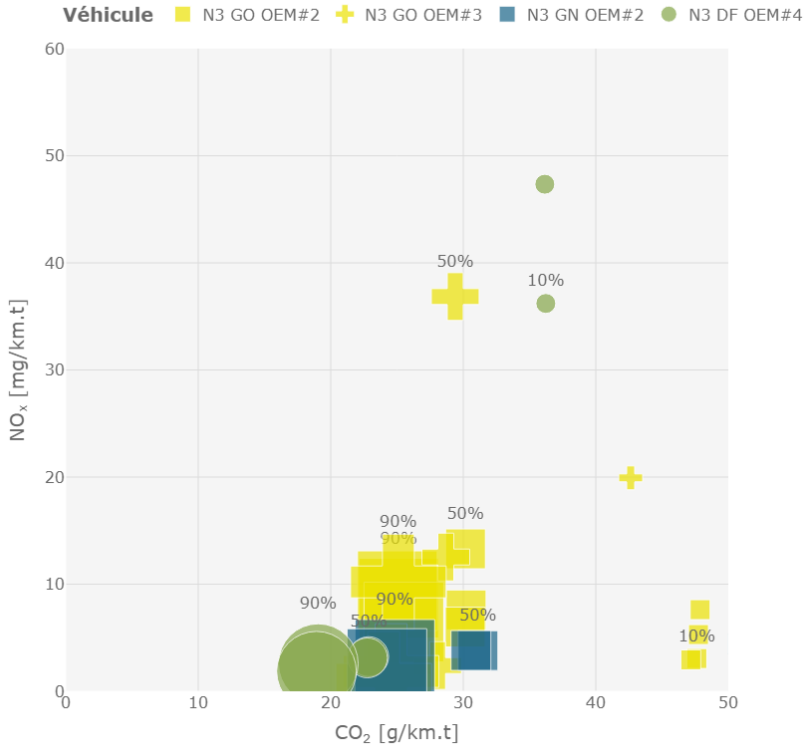


Figure 113 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Compromis NO_x vs CO_2 – ISC 50% – Tamb = 23°C

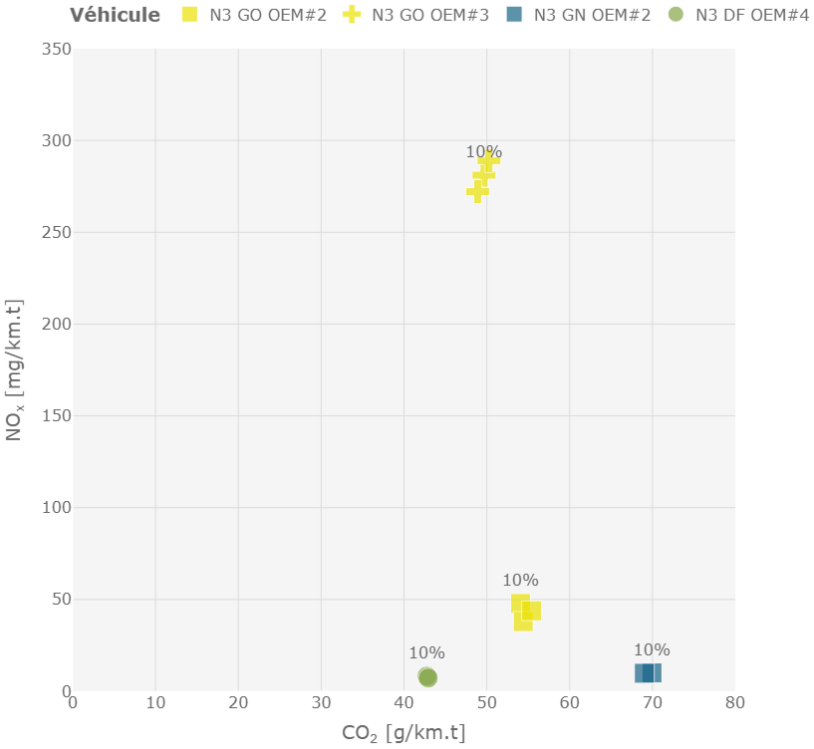


Figure 114 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Compromis NO_x vs CO_2 – Urban delivery – Tamb = 23°C

Les véhicules gaz sont très bien situés en termes d'émissions de NO_x. Les très fortes émissions de NO_x du N3 GO OEM#3 sont potentiellement dues à un système de post-traitement peu efficace en début de campagne.

Energie à la roue : Les essais réalisés sur les différents véhicules montrent les mêmes énergies à la roue (Figure 115). Ce résultat est cohérent car les véhicules comparés ont des masses très proches.

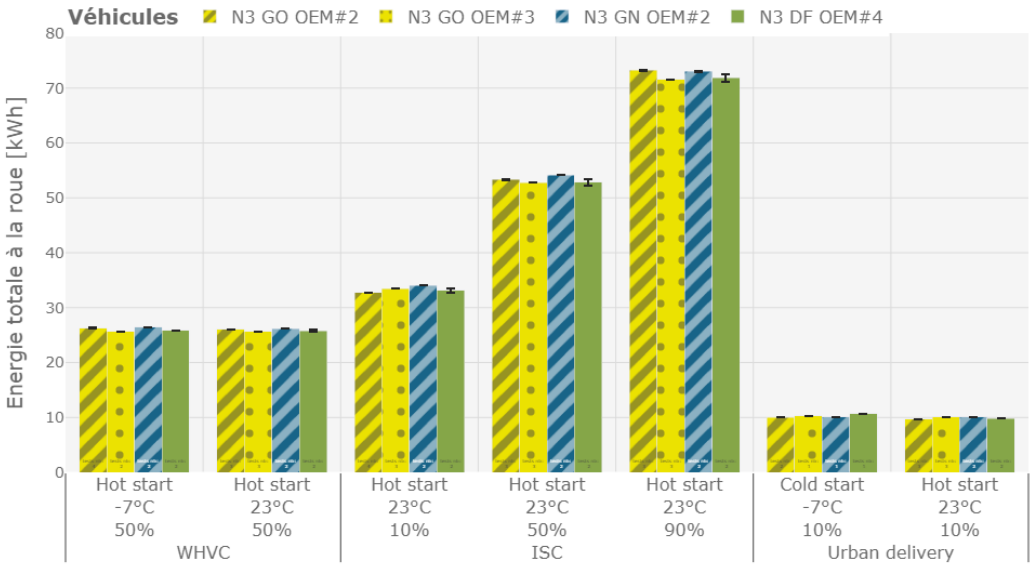


Figure 115 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Energie totale à la roue

CO_2 : Les émissions de CO_2 du N3 DF OEM#4 sont les plus faibles dans cette comparaison (Figure 116). Une baisse des émissions comprise entre 14% et 24% est mesurée. En supposant un même rendement effectif, l'utilisation de GNV permet en théorie de limiter les émissions de CO_2 de 23% par rapport au B7 grâce à un rapport H/C beaucoup plus élevé (4 vs ~ 1.8). Les résultats de la campagne d'essais correspondent ainsi à la théorie.

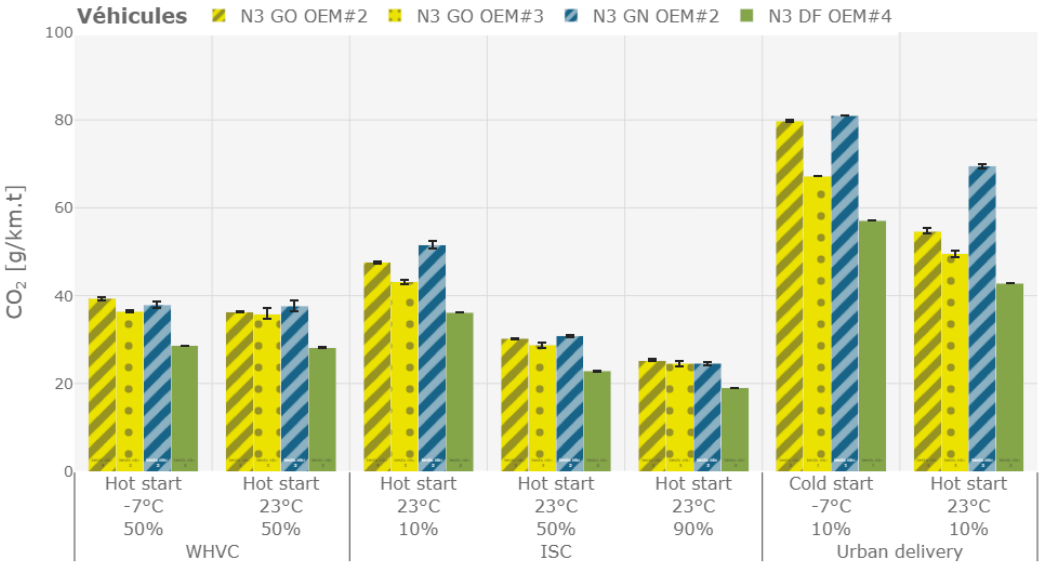


Figure 116 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de CO_2

CH_4 : Les émissions de CH_4 sont cependant logiquement très significativement plus élevées sur les véhicules GNV et Dual Fuel (Figure 117). En particulier, le Dual Fuel présente des émissions très élevées, notamment sur cycle Urban delivery.

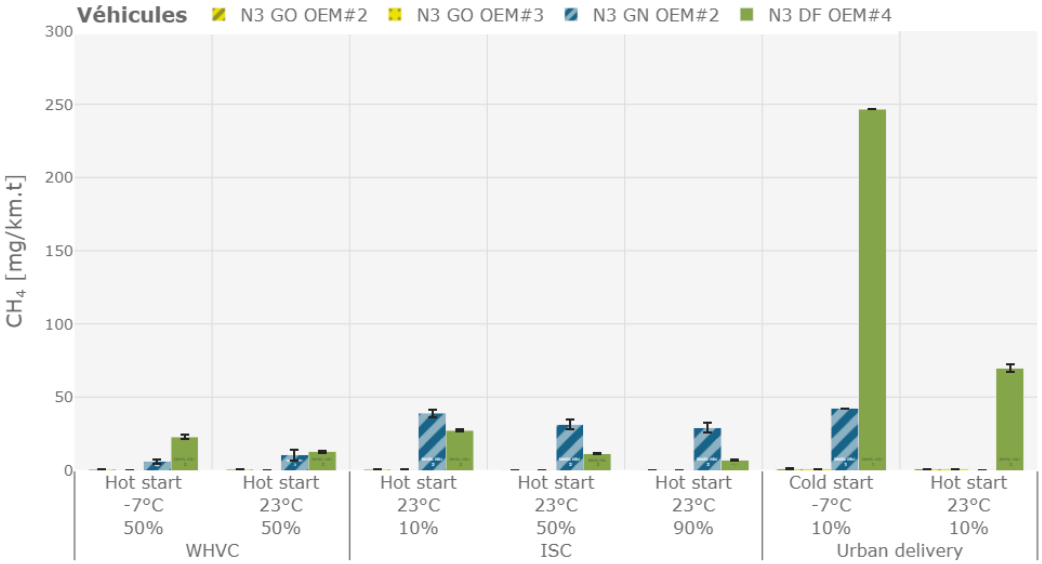


Figure 117 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de CH_4

N_2O : Les émissions de N_2O sont les plus élevées pour les véhicules Diesel (Figure 118). Les émissions mesurées pour le Dual Fuel sont anormalement élevées. Le véhicule testé ayant un faible kilométrage, ce résultat peut provenir de l'état neuf du système SCR.

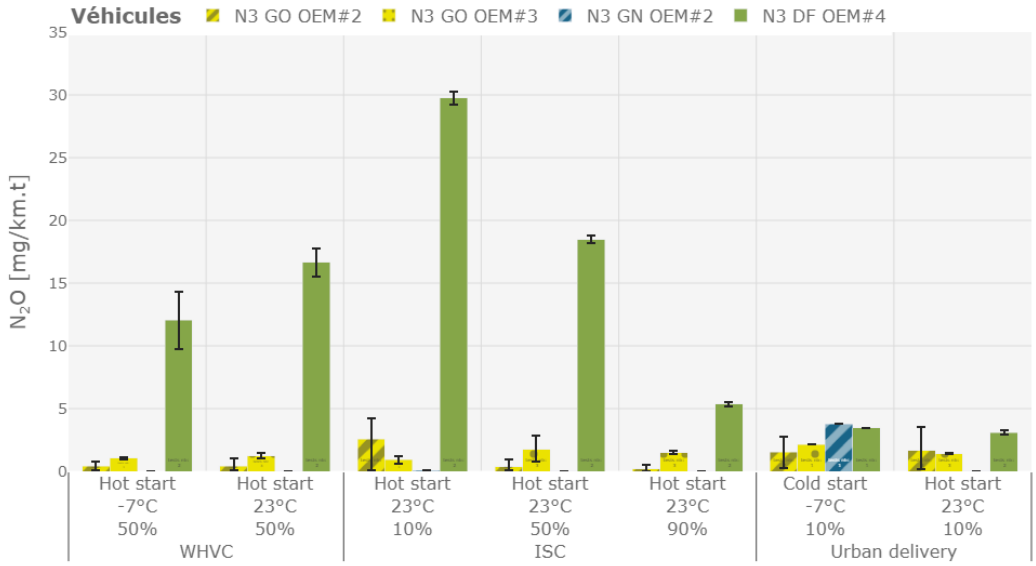


Figure 118 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de N_2O

GES : Le Dual Fuel est le plus performant en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Le niveau élevé d'émissions de N_2O ternit cependant son bilan (Figure 119). Ces émissions comptent pour 10% des émissions de GES. Les émissions de GES sont 7% inférieures au cas Diesel et 20% inférieures au cas GNV.

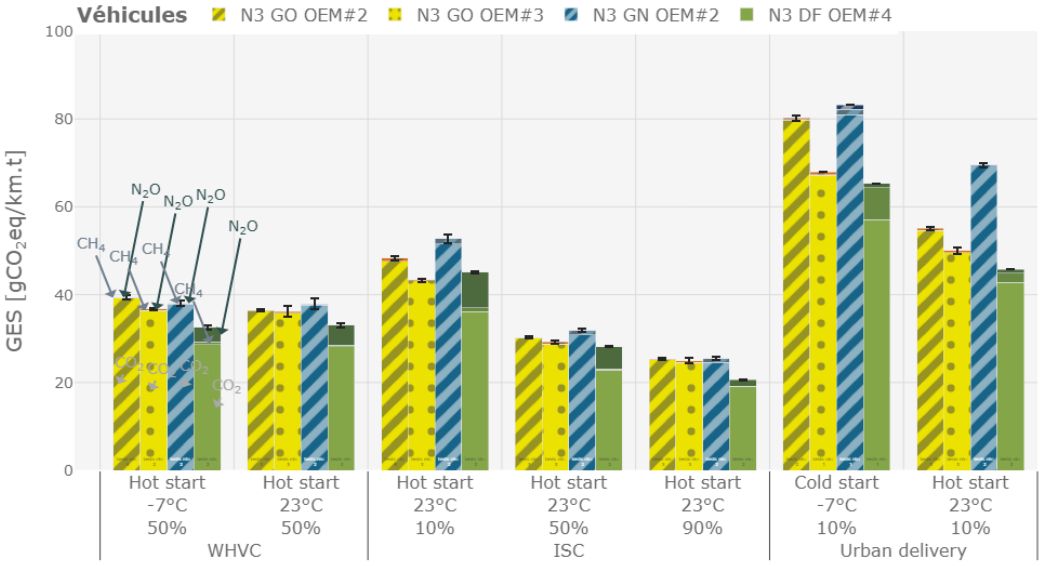


Figure 119 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de GES

NO_x : Les véhicules GNV et Dual Fuel présentent de très bons résultats d'émissions de NO_x par rapport aux véhicules Diesel (Figure 120). Sur véhicule Dual Fuel, les émissions de NO_x sont en moyenne 2 fois plus faibles que celles observées sur véhicule Diesel mais 2.5 fois plus élevées que sur véhicule GNV. Les émissions en sortie moteur (EO) sont élevées pour le véhicule GNV mais le système de post-traitement 3 voies permet de limiter fortement les émissions à l'atmosphère (TP) (Figure 121). Les émissions EO du Dual Fuel sont limitées par rapport aux autres véhicules, lui permettant d'afficher de bons résultats également en TP.

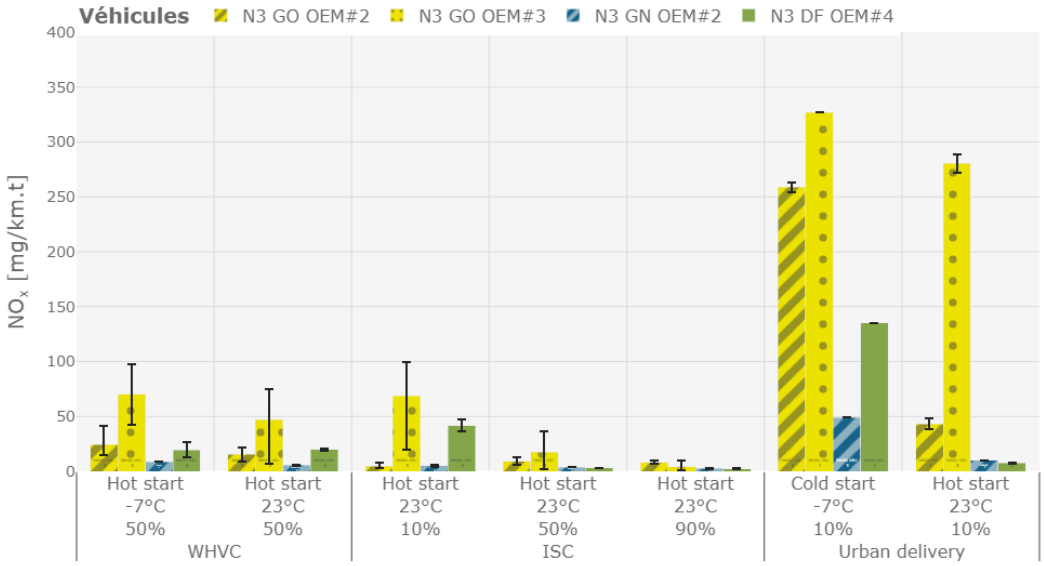


Figure 120 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de NO_x

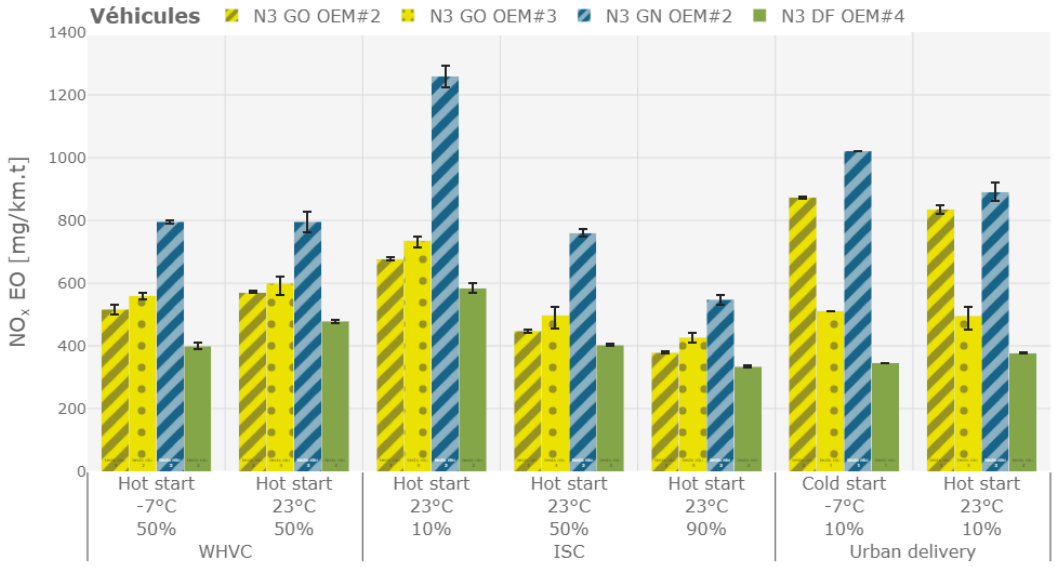


Figure 121 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de NO_x en sortie moteur (EO)

CO : Les émissions de CO du Dual Fuel sont au niveau des véhicules Diesel et bien inférieures à celles obtenues sur véhicule GNV pour les cas à chaud, que ce soit en TP (-70% par rapport au cas GNV) ou en EO (Figure 122 et Figure 123).

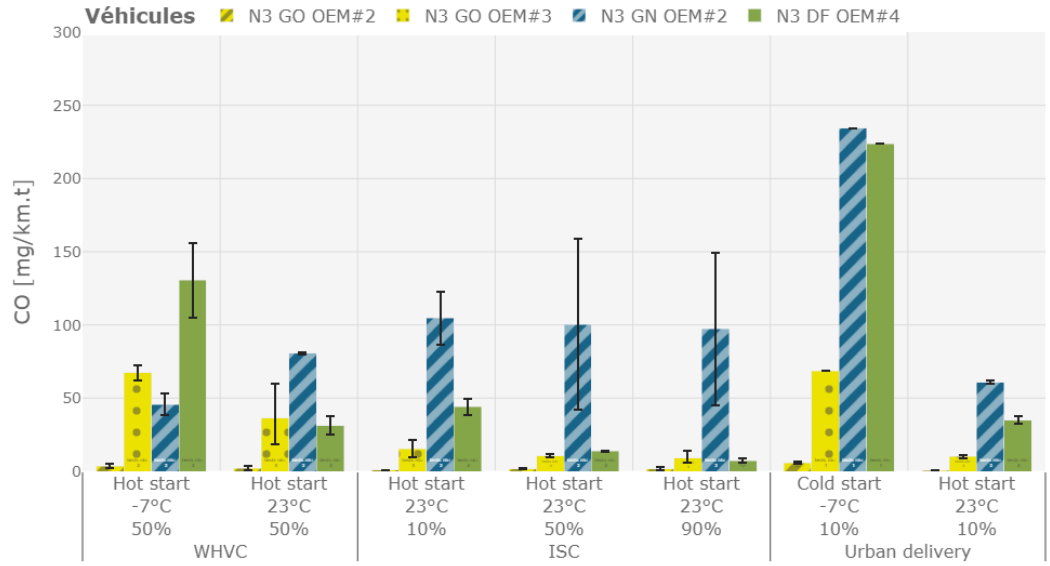


Figure 122 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de CO

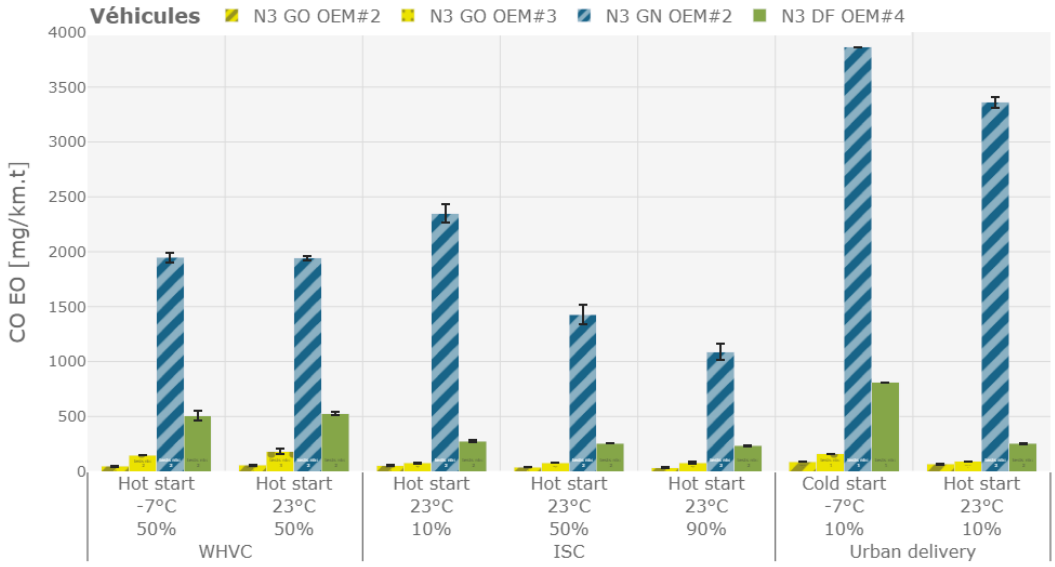


Figure 123 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de CO en sortie moteur (EO)

THC : Les émissions de THC du Dual Fuel sont proches de celles du GNV et supérieures aux cas Diesel (Figure 124). Les émissions du Dual Fuel sur cycle Urban delivery sont particulièrement élevées. Elles sont 20 fois plus élevées que pour les autres véhicules sur ce cycle. Cependant, les émissions EO du Dual Fuel sont significativement plus faibles que celle du cas GNV (hors cycle Urban delivery) (Figure 125) : l'efficacité de post-traitement des THC sur le Dual Fuel est particulièrement faible (Figure 126). Il est possible que l'état neuf du système de post-traitement explique de tels résultats.

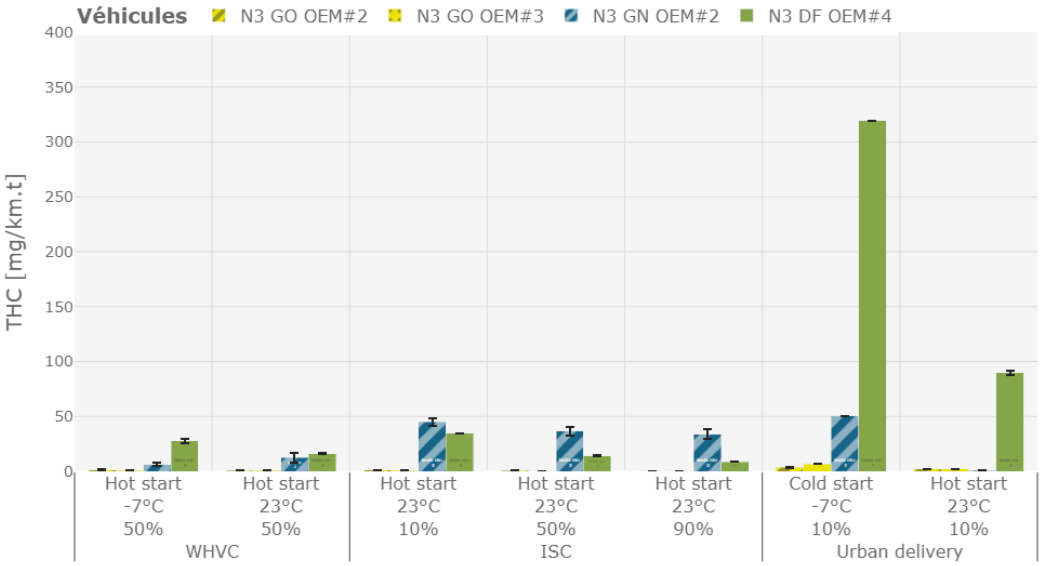


Figure 124 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de THC

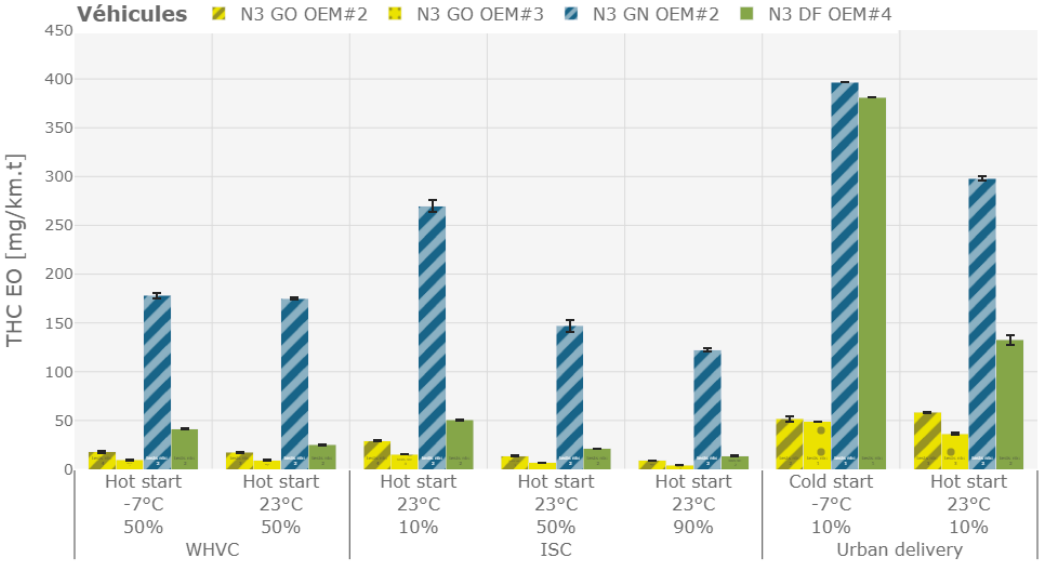


Figure 125 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de THC en sortie moteur (EO)

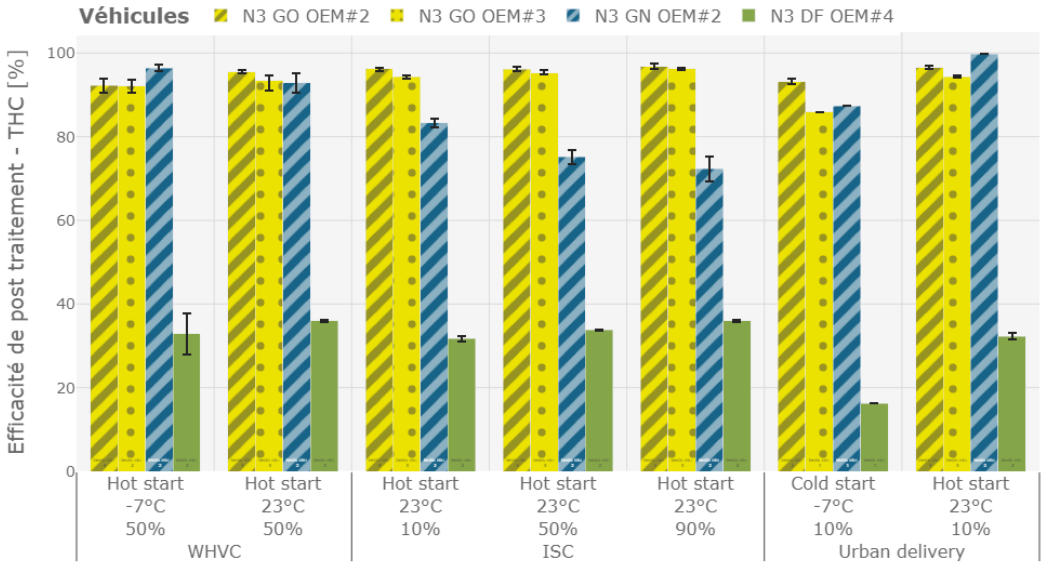


Figure 126 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Efficacité de post-traitement des THC

NH_3 : Les émissions de NH_3 sont très significativement plus élevées sur le véhicule GNV que sur les véhicules Diesel. Le fonctionnement à la stœchiométrie (richesse = 1) favorise l'émissions de ce polluant (Figure 127).

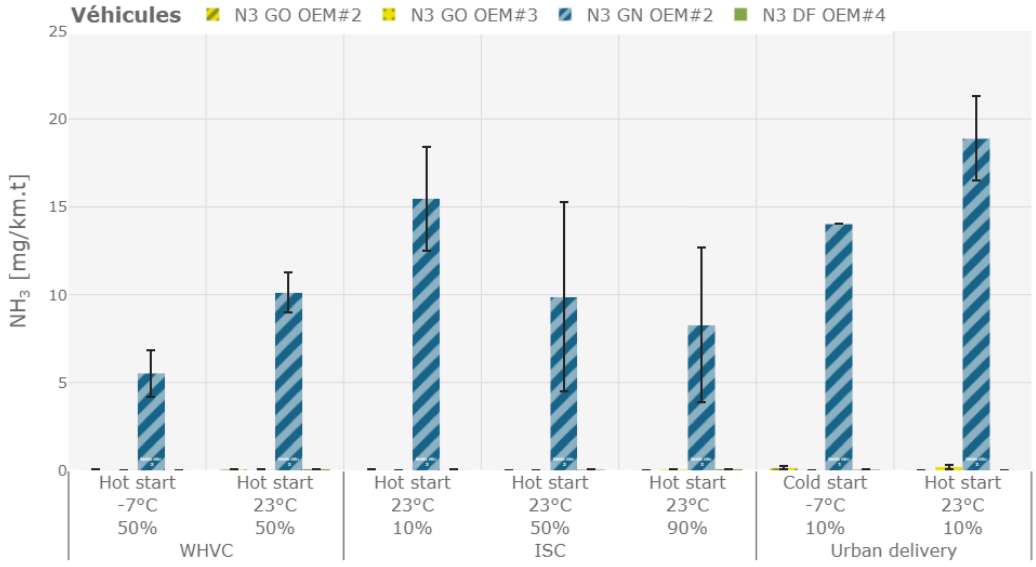


Figure 127 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de NH_3

PN_{23} : Le véhicule Gas montre des émissions de PN_{23} proche de celles des cas Diesel. Les émissions du cas Dual Fuel sont relativement élevées en moyenne (Figure 128). Les émissions EO pour ce véhicule sont au même niveau que les cas Diesel (Figure 129), la qualité de filtration des particules semble ainsi plus faible sur le Dual Fuel. De nouveau, le faible kilométrage du véhicule peut en être la cause.

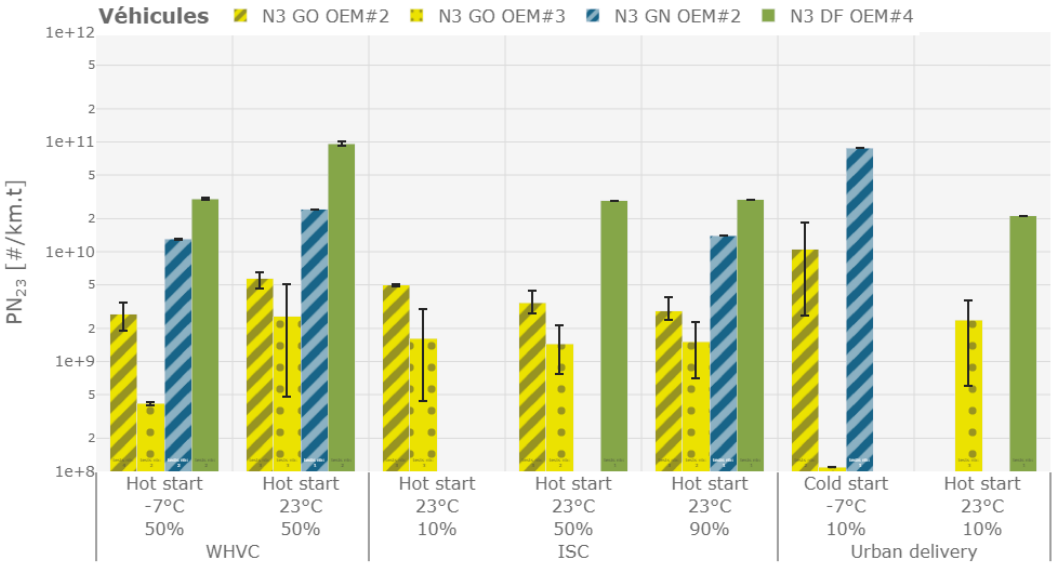


Figure 128 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de PN_{23}

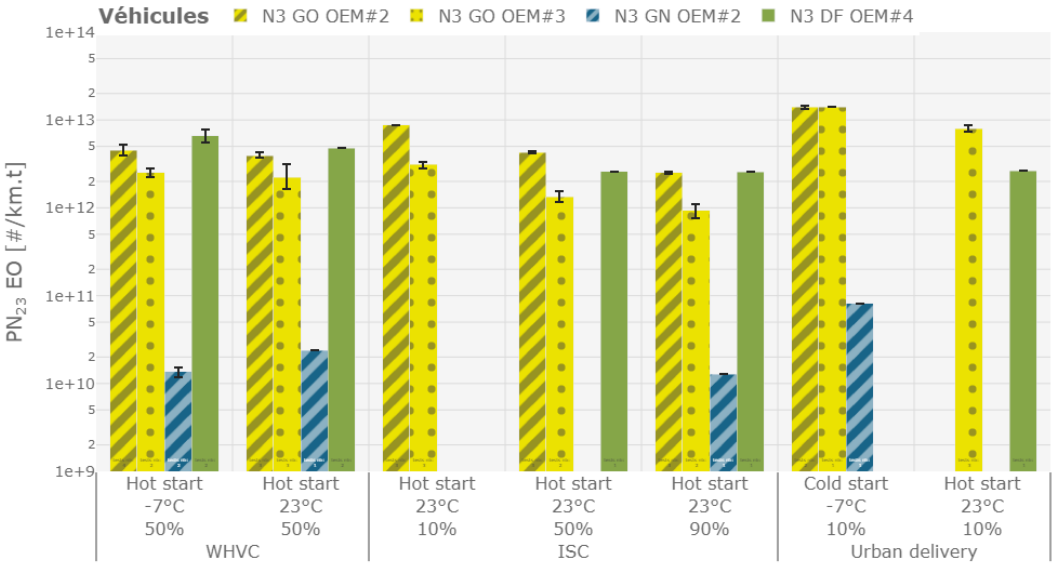


Figure 129 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de PN_{23} en sortie moteur (EO)

PN_{10} : Sur la plupart des cycles, le Dual Fuel présente les émissions de PN_{10} les plus élevées de la comparaison (Figure 130). Les émissions de PN_{10} du Dual Fuel sont 2.5 à 7 fois plus élevées que sur les autres véhicules. Ceci est en lien avec le faible kilométrage du véhicule énoncé précédemment. De plus, le système de post-traitement étant celui d'un véhicule Diesel, il est possible que le lit de suies créé par la combustion du gaz ne permette pas une qualité de filtration du niveau d'un véhicule Diesel.

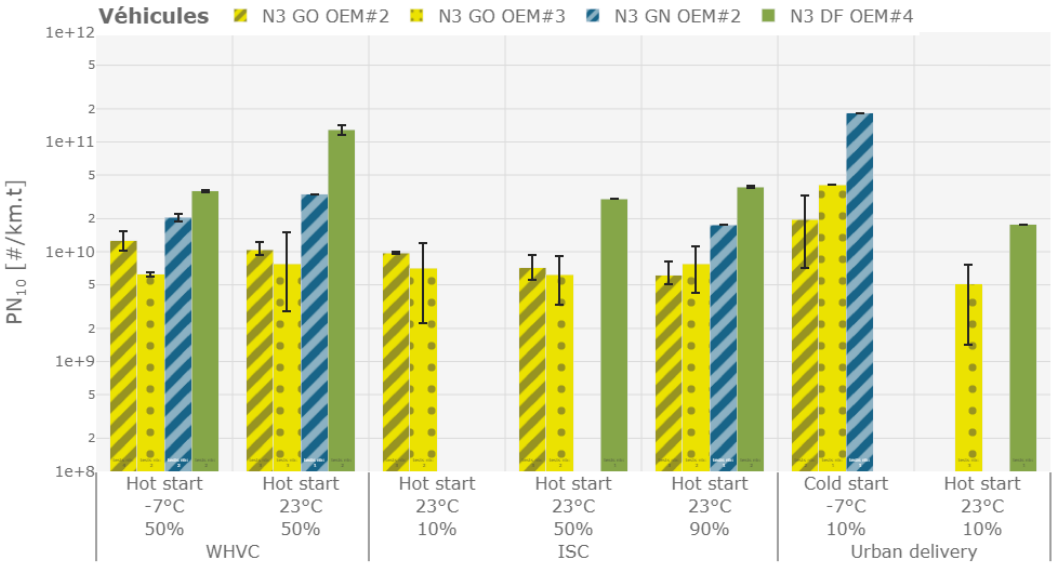


Figure 130 : Comparaison Diesel vs GNV vs Dual Fuel – Emissions spécifiques de PN_{10}

12.7. Analyse de l'effet des biodiesels

Comparaison des résultats entre les véhicules suivants :

- N2 GO OEM#1 – Tout carburant
- N3 GO OEM#3 – Tout carburant
- N3 GO OEM#2 – Tout carburant

Les données présentées ci-dessous sont sans traitement normatif (brut) et prennent en compte tout le cycle. Tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte.

Les données énergétiques ECU des véhicules OEM#2 (tout carburant sauf B100) et OEM#1 ne sont pas valides. Ainsi, les résultats sont présentés en g/km.t. Les émissions spécifiques en g/km sont normalisées par la masse totale du véhicule (masse à vide + masse utile transportée).

Compromis NO_x vs CO_2 : Quel que soit le véhicule, l'influence du carburant sur le compromis NO_x vs CO_2 est faible. Les émissions spécifiques de CO_2 des tracteurs N3 GO OEM#2 et N3 GO OEM#3 dépendent fortement de la charge : utiliser le véhicule fortement chargé permet de limiter les émissions de CO_2 par masse transportée (Figure 131). Les émissions spécifiques de NO_x sont cependant peu dépendantes de la charge. Il est à noter que l'efficacité de conversion du SCR a fortement évolué durant les essais pour le N3 GO OEM#3, conduisant à une forte dispersion des émissions de NO_x.

Sur cycle Urban delivery, les émissions de NO_x et de CO_2 sont peu dépendantes du carburant (Figure 132).

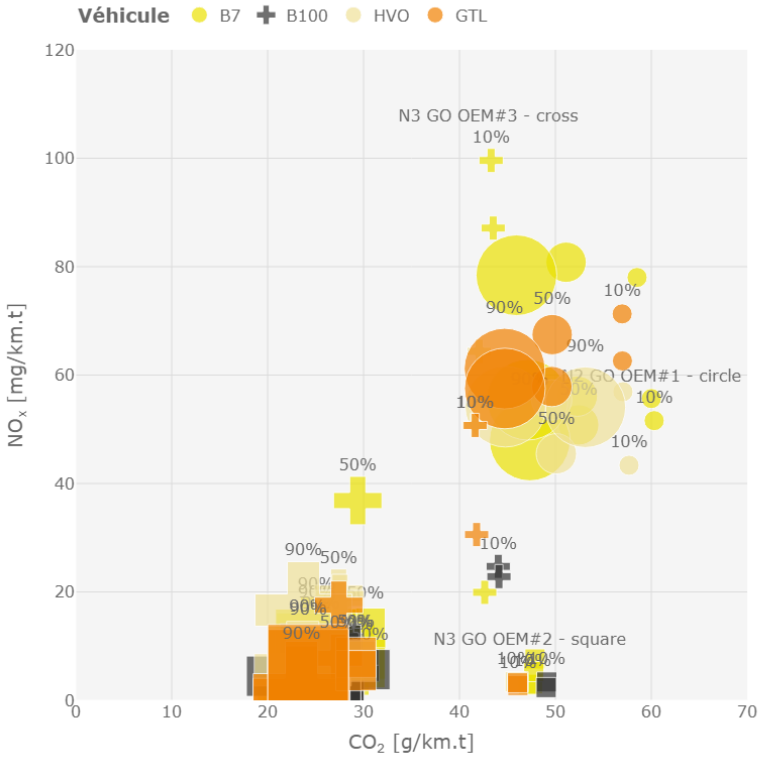


Figure 131 : Analyse de l'effet des biodiesels – Compromis NO_x vs CO_2 – ISC

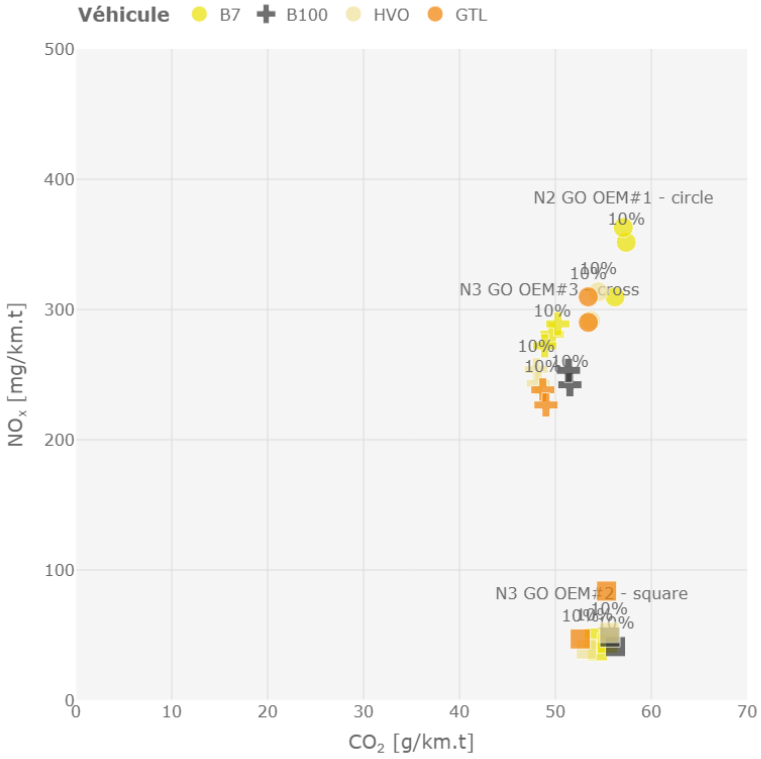


Figure 132 : Analyse de l'effet des biodiesels – Compromis NO_x vs CO_2 – Urban delivery – Tamb = 23°C

CO_2 : L'effet du carburant sur les émissions de CO_2 à l'échappement est faible (Figure 133). Les variations sont de l'ordre de quelques pourcents. En supposant un même rendement effectif (*i.e.* sans impact du carburant sur le rendement), ces variations correspondent à l'analyse théorique (Figure 134).

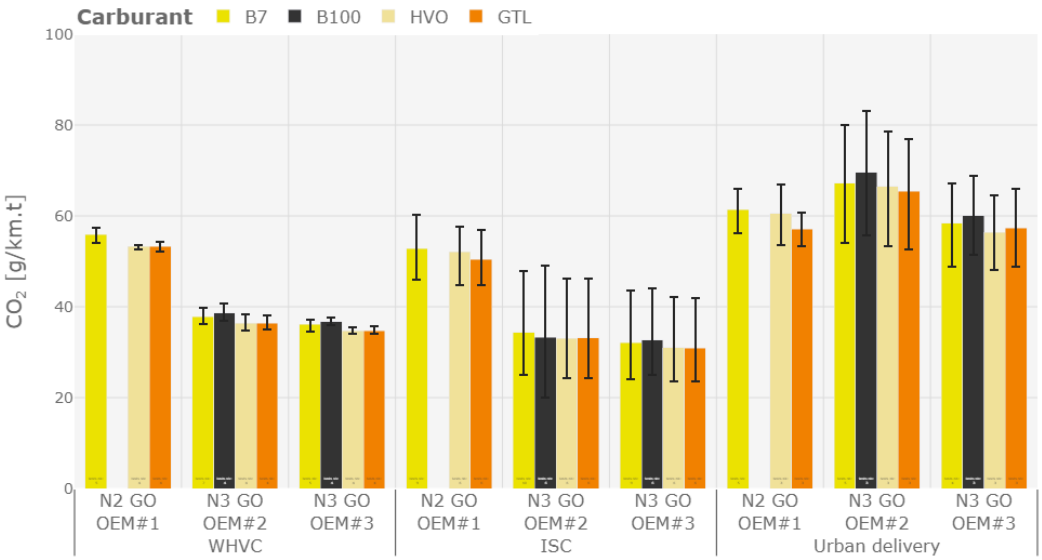


Figure 133 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de CO_2

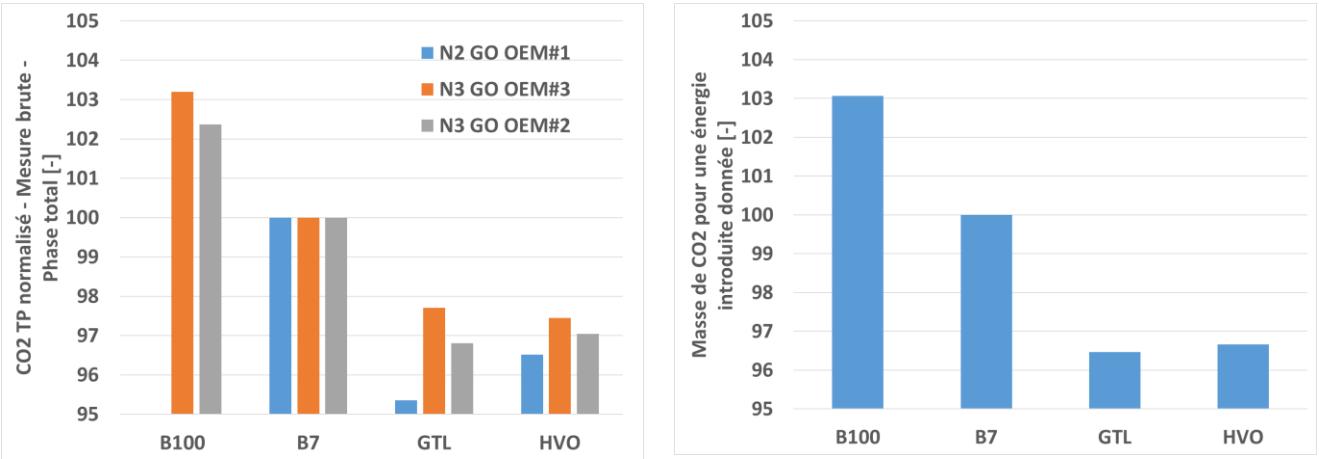


Figure 134 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de CO_2 (gauche) et calcul théorique (droite) avec Référence = B7

Emissions polluantes : Les polluants locaux (NO_x, CO, THC, NH_3, PN_{10}) présentent des niveaux d'émissions proches quel que soit le carburant utilisé. Les émissions polluantes à l'échappement sont beaucoup plus sensibles aux conditions d'utilisation (température ambiante, cycle, charge) qu'aux propriétés du carburant.

En sortie moteur, le carburant n'influence pas les émissions de NO_x (Figure 136). Le B100 permet de limiter les émissions EO de CO (Figure 140), de THC (Figure 142) et de PN_{23} (Figure 145). Cependant, l'efficacité des systèmes de post-traitement (DOC et DPF) annule cet avantage à l'échappement.

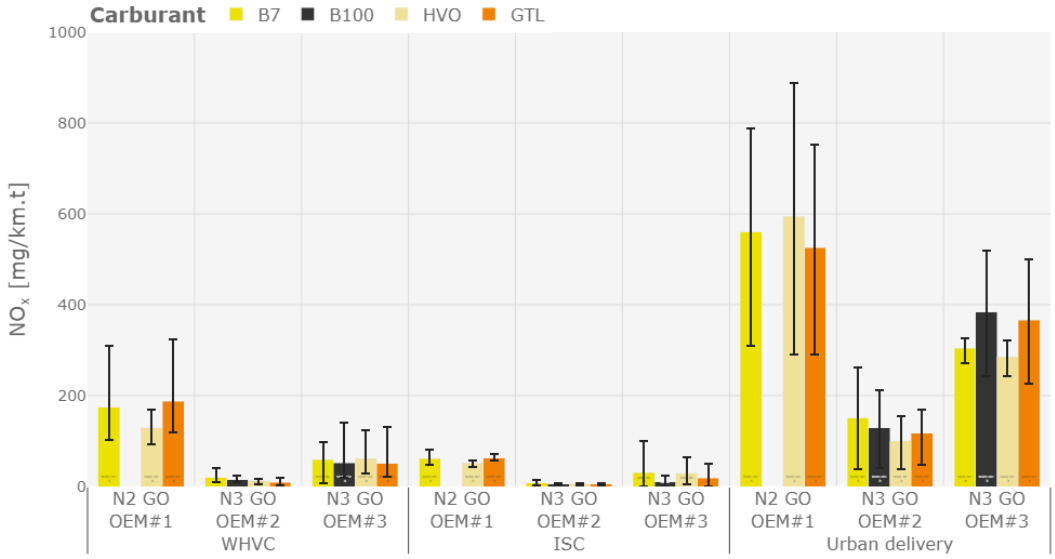


Figure 135 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de NO_x

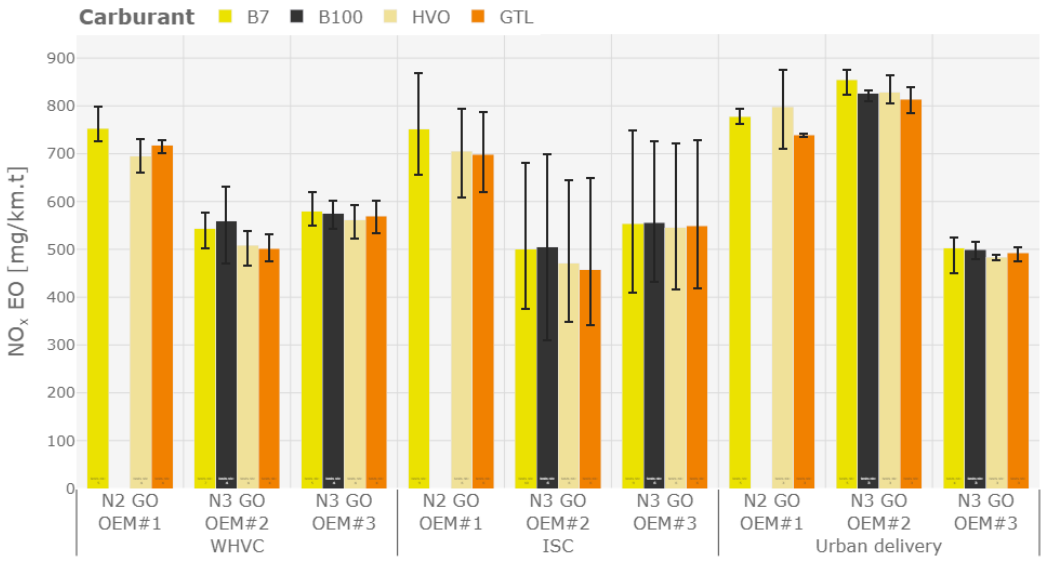


Figure 136 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de NO_x en sortie moteur (EO)

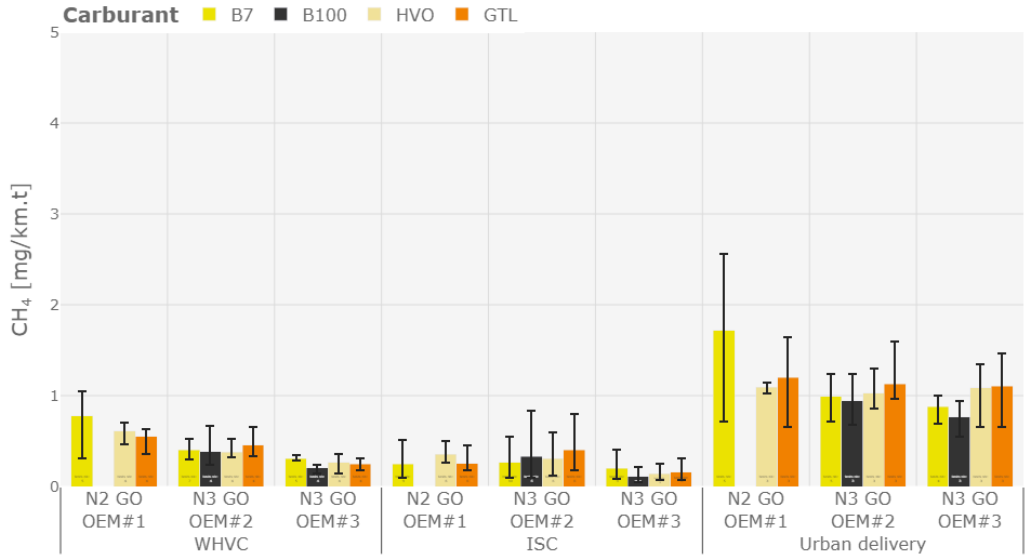


Figure 137 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de CH_4

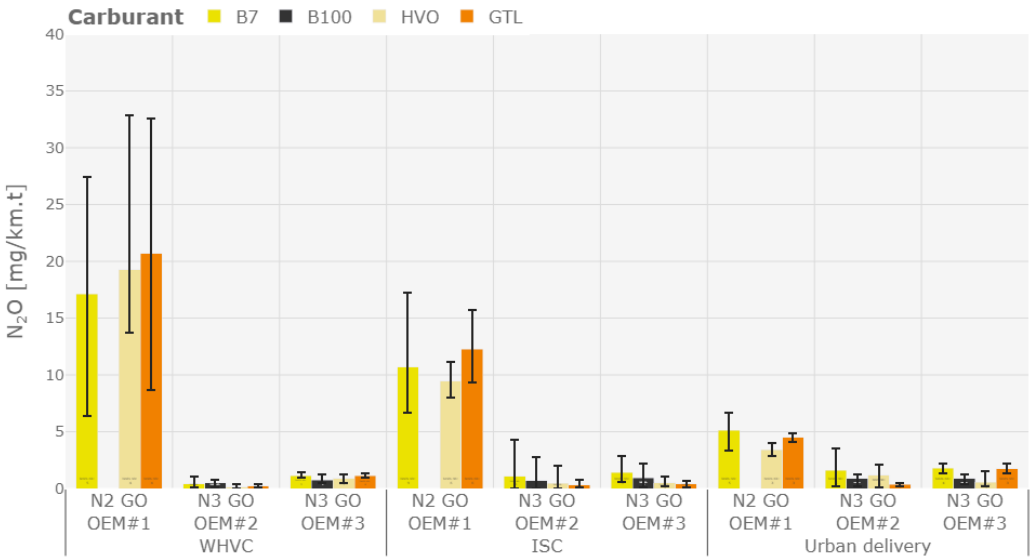


Figure 138 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de N_2O

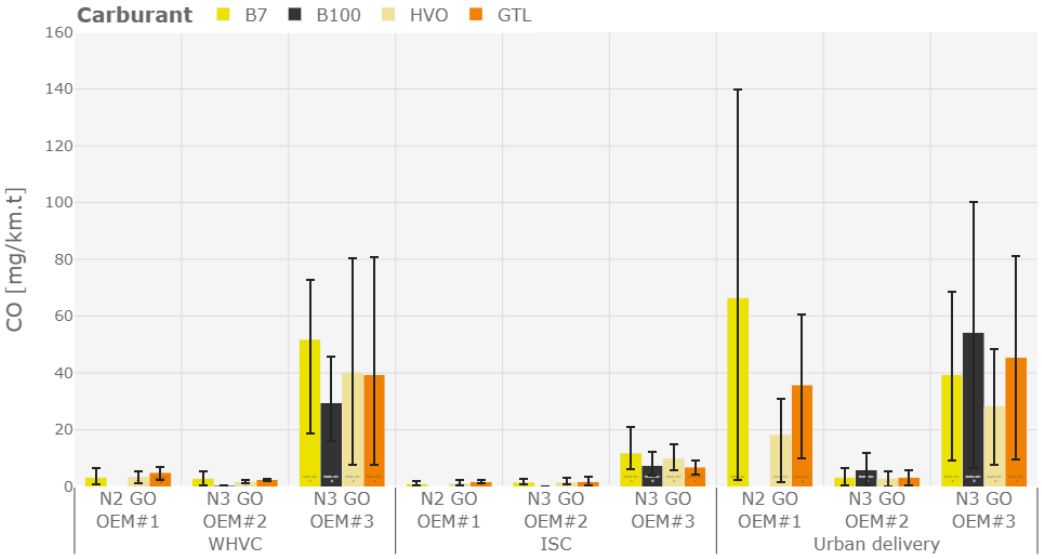


Figure 139 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de CO

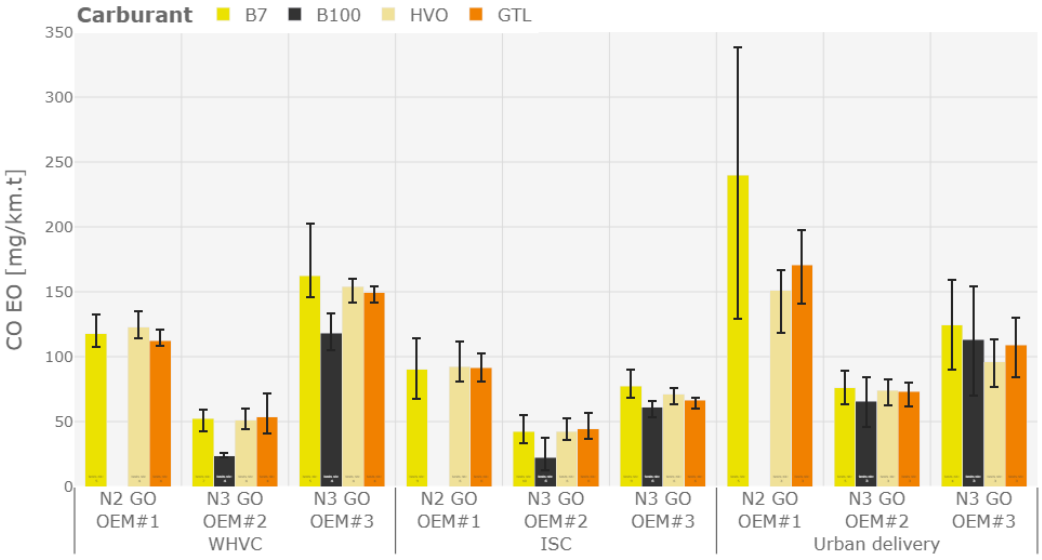


Figure 140 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de CO en sortie moteur (EO)

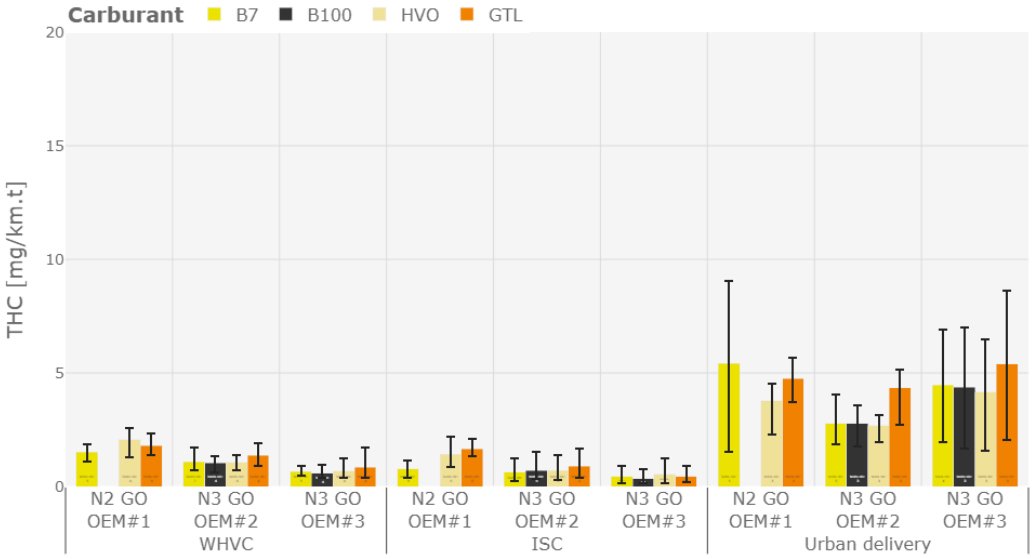


Figure 141 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de THC

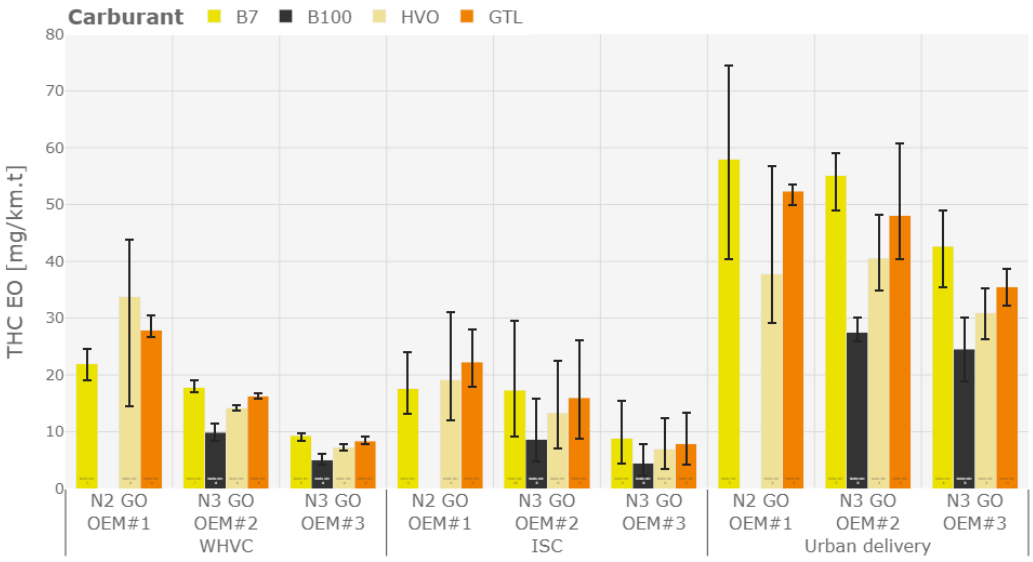


Figure 142 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de THC en sortie moteur (EO)

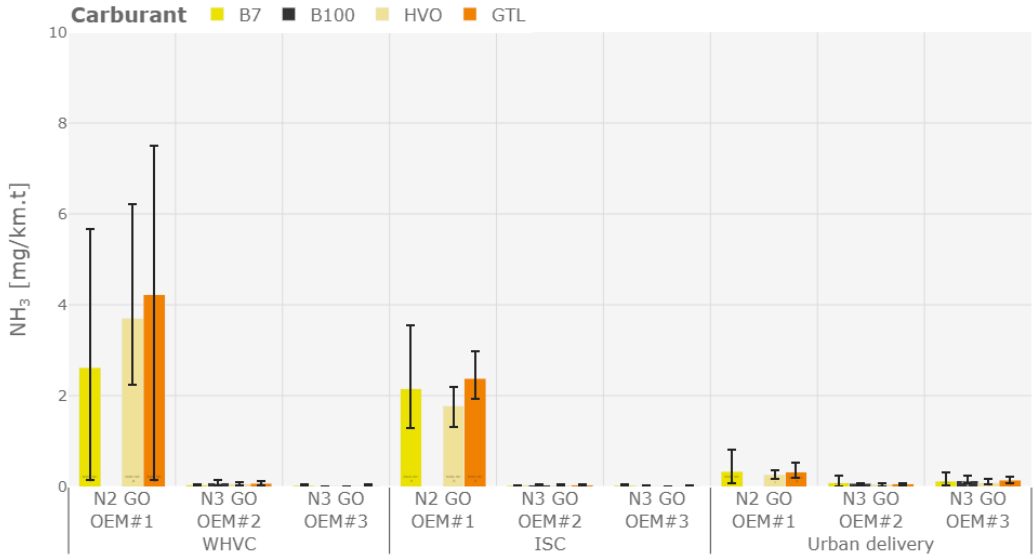


Figure 143 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de NH_3

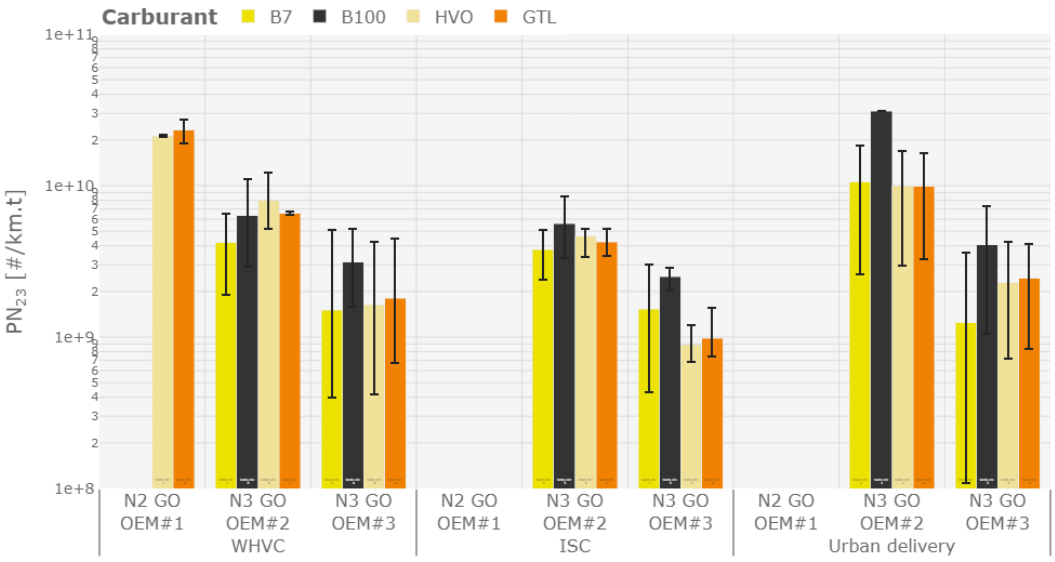


Figure 144 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de PN_{23}

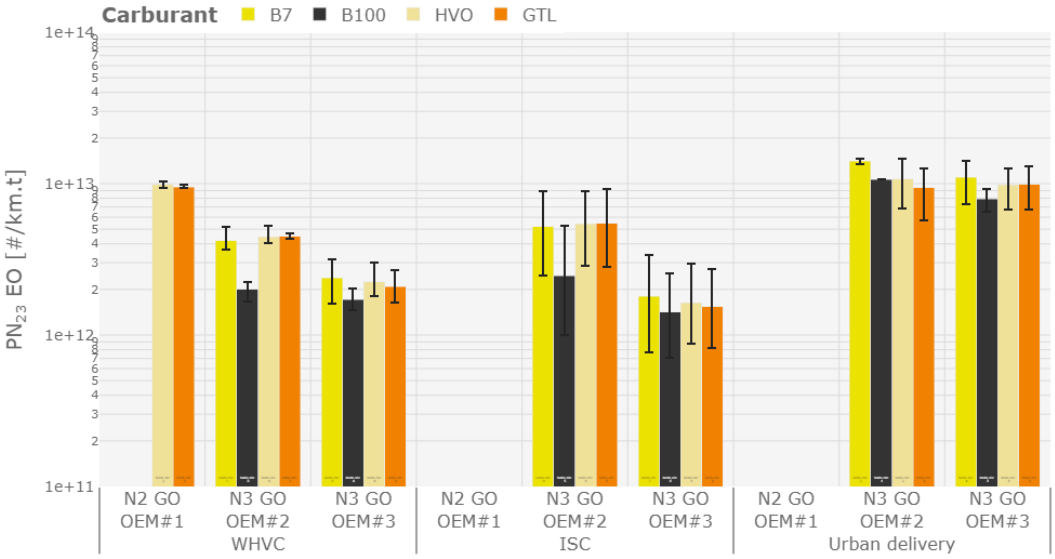


Figure 145 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de PN_{23} en sortie moteur (EO)

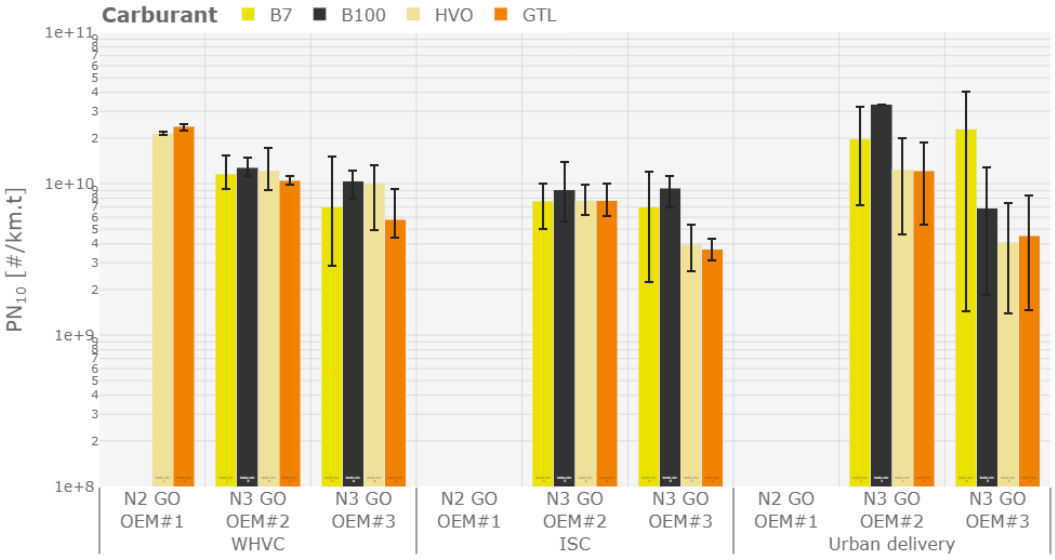


Figure 146 : Analyse de l'effet des biodiesels – Emissions spécifiques de PN_{10}

12.8. Comparaison B100 vs B100 exclusif

Comparaison des résultats entre les véhicules suivants :

- N3 GO OEM#3 – Carburant B100
- N3 GO B1 OEM#3 – Carburant B100

Les données présentées ci-dessous sont sans traitement normatif (brut) et prennent en compte tout le cycle. Tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte.

Les données énergétiques ECU des deux véhicules présentent un léger écart, notamment sur cycle Urban delivery. Ainsi, les résultats sont présentés en g/km.t. Les émissions spécifiques en g/km sont normalisées par la masse totale du véhicule (masse à vide + masse utile transportée).

Compromis NO_x vs CO_2 : Le comportement en termes d'émissions de CO_2 est très similaire entre les deux véhicules (Figure 147 et Figure 148). On note cependant un léger écart sur les émissions de NO_x, potentiellement dû à une différence en termes d'efficacité de système SCR.

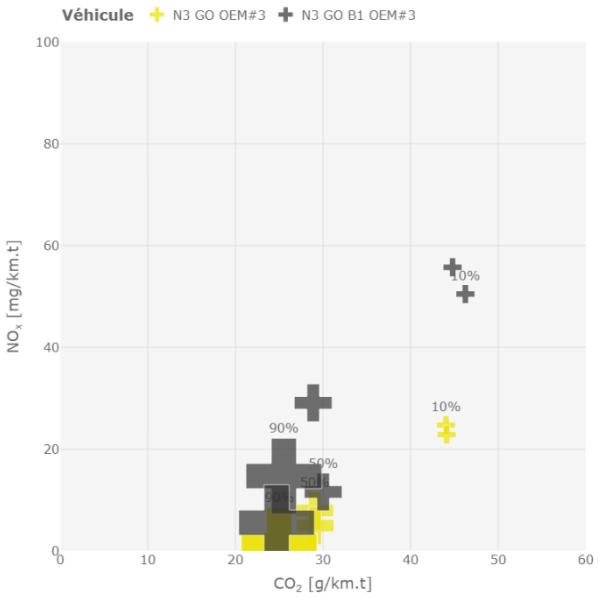


Figure 147 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Compromis NO_x vs CO_2 – ISC Tamb = 23°C

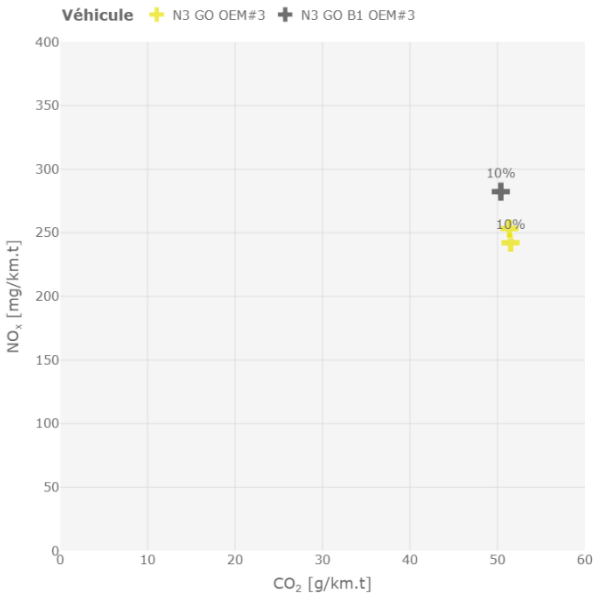


Figure 148 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Compromis NO_x vs CO_2 – Urban delivery Tamb = 23°C

Emissions polluantes : Les ordres de grandeurs et la sensibilité aux conditions d'usage des émissions sont conservés entre le N3 GO OEM#3 utilisant du B100 et le N3 GO B1 OEM#3, quel que soit les émissions considérées : CO_2 (Figure 149), CH_4 (Figure 150), N_2O (Figure 151), NO_x (Figure 152), CO (Figure 153), THC (Figure 154), NH_3 (Figure 155) et particules PN_{23} (Figure 156) et PN_{10} (Figure 157).

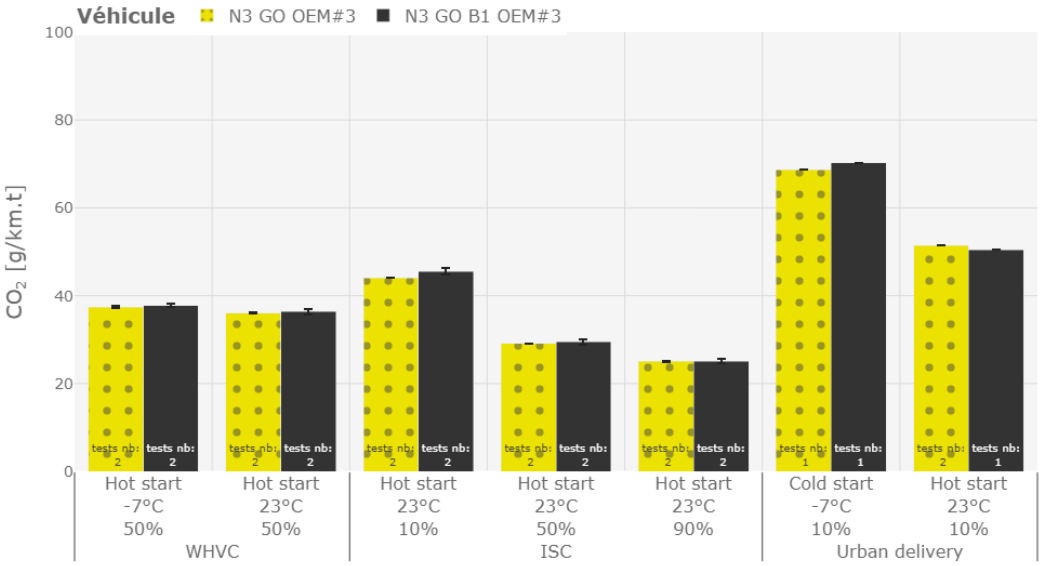


Figure 149 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Emissions spécifiques de CO_2

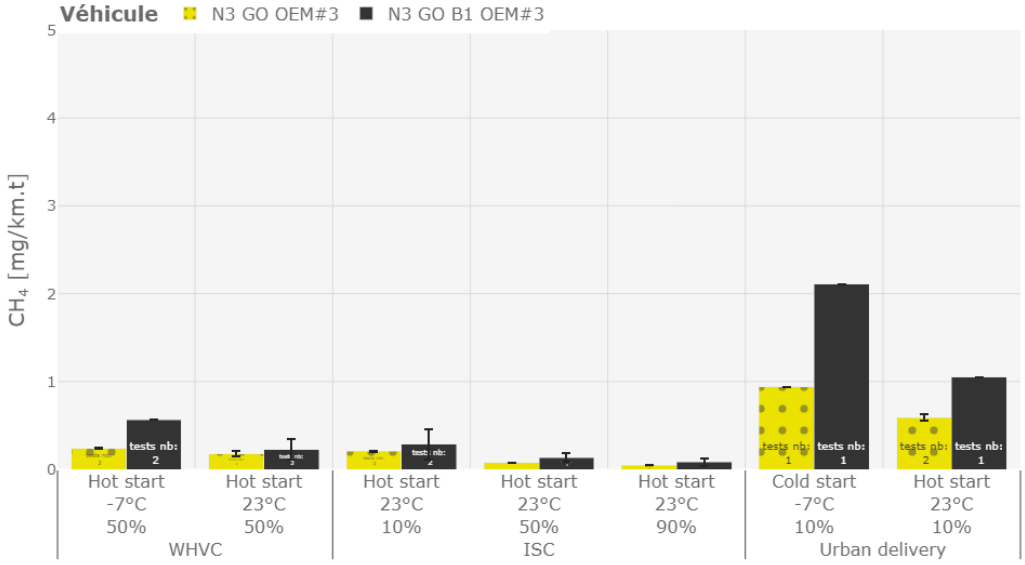


Figure 150 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Emissions spécifiques de CH_4

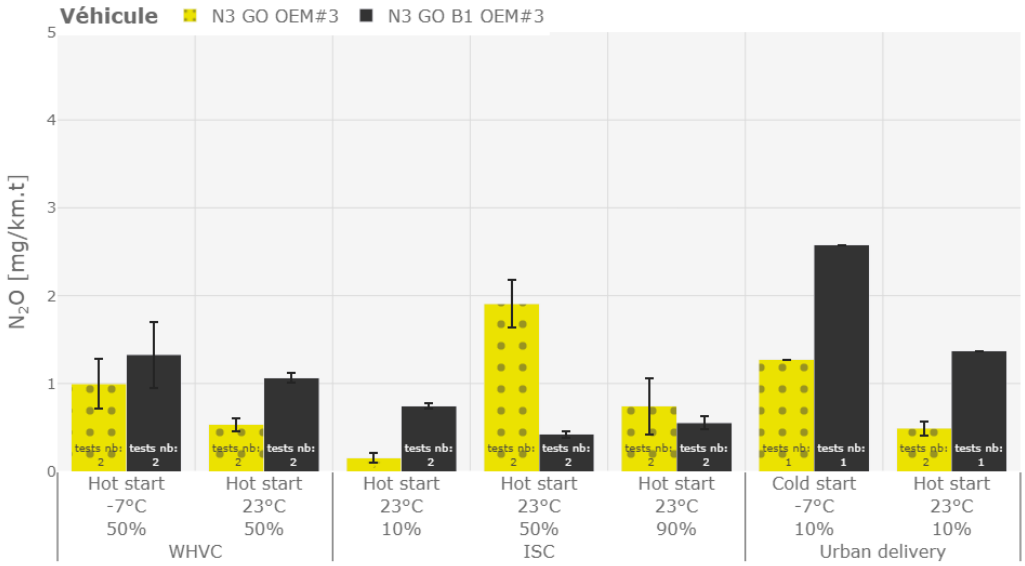


Figure 151 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Emissions spécifiques de N_2O

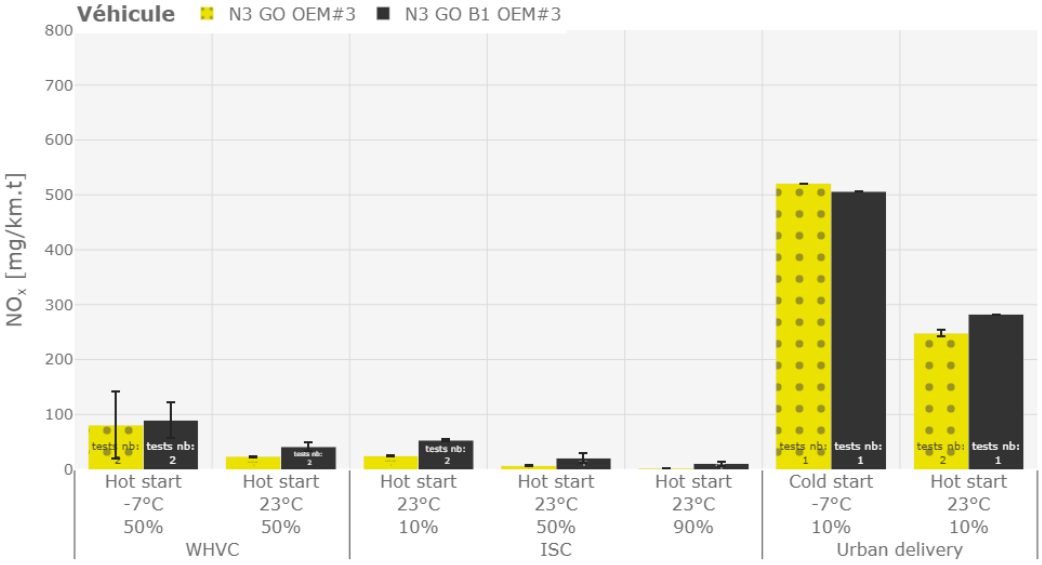


Figure 152 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Emissions spécifiques de NO_x

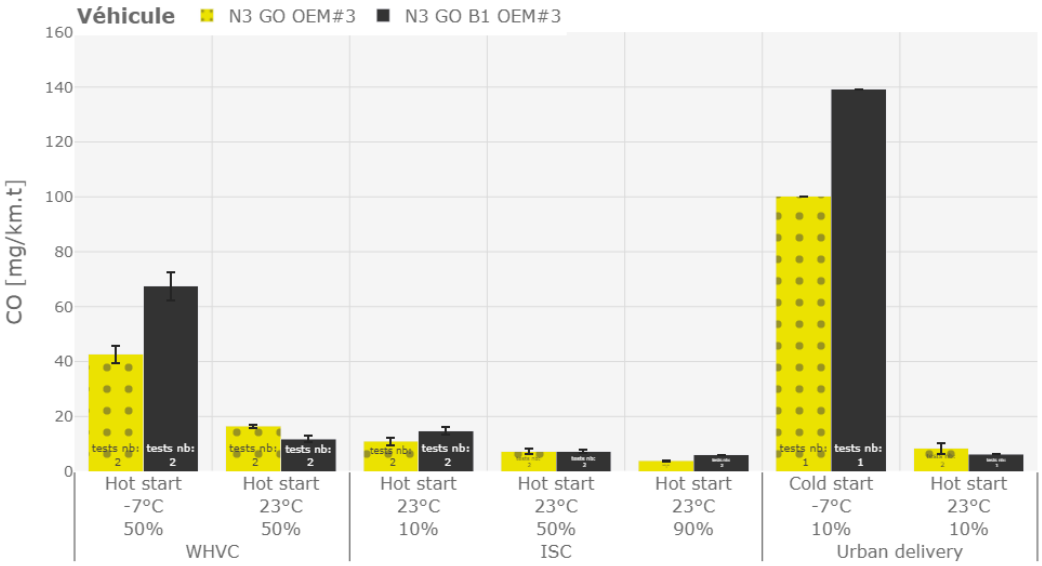


Figure 153 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Emissions spécifiques de CO

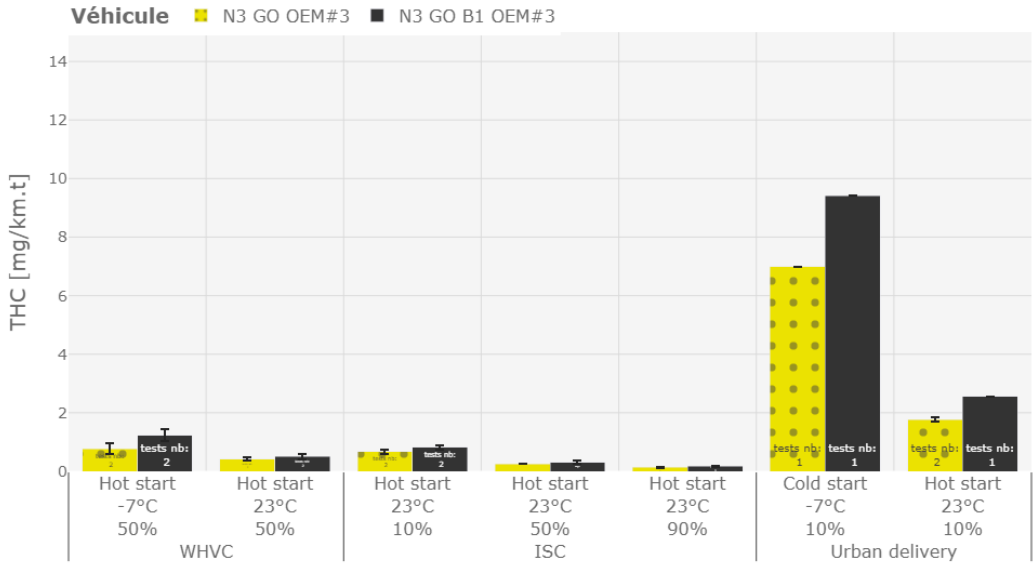


Figure 154 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Emissions spécifiques de THC

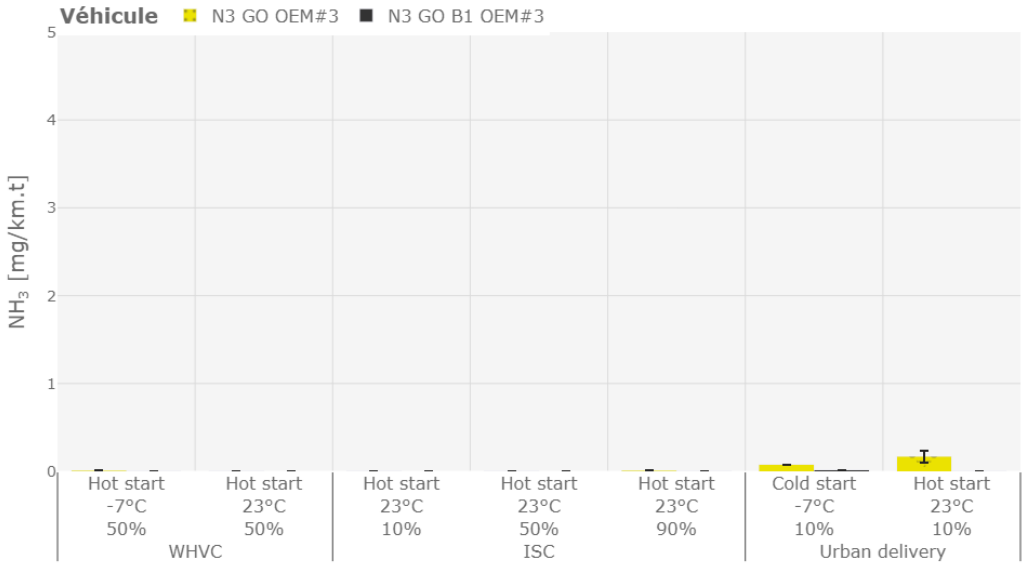


Figure 155 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Emissions spécifiques de NH_3

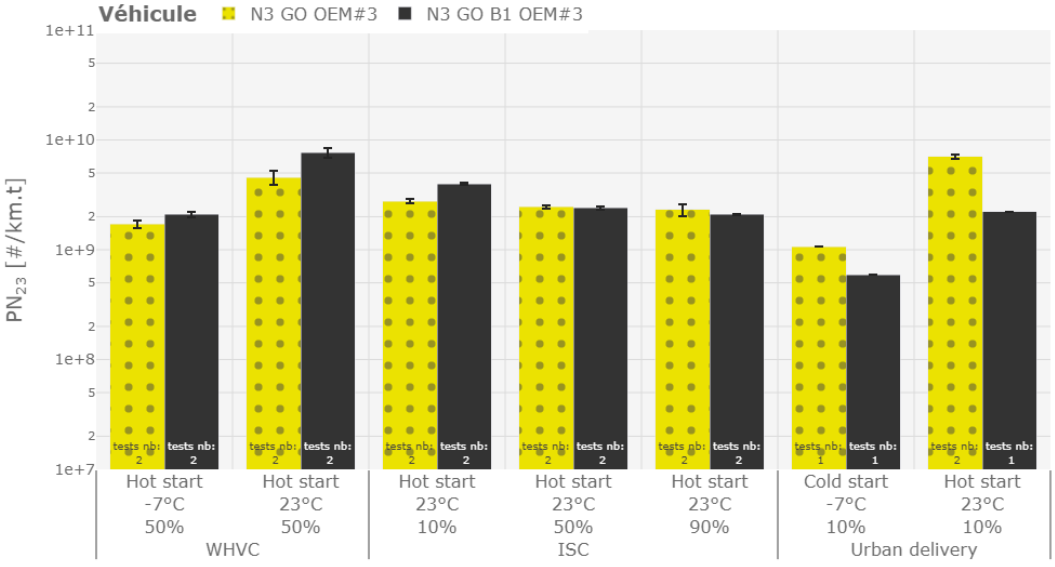


Figure 156 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Emissions spécifiques de PN_{23}

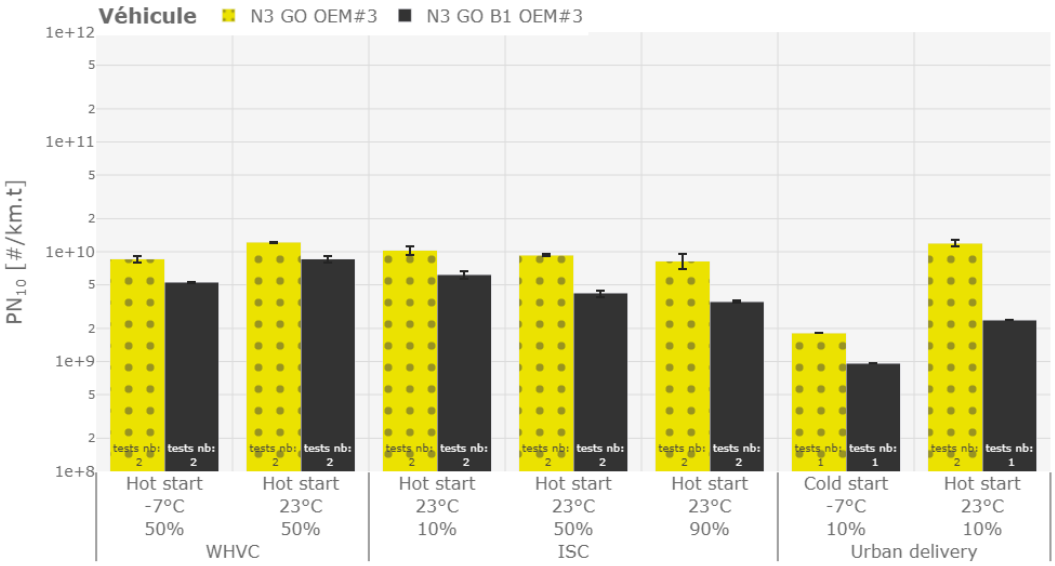


Figure 157 : Comparaison B100 vs B100 exclusif – Emissions spécifiques de PN_{10}

12.9. Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride

Comparaison des résultats entre les véhicules suivants :

- Bus GN OEM#1 – Carburant GNV
- Bus GN HEV OEM#1 – Carburant GNV

Les données présentées ci-dessous sont sans traitement normatif (brut) et prennent en compte tout le cycle. Tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte.

Un consommateur important était présent lors des essais des deux véhicules. Ainsi, les résultats sont présentés en g/km.t. Les émissions spécifiques en g/km sont normalisées par la masse totale du véhicule (masse à vide + masse utile transportée).

Compromis NO_x vs CO_2 : L'hybridation permet un gain modeste en termes d'émissions de CO_2 (Figure 158 et Figure 159). Les résultats en NO_x sont excellents, sans différence notable entre les cas standard et hybride.

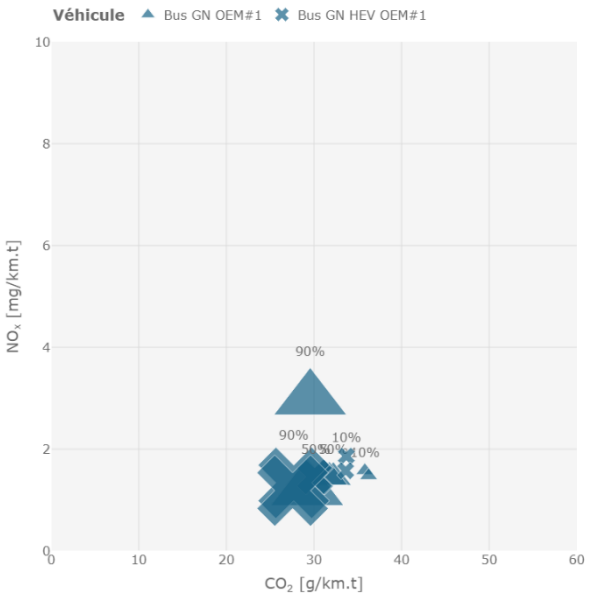


Figure 158 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Compromis NO_x vs CO_2 – ISC Tamb = 23°C

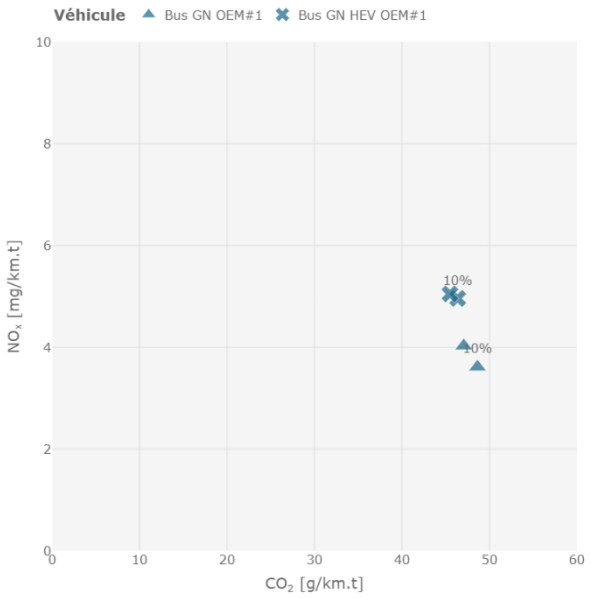


Figure 159 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Compromis NO_x vs CO_2 – Urban delivery Tamb = 23°C

CO_2 : L'hybridation permet un gain compris entre 4% et 8% (Figure 160).

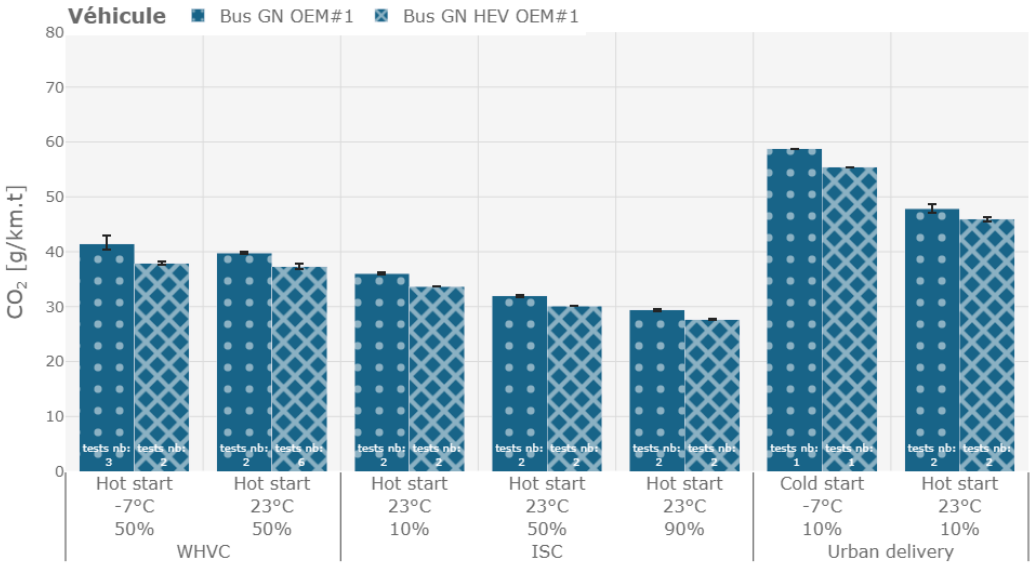


Figure 160 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de CO_2

$\underline{CH_4}$: Les émissions de CH_4 sont très faibles pour les deux véhicules, sauf en cas de roulage sur cycle urbain à froid (Figure 161). Les émissions en sortie moteur sont alors significativement plus élevées et l'efficacité du système de post-traitement diminue, en particulier pour le cas hybride (Figure 162).

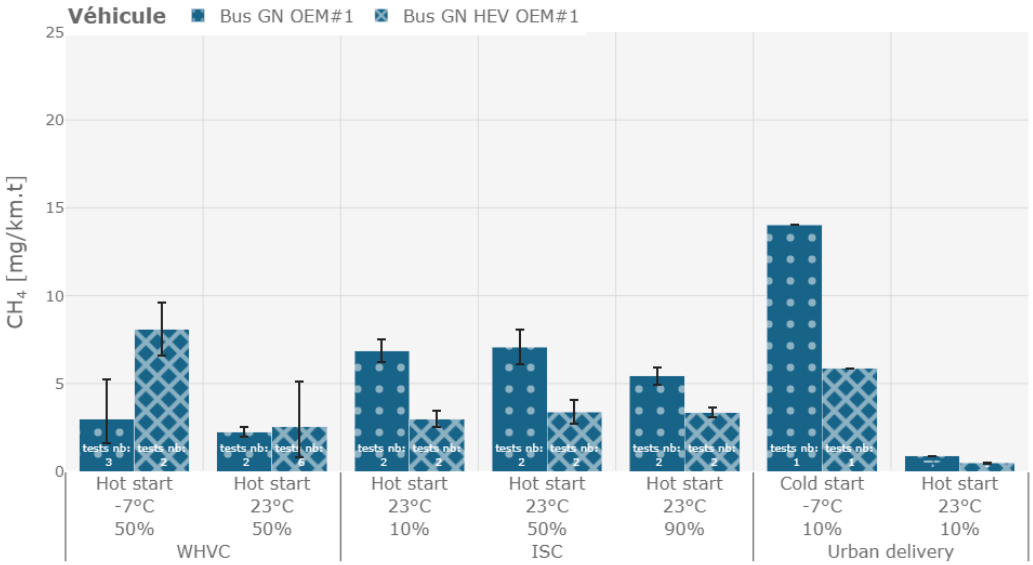


Figure 161 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de CH_4

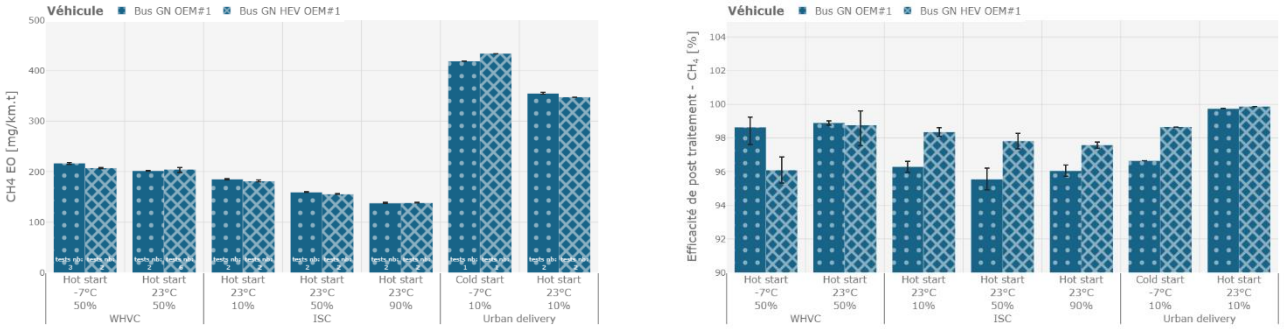


Figure 162 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de CH_4 en sortie moteur (gauche) et efficacité de post-traitement (droite)

$\underline{N_2O}$: Les émissions de N_2O restent très contenues dans les deux cas, sauf en cas de roulage à froid sur cycle Urban delivery (Figure 163).

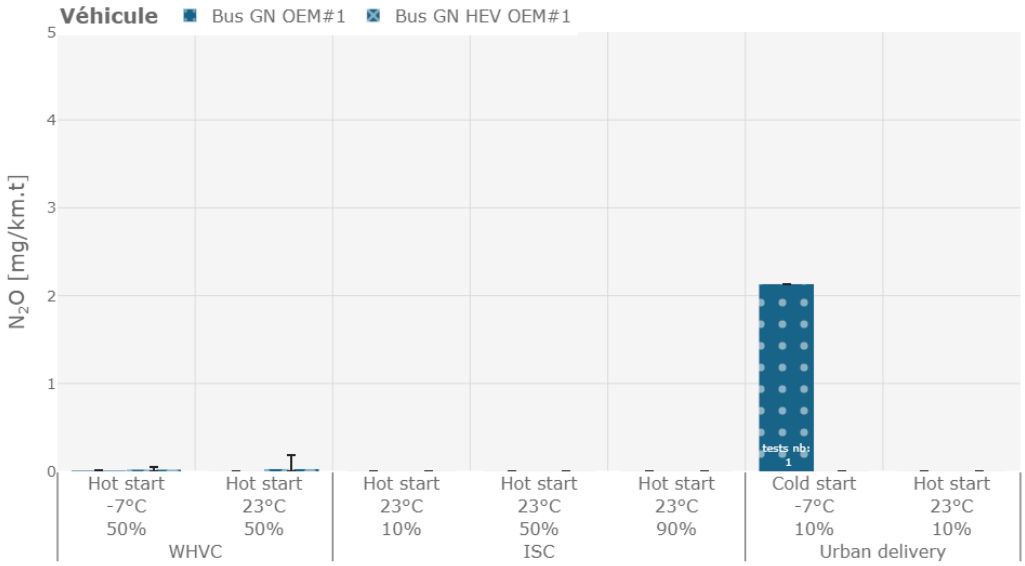


Figure 163 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de N_2O

GES : Les faibles émissions de CH_4 et de N_2O jouent peu sur les émissions de gaz à effet de serre, très majoritairement dues aux émissions de CO_2 (Figure 164).

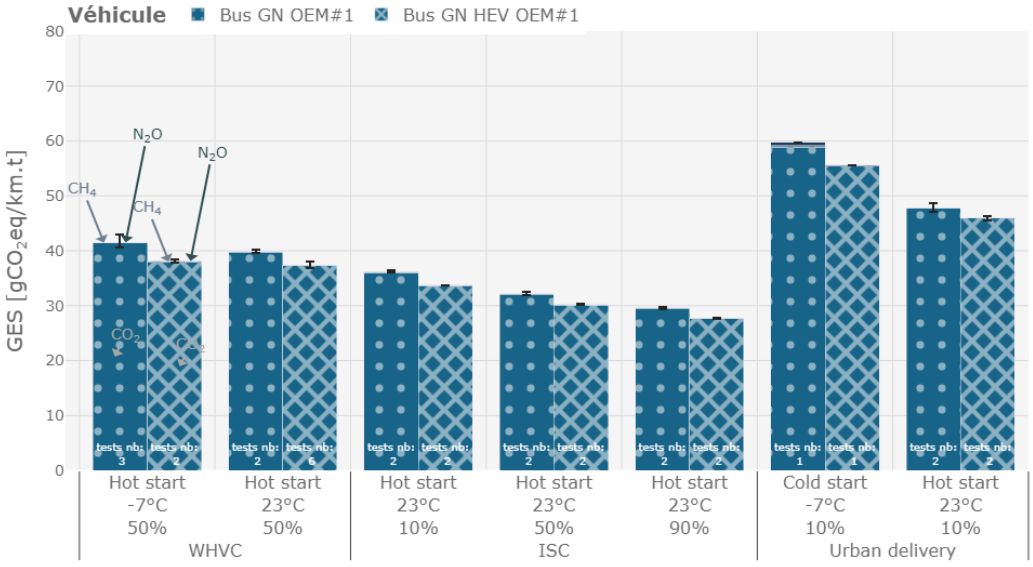


Figure 164 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de GES

NO_x : Les émissions de NO_x sont très contenues pour les deux véhicules (Figure 165). Les émissions les plus élevées sont observées dans le cas de roulage en cycle Urban delivery à froid, conditions pour lesquelles l'efficacité de post-traitement chute (Figure 166).

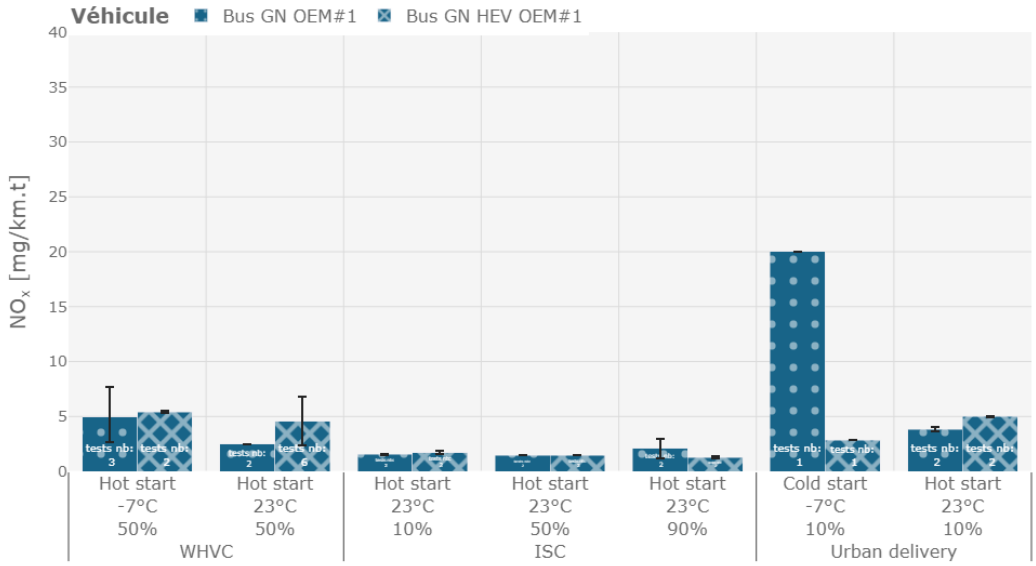


Figure 165 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de NO_x

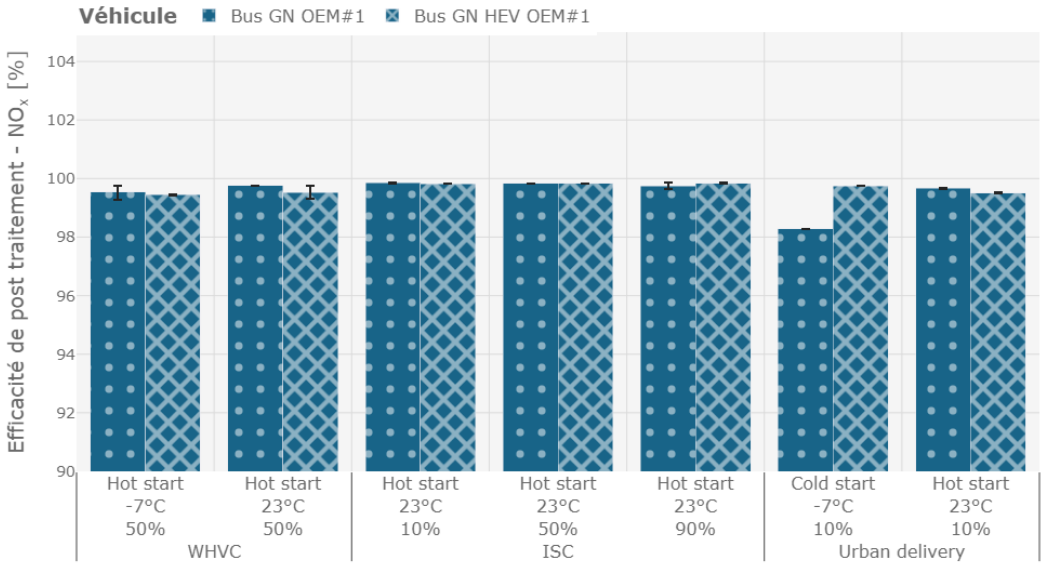


Figure 166 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Efficacité de post-traitement des NO_x

CO et HC : De même que pour les émissions de NO_x, les émissions de CO sont faibles sauf en cas de roulage urbain à froid (Figure 167). Les émissions en sortie moteur sont plus élevées dans ces conditions et comme précédemment l'efficacité de post-traitement est significativement plus faible (Figure 168). Les mêmes résultats sont obtenus pour les émissions de THC (Figure 169 et Figure 170).

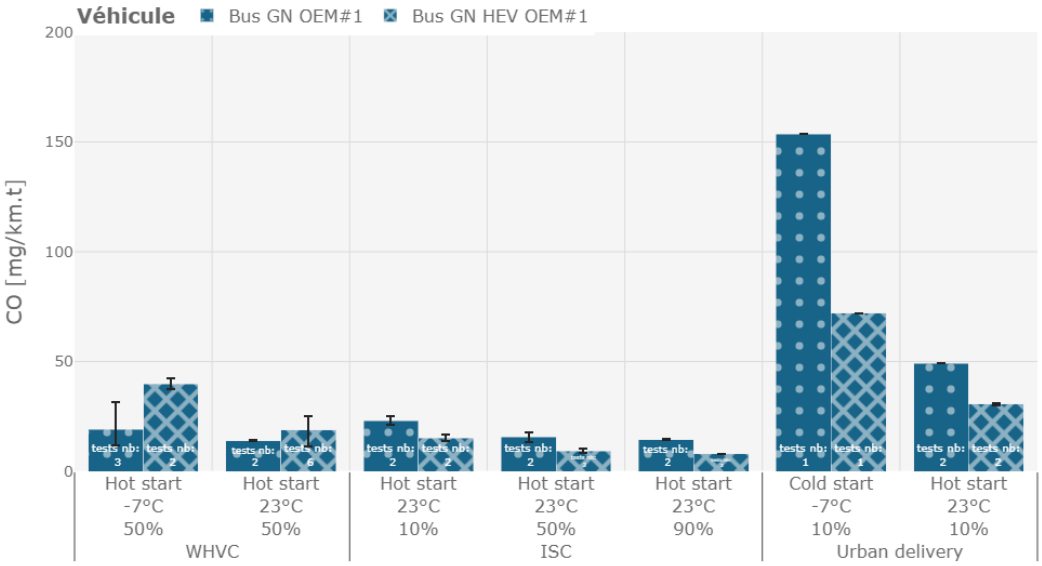


Figure 167 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de CO

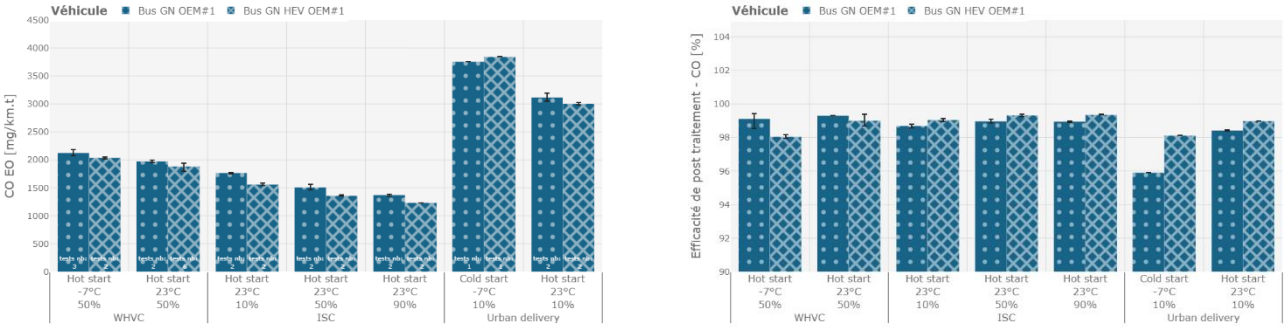


Figure 168 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de CO en sortie moteur (gauche) et efficacité de post-traitement (droite)

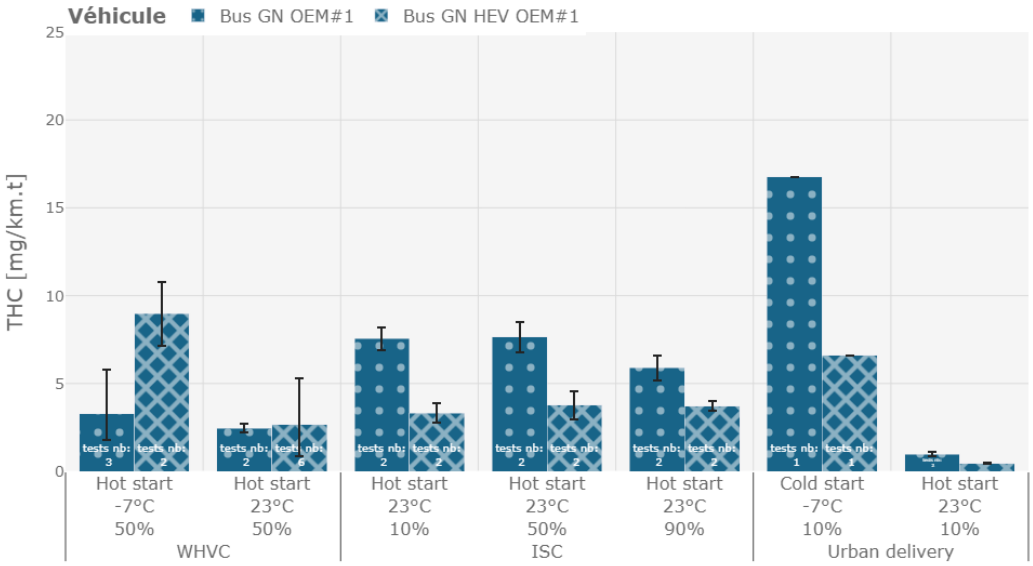


Figure 169 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de THC

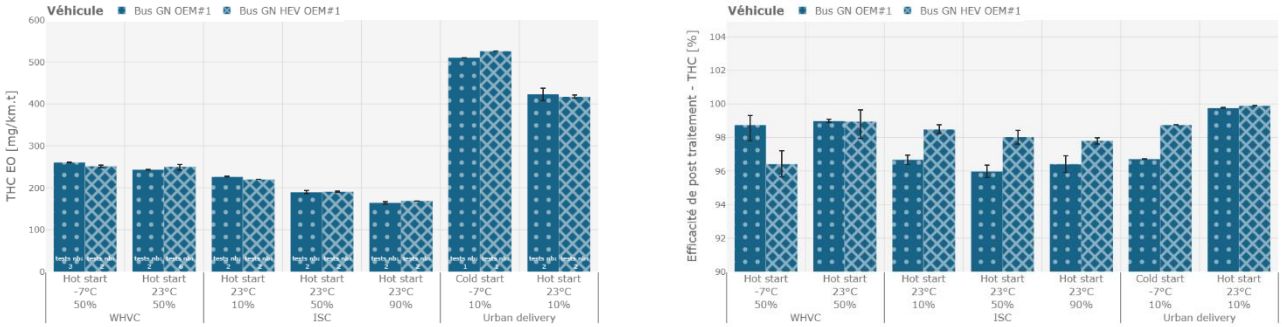


Figure 170 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de THC en sortie moteur (gauche) et efficacité de post-traitement (droite)

NH$_3$: Les émissions de NH$_3$ sont faibles pour les deux véhicules, à l'exception des cycles urbains denses, en particulier en conditions froides (Figure 171).

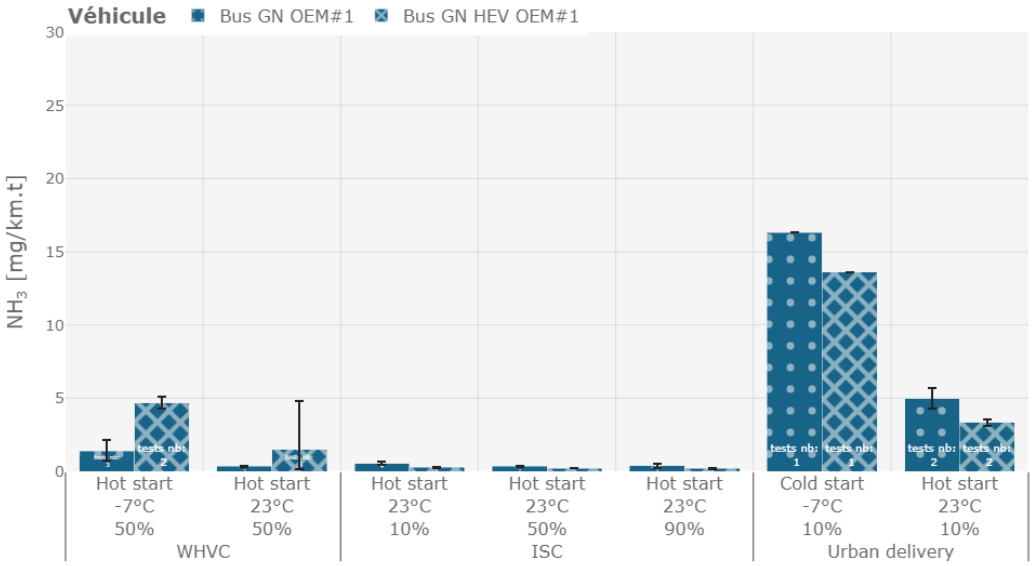


Figure 171 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de NH_3

PN23 et PN10 : Grâce à la présence d'un filtre à particules sur les deux véhicules, les émissions de PN_{23} (Figure 172) et PN_{10} (Figure 173) sont particulièrement faibles. Les émissions de PN_{10} sont en moyenne 5 fois plus élevées pour le cas hybride.

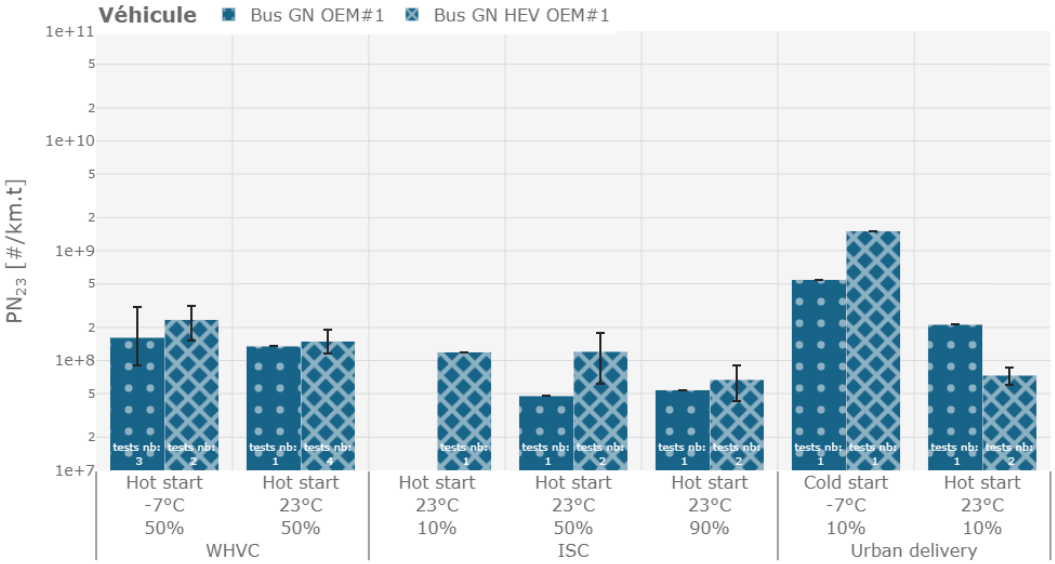


Figure 172 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de PN_{23}

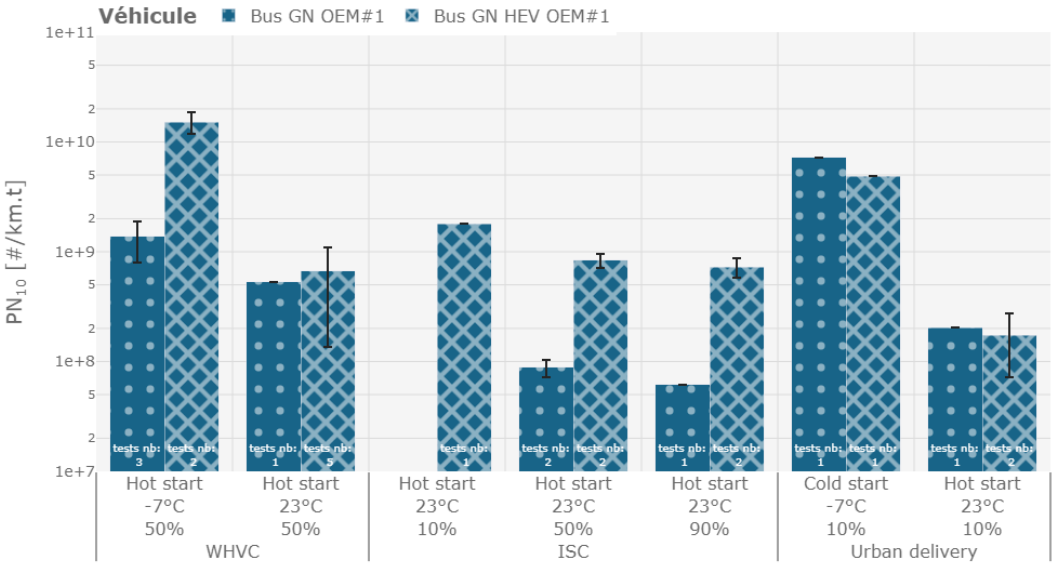


Figure 173 : Comparaison TCP CNG vs CNG Hybride – Emissions spécifiques de PN_{10}

12.10. Diesel PHEV

Seul le véhicule N3 GO PHEV OEM#2 est ici considéré. Les données présentées ci-dessous sont sans traitement normatif (brut) et prennent en compte tout le cycle. Tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte, sauf les essais sur cycle WHVC et les essais avec démarrage à froid. En effet, pour ces conditions, seuls des essais en mode « maintien de la charge » ont été réalisés, ne permettant pas de déterminer l'impact du mode de roulage sur les émissions.

Compromis NO_x vs CO_2 : L'abaissement de la demande énergétique au moteur thermique en mode « épuisement de charge » n'œuvre pas en faveur d'une limitation des émissions de NO_x sur cycle Urban delivery (Figure 174). Le meilleur compromis est trouvé pour une faible charge de 10%.

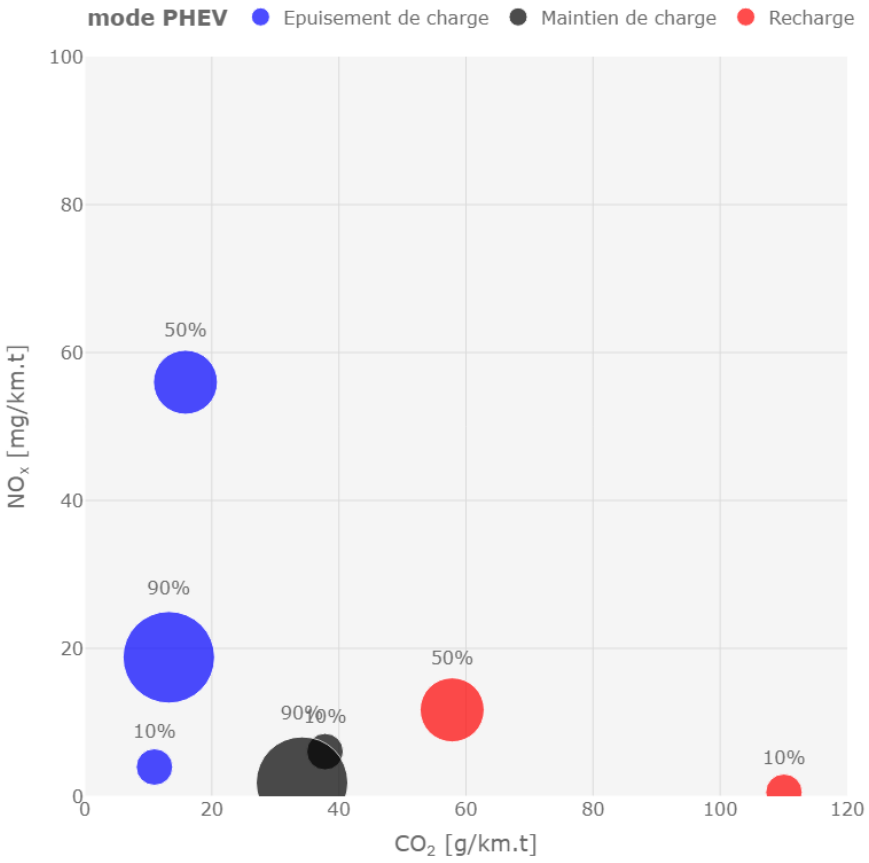


Figure 174 : Diesel PHEV – Compromis CO_2 vs NO_x – Cycle Urban delivery – Tamb = 23°C

Energie : La Figure 175 (gauche) permet de vérifier que l'énergie nécessaire à la roue est identique pour les trois modes de fonctionnement du véhicule PHEV. L'énergie au vilebrequin (Figure 175 – droite) est cependant différente. Les modes « épuisement de charge » et « maintien de charge » sont logiquement similaires, tandis qu'une forte augmentation de l'énergie au vilebrequin est observée pour le mode « recharge » : une partie de l'énergie du moteur thermique disponible au vilebrequin est utilisée pour recharger les batteries.

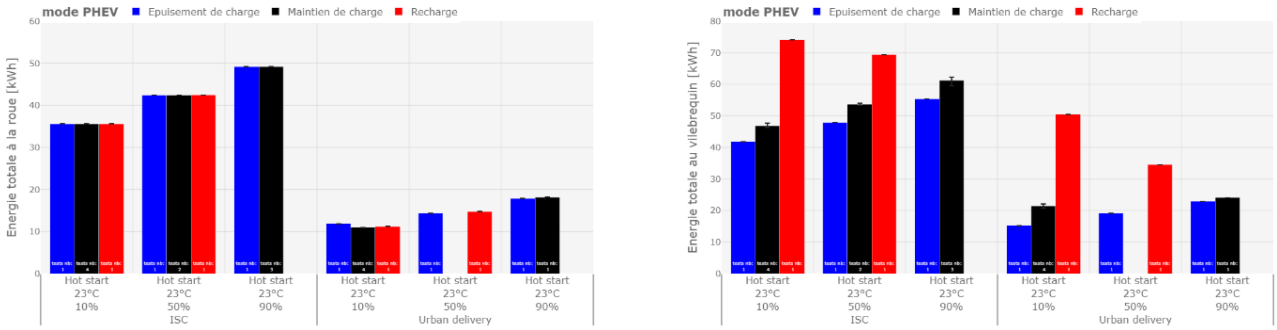


Figure 175 : Diesel PHEV – Energie totale (thermique + électrique) à la roue (gauche) et au vilebrequin (droite)

Le mode « épuisement de charge » sollicite beaucoup moins le moteur thermique, en particulier sur cycle urbain (Figure 176 – gauche) : une partie significative de l'énergie nécessaire à l'avancement du véhicule provient des

batteries (Figure 176 – droite). Au contraire, en mode « recharge », le moteur thermique est très sollicité comme mentionné précédemment et une faible part de l'énergie disponible au vilebrequin provient des batteries.

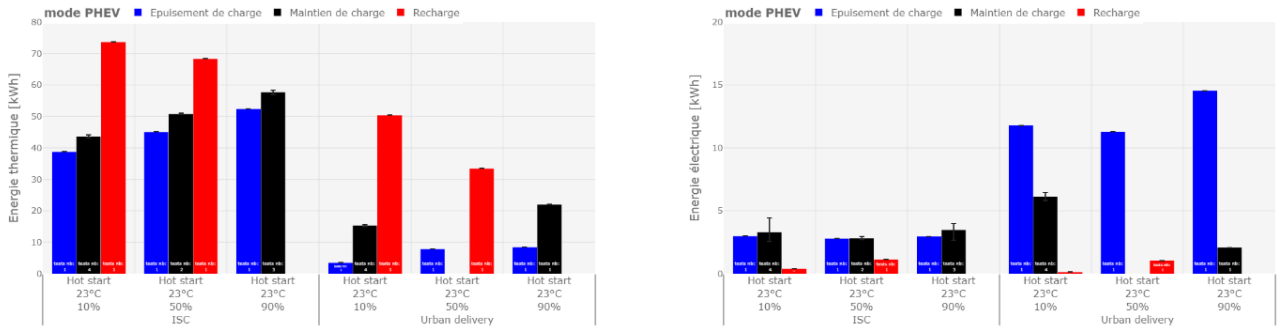


Figure 176 : Diesel PHEV – Energie thermique (gauche) et électrique (droite)

CO_2 : Le mode « épuisement de charge » permet de fortement limiter les émissions de CO_2, en particulier sur cycle urbain (Figure 177 – gauche). Une baisse des émissions (en g/km.t) de l'ordre de 10% est obtenue par rapport au mode maintien de charge sur cycle ISC. Ces émissions peuvent chuter de 60% à 70% sur cycle urbain. Au contraire, le mode « recharge » conduit à une augmentation des émissions comprise entre 30% et 200%.

En cas d'analyse des émissions de CO_2 par unité d'énergie (en g/kWh), les résultats sont différents (Figure 177 – droite) : sur cycle ISC aucune différence n'est observée, sur cycle urbain les émissions de CO_2 sont très significativement inférieures pour le mode « épuisement de charge ». Une baisse de 60% des émissions est mesurée par rapport au mode maintien de charge. Les émissions augmentent en mode « recharge » : la recharge batterie s'effectue en partie sur des points de fonctionnement de mauvais rendement.

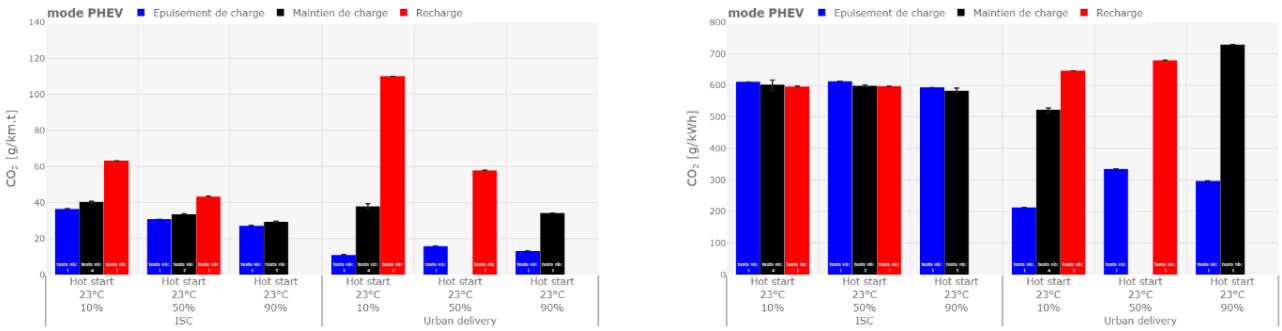


Figure 177 : Diesel PHEV – Emissions spécifiques de CO_2 en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

N_2O : Les émissions de N_2O sont bien maitrisées sauf sur cycle urbain peu chargé en mode « recharge » (Figure 178). Ces émissions restent très inférieures aux limites normatives Euro VII.

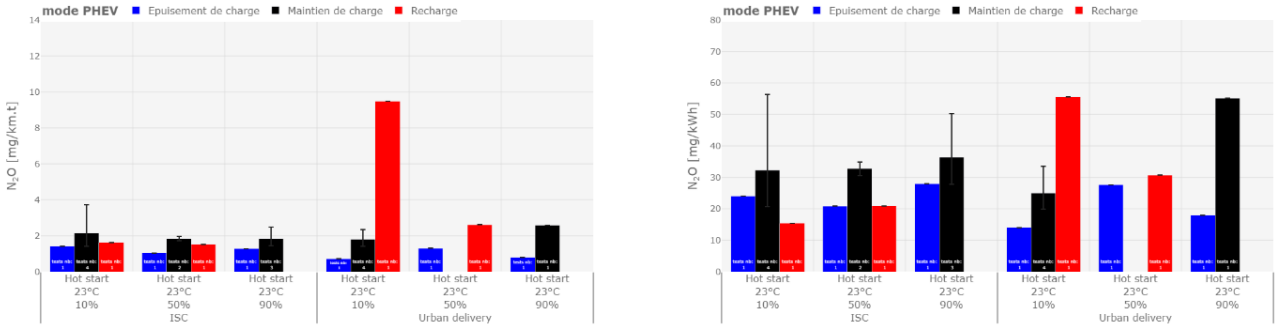


Figure 178 : Diesel PHEV – Emissions spécifiques de N_2O en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

$\underline{NO_x}$: Les émissions de NO_x augmentent fortement en mode « épuisement de charge », elles peuvent être jusqu'à 20 fois supérieures à celles mesurées en mode maintien de charge. Elles restent maitrisées en mode « recharge » (Figure 135). Les niveaux atteints sont alors significativement supérieurs aux différentes limites normatives. Le mode d'épuisement de charge ne permet pas de garantir une bonne efficacité du système SCR (Figure 180), en particulier sur cycle urbain. Le fonctionnement prolongé en mode ZEV (moteur thermique coupé) provoque une forte diminution de la température en entrée du système SCR (Figure 181 – droite), conduisant à des pics d'émissions non maitrisés lorsque le moteur thermique est redémarré (Figure 181 – gauche).

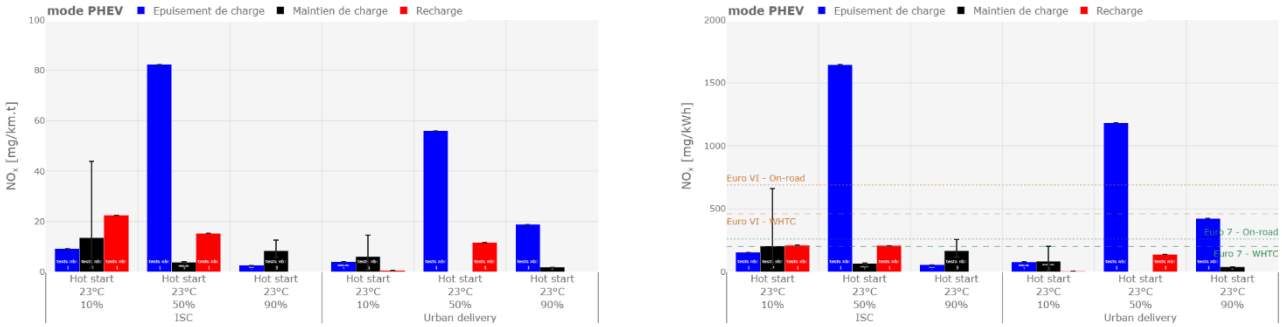


Figure 179 : Diesel PHEV – Emissions spécifiques de NO_x en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

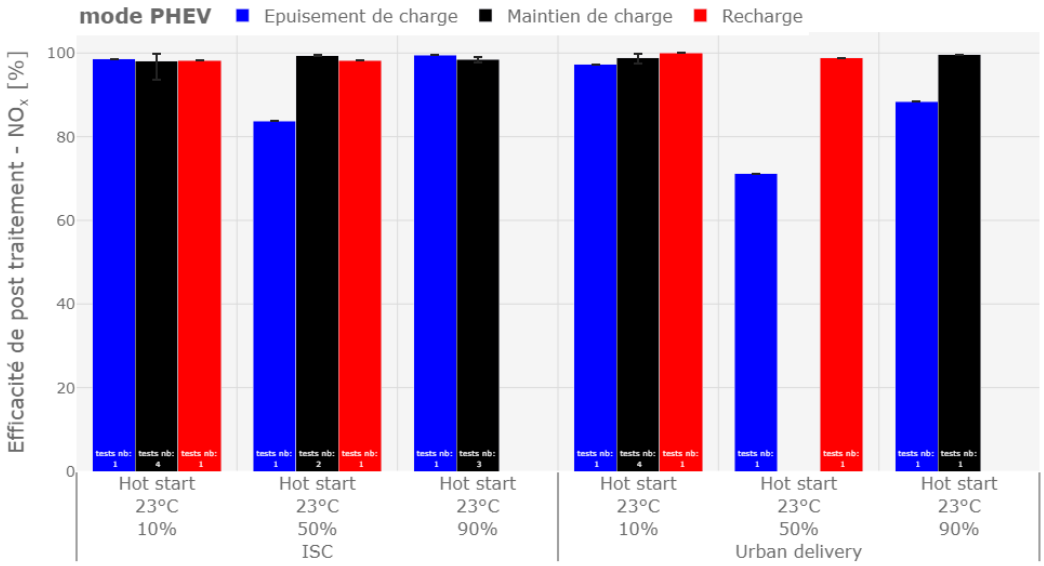


Figure 180 : Diesel PHEV – Efficacité de post-traitement des NO_x

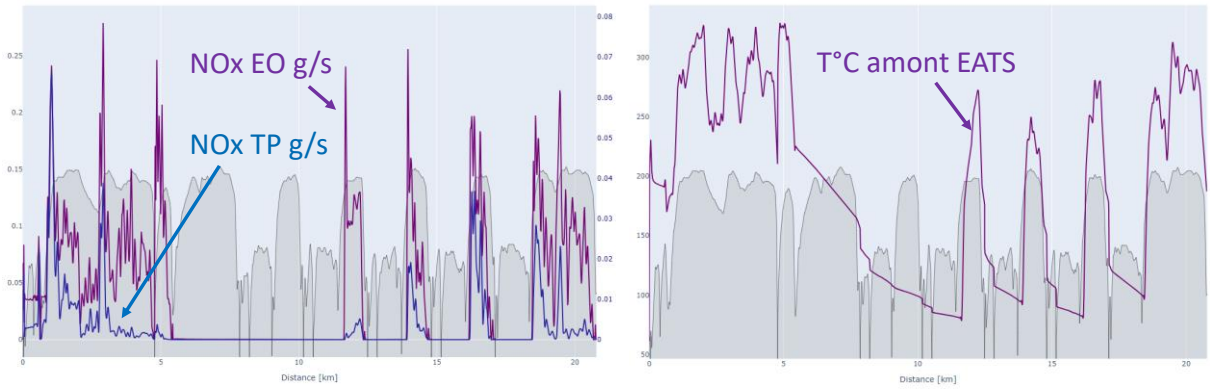


Figure 181 : Diesel PHEV – Evolution temporelle des émissions de NO_x (gauche) et de la température amont système de post-traitement (droite) – Cycle Urban delivery 50% – Epuisement de charge

<u>CH_4, CO, THC et NH_3 :</u> Les émissions de CH_4 sont faibles et largement inférieures aux limites normatives (Figure 182). Il en est de même pour les émissions de CO (Figure 183), de THC (Figure 184) et de NH_3 (Figure 185).

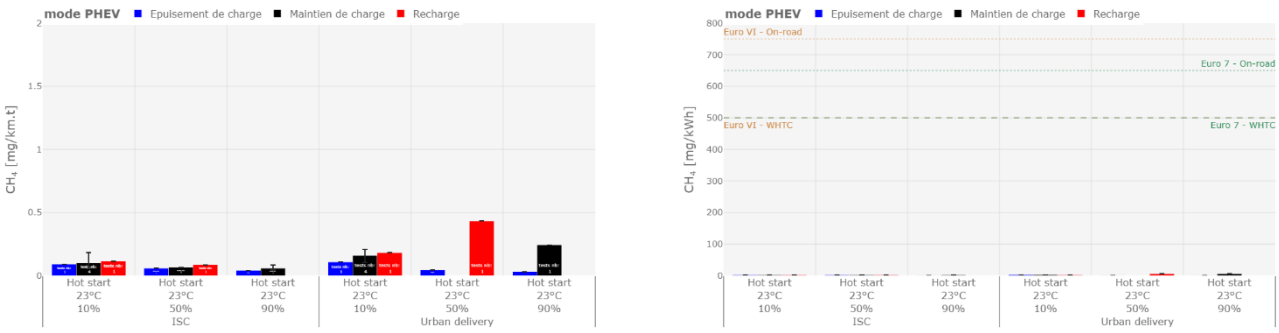


Figure 182 : Diesel PHEV – Emissions spécifiques de CH_4 en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

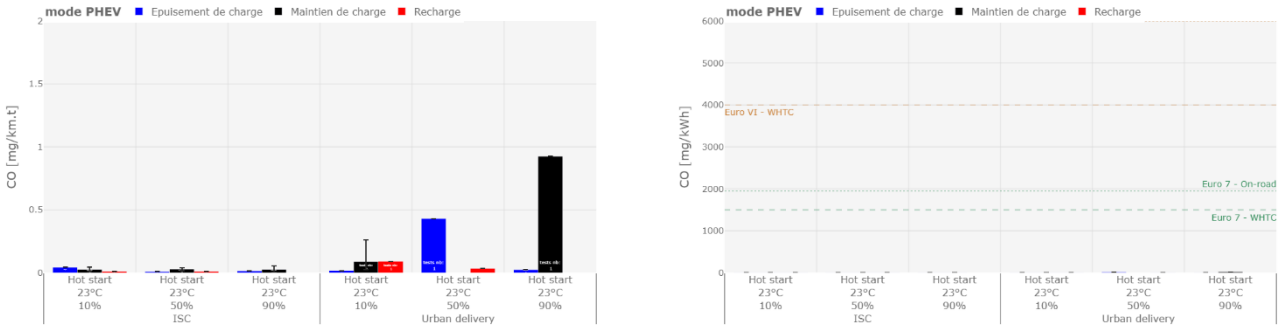


Figure 183 : Diesel PHEV – Emissions spécifiques de CO en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

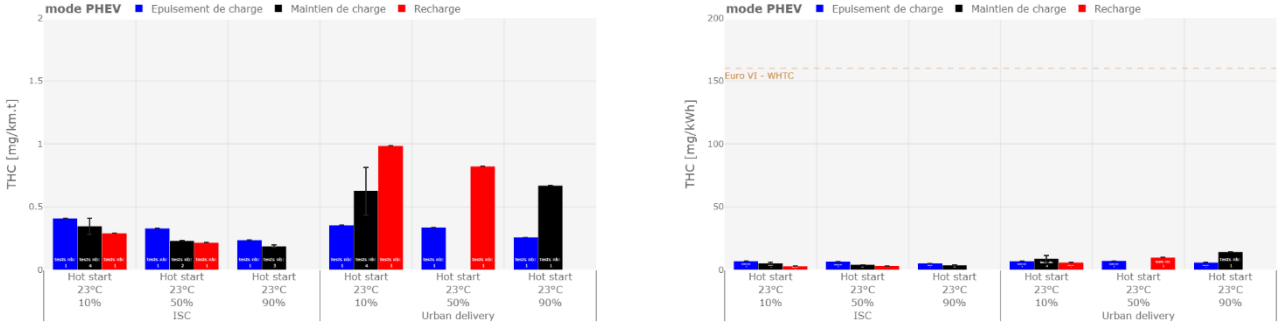


Figure 184 : Diesel PHEV – Emissions spécifiques de THC en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

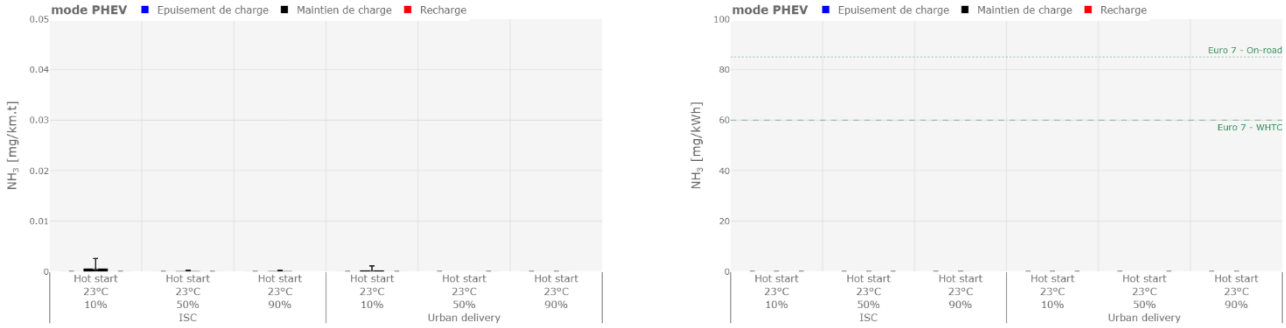


Figure 185 : Diesel PHEV – Emissions spécifiques de NH_3 en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

PN$_{23}$ et PN$_{10}$: Les émissions de particules PN$_{23}$ (Figure 186) et PN$_{10}$ (Figure 187) sont faibles et inférieures aux seuils normatifs, y compris en mode « recharge ».

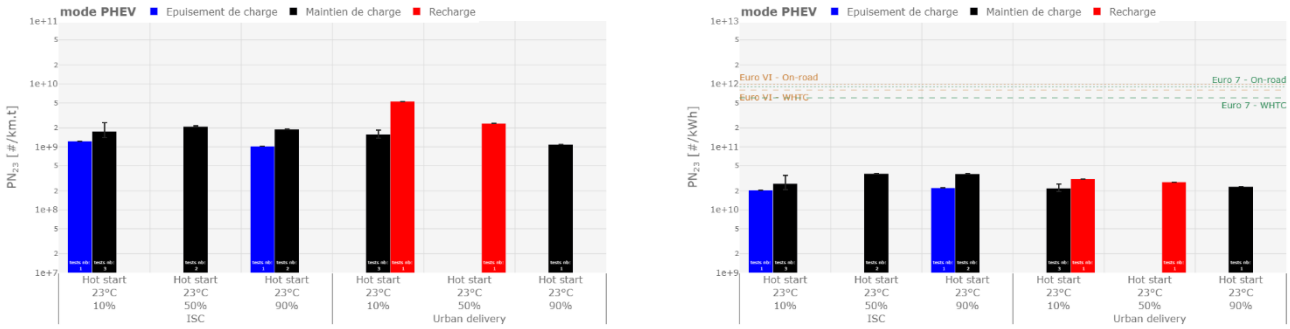


Figure 186 : Diesel PHEV – Emissions spécifiques de PN_{23} en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

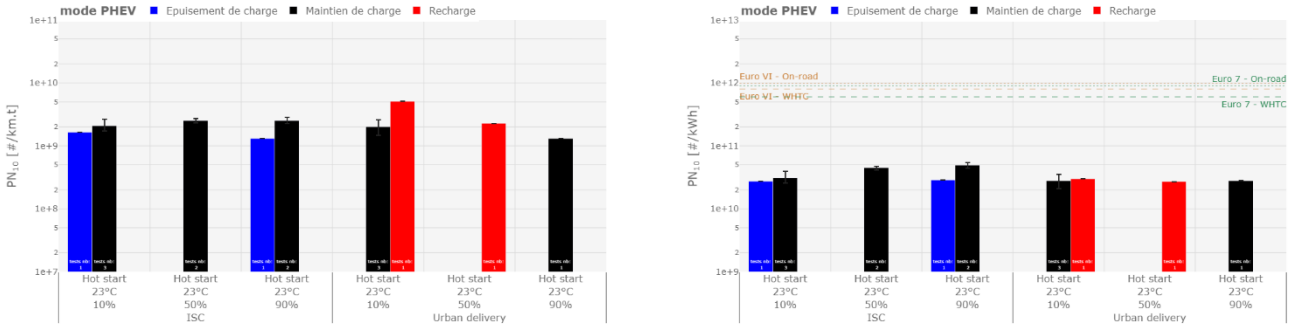


Figure 187 : Diesel PHEV – Emissions spécifiques de PN_{10} en fonction de la distance (gauche) et de l'énergie (droite)

12.11. Effet de la phase

Dans cette section, tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte, quel que soit le véhicule et quel que soit le carburant. Le traitement Step E est appliqué aux données présentées ci-dessous.

CO_2 : Les émissions de CO_2 sont significativement plus élevées en phase froide du cycle (Figure 188). Elles sont également élevées en phase urbaine et le minimum est observé sur phase autoroute.

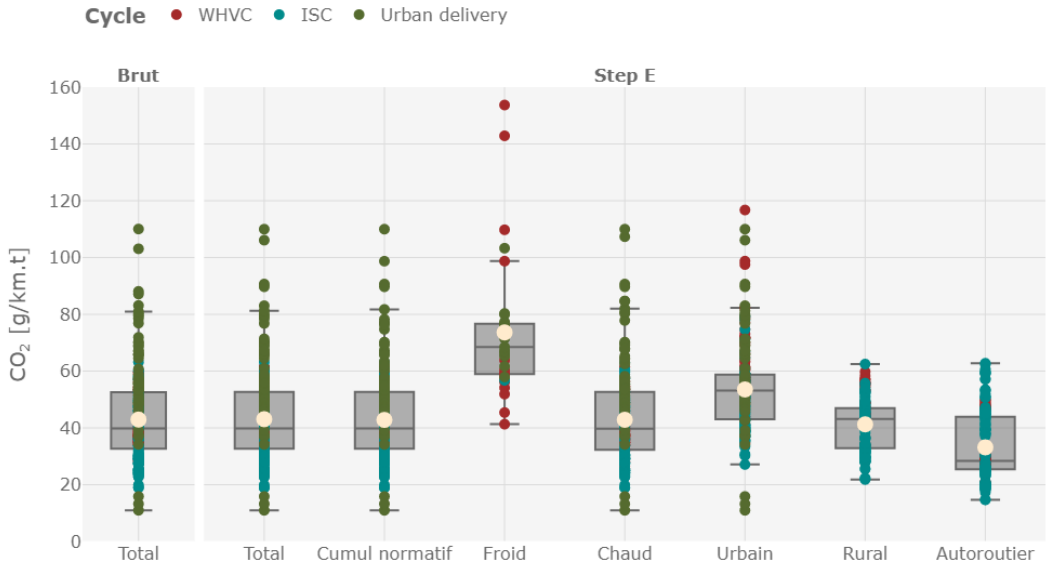


Figure 188 : Effet de la phase – CO_2

CO, THC et CH_4 : Les émissions de CO sont très significatives uniquement durant la phase froide du cycle (Figure 189). Le système de post-traitement est alors peu efficace (voir section suivante). Ces émissions sont également plus élevées pour les cycles urbains lents. Les mêmes résultats sont observés pour les émissions de THC (Figure 190) et de CH_4 (Figure 191).

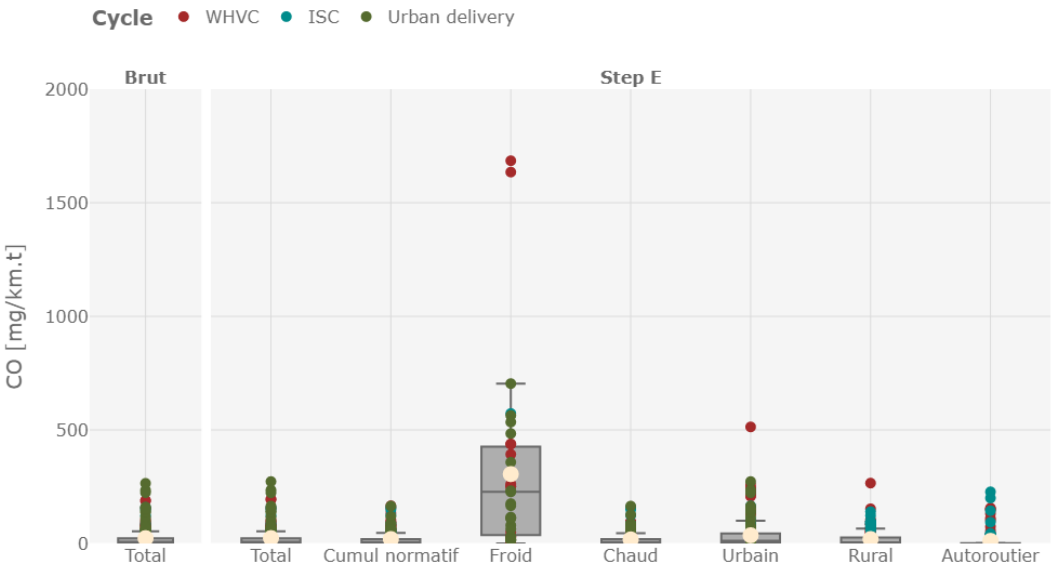


Figure 189 : Effet de la phase – CO

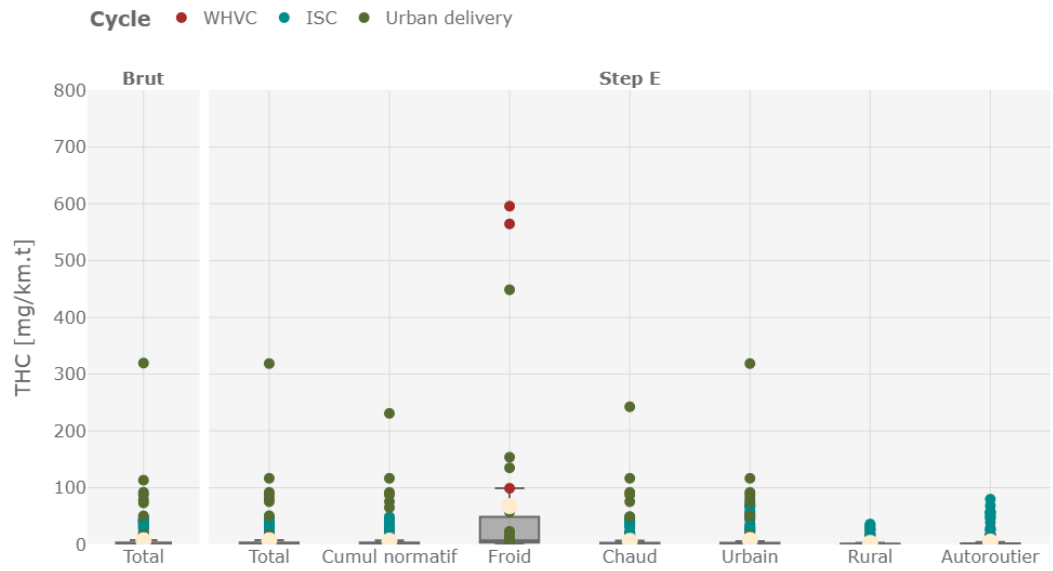


Figure 190 : Effet de la phase – THC

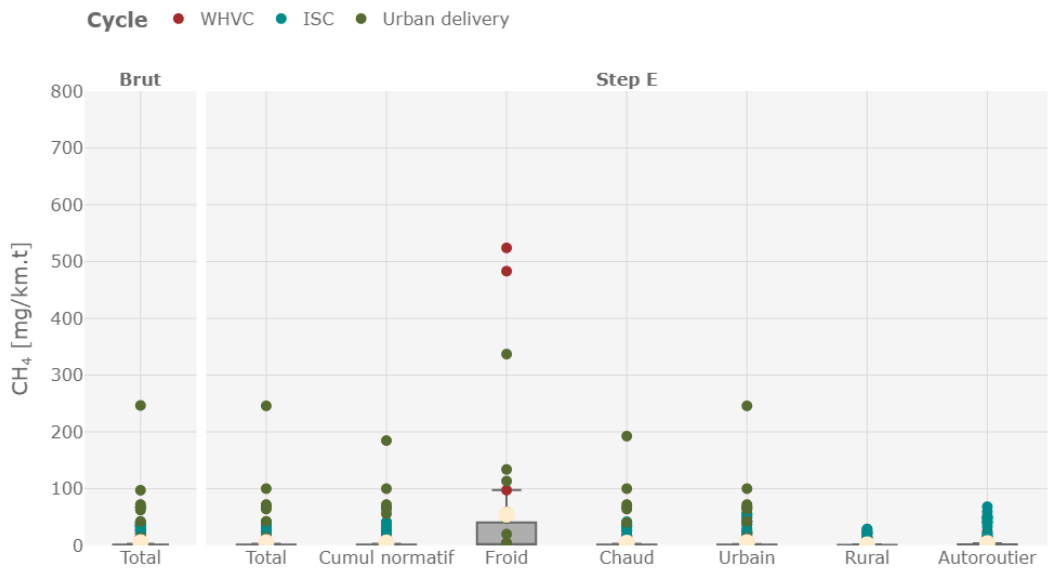


Figure 191 : Effet de la phase – CH_4

NO_x : Les émissions de NO_x sont de nouveau maximales en phase froide du cycle et pour les cycles Urban delivery (Figure 192). Ces émissions sont plus faibles sur phase autoroute et rural et plus élevées sur phase urbaine.

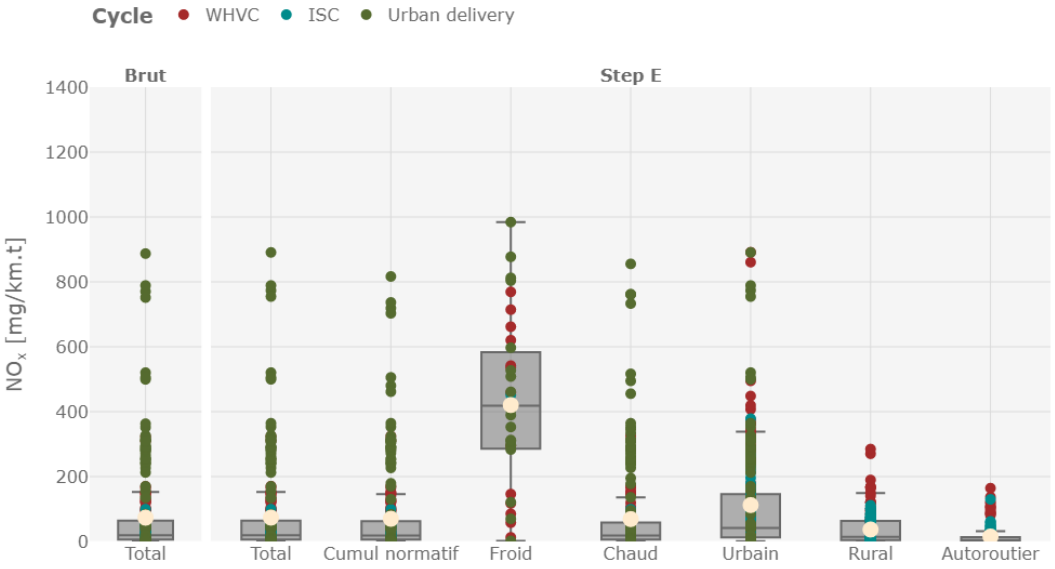


Figure 192 : Effet de la phase – NO_x

$\underline{NH_3}$: Les émissions de NH_3 sont contenues quelle que soit la phase (Figure 193).

Figure 193 : Effet de la phase – NH_3

$\underline{PN_{10} \text{ et } PN_{23}}$: La phase a moins d'impact pour les émissions de particules PN_{23} et PN_{10} que pour les autres polluants (Figure 194 et Figure 195 respectivement). Les émissions sont cependant relativement plus dispersées à froid que pour les autres phases : certains essais montrent des émissions plus importantes durant la phase froide du cycle.

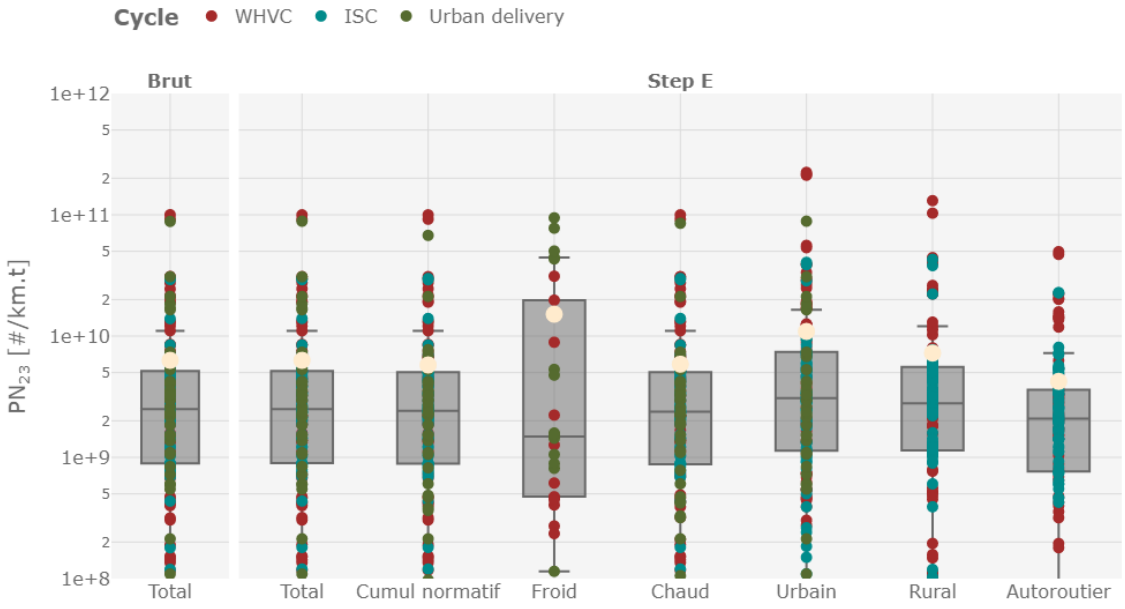


Figure 194 : Effet de la phase – PN_{23}

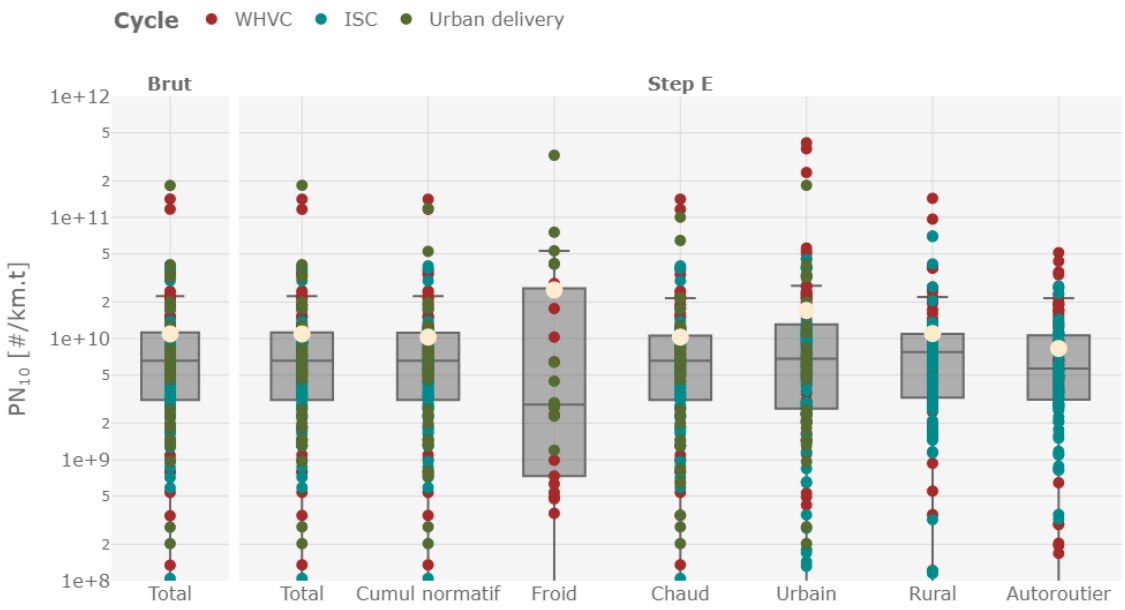


Figure 195 : Effet de la phase – PN_{10}

12.12. Efficacité des systèmes de dépollution

Dans cette section, tous les essais validés réalisés en laboratoire sont pris en compte, quel que soit le véhicule et quel que soit le carburant. Le traitement Step E est appliqué aux données présentées ci-dessous.

CO : L'efficacité de traitement des émissions de CO diminue fortement pour la phase froide du cycle, si elle existe (Figure 196). Au contraire, sur phase autoroute, l'efficacité de post-traitement est maximale. Les cas Diesel montrent une moindre efficacité de post-traitement par comparaison avec leurs homologues GNV (Figure 197). Les plus faibles températures échappement rencontrées dans le cas des moteurs Diesel peuvent expliquer cette baisse de l'efficacité de post-traitement.

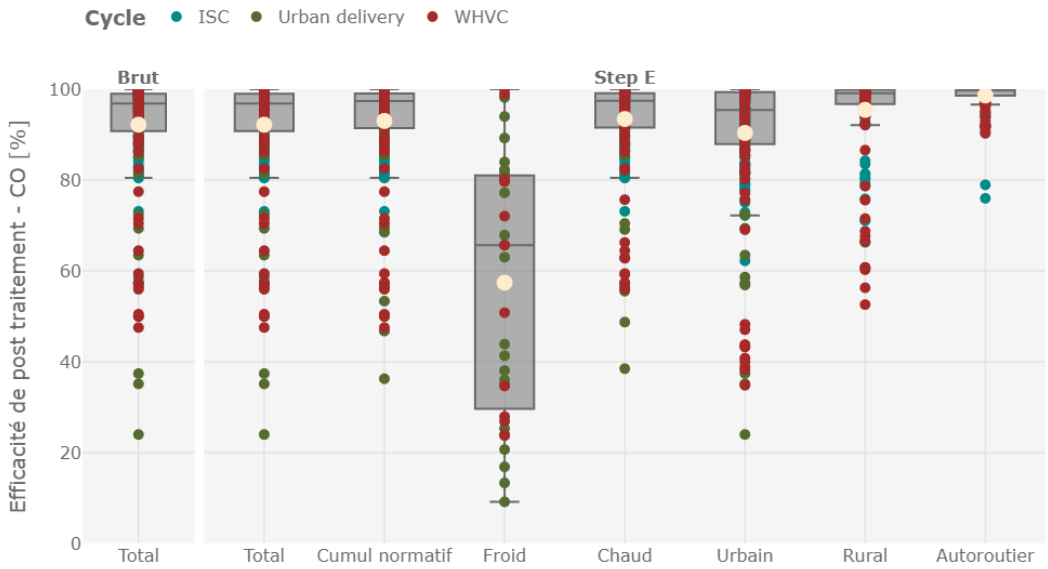


Figure 196 : Efficacité des systèmes de dépollution – CO

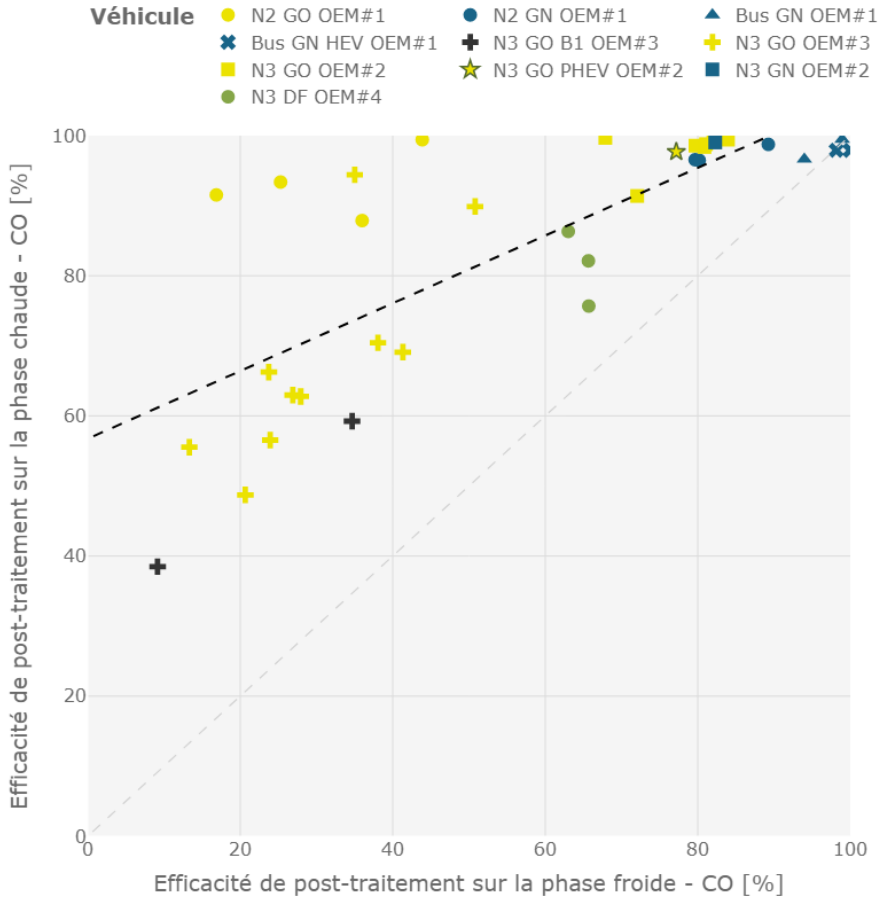


Figure 197 : Efficacité des systèmes de dépollution – Froid vs Chaud – CO

THC : De la même façon que pour les émissions de CO, une diminution significative de l'efficacité de post-traitement des THC est observée pour la phase froide du cycle (Figure 198). A chaud, l'efficacité de post-traitement des THC est significativement plus élevée pour les véhicules GNV (Figure 199). La température échappement plus élevée observée sur ces véhicules peut en être la cause. Certains essais sur véhicule Dual Fuel montrent une efficacité de post-traitement relativement faible y compris pour la phase chaude du cycle.

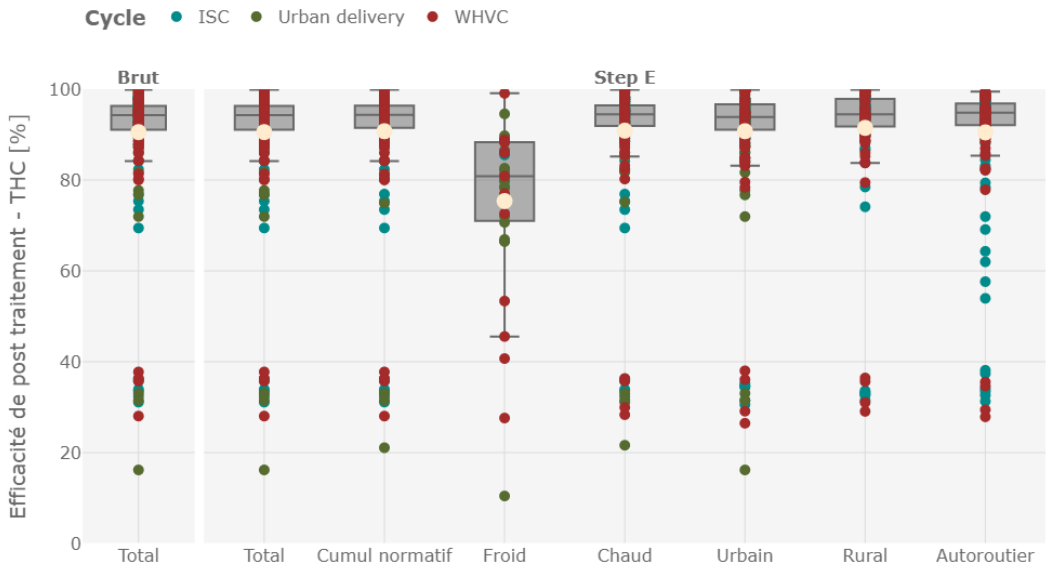


Figure 198 : Efficacité des systèmes de dépollution – THC

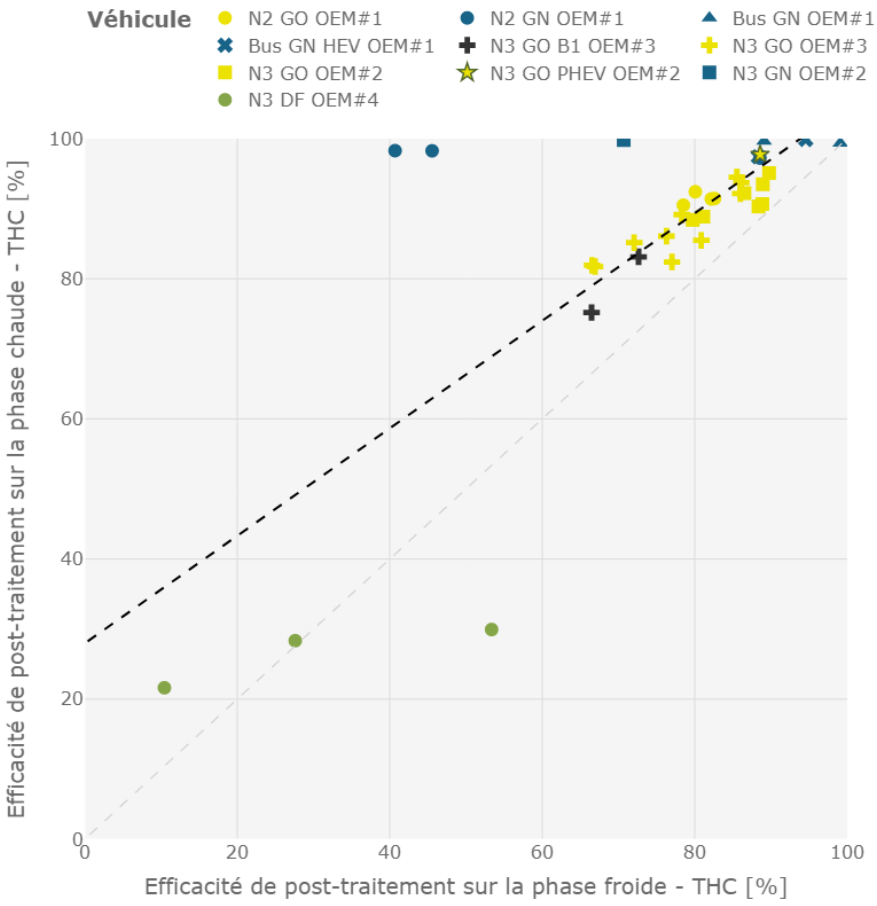


Figure 199 : Efficacité des systèmes de dépollution – Froid vs Chaud – THC

CH_4 : Le CH_4 est un polluant qui peut être particulièrement difficile à catalyser. Comme pour les autres polluants (excepté les particules), une diminution de l'efficacité de post-traitement est observée pour la phase froide du cycle (Figure 200). Il est également à noter que pour certains essais, l'efficacité de post-traitement est négative, *i.e.* les émissions de CH_4 sont supérieures en sortie de système de post-traitement. Ces cas sont exclusivement rencontrés dans le cas de véhicules Diesel (Figure 201). Il est possible que les NMHC soit partiellement catalysés en CH_4, conduisant à une augmentation de ces émissions en sortie du système de post-traitement.

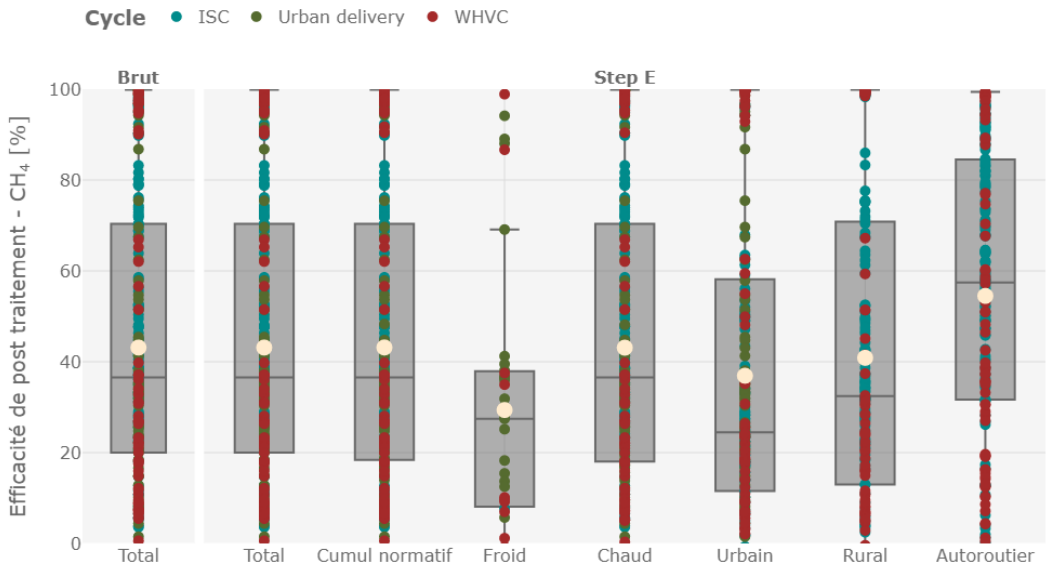


Figure 200 : Efficacité des systèmes de dépollution – CH_4

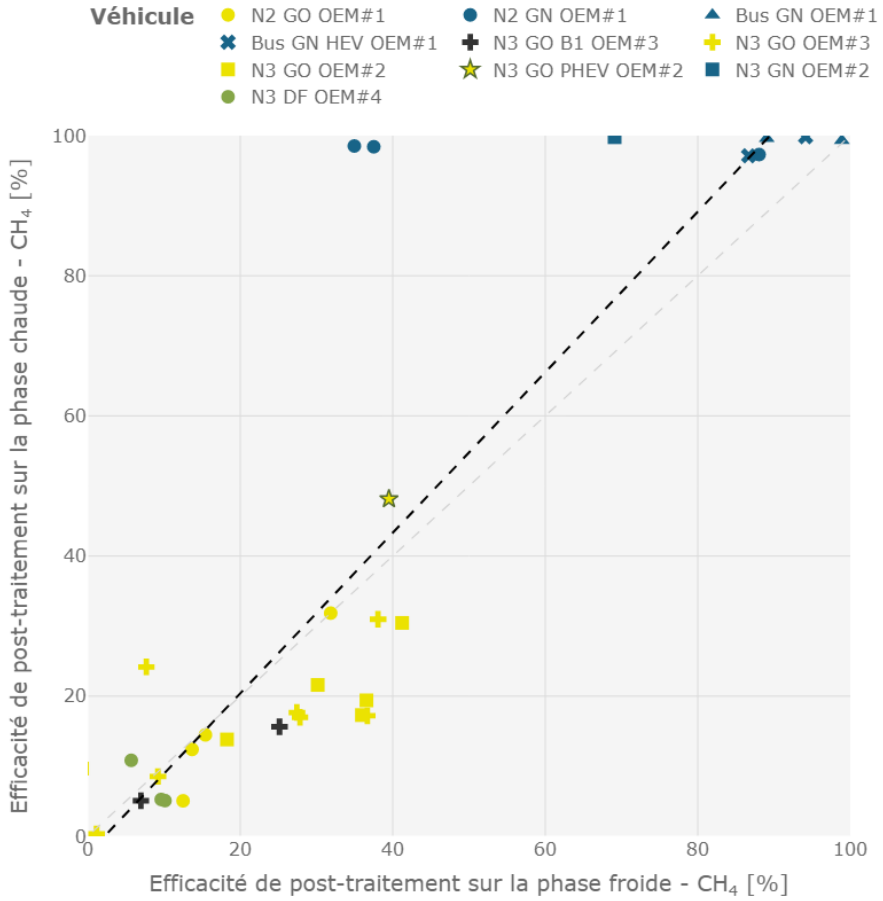


Figure 201 : Efficacité des systèmes de dépollution – Froid vs Chaud – CH_4

$\underline{NO_x}$: L'efficacité de traitement des NO_x est maximale sur phase autoroute. Au contraire, le taux de conversion des NO_x chute en phase froide du cycle (Figure 202). Les plus faibles efficacités de post-traitement sont observées pour les cas Diesel (Figure 203). L'absence d'injection d'urée sous certaines conditions de température échappement peuvent expliquer cette baisse de l'efficacité par rapport aux véhicules GNV. De plus, les moteurs GNV (hors cas Dual Fuel) fonctionnent à la stœchiométrie (richesse = 1) et disposent d'un catalyseur 3 voies particulièrement efficace lorsque le système de post-traitement est activé.

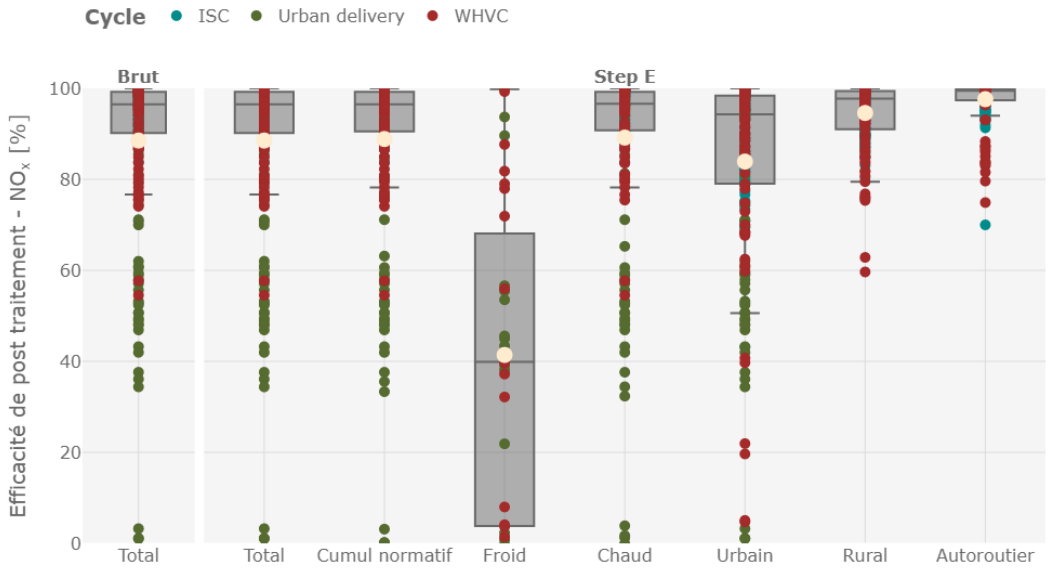


Figure 202 : Efficacité des systèmes de dépollution – NO_x

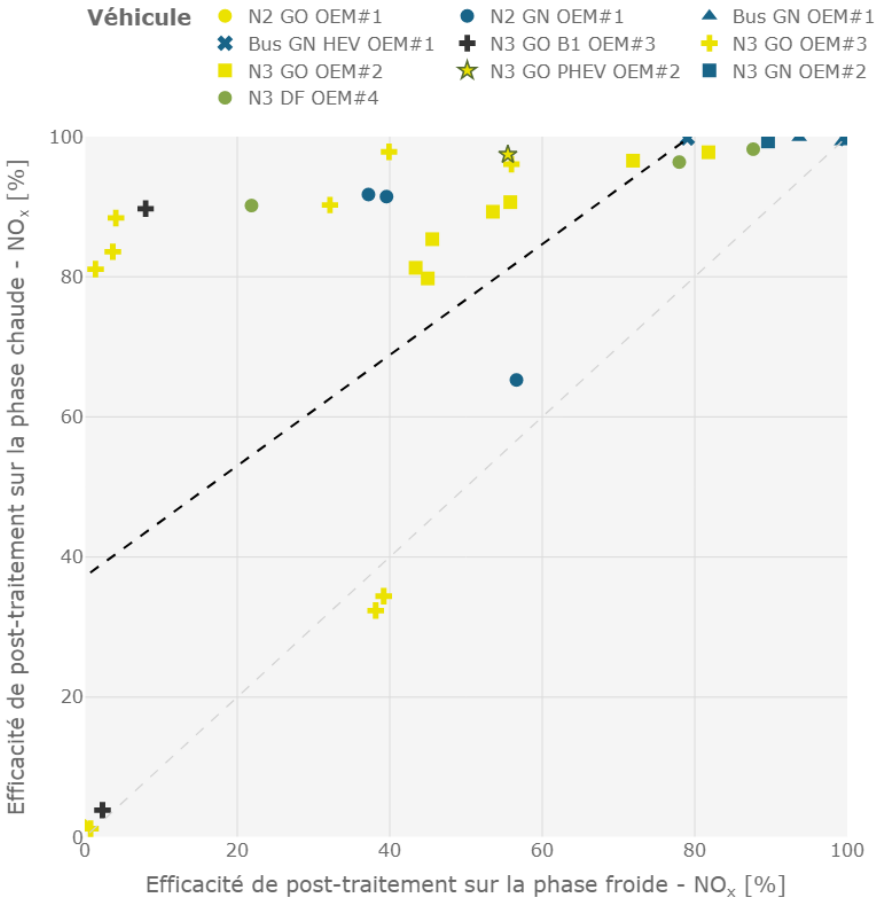


Figure 203 : Efficacité des systèmes de dépollution – Froid vs Chaud – NO_x

$\underline{PN_{23}}$: La qualité de filtration des particules PN_{23} est bonne quelle que soit la phase (Figure 204), en particulier pour les véhicules Diesel (Figure 205). L'ajout d'un filtre à particules sur véhicules GNV permet d'améliorer très significativement la qualité de post-traitement des particules : une filtration de 80% des particules (en nombre) est possible.

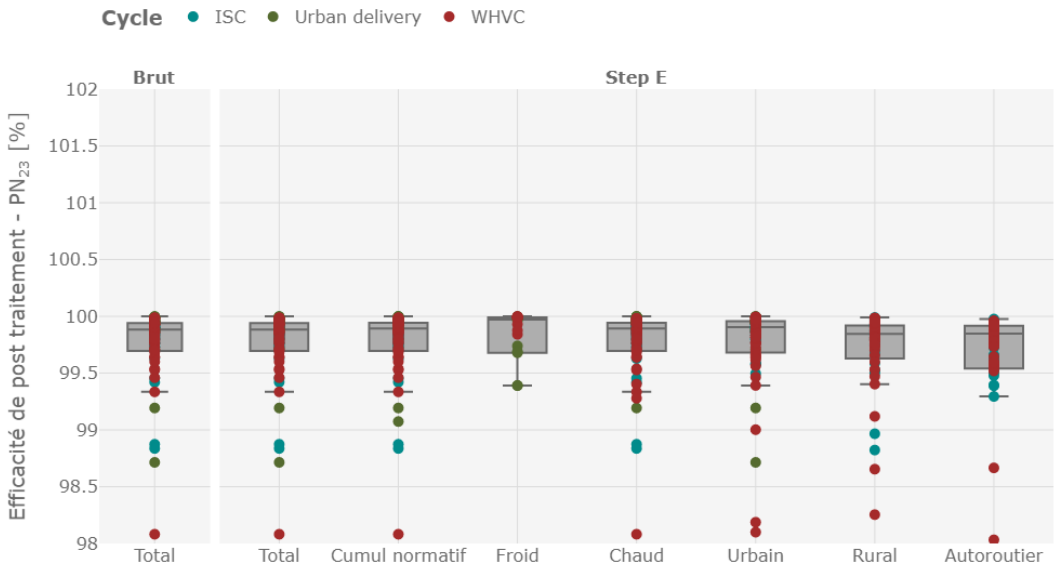


Figure 204 : Efficacité des systèmes de dépollution – PN_{23}

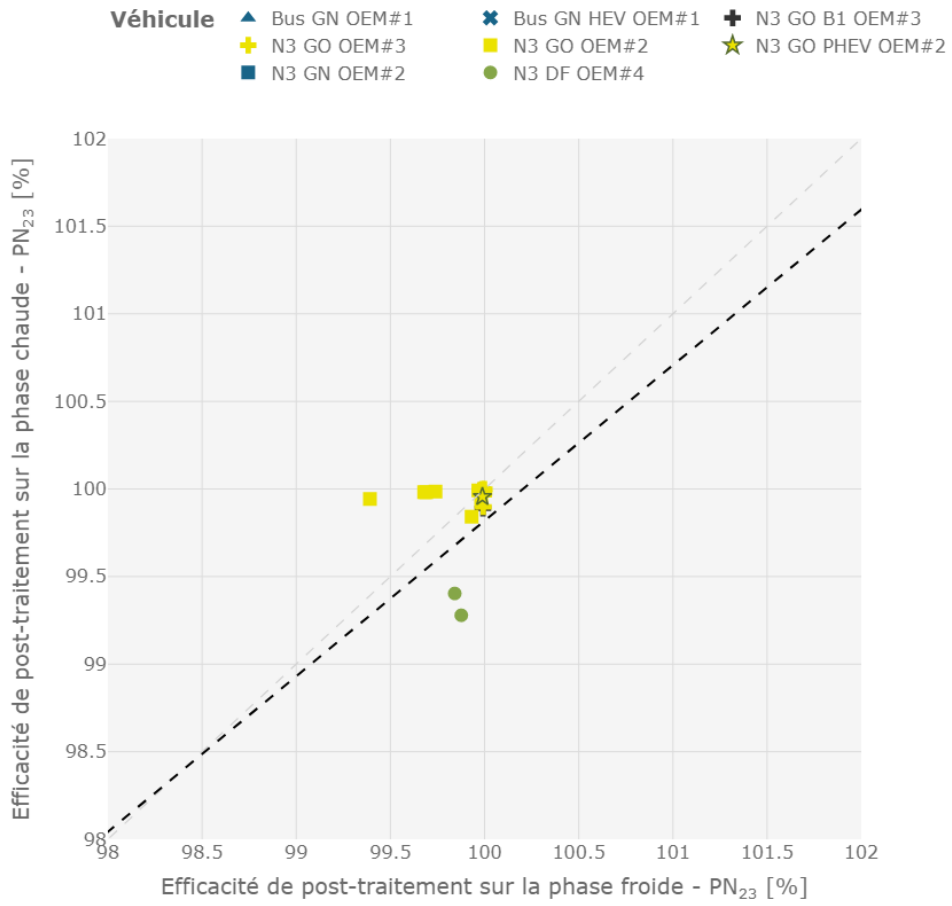


Figure 205 : Efficacité des systèmes de dépollution – Froid vs Chaud – PN_{23}

12.13. Analyse détaillée des émissions en usage réel

12.13.1. Introduction des données en usage réel

Les données en usage réel sont collectées par le système CEMS (*Continuous Emissions Measurement System*) sur l'ensemble des 10 véhicules. Cette technologie est couramment utilisée dans de nombreuses campagnes de mesure sur divers types de machines et véhicules. Les données mesurées par le système CEMS, qui sont également connectées aux données CAN J1939, sont récupérées directement par télématique à une fréquence de 1 Hz.

L'objectif de cette campagne est afin de compléter les résultats des essais réglementaires qui sont généralement réalisés dans des conditions contrôlées, et qui ne reflètent pas toujours la complexité des environnements de conduite urbains ou ruraux. Par exemple, les cycles de conduite utilisés pour les tests peuvent ne pas intégrer les arrêts fréquents, les embouteillages ou les variations de vitesse qui sont caractéristiques des trajets réels.

Les signaux collectés en continu comprennent :

- GPS :
  - Date
  - Latitude (°) et longitude (°)
  - Vitesse (km/h) et altitude (m)
- CAN J1939 :
  - Consommation carburant (L/h ou kg/h)
  - Vitesse (km/h)
  - Consigne de couple : indiqué, effectif et frottement (%)
  - Température moteur (°C)
  - Rapport engagé
  - Régime du moteur (rpm)
- CEMS :
  - Quantité de concentration combinée de NO et de NO_2 (ppm)
  - Concentration réelle d'oxygène O_2 (%)
  - Flags de diagnostic de sonde : voltage, température, NO_x, O_2, etc.
  - Température échappement (°C), disponible à partir de 100°C

Pour ce qui concerne la sonde de NO_x, elle est placée dans l'échappement et permet de mesurer les teneurs en oxygène et les NO_x. Elle fournit une information valide, même à la stœchiométrie. La sonde ne fait pas la distinction entre les NO_x et le NH_3, la valeur fournie corresponde à la somme des deux.

12.13.2. Enrichissement des signaux

A partir des données récupérées par mesure, des autres signaux peuvent être calculées :

- Couple moteur (Nm) : indiqué, effectif et de frottements, à partir des consignes de couple et du couple de référence
- Puissance demandée au moteur (kW)
- Débit des gaz d'échappement (g/s)
- Débit des émissions de NO_x (g/s)

Les signaux sont encore complétés grâce au map-matching afin de bien comprendre l'usage. Le map-matching est une méthode utilisée pour aligner les données de localisation GPS d'un véhicule avec le réseau routier

correspondant, en associant chaque point GPS à une position sur une route précise. Cette technique permet de corriger les imprécisions des systèmes GPS et fournir des informations fiables sur la trajectoire, telles que la vitesse, la pente, ou le type de route (urbaine, rurale, autoroute).

Certains trajets ne sont pas map-matchés en raison de la nature du trajet (par exemple, les très courts trajets dans des parkings ou des zones privées).

Ces données sont ensuite analysées par un algorithme afin de déterminer le début et la fin d'un trajet, ainsi que de vérifier la présence et la validité des signaux. Elles sont ensuite stockées dans une base de données MongoDB afin d'assurer une analyse homogène sur l'ensemble des trajets et véhicules.

12.13.3. Analyse de l'usage réel

Le Tableau 33 décrit les différentes caractéristiques macroscopiques associées à l'usage et à la vitesse pour chaque poids lourd ainsi que pour l'ensemble. Le tableau présente un pourcentage de temps considérable passé à l'arrêt ; cela n'est cependant pas uniquement dû à une forte congestion du trafic, mais aussi à des démarrages du moteur sans départ (dits en « manœuvre »), comme l'illustre la Figure 206. Dans ce type de trajets, la vitesse limite map-matchée est également absente.

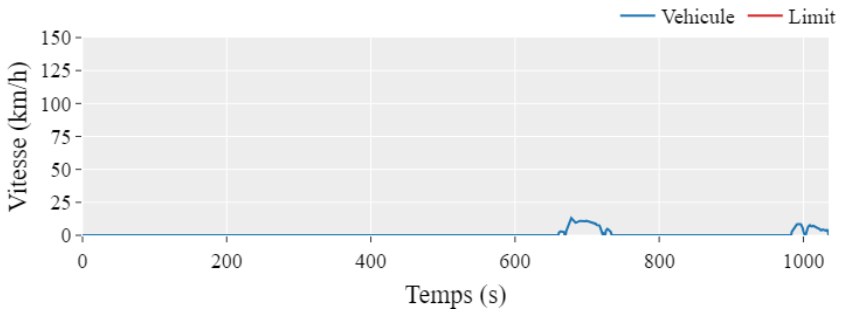


Figure 206: Exemple d'un trajet en "manœuvre" qui représente 10% des mesures. Un déplacement court dans une zone privée.

Note : Les véhicules Bus GN OEM#1 et Bus GN HEV OEM#1 n'ont pas été testés dans un contexte d'usage réel, car il s'agit de véhicules prototypes.

Tableau 33: Descripteurs macroscopiques de l'usage réel pour chaque véhicule.

Véhicule	Nombre de trajets	Durée totale (h)	Distance totale (km)	Distance moyenne (km)	Temps l'arrêt (%)	Nombre de trajets en manœuvre	Zone urbaine (%)
N2 GO OEM#1	26	21	844	31	9,5	1	46,6
N3 GO OEM#3	145	96	3 425	23	31,9	2	51,6
N3 GO B1 OEM#3	114	106	5 360	47	22,4	13	28,5
N3 GO OEM#2	154	194	10 024	65	21,3	26	27,4
N3 GO PHEV OEM#2	204	169	5 882	29	34,2	19	45,8
N2 GN OEM#1	26	20	1 108	41	12,7	1	33,5
N3 GN OEM#2	256	160	3 628	14	52,2	61	52,6
Bus GN OEM#1	3	27	483	121	35,4	0	88,9
Bus GN HEV OEM#1	9	34	564	56	37,0	0	86,4
N3 DF OEM#4	219	63	755	3	9,1	12	16,7

Total	**1165**	**890**	**32 072**	**27**	**30,3**	**135**	**42,2**

La comparaison des répartitions par distance et par temps affiché dans la Figure 207 montre des différences significatives dans l'usage des trajets en fonction de l'environnement. Les trajets en zone rurale et autoroute, bien qu'ils représentent la majeure partie de la distance parcourue (84,4 %), n'occupent que 56,1% du temps total. À l'inverse, les trajets en zones urbaines constituent une part bien plus importante du temps total (43,9 %), alors qu'ils ne représentent que 15,53% de la distance parcourue. Cette différence suggère que les trajets urbains, bien qu'ils couvrent moins de distance, demandent davantage de temps en raison des vitesses moyennes réduites et des arrêts fréquents : 8% du temps pour les zones urbaines contre moins d'1% pour les autoroutes.

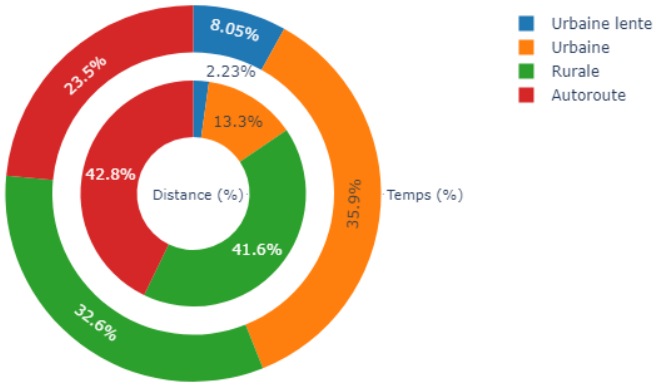


Figure 207: Distribution de la distance parcourue (anneau interne) et du temps passé (anneau externe) par type de route.

Pour ce qui concerne la variation de vitesse en chaque type de route, la Figure 208 montre une bonne variation de vitesses moyennes pour tous les véhicules confondus, ce qui permettra de mieux comprendre l'impact de cette variable vis-à-vis les émissions.

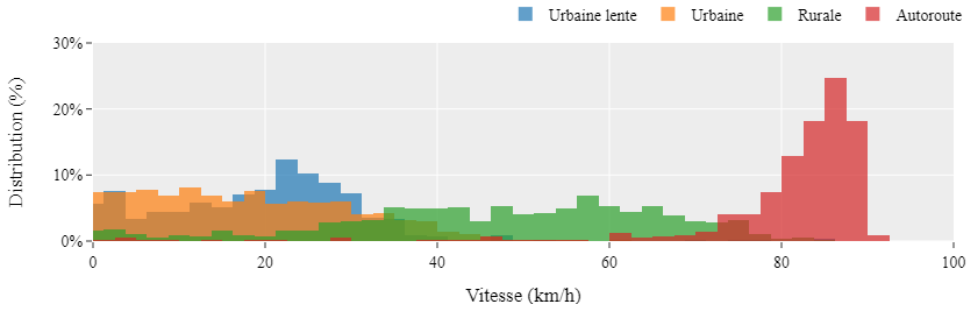


Figure 208: Vitesse moyenne par type de route pour chaque trajet mesuré.

Pour ce qui concerne la pente moyenne, affichée sur la Figure 209, elle est toujours centrée à 0% sur tous les types de routes avec une pente moyenne maximale de 6,5%. Pour la zone urbaine lente, les montées et descentes sont plus présentées.

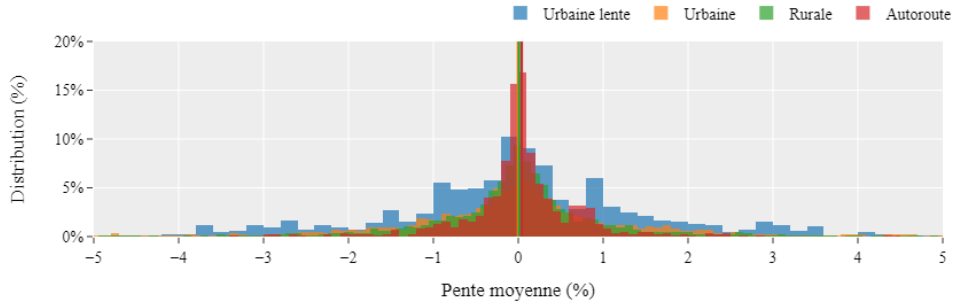


Figure 209: Pente moyenne par type de route pour chaque trajet mesuré.

L'ensemble des trajets se réalise entre 55 et 700 m d'altitude, la distribution est montrée sur la Figure 210, avec une moyenne de 248 m. Pour l'ensemble des véhicules, il y a au moins 99 % de compensation entre la distance parcourue en montée et en descente.

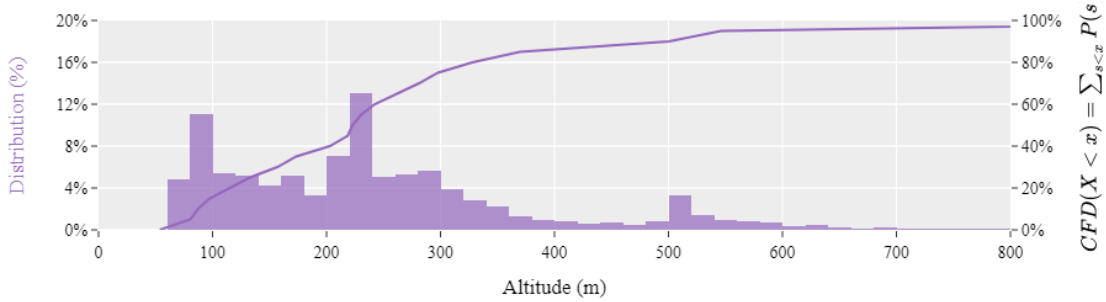


Figure 210: Distribution de l'altitude de l'ensemble de trajets mesurés.

Un autre axe de l'analyse présenté dans le Tableau 34 concerne le comportement des émissions selon les segments de véhicules, à savoir les catégories N2, N3 et les M3. Pour ces derniers, bien que les véhicules M3 ne soient pas utilisés en usage quotidien dans cette campagne, les trajets effectués sont conçus pour représenter l'usage typique attendu pour ce type de véhicule. Cette analyse permet d'étudier les spécificités des usages pour des catégories différents.

Tableau 34: Descripteurs macroscopiques de l'usage réel par segment du véhicule.

	N2	N3	M3
Distance moyenne (km)	36.14	26.5	74.77
Distance totale (km)	1951	29014	1046
Temps moyen (min)	45	44	270
Vitesse moyenne (km/h)	20.74	36.61	36.39
Temps à l'arrêt (%)	35.58	30.28	16.94
Temps urbaine lente (%)	10.2	5.4	39.1
Temps urbaine (%)	30.7	35.1	48.7
Temps rurale (%)	35.5	34.0	12.2
Temps autoroute (%)	23.6	25.4	0.0

Les véhicules de la catégorie **N2** se distinguent par une distance moyenne modérée (36 km) et une vitesse moyenne relativement basse (20 km/h), associée à une proportion importante de temps passé à l'arrêt (36 %). Ces résultats vont de la main à une utilisation typiquement urbaine ou semi-urbaine où ils sont les plus présents.

Les véhicules de la catégorie **N3**, en revanche, montrent un usage plus équilibré, avec une distance moyenne légèrement plus courte (26 km) mais une vitesse moyenne significativement plus élevée (37 km/h). Leur temps à l'arrêt est réduit, et la répartition des types de trajets est homogène entre les environnements urbain, rural, et autoroutier. Cela reflète un usage polyvalent.

Enfin, les véhicules de la catégorie **M3** se caractérisent par des trajets nettement plus longs en moyenne (75 km) et des temps de mission très élevés (plus de 4h en continue). Ils affichent une vitesse moyenne similaire à celle des N3 mais un temps à l'arrêt beaucoup plus faible, traduisant un usage essentiellement continu. L'analyse par type de trajet montre une forte prépondérance des environnements urbains, avec 88 % du temps passé en zones urbaines confondues, confirmant leur usage typique pour le transport en commun.

A retenir :

1165 trajets réalisés dans la campagne qui comprend presque que 900 heures et plus de 32 000 km parcourus.

Bonne répartition du temps passé par chaque type de zone : urbaine, rurale et autoroute pour comprendre l'impact des émissions sur chaque type de trajet. Suffisamment de données pour comprendre aussi l'impact de la pente et les trajets courts.
11,5% des usages sont trajets en « manœuvre » qui représentent des trajets très courts dans une zone privée.

Chaque segment de véhicule (N2, N3, M3) présente des usages réels distincts avec des usages majoritairement urbains pour les N2 et M3, tandis que les N3 montrent une polyvalence entre zones urbaines, rurales et autoroutières.

12.14. Analyse des émissions en usage réel

12.14.1. Constat global et l'effet de la distance parcourue

L'objectif de cette section est de réaliser une analyse approfondie des émissions de NO_x et de leur corrélation avec l'usage réel. Une première analyse globale peut être menée en étudiant les émissions de NO_x totales, normalisées par rapport à la distance, présentées dans la Figure 211(a). On observe que certains trajets sont particulièrement émetteurs, mais ce résultat peut être biaisé par la normalisation selon la distance parcourue : le véhicule n'ait pas eu suffisamment de temps pour activer son système de post-traitement. Afin d'obtenir une vision plus complète de ces niveaux d'émissions, la Figure 211(b) illustre également la variation (médiane et interquartile) des émissions instantanées, lorsqu'elles ne sont pas nulles.

En ce qui concerne un véhicule qui semble très émetteur au premier abord, comme le N3 GO OEM#2, il apparaît en réalité que ses émissions instantanées et son pourcentage de temps à émissions nulles (efficacité de conversion de 100 %) sont comparables à ceux du véhicule N3 GO OEM#3. De plus, la valeur médiane des émissions est inférieure pour le N3 GO OEM#2. Cela signifie que ce sont des trajets spécifiques qui produisent des valeurs particulièrement élevées. Il est donc pertinent d'examiner l'usage en fonction des distances parcourues et des émissions, comme le montre la Figure 212 : plus le trajet est court, plus les émissions sont élevées, avec une tendance vers un niveau stable à partir de 10 km.

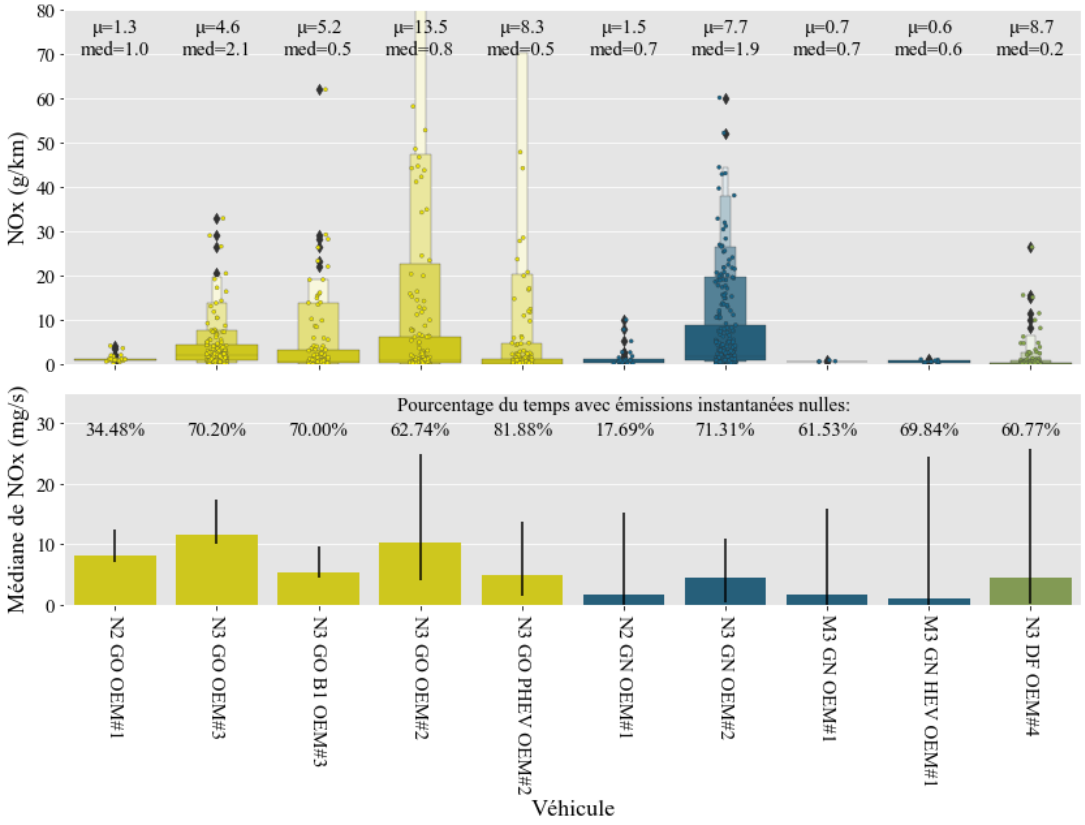


Figure 211: (a) Distribution des émissions de NO_x par véhicule.
(b) Emissions médianes instantanées et écart interquartile.
En violet les véhicules diesel ; en rose les véhicules gaz et en marron le véhicule dual fuel

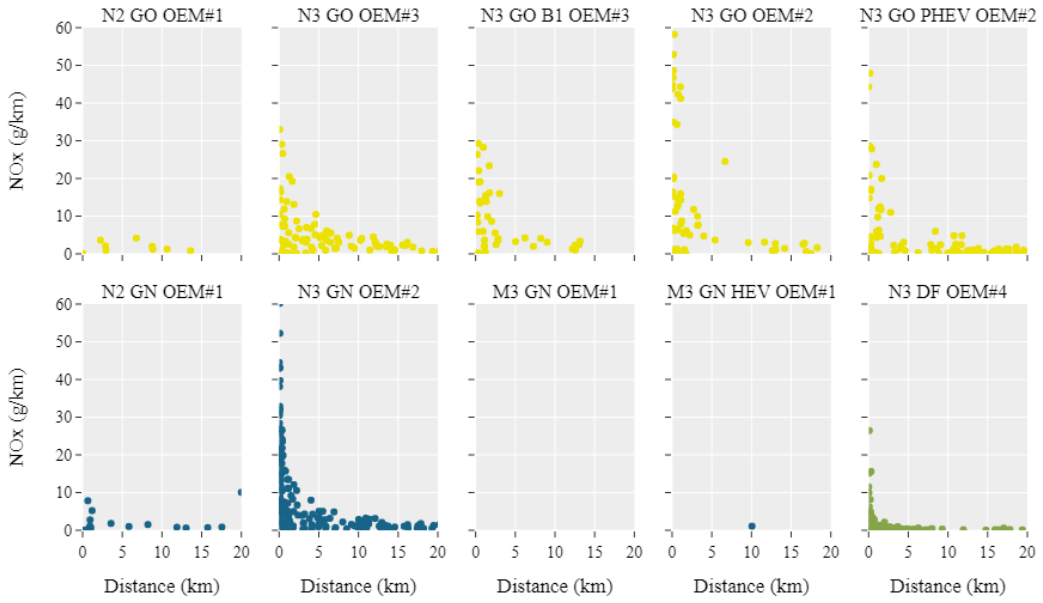


Figure 212: Emissions moyennes cumulées en fonction de la distance totale parcourue du trajet.

En fait, ces trajets fortement émetteurs se caractérisent non seulement par une distance limitée, mais aussi par un temps important passé au ralenti avant le démarrage effectif du véhicule. La Figure 213 montre que les trajets les plus émetteurs, indiqués en étoiles foncées (>10 g/km), sont non seulement les plus courts, mais également ceux où le véhicule reste le plus de temps à l'arrêt. Ces trajets correspondent également à ceux pour lesquels le map-matching n'a pas été réalisé avec succès, donc, trajets en « manœuvre ».

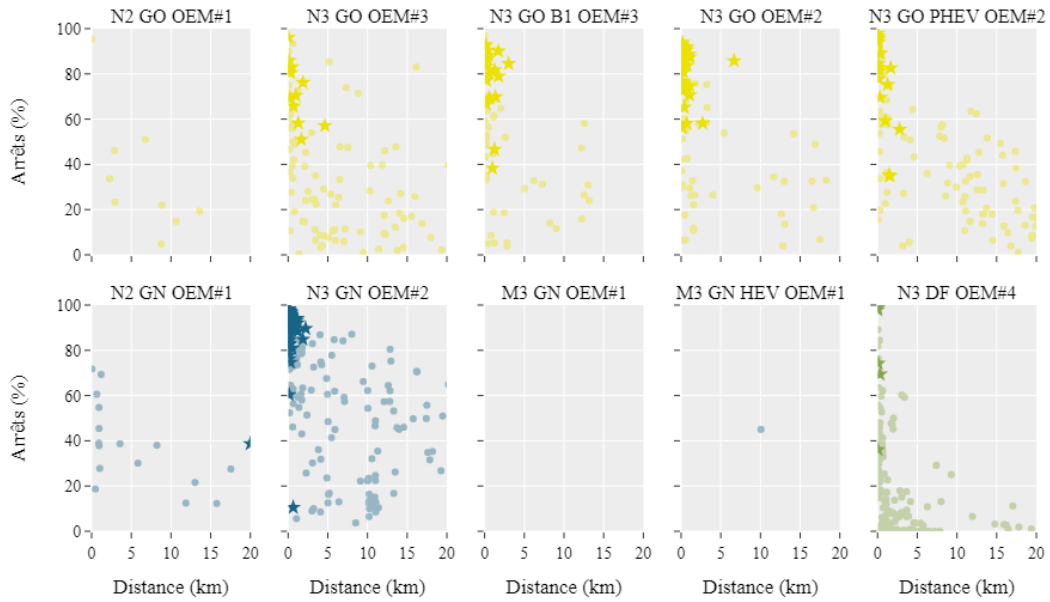


Figure 213: Pourcentage du temps à l'arrêt en fonction de la distance totale parcourue. Les étoiles foncées représentent les trajets les plus émetteurs en g/km.

Il est également intéressant de considérer les émissions en termes de contribution à la masse totale émise, comme le montre la Figure 214. En effet, les trajets courts (<10 km) représentent 17 % des émissions massiques, alors qu'ils ne constituent que 3,77 % des kilomètres totaux parcourus.

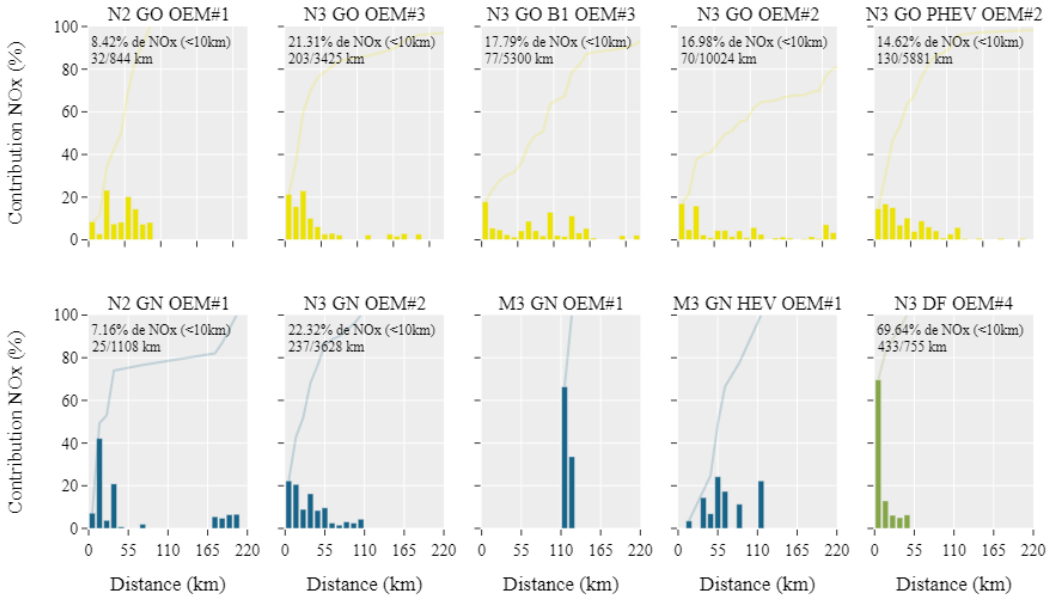


Figure 214: Contribution des émissions cumulées par distance totale parcourue.

Pour conclure, cette analyse et les prochaines étapes seront synthétisées dans l'impact par type de carburant et la présence de ces situations de vie et catégorisées afin de comprendre la criticité des situations et la fréquence d'occurrence en temps et en distance dans l'usage réel. Le Tableau 35 montre pour les 5 véhicules diesel et les 4 véhicules gaz naturel, la contribution des émissions et la fréquence de temps et de la distance parcourue passé par situation. Les trajets courts (≤ 5 km) sont responsables de 12,3 % des émissions totales de NO_x tout en ne représentant que 0,9 % des distances parcourues, avec des niveaux d'émissions spécifiques particulièrement élevés. Pour les véhicules au gaz naturel, les trajets courts (≤ 5 km) concentrent 14,0 % des émissions de NO_x pour seulement 2,2 % des distances parcourues, avec des émissions spécifiques marquées.

Tableau 35: Répartition du temps, de la distance et des émissions en fonction de la distance totale parcourue pour chaque trajet par carburant.

Indicateur	Diesel				Gaz naturel			
	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)
$d \leq 1\ km$	3.7	0.2	4.8	17.1	10.3	0.4	5.7	11.3
$1 < d \leq 5\ km$	3.6	0.7	7.2	6.2	7.5	1.8	7.8	3.7
$5 < d \leq 10\ km$	2.8	1.1	5.8	3.4	4.4	2.4	5.6	2.0
$10 < d \leq 50\ km$	28.6	20.9	35.2	1.1	38.9	43.0	46.8	0.9
$d > 50\ km$	61.3	77.1	47.0	0.4	38.9	52.5	34.1	0.5

A retenir :

Les trajets courts, bien qu'ils représentent une fraction marginale de la distance totale parcourue, contribuent de manière disproportionnée aux émissions de NO_x, avec des niveaux d'émissions spécifiques nettement plus élevés. En revanche, les trajets longs, qui dominent en termes de distance parcourue, affichent des émissions spécifiques beaucoup plus faibles, montrant une corrélation inverse entre la longueur du trajet et l'intensité des émissions par kilomètre.

12.14.2. Emissions par type de route et vitesse

Les émissions peuvent être analysées dans des autres axes d'intérêt, au-delà de la distance parcourue. Dans la prochaine étape, l'analyse se fera de forme globale sur les véhicules diesel et gaz, ainsi que, par type de zone : urbaine lente (<30 km/h), urbaine (50 km/h), rurale (70-90 km/h) et autoroute (>100 km/h) puis par les éléments de conduite qui diffèrent entre chaque zone.

La Figure 215 représente la contribution des émissions (anneau extérieur), le temps passé (anneau centrale) et la distance totale parcourue (anneau intérieur) par type de route. Les données montrent une répartition contrastée du temps passé et de la contribution aux émissions de NO_x en fonction des types de zones et de motorisation.

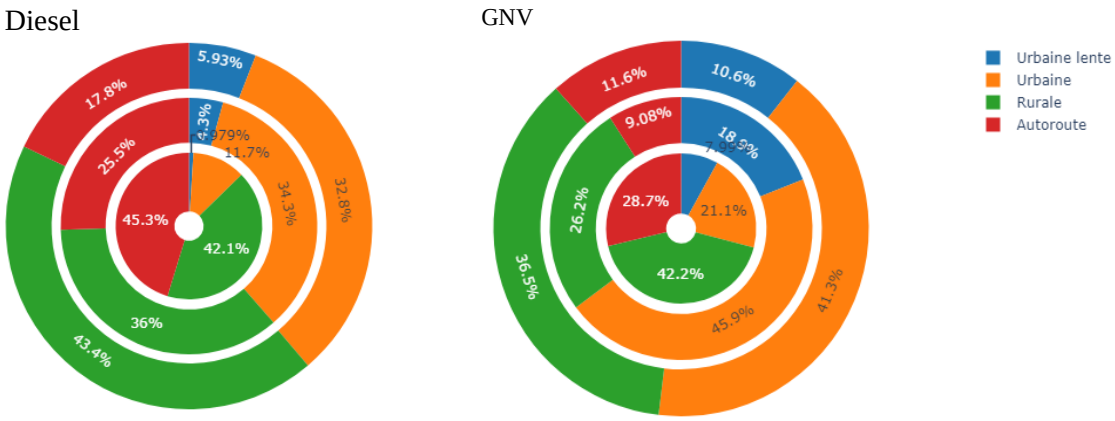


Figure 215: Contribution des émissions NO_x (anneau extérieur) et fréquence d'occurrence en temps (anneau centrale) et en distance totale (anneau intérieur) par carburant.

Pour les véhicules diesel, bien que le temps passé (anneau centrale) soit presque également réparti entre les zones rurales et les autoroutes, la contribution aux émissions de NO_x est nettement plus importante en zones rurales (43,4 %) par rapport aux autoroutes (17,8 %). Les zones urbaines combinées représentent 12,7% de la distance parcourue et contribuent à 38,7% des émissions de NO_x. Cela signifie que l'impact environnemental des véhicules diesel est amplifié en zones rurales et urbaines, où les conditions de conduite ou les cycles moteur sont moins favorables à un contrôle efficace des émissions de NO_x.

Pour les véhicules à gaz, la répartition du temps est nettement orientée vers les zones urbaines, tandis que les autoroutes représentent une fraction très réduite du temps et la distance. Cette distribution d'usage se reflète dans les émissions de NO_x, avec une part significative en zones urbaines confondues (51,9 %) et rurales (36,5 %). Les zones urbaines lentes représentent 10,6 % des émissions, une proportion notable en raison de l'usage prolongé à faible vitesse et des arrêts fréquents, qui nuisent à l'efficacité du post-traitement.

La principale différence des zones en termes d'usage est la vitesse moyenne. Une analyse intéressante à mener est alors, la variation des émissions en fonction de la vitesse moyenne. Dans la Figure 216, s'affiche la valeur moyenne des émissions en fonction de la vitesse moyenne par type de carburant. Pour les deux cas, les émissions les plus fortes sont à faibles vitesses. Pour le cas Diesel s'observe aussi un pic des émissions aux dépassements de la vitesse moyenne par rapport la vitesse limite. Cela s'explique normalement par une conduite plus agressive non seulement en vitesse mais aussi en niveau d'accélération.

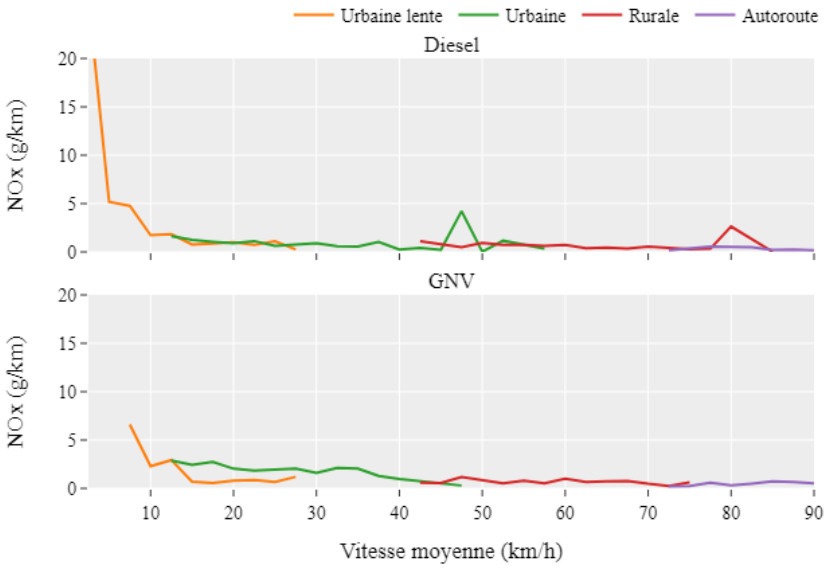


Figure 216 : Variation des émissions à chaud (température post-traitement > 100°C) moyennes par type de carburant en fonction de la vitesse moyenne en usage réel.

Les données du Tableau 36 mettent en évidence des différences marquées dans la répartition des émissions de NO_x et de l'activité des véhicules selon les types de zones pour le diesel et le gaz naturel, les ordres de grandeur sont les mêmes que présentés dans l'analyse amenée dans antérieurement.

Tableau 36: Répartition du temps, de la distance et des émissions en fonction de la vitesse limite par carburant.

Indicateur	Diesel				Gaz naturel			
	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)
Urbaine lente	4.3	1.0	5.9	3.8	18.9	8.0	10.6	1.1
Urbaine	34.3	11.7	32.8	1.8	45.9	21.1	41.3	1.6
Rurale	36.0	42.1	43.4	0.6	26.2	42.2	36.5	0.7
Autoroute	25.5	45.3	17.8	0.2	9.1	28.7	11.6	0.3

A retenir :

Les zones urbaines lentes concentrent une part importante des émissions de NO_x pour les deux types de véhicules, malgré des distances relativement réduites, soulignant l'impact des faibles vitesses et des arrêts fréquents. Les zones rurales et autoroutières, bien qu'elles couvrent des distances significatives, affichent des émissions spécifiques nettement inférieures, tandis que les zones urbaines classiques se situent dans une position intermédiaire, avec une contribution modérée tant en distance qu'en émissions.

12.14.3. Émissions par niveau de pente

L'analyse de l'impact de la pente sur les émissions met en évidence des tendances marquées en fonction du niveau de pente. Les pentes instantanées sont ici classifiées en cinq catégories : forte descente ($\alpha < -3$ %), descente modérée (-3 % $< \alpha < -0{,}5$ %), plat ($-0{,}5$ % $< \alpha < 0{,}5$ %), montée modérée ($0{,}5$ % $< \alpha < 2$ %) et forte montée ($\alpha > 2$ %). La Figure 217 présente le débit moyen des émissions en fonction de ces niveaux de pente.

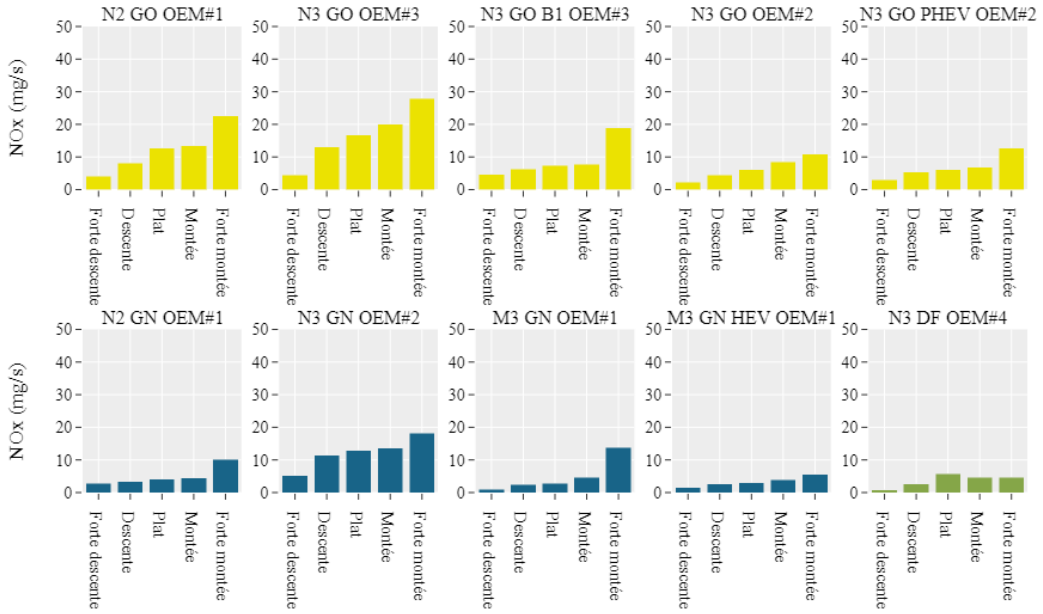


Figure 217: Emissions moyennes instantanées par niveau de pente.

L'analyse révèle une corrélation significative entre la pente et les émissions de NO_x pour l'ensemble des véhicules étudiés, à l'exception notable du véhicule Dual Fuel, qui montre une sensibilité moindre aux variations de pente. Pour la totalité des véhicules, en prenant comme référence les émissions mesurées à plat, la médiane des émissions est réduite de 60 % lors de fortes descentes et de 16 % en descente modérée, tandis qu'elle augmente de 11 % en montée modérée et de 80 % en forte montée.

Ces résultats soulignent l'influence des pentes importantes sur la consommation et les émissions : les descentes favorisent une diminution des émissions grâce à des sollicitations moindres du moteur, tandis que les montées, en particulier les fortes montées, nécessitent une puissance accrue, entraînant une hausse proportionnelle des émissions de NO_x.

Pour synthétiser l'impact de l'élévation par type de carburant, le Tableau 18 résume la contribution et la fréquence des émissions pour ces 5 catégories.

Tableau 37: Répartition du temps, de la distance et des émissions en fonction du niveau de pente par carburant.

Indicateur	Diesel				Gaz naturel			
	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)
Forte descente	3.8	3.9	1.6	0.2	7.1	6.1	2.7	0.4
Descente	29.2	29	21.7	0.5	26.4	25.6	21.9	0.7
Plat	32.6	33.6	31.1	0.6	31.7	35.9	32.8	0.7
Montée	26.5	24.6	30.4	0.8	23.2	21.3	23	0.8
Forte montée	7.9	8.8	15.2	1.1	11.6	11.2	19.7	1.4

A retenir :

Les données révèlent une forte corrélation entre les niveaux de pente et les émissions de NO_x pour les deux types de motorisation. Les pentes les plus marquées représentent une part modérée du temps et de la distance parcourus, mais contribuent de manière disproportionnée aux émissions spécifiques de NO_x. À l'inverse, les descentes, se distinguent par une contribution relativement faible aux émissions malgré une part significative de la distance et du temps, reflétant une moindre sollicitation du moteur dans ces conditions. Les trajets plats, bien qu'équilibrés en temps et en distance, affichent une contribution en émissions plus modérée, correspondant à des conditions de roulage stables.

Les données montrent également qu'il n'y a pas de compensation des émissions entre les montées et les descentes, les émissions accrues lors des montées n'étant pas équilibrées par les réductions observées en descente.

12.14.4. L'effet de la température

L'impact des émissions à l'échappement lorsque que le post-traitement n'est pas activé est assez direct. Ces conditions se retrouvent principalement en débuts de trajets. Ce paragraphe est dédié à la compréhension des émissions associées à la température de gaz mesurée par un thermocouple à la sortie du post-traitement au niveau de la ligne d'échappement.

Dans la Figure 218, la surface colorée indique l'intervalle interquartile (du 25^{e} au 75^{e} percentile) des émissions instantanées pour chaque intervalle de la température post-traitement. Cette zone remplie représente donc la plage des émissions où se situe la majorité des valeurs mesurées, avec la médiane (50^{e} percentile) au centre de la zone colorée. Elle s'affiche une importante corrélation entre les faibles températures et les hauts pics d'émissions instantanées, surtout dans le cas du poids lourd N3 GN OEM#2.

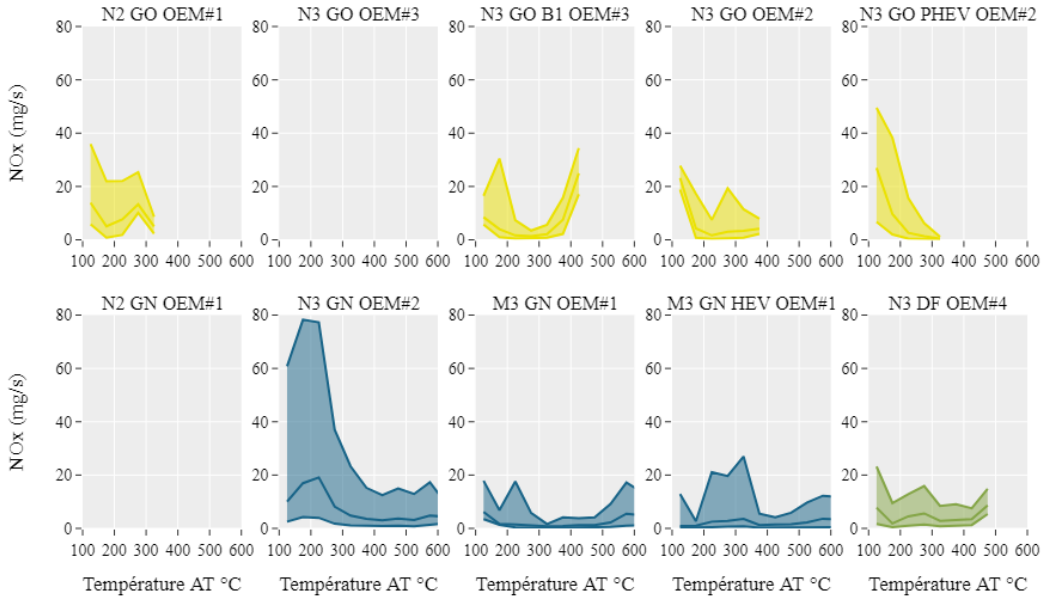


Figure 218: Distribution des émissions instantanées corrélées à la température post-traitement. L'aire représente l'écart interquartile (25e à 75e percentiles).

Afin de mieux comprendre la contribution des émissions en fonction de la température, de catégories sont créées : dit « froid » à < 100°C, valeur minimale qui mesure le thermocouple. Puis, des catégories intermédiaires chaque 50°C jusqu'à 250°C. La contribution des émissions et la fréquence d'occurrence sont affichées sur Tableau 38.

Tableau 38: Répartition du temps, de la distance et des émissions en fonction de la température post-traitement par carburant.

Indicateur	Diesel				Gaz naturel			
	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)
T < 100°C	19.3	2.2	30.8	7.6	25.8	0.3	3.1	9.1
100 < T < 150°C	8.9	2.4	24.3	5.5	7	0.2	2.1	8.9
150 < T < 200°C	4.2	2	8.3	2.3	2.2	0.2	2.8	12.6
200 < T < 250°C	57.9	78.6	33.1	0.2	7.5	2.5	25.5	9.7
T > 250°C	9.6	14.8	3.5	0.1	57.4	96.7	66.5	0.7

Les émissions de NO_x sont étroitement liées à la température du post-traitement. Pour les moteurs diesel, les plages de températures inférieures à 200 °C sont responsables de la majorité des émissions, en raison de l'inefficacité du système de post-traitement. À partir de 200 °C, l'efficacité du dispositif s'améliore considérablement, atteignant des performances optimales au-delà de 250 °C.

Pour les véhicules au gaz naturel, la situation est différente : le système de post-traitement fonctionne efficacement au-delà de 250 °C, mais les plages intermédiaires entre 200 et 250 °C montrent encore des niveaux élevés d'émissions spécifiques, ce qui peut indiquer des défis technologiques à ces températures.

L'ensemble des grandeurs obtenus par les véhicules gaz, ne représente pas le comportement du véhicule le plus émetteur montré dans le graphique précédent. Dans ce cas, ce véhicule passe 14% du temps avec une température inférieure à 100°C et contribue 38% des émissions du véhicule avec une émission moyenne de 29 g/km, trois fois plus que la moyenne de ce carburant.

A retenir :

Il apparaît clairement que les émissions de NO_x sont fortement influencées par la température du post-traitement. Les véhicules Diesel ont tendance à générer des émissions plus élevées à des températures inférieures à 200°C, tandis que ceux à gaz naturel montrent une réduction plus marquée des émissions lorsqu'ils fonctionnent à des températures supérieures à 250°C.

12.14.5. L'effet de la sollicitation du moteur

Les émissions à la sortie du post-traitement sont liées aux conditions de fonctionnement du moteur et à l'efficacité des systèmes de dépollution. Une analyse par charge moteur permet de mieux comprendre comment les émissions évoluent en fonction de l'effort demandé au moteur, en termes de puissance. Cette approche permet également d'identifier les points de fonctionnement critiques où les émissions sont les plus importantes, tout en évaluant l'impact de la sollicitation moteur sur les performances globales du post-traitement.

L'analyse se fait d'un point de vue de la puissance demandée au moteur normalisée par rapport la puissance maximale du moteur afin d'avoir un pourcentage de demande comparable entre tous les véhicules, les différences classes sont affichées dans le Tableau 39.

Tableau 39: Répartition du temps, de la distance et des émissions en fonction du pourcentage de la puissance demandée au moteur par carburant.

Indicateur	Diesel				Gaz naturel			
	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)	Temps (%)	Distance (%)	NO_x (%)	NO_x (g/km)
P < 5%	55	31.1	22.9	0.5	66.4	35.4	11.2	0.3
5% < P < 20%	14.8	19.7	11.8	0.4	9.3	10.7	19.6	1.5
20% < P < 40%	15.4	25.5	16.2	0.4	10	21.7	22	0.8
40% < P < 60%	7.5	12.2	16.9	0.9	6.5	14.6	16.6	0.9
60% < P < 80%	4.8	7.6	18.6	1.6	4	8.7	15.3	1.5
80% < P < 95%	2.3	3.6	11.8	2.1	3.1	7.2	11.8	1.4
P > 95%	0.2	0.3	1.8	3.7	0.7	1.5	3	1.7

Les moteurs passent une proportion importante de temps à moins de 5% de la puissance maximale du moteur (55% pour diesel, 66.4% pour GNV) dans cette plage. Cependant, les émissions de NO_x (g/km) restent faibles, surtout pour le GNV, en raison d'une charge moteur modérée.

Pour les charges intermédiaires (entre 20 et 60%), cette plage représente la majeure partie des trajets en termes de distance (57.4% pour diesel et 47% pour GNV). Les émissions spécifiques de NO_x augmentent légèrement avec la charge (de 0.4 à 0.9 g/km pour Diesel et de 0.8 à 0.9 g/km pour GNV).

Pour les charges élevées (entre 60 et 95%) bien que le temps passé dans cette plage soit faible, les émissions spécifiques de NO_x augmentent sensiblement par rapport les charges intermédiaires.

Pour la plage la plus forte (> 95%), correspondant à des efforts moteurs très fortes, est très peu utilisée (<1% du temps). Les émissions spécifiques de NO_x y atteignent leur pic (3.7 g/km pour Diesel et 1.7 g/km pour les GNV). Cependant, la contribution totale à la pollution reste faible en raison du temps limité passé dans cette zone.

A retenir :

Les véhicules diesel et GNV opèrent majoritairement à faible charge moteur (<40%), où les émissions de NO_x restent modérées. Le GNV se distingue par des émissions spécifiques globalement plus faibles, même à des charges élevées. Toutefois, les zones de forte charge (>60%) montrent une montée des émissions pour les deux carburants, soulignant les limites des systèmes de post-traitement dans ces conditions.

12.14.6. Comparaison avec les essais laboratoires

Il est pertinent d'explorer les différences de mesure entre les usages réels et les essais expérimentaux. Les résultats obtenus dans des conditions de laboratoire peuvent souvent diverger significativement de ceux observés dans la réalité quotidienne des usagers. L'objectif est de comprendre si cet écart est principalement expliqué par des facteurs liés à l'usage, tels que les conditions de conduite, les comportements des conducteurs ou les caractéristiques des trajets effectués, plutôt que par une disparité dans les méthodes de post-traitement des émissions. La Figure 219 montre un zoom sur les émissions moyennes totales pour les trajets d'au moins 1 km.

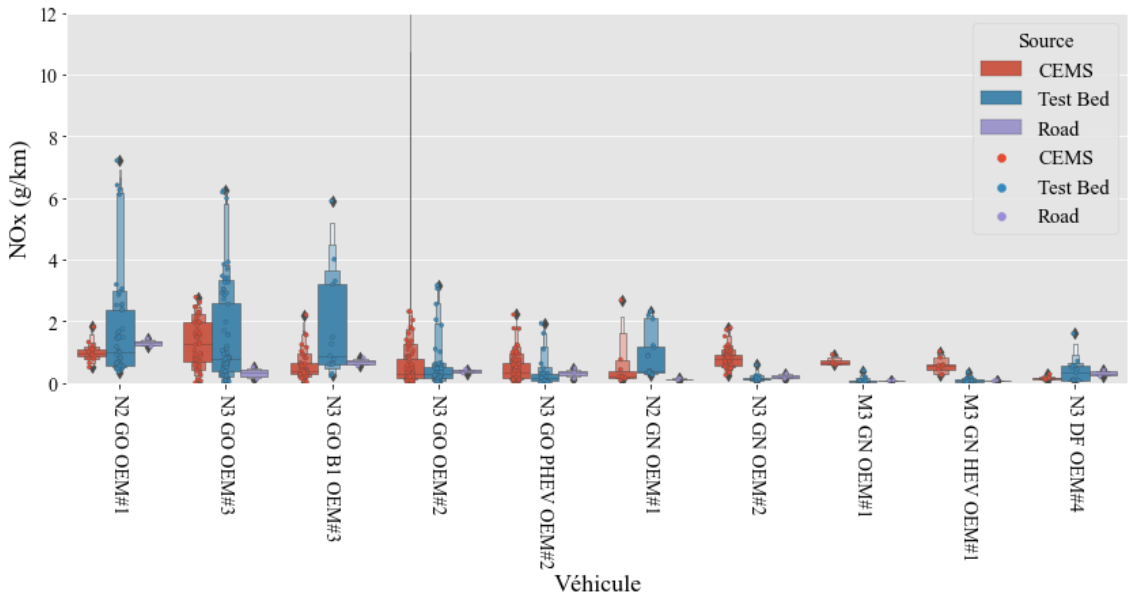


Figure 219: Distribution des émissions de NO_x (CEMS, banc à rouleaux et essais sur route) par véhicule.

La distance minimale parcourue lors des essais expérimentaux est de plus de 19 km. Après avoir examiné l'impact des émissions normalisées par rapport à la distance, il est donc intéressant de se concentrer sur les mêmes types de trajets. Ainsi, compte tenu de la différence de nature entre les mesures CEMS et les essais expérimentaux, il est également pertinent d'ajouter la masse de NH3 dans les essais expérimentaux pour être dans le même axe référentiel. Cette comparaison est affichée dans la Figure 220.

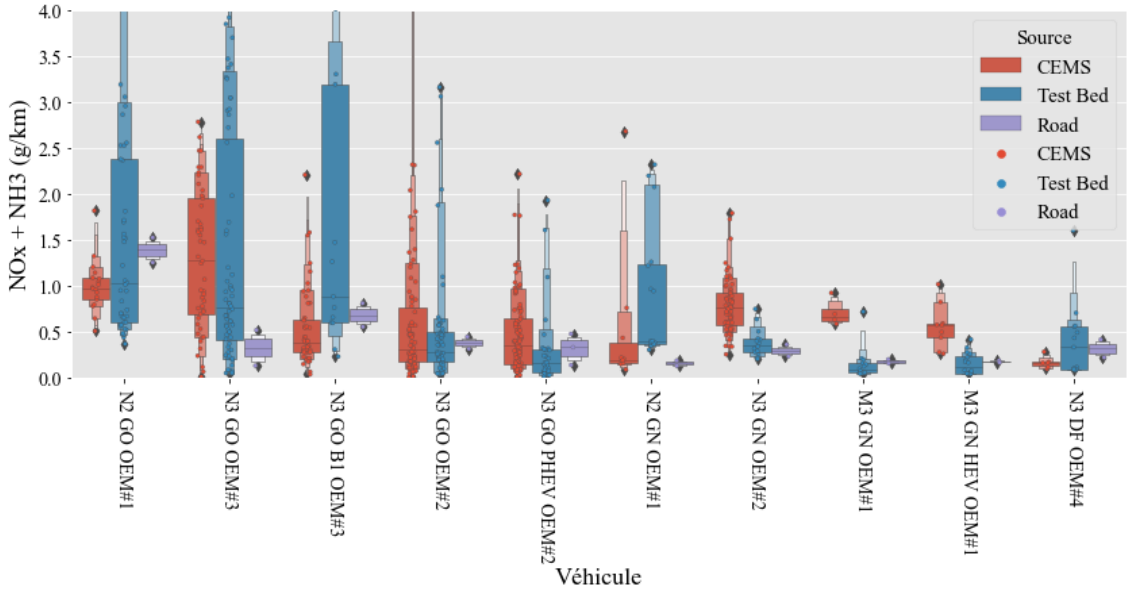


Figure 220: Distribution des émissions de NO_x par véhicule pour les trajets supérieurs à 19 km parcourus. Addition de NH3 pour les essais banc à rouleaux et essais sur route.

On observe que, malgré cette comparaison plus juste, il existe toujours un écart entre les émissions. Pour comprendre cet écart sous un angle quantitatif, l'écart absolu et relatif est présenté dans le Tableau 40. Bien que les véhicules à gaz soient les moins émetteurs, ils sont également ceux qui présentent le plus d'écart entre les émissions en usage réel et celles des essais expérimentaux.

Tableau 40 : Emissions médianes entre les essais en usage réel et les essais expérimentaux pour les trajets supérieurs à 19 km parcourus.

Véhicule	Médiane usage réel (g/km)	Médiane essais expérimentaux (g/km)	Ecart absolu (g/km)	Ecart relatif (%)
N2 GO OEM#1	1.01	1.04	0.03	3.01
N3 GO OEM#3	2.08	0.73	-1.35	-64.78
N3 GO B1 OEM#3	0.55	0.81	0.26	46.81
N3 GO OEM#2	0.77	0.29	-0.48	-62.39
N3 GO PHEV OEM#2	0.48	0.16	-0.32	-66.50
N2 GN OEM#1	0.70	0.39	-0.31	-43.94
N3 GN OEM#2	1.89	0.34	**-1.55**	-81.78
Bus GN OEM#1	0.66	0.11	-0.55	-83.94
Bus GN HEV OEM#1	0.57	0.16	-0.41	-71.89
N3 DF OEM#4	0.17	0.33	**0.15**	90.66

Si les émissions varient de manière aussi significative, cela est lié à l'activation du post-traitement, qui montre une forte corrélation avec la température du post-traitement, tel qu'observé sur la section précédente. Dans la Figure 221 s'affiche la distribution d'émissions en usage réel et dans les essais expérimentaux afin de comprendre cet écart. Les trois véhicules les plus émetteurs dans l'usage réel sont aussi les trois véhicules qui ont passé plus de temps en zone urbaine affiché dans le tableau.

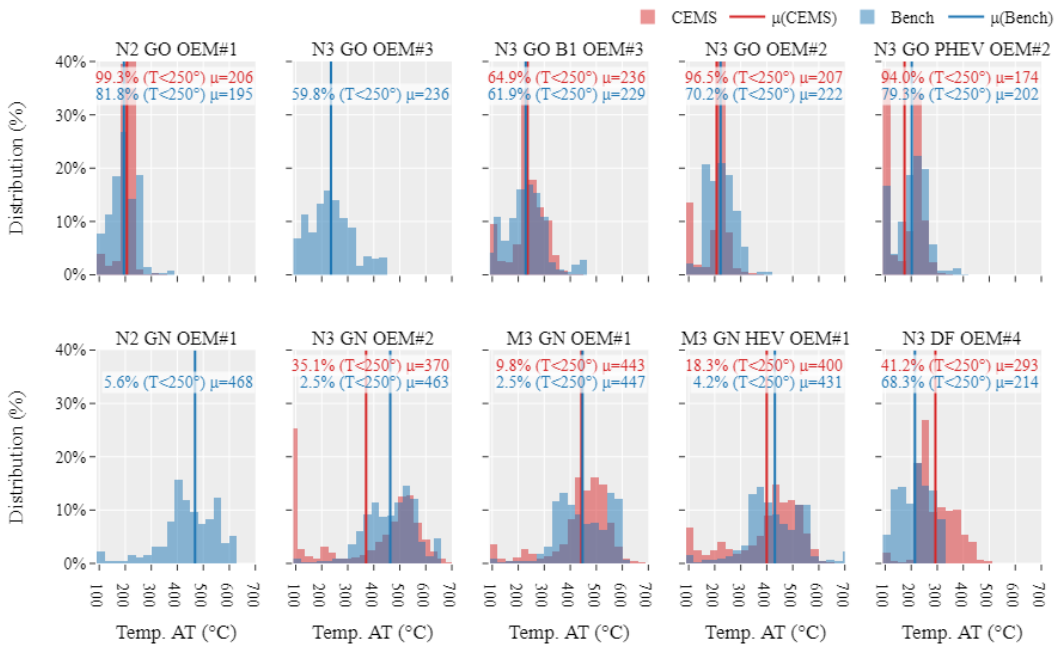


Figure 221: Comparaison de la distribution de la température à la sortie du post-traitement entre les essais expérimentaux et le banc à rouleaux.

Le véhicule le plus similaire en émissions dans les deux cas (N2 GO OEM#1), corresponde aussi à celui qui passent le moins de temps avec une température inférieure à 100 °C et qui a le même ordre de grandeur en température moyenne entre les deux types de mesures. De l'autre côté, le véhicule avec l'écart absolu le plus importante (N3 GN OEM#2) est aussi dont la température moyenne en usage réel est inférieure de 100°C, et avec plus de 32% avec une température inférieure au seuil de 250 °C.

Une analyse de corrélation entre la température et les variables liées à l'usage est effectuée pour chaque véhicule. La variable qui montre systématiquement la corrélation la plus forte est celle de la vitesse instantanée avec une corrélation moyenne de 32%. Dans le cas du véhicule N3 GN OEM#2, la température instantanée est corrélée à la vitesse avec un coefficient de 79 %. Dans la Figure 222, il y a la même représentation que le précèdent pour la variation de température par intervalle de vitesse, ainsi qu'une ligne pointillée est utilisée pour illustrer le 5^{e} percentile de température observée pour chaque vitesse.

Dans l'ensemble, on observe que les véhicules à gaz (par exemple le N3 GN OEM#2 et le N2 GN OEM#1), la température du système de post-traitement augmente de manière significative avec la vitesse, atteignant des niveaux plus élevés lorsque le véhicule roule plus rapidement, sauf pour le véhicule N3 GN OEM#2 dont le niveau de température est très faible par rapport les autres véhicules de la même technologie.

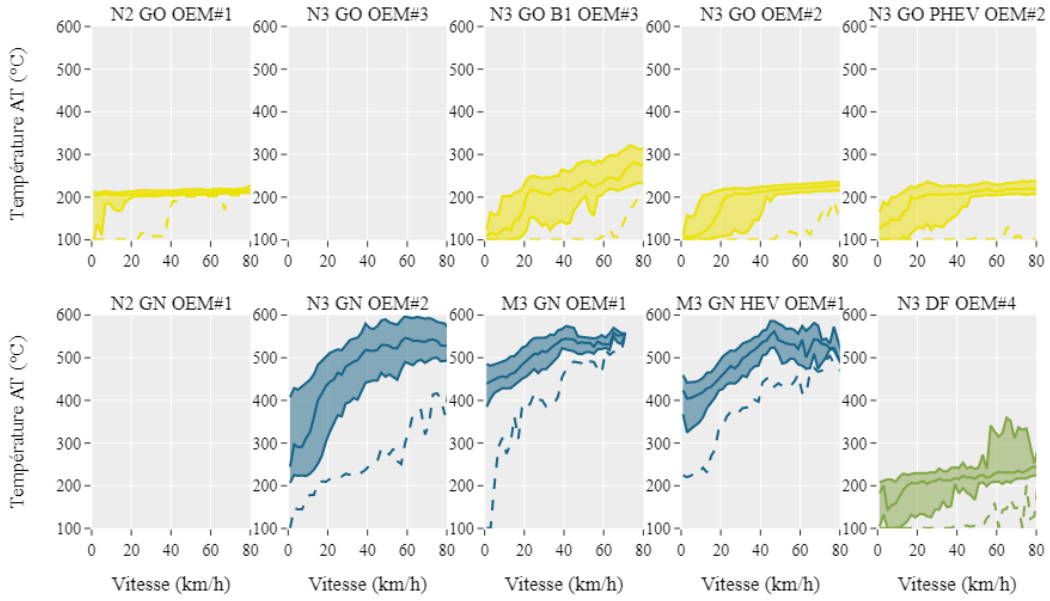


Figure 222: Corrélation de la température en fonction de la vitesse en usage réel par percentiles. L'aire représente l'écart interquartile (25e à 75e percentiles), la ligne pointillée indique le 5e percentile des températures les plus basses.

A retenir :

Les différences d'émissions de NO_x entre les essais expérimentaux en laboratoire et les usages réels sont fortement influencés par les conditions de fonctionnement des véhicules, notamment les variations de température du système de post-traitement. Les véhicules les plus émetteurs en usage réel, comme le N3 GN OEM#2, présentent des écarts significatifs de température par rapport aux essais en laboratoire, ce qui reflète des conditions d'utilisation en milieu urbain où la température du post-traitement reste inférieure au seuil optimal. Ces écarts soulignent l'importance des paramètres d'usage, tels que la vitesse instantanée et la proportion de temps passée en zones à faible vitesse, pour mieux comprendre et réduire les émissions en conditions réelles.

12.14.7. Comparaison avec l'état de l'art

L'état de l'art, COPERT, largement utilisé pour les évaluations à grande échelle, simplifie les estimations des émissions en s'appuyant sur la vitesse moyenne comme entrée principale, en s'appuyant sur les données récupérées des mesures ainsi que du HBEFA est une base de données fournissant des facteurs d'émission spécifiques en g/km. Cette approche néglige des facteurs critiques tels que la variation de pente instantanée de la route, le style de conduite et les comportements dynamiques tels que l'accélération et la décélération, qui ont un impact significatif sur les niveaux d'émissions.

Afin de comprendre la pertinence de l'état de l'art et son positionnement par rapport les mesures, les mesures seront comparées à l'état de l'art COPERT, à partir de la vitesse moyenne.

Pour rester dans le même cadre, seules les émissions à chaud sont évaluées. Les poids lourds sont dans une première étape associée à la catégorie qui ressemble dans l'état de l'art dans le Tableau 41.

Tableau 41: Association d'un véhicule testé avec l'état de l'art COPERT

	Segment	Carburant	Euro
N2 GO OEM#1	Rigide 12 – 14 T	Diesel	EURO VI A/B/C
N3 GO OEM#3	Articulé 40 – 50 T	Diesel	Euro VI D/E
N3 GO B1 OEM#3	Articulé 40 – 50 T	Diesel	Euro VI D/E
N3 GO OEM#2	Articulé 40 – 50 T	Diesel	EURO VI A/B/C
N2 GN OEM#1	Rigide 4.5 – 12 T	CNG	Euro VI D/E
N3 GN OEM#2	Articulé < 40 T	CNG	Euro VI D/E

Une analyse sur l'ordre de grandeur globale des émissions est faite avec les consignes suivantes :

- Vitesse moyenne saturée entre 5 et 75 km/h
- Trajets longs en usage réel pour ne pas avoir l'impact des émissions à froid (38% de trajets avec une distance parcourue de plus de 19 km)
- Analyse de trois niveaux de chargement pour COPERT : 0%, 50% et 100%

La distribution des émissions moyennes ainsi que la valeur moyenne par source (usage réel, banc à rouleaux, essais sur route et COPERT pour trois chargements) est présentée dans la Figure 223. En ce qui concerne le véhicule diesel N2, le niveau d'émissions, quelle que soit la source de mesure, est supérieur à l'état de l'art d'un facteur de 4 à 6. Toutefois, cela peut être biaisé du fait de la comparaison avec un seul véhicule. Les mêmes conclusions sont reflétées aussi sur les autres types de véhicules.

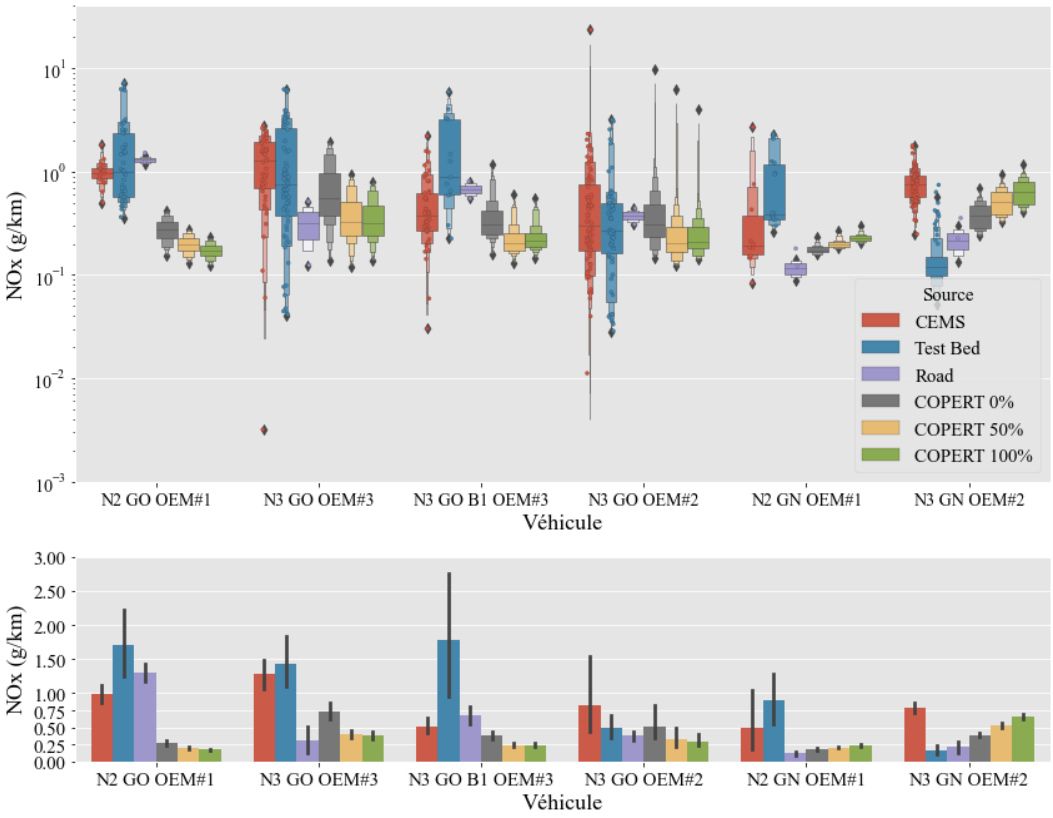


Figure 223 : (a) Distributions des émissions à chaud sur la totalité de chaque trajet par source en échelle logarithmique. (b) Emissions à chaud moyennes sur la totalité de chaque trajet et écart-type par source.

Pour mieux comprendre l'écart observé à chaud, il est pertinent d'analyser les émissions en fonction de la vitesse moyenne des trajets, affiché sur la Figure 82. Dans la section de l'analyse des émissions en usage réel par type de

route et vitesse, c'était surligné le fait de l'impact de la vitesse moyenne qui a été extrait par type de zone et non par trajet complet.

La Figure 83 illustre les émissions moyennes de trois véhicules diesel articulés appartenant à la même catégorisation COPERT, mettant en lumière les limites et les atouts des approches basées sur l'état de l'art. Comme cela a été rapporté dans la littérature, les trajets avec des vitesses moyennes faibles tendent à être plus polluants, une tendance clairement corroborée par les données mesurées.

Dès lors que les trajets sont segmentés par type de route (urbain, rural, autoroute), l'impact de la vitesse moyenne est mieux capturé par l'état de l'art. Néanmoins, l'approche standard de l'état de l'art repose souvent sur une vitesse moyenne unique pour l'ensemble du trajet. Ce choix simplifie l'analyse, mais il engendre des sous-estimations importantes lorsqu'on compare les résultats à ceux obtenus à partir de mesures réelles. La ligne bleue représentant les émissions cumulées issues des mesures CEMS sur le trajet complet est systématiquement plus élevée que la ligne noire de l'état de l'art. L'écart est particulièrement marqué, atteignant plus de 80 % de sous-estimation pour certains cas. Cela souligne que l'hétérogénéité des conditions réelles peut être insuffisamment capturée par une vitesse moyenne unique, entraînant une perte de précision dans les estimations des émissions.

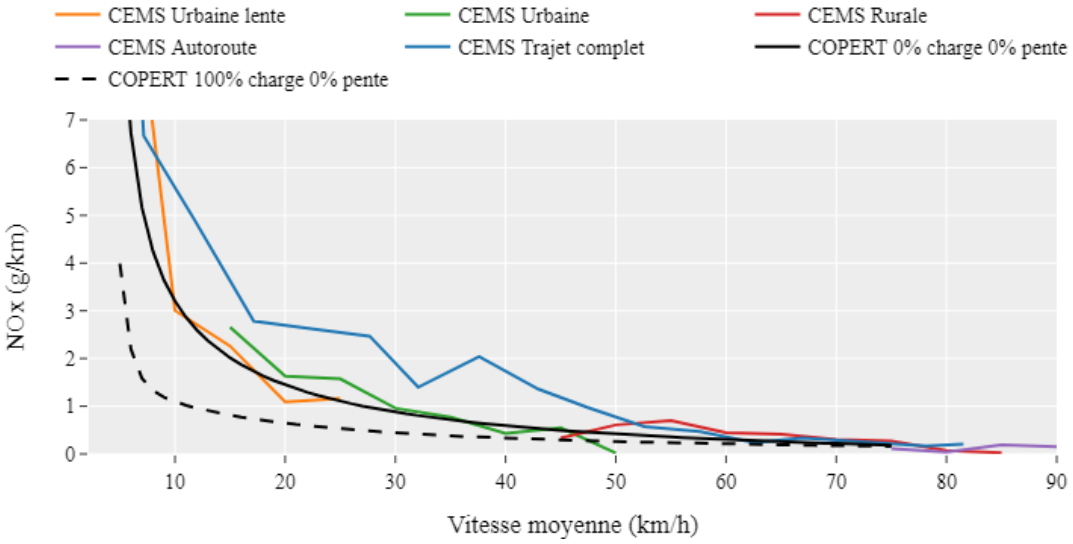


Figure 224: Comparaison de l'impact de vitesse moyenne sur le niveau d'émissions à chaud en usage réel par trajet complet et par type de zone contre l'état de l'art COPERT à 0% et 100% de charge pour la catégorie poids lourds diesel articulés 40 -50 T

A retenir :
La segmentation des trajets par type de route améliore la capture de l'impact de la vitesse moyenne par l'état de l'art, mais l'utilisation d'une vitesse moyenne unique simplifie l'analyse au détriment de la précision. Cela entraîne des sous-estimations significatives des émissions, dépassant parfois 80 %, en raison de l'incapacité à refléter l'hétérogénéité des conditions réelles.

12.15. Comparaison chiffrée aux seuils normatifs

Il est également possible de comparer les données mesurées avec les limites normatives. Pour respecter la norme, les données énergétiques provenant de l'ECU sont prises en référence malgré les réserves portées sur certains véhicules. Seuls les ordres de grandeurs peuvent être analysés.

Pour cette comparaison, seuls les essais WHVC tels que Tamb = 23°C sont pris compte. De plus, chaque véhicule est comparé à la norme en fonction du step normatif qui lui est associé (Step C, Step D ou Step E). Seuls les essais avec le B7 sont pris en compte pour les véhicules Diesel, sauf pour le N3 GO B1 OEM#3.

CO : Concernant les émissions de CO, les données mesurées sont inférieures aux valeurs normatives pour tous les véhicules, que le référentiel normatif soit Euro VI ou Euro 7

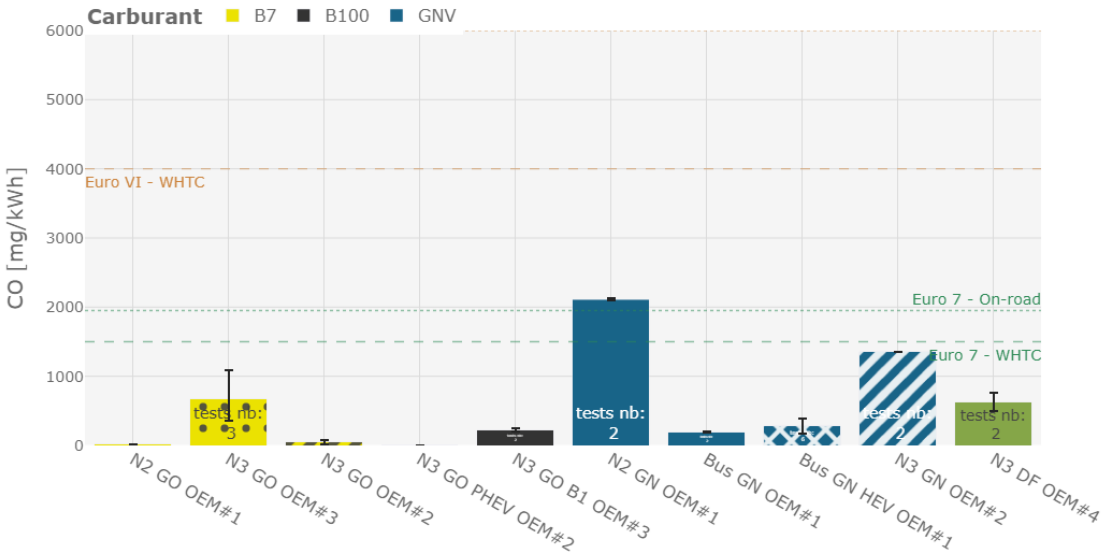


Figure 225 : Comparaison aux seuils normatifs – CO

THC et CH_4: De même, les émissions de THC (NMHC pour les véhicules fonctionnant au GNV) et de CH_4 sont significativement inférieures aux différents seuils normatifs (Figure 226 et Figure 227 respectivement).

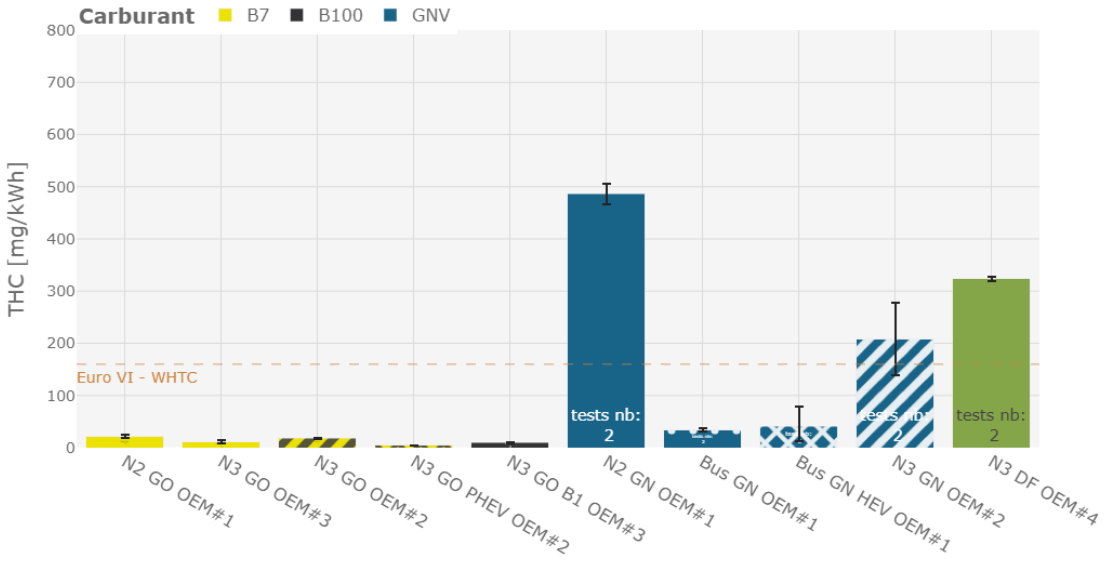


Figure 226 : Comparaison aux seuils normatifs – THC

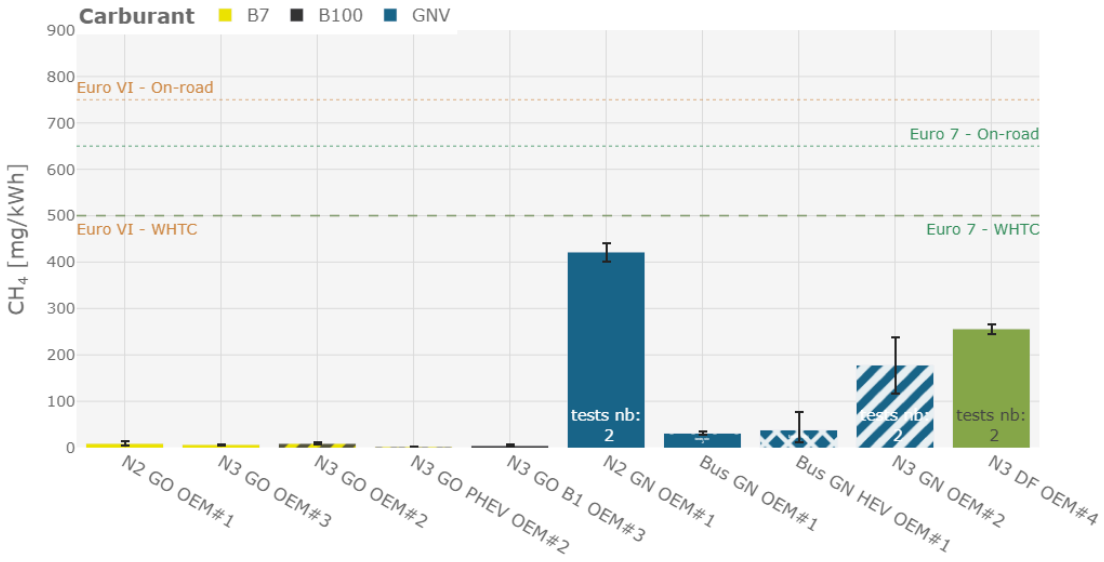


Figure 227 : Comparaison aux seuils normatifs – CH_4

NO_x : Les émissions spécifiques de NO_x respectent les normes Euro VI pour l'ensemble des véhicules, sauf pour l'N2 GO OEM#1 qui présente des émissions très élevées. Ce niveau d'émissions est en partie dû à une erreur d'estimation de l'énergie par l'ECU. Il est également intéressant de remarquer que certains véhicules respectent les seuils Euro VII.

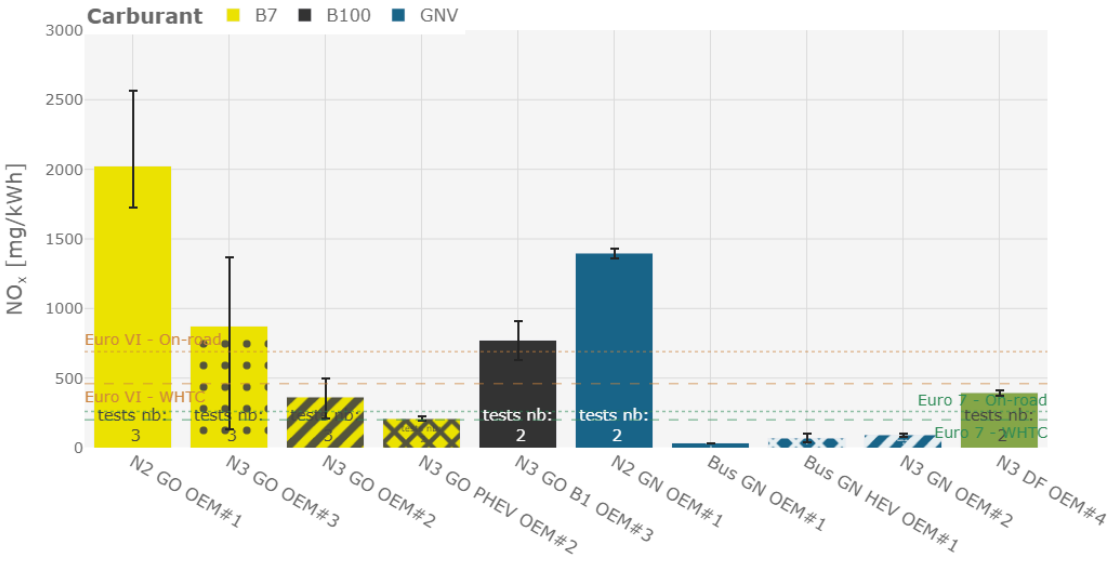


Figure 228 : Comparaison aux seuils normatifs – NO_x

NH_3 et N_2O : Hormis le N3 GN OEM#2, les différents véhicules testés respectent les seuils d'émissions de NH_3 Euro VII (Figure 229). De même, les niveaux maximum Euro VII pour le N_2O sont également respectés (Figure 230).

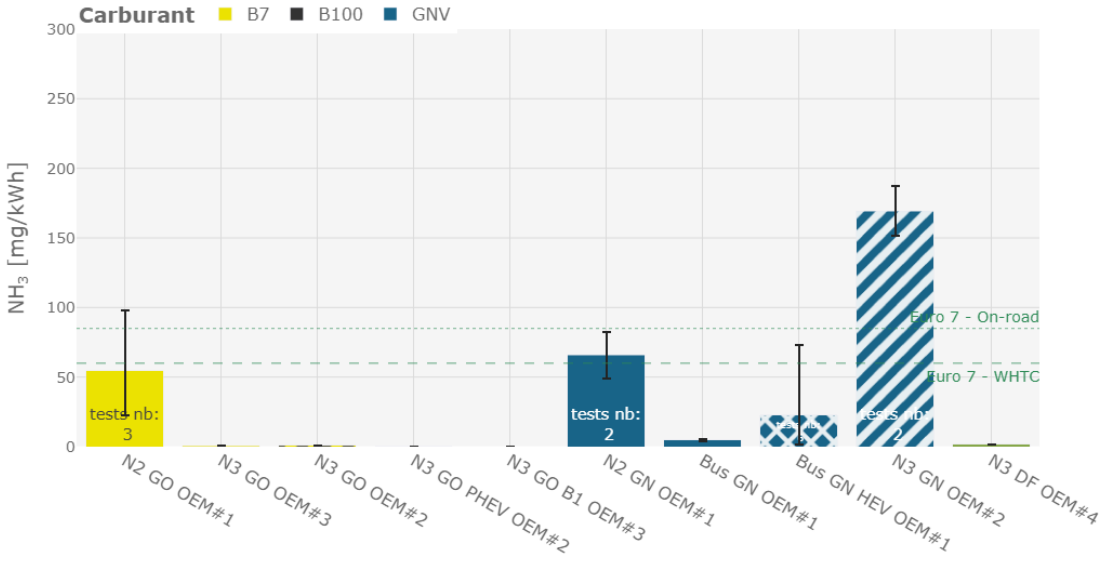


Figure 229 : Comparaison aux seuils normatifs – NH_3

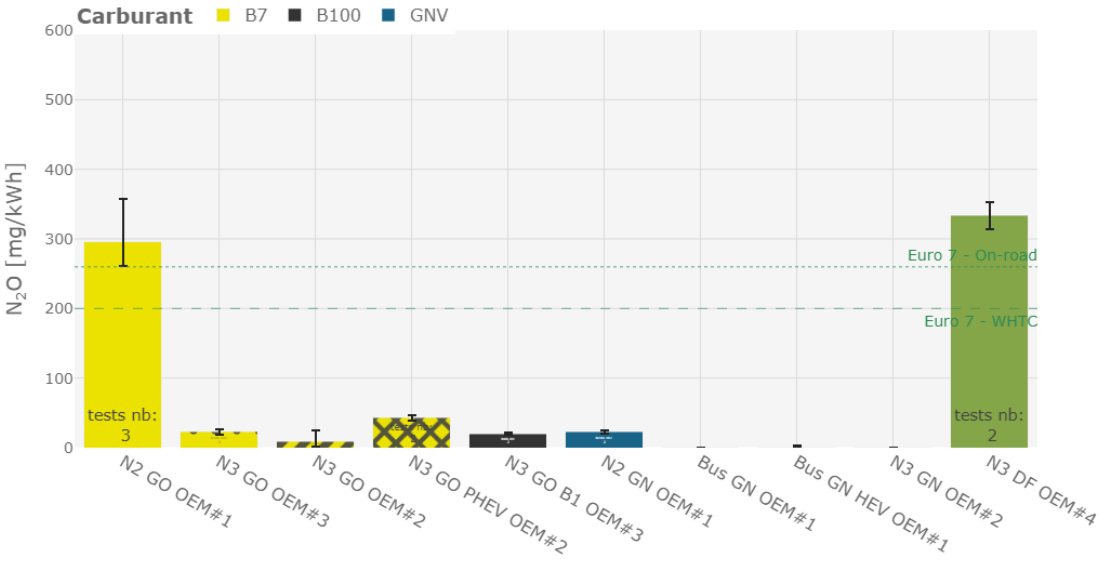


Figure 230 : Comparaison aux seuils normatifs – N_2O

PN$_{10}$: Les émissions de PN$_{10}$ (Euro VII) sont globalement respectées par les différents véhicules (Figure 231). Les seuils Euro VI pour les PN$_{23}$ sont *a fortiori* également respectés. Seul le N3 DF OEM#4 dépasse significativement les normes. Comme évoqué précédemment, l'aspect neuf du système de post-traitement peut en être la cause.

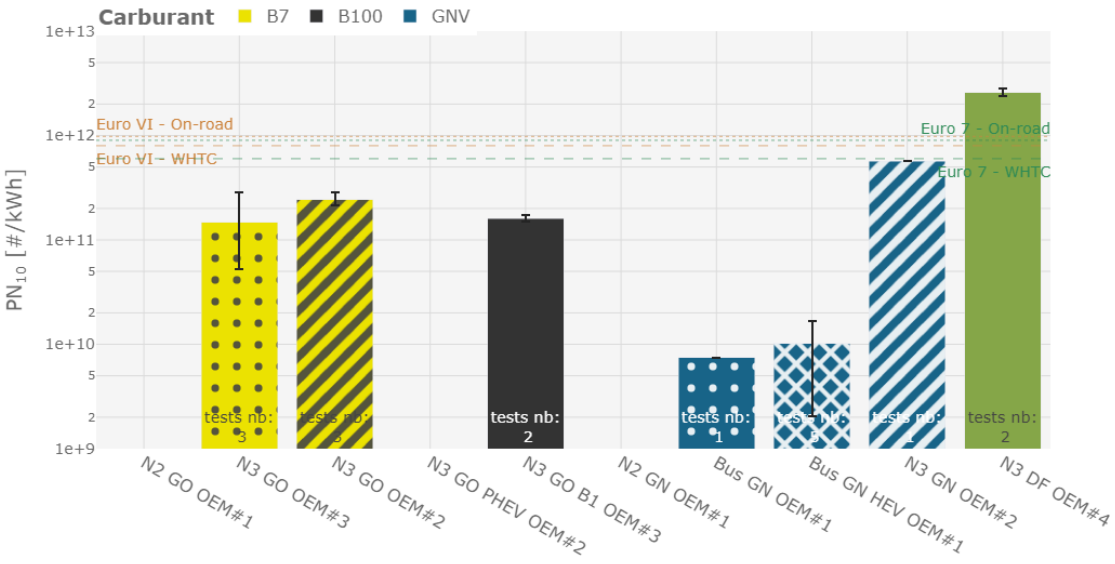


Figure 231 : Comparaison aux seuils normatifs – PN$_{10}$

13. Table des figures

FIGURE 1 : ÉVOLUTION DES EMISSIONS FRANÇAISE DE GES DU SECTEUR DES TRANSPORTS PAR MODE DE TRANSPORT – FRANCE – 1990 / 2019 – SOURCE [1] 6

FIGURE 2 : ÉMISSIONS DU TRANSPORT ROUTIER PAR TYPE DE VEHICULE ET MOTORISATION POUR QUELQUES POLLUANTS EN 2018 – CHAMP : FRANCE METROPOLITAINE - SOURCE [2] 6

FIGURE 3 : ANALYSE DE DECOMPOSITION DES EMISSIONS DE CO_2 DES CAMIONS DANS L'UE-27, 2000-2019 - CONTRIBUTION EN POURCENTAGE DE DIFFERENTS FACTEURS. SOURCES : [3][4] 7

FIGURE 4 : OBJECTIFS DE DECARBONATION DU TRANSPORT ROUTIER NATIONAL. SOURCE : SYNTHESE SNBC 2 [5] 8

FIGURE 5 : SOURCE : FEUILLE DE ROUTE TLF « QUELLE TRANSITION ENERGETIQUE POUR LE TRANSPORT ROUTIER DE MARCHANDISE ? » [10] 9

FIGURE 6 : « PRINCIPAUX AVANTAGES (EN VERT) ET INCONVENIENTS OU FREINS (EN ORANGE) DES DIFFERENTES OPTIONS DE DECARBONATION POUR LES POIDS LOURDS SUR LONGUE DISTANCE, DE MANIERE QUALITATIVE », [9] 10

FIGURE 7 : TERRITOIRES ZFE EFFECTIFS (GAUCHE) ET TERRITOIRES DE VIGILANCE (DROITE) [51] 19

FIGURE 8 : DISPOSITIF CEMS MIS EN ŒUVRE LORS DES CAMPAGNES DE CAPTATION D'USAGES DES VEHICULES 22

FIGURE 9 : ILLUSTRATION DES CYCLES DE CONDUITE REPRODUITS EN LABORATOIRE ET DE L'INSTRUMENTATION UTILISEE 23

FIGURE 10 : ILLUSTRATION DES TYPES DE ROULAGES REALISES SUR ROUTES OUVERTES A LA CIRCULATION 24

FIGURE 11 : REPARTITION DES IMMATRICULATIONS DE N3 ENTRE 01/2020 ET 10/2022, PAR TYPE D'ENERGIE (A GAUCHE), PAR GENRE (AU CENTRE) ET PAR MARQUE (A DROITE) 25

FIGURE 12 : ÉVOLUTION DES IMMATRICULATIONS DE VEHICULES N3 PAR TYPE D'ENERGIE ENTRE 2020 ET 2022 25

FIGURE 13 : REPARTITION DES IMMATRICULATIONS DE N2 ENTRE 01/2020 ET 10/2022, PAR TYPE D'ENERGIE (A GAUCHE), PAR GENRE (AU CENTRE) ET PAR MARQUE (A DROITE) 26

FIGURE 14 : ÉVOLUTION DES IMMATRICULATIONS DE VEHICULES N3 PAR TYPE D'ENERGIE ENTRE 2020 ET 2022 26

FIGURE 15 : REPARTITION DES IMMATRICULATIONS DE M3 ENTRE 01/2020 ET 10/2022, PAR TYPE D'ENERGIE (A GAUCHE), PAR GENRE (AU CENTRE) ET PAR MARQUE (A DROITE) 27

FIGURE 16 : ÉVOLUTION DES IMMATRICULATIONS DE VEHICULES M3 PAR TYPE D'ENERGIE ENTRE 2020 ET 2022 27

FIGURE 17 : COMPARAISONS REALISEE - SYNOPTIQUE 30

FIGURE 18 : PUISSANCE ECU AU RALENTI DANS LES CAS 2 (GAUCHE) ET CAS 3 OU CAS 4 (DROITE) SUR CYCLE URBAN DELIVERY 31

FIGURE 19 : VALIDATION DES DONNEE ENERGETIQUES : REPRESENTATION DE L'ENSEMBLE DES ESSAIS REALISES 32

FIGURE 20 : METHODOLOGIE DE VALIDATION DES DONNEES ENERGETIQUES ECU : SYNOPTIQUE 32

FIGURE 21 : RECALAGE TEMPOREL DES DONNEES POUR LES ESSAIS AU BANC DE CHARGE 33

FIGURE 22 : RECALAGE TEMPOREL DES DONNEES POUR LES ESSAIS SUR ROUTE 33

FIGURE 23 : EXEMPLE DE FIGURE D'ANALYSE DES EMISSIONS 34

FIGURE 24 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 35

FIGURE 25 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE GES 36

FIGURE 26 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – ÉMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x 37

FIGURE 27 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{10} 37

FIGURE 28 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NH_3 38

FIGURE 29 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 40

FIGURE 30 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – ÉMISSIONS SPECIFIQUES DE GES 40

FIGURE 31 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x 41

FIGURE 32 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO 41

FIGURE 33 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – ÉMISSIONS SPECIFIQUES DE THC 42

FIGURE 34 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – ÉMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{10} 43

FIGURE 35 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – ÉMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 45

FIGURE 36 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – ÉMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 (GAUCHE) ET CALCUL THEORIQUE (DROITE) AVEC REFERENCE = B7 45

FIGURE 37 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – ÉMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x 46

FIGURE 38 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – ÉMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 47

FIGURE 39 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – ÉMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x 47

FIGURE 40 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – ÉMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{10} 48
FIGURE 41 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 49
FIGURE 42 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NH_3 50
FIGURE 43 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{10} 50
FIGURE 44 : DIESEL PHEV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE) .. 51
FIGURE 45 : DIESEL PHEV – COMPROMIS CO_2 VS NO_x – CYCLE URBAN DELIVERY – TAMB = 23°C 52
FIGURE 46 : DIESEL PHEV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE) .. 52
FIGURE 47 : DIESEL PHEV – ÉMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{10} EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE) . 53
FIGURE 48: (A) DISTRIBUTION DES EMISSIONS DE NO_x PAR VEHICULE. 57
FIGURE 49: CONTRIBUTION DES EMISSIONS NO_x (ANNEAU EXTERIEUR), REPARTITION DES CATEGORIES DE ROULAGE EN FONCTION DU TEMPS (ANNEAU CENTRAL) ET EN FONCTION DE LA DISTANCE TOTALE (ANNEAU INTERIEUR) PAR CARBURANT. 58
FIGURE 50: DISTRIBUTION DES EMISSIONS INSTANTANEES CORRELEES A LA TEMPERATURE POST-TRAITEMENT. L'AIRE REPRESENTE L'ECART INTERQUARTILE (25^E A 75^E PERCENTILES). 59
FIGURE 51: DISTRIBUTION DES EMISSIONS DE NO_x PAR VEHICULE POUR LES TRAJETS SUPERIEURS A 19 KM PARCOURUS. 60
FIGURE 52: COMPARAISON DE LA DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE A LA SORTIE DU POST-TRAITEMENT ENTRE LES ESSAIS CEMS ET LABORATOIRES, μ=VALEUR MOYENNE 61
FIGURE 53: COMPARAISON DE L'IMPACT DE VITESSE MOYENNE SUR LE NIVEAU D'EMISSIONS A CHAUD EN USAGE REEL PAR TRAJET COMPLET ET PAR TYPE DE ZONE CONTRE L'ETAT DE L'ART COPERT A 0% ET 100% DE CHARGE POUR LA CATEGORIE POIDS LOURDS DIESEL ARTICULES 40 -50 T. 62
FIGURE 54 : COMPARAISON A L'HOMOLOGATION – CO_2 63
FIGURE 55 : COMPARAISON A L'HOMOLOGATION – NO_x 64
FIGURE 56 : COMPARAISON A L'HOMOLOGATION – PARTICULES 64
FIGURE 57 : COMPARAISON AUX SEUILS NORMATIFS – NO_x 65
FIGURE 58 : COMPARAISON AUX SEUILS NORMATIFS – PN_{10} 66
FIGURE 59 : EFFET DU TRAITEMENT NORMATIF – CO – TOUTE DONNEE LABORATOIRE VALIDEE EST PRISE EN COMPTE 68
FIGURE 60 : EFFET DU TRAITEMENT NORMATIF – NO_x – TOUTE DONNEE LABORATOIRE VALIDEE EST PRISE EN COMPTE 68
FIGURE 61 : EFFET DE LA PHASE – CO – TOUT ESSAI LABORATOIRE VALIDE EST PRIS EN COMPTE 69
FIGURE 62 : EFFET DE LA PHASE – NO_x – TOUT ESSAI LABORATOIRE VALIDE EST PRIS EN COMPTE 69
FIGURE 63 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – CO – TOUT ESSAI LABORATOIRE VALIDE EST PRIS EN COMPTE 70
FIGURE 64 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – CH_4 – TOUT ESSAI LABORATOIRE VALIDE EST PRIS EN COMPTE 71
FIGURE 65 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – NO_x – TOUT ESSAI LABORATOIRE VALIDE EST PRIS EN COMPTE 71
FIGURE 66 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – FROID VS CHAUD – CO – TOUT ESSAI LABORATOIRE VALIDE POSSEDANT UNE PHASE FROIDE EST PRIS EN COMPTE 72
FIGURE 67 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – FROID VS CHAUD – NO_x – TOUT ESSAI LABORATOIRE VALIDE POSSEDANT UNE PHASE FROIDE EST PRIS EN COMPTE 72
FIGURE 68 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – FROID VS CHAUD – CH_4 – TOUT ESSAI LABORATOIRE VALIDE POSSEDANT UNE PHASE FROIDE EST PRIS EN COMPTE 72
FIGURE 69 : EMISSIONS DE PARTICULES EXPRIMEES EN NOMBRE (PN_{23} SELON NORME EURO VI ET PN_{10} SELON NORME EURO 7) 74
FIGURE 70 : ILLUSTRATION DES FILIERES ENERGETIQUES A UN NIVEAU DE MATURITE INTERMEDIAIRE OU FAIBLE REPONDANT AU BESOIN DE PRODUCTION DE CARBURANTS A USAGE MOTEUR A ALLUMAGE PAR COMPRESSION [57] 77
FIGURE 71 : POTENTIEL DE PRODUCTION THEORIQUE DE DISTILLATS MOYENS EN 2030 POUR DIFFERENTES FILIERES ENERGETIQUES A PARTIR DES RESSOURCES LISTEES DANS LA RED II/2018 ANNEXE IX PARTIES A ET B. LES COLONNES NE PEUVENT GENERALEMENT PAS ETRE AJOUTEES LES UNES AUX AUTRES COMPTE TENU DU FAIT QU'ELLES S'APPUIENT SUR LES MEMES RESSOURCES. 80
FIGURE 72 : PROJETS DE DEVELOPPEMENT DE CARBURANTS AERONAUTIQUES DURABLES EN EUROPE (EASA [61], 2022) 81
FIGURE 73 : PROJETS DE DEVELOPPEMENT DE CARBURANTS AERONAUTIQUES DURABLES EN FRANCE (COMMUNICATIONS ANTERIEURES A 2024). 81
FIGURE 74 : ILLUSTRATION DU SCENARIO DE DECARBONATION DU SECTEUR AERIEN EN FRANCE SELON L'HYPOTHESE « ACCELERATION » (HAUT) ET OBJECTIFS D'INCORPORATION DE CARBURANTS BIOGENIQUES ET SYNTHETIQUES SELON LE REGLEMENT REFUEL EU AVIATION (BAS). 82
FIGURE 75 : FACTEURS D'EMISSIONS WTW DES CARBURANTS "DIESEL-LIKE" 84
FIGURE 76 : FACTEURS D'EMISSIONS WTW DES CARBURANTS GAZEUX 85
FIGURE 77 : EVALUATION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE SUR LE CYCLE DE VIE COMPLET POUR UN LONG-ROUTIER 44T SELON LES TECHNOLOGIES ET VECTEURS ENERGETIQUES RETENUS. SOURCE : OUTIL « HDV CO_2 COMPARATOR » HTTPS://HDVCO2COMPARATOR.EU/ 87

FIGURE 78 : EXEMPLE D'EVALUATION DES COUTS TOTAUX D'USAGES ET DES EMISSIONS DE GES POUR UN VEHICULE 12T SUR UN USAGE URBAIN, 10 ANS DE DUREE DE VIE, 50 000 KM ANNUELS, SOURCE : OUTIL "VERDIR MA FLOTTE" 89
FIGURE 79 : EXEMPLE D'EVALUATION DES COUTS TOTAUX D'USAGES ET DES EMISSIONS DE GES POUR UN VEHICULE 44T SUR UN USAGE PRINCIPALEMENT AUTOROUTIER, 10 ANS DE DUREE DE VIE, 200 000 KM ANNUELS, SOURCE : OUTIL "VERDIR MA FLOTTE".... 89
FIGURE 80 : COMPARAISON ILLUSTRATIVE ENTRE LE MODELE ET LA MESURE DES EMISSIONS CO_2. 93
FIGURE 81 : COMPARAISON ILLUSTRATIVE ENTRE LE MODELE ET LA MESURE DES EMISSIONS NO_x SORTIE MOTEUR 94
FIGURE 82 : (A) COMPARAISON ILLUSTRATIVE ENTRE LE MODELE ET LA MESURE DES EMISSIONS CO SORTIE MOTEUR ET CARTOGRAPHIE APPRISE, (B) COMPARAISON ILLUSTRATIVE ENTRE LE MODELE ET LA MESURE DES EMISSIONS HC SORTIE MOTEUR ET CARTOGRAPHIE APPRISE94
FIGURE 83 : COMPARAISON ILLUSTRATIVE ENTRE LE MODELE ET LA MESURE DES EMISSIONS SORTIE-ECHAPPEMENT..... 95
FIGURE 84 : COMPARAISON DU MODELE CONTRE LA MESURE DES EMISSIONS CUMULEES SORTIE POST-TRAITEMENT DANS UN PLOT DE PARITE AVEC UNE DENSITE HEXAGONALE. 96
FIGURE 85 : EXEMPLE D'AFFICHAGE DISPONIBLE SUR R-TAMS. 98
FIGURE 86 : STRUCTURATION DE L'ETUDE 109
FIGURE 87 : MACRO-PLANNING DE DEROULEMENT DE L'ETUDE..... 109
FIGURE 88 : REPARTITIONS DES EMISSIONS DE NO_x – SIX MOIS DE DONNEES 111
FIGURE 89 : N2 GN OEM#1 – SYNTHESE DES EMISSIONS MESUREES..... 122
FIGURE 90 : N2 GO OEM#1 – SYNTHESE DES EMISSIONS MESUREES..... 122
FIGURE 91 : N3 GO OEM#3 – SYNTHESE DES EMISSIONS MESUREES..... 123
FIGURE 92 : N3 GO B1 OEM#3 – SYNTHESE DES EMISSIONS MESUREES..... 123
FIGURE 93 : N3 GO OEM#2 – SYNTHESE DES EMISSIONS MESUREES..... 124
FIGURE 94 : N3 GN OEM#2 – SYNTHESE DES EMISSIONS MESUREES..... 124
FIGURE 95 : N3 GO PHEV OEM#2 – SYNTHESE DES EMISSIONS MESUREES 125
FIGURE 96 : N3 DF OEM#4 – SYNTHESE DES EMISSIONS MESUREES..... 125
FIGURE 97 : BUS GN OEM#1 – SYNTHESE DES EMISSIONS MESUREES..... 126
FIGURE 98 : BUS GN HEV OEM#1 – SYNTHESE DES EMISSIONS MESUREES 126
FIGURE 99 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – COMPROMIS NO_x VS CO_2 – ISC – TAMB = 23°C..... 127
FIGURE 100 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – COMPROMIS NO_x VS CO_2 – URBAN DELIVERY – TAMB = 23°C..... 128
FIGURE 101 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2..... 128
FIGURE 102 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CH_4..... 129
FIGURE 103 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE N_2O 129
FIGURE 104 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE GES 130
FIGURE 105 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x 130
FIGURE 106 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x EN SORTIE MOTEUR (EO) 131
FIGURE 107 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO..... 131
FIGURE 108 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE THC..... 132
FIGURE 109 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NH_3 132
FIGURE 110 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{23} 133
FIGURE 111 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{23} EN SORTIE MOTEUR (EO) 133
FIGURE 112 : COMPARAISON DIESEL VS GNV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{10} 134
FIGURE 113 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – COMPROMIS NO_x VS CO_2 – ISC 50% – TAMB = 23°C 135
FIGURE 114 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – COMPROMIS NO_x VS CO_2 – URBAN DELIVERY – TAMB = 23°C.... 135
FIGURE 115 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – ENERGIE TOTALE A LA ROUE 136
FIGURE 116 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2..... 137
FIGURE 117 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CH_4..... 137
FIGURE 118 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE N_2O 138
FIGURE 119 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE GES 138
FIGURE 120 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x..... 139
FIGURE 121 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x EN SORTIE MOTEUR (EO) 139
FIGURE 122 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO 140
FIGURE 123 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO EN SORTIE MOTEUR (EO)..... 140

FIGURE 124 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE THC 141
FIGURE 125 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE THC EN SORTIE MOTEUR (EO) 141
FIGURE 126 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EFFICACITE DE POST-TRAITEMENT DES THC 142
FIGURE 127 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NH_3 142
FIGURE 128 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{23} 143
FIGURE 129 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{23} EN SORTIE MOTEUR (EO) 143
FIGURE 130 : COMPARAISON DIESEL VS GNV VS DUAL FUEL – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{10} 144
FIGURE 131 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – COMPROMIS NO_x VS CO_2 – ISC 145
FIGURE 132 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – COMPROMIS NO_x VS CO_2 – URBAN DELIVERY – TAMB = 23°C 145
FIGURE 133 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 146
FIGURE 134 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 (GAUCHE) ET CALCUL THEORIQUE (DROITE) AVEC REFERENCE = B7 146
FIGURE 135 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x 147
FIGURE 136 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x EN SORTIE MOTEUR (EO) 147
FIGURE 137 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CH_4 148
FIGURE 138 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE N_2O 148
FIGURE 139 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO 149
FIGURE 140 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO EN SORTIE MOTEUR (EO) 149
FIGURE 141 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE THC 150
FIGURE 142 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE THC EN SORTIE MOTEUR (EO) 150
FIGURE 143 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NH_3 151
FIGURE 144 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{23} 151
FIGURE 145 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{23} EN SORTIE MOTEUR (EO) 152
FIGURE 146 : ANALYSE DE L'EFFET DES BIODIESELS – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{10} 152
FIGURE 147 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – COMPROMIS NO_x VS CO_2 – ISC TAMB = 23°C 153
FIGURE 148 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – COMPROMIS NO_x VS CO_2 – URBAN DELIVERY TAMB = 23°C 153
FIGURE 149 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 154
FIGURE 150 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CH_4 154
FIGURE 151 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – EMISSIONS SPECIFIQUES DE N_2O 155
FIGURE 152 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x 155
FIGURE 153 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO 156
FIGURE 154 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – EMISSIONS SPECIFIQUES DE THC 156
FIGURE 155 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NH_3 157
FIGURE 156 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{23} 157
FIGURE 157 : COMPARAISON B100 VS B100 EXCLUSIF – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{10} 158
FIGURE 158 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – COMPROMIS NO_x VS CO_2 – ISC TAMB = 23°C 159
FIGURE 159 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – COMPROMIS NO_x VS CO_2 – URBAN DELIVERY TAMB = 23°C 159
FIGURE 160 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 159
FIGURE 161 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CH_4 160
FIGURE 162 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CH_4 EN SORTIE MOTEUR (GAUCHE) ET EFFICACITE DE POST-TRAITEMENT (DROITE) 160
FIGURE 163 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE N_2O 161
FIGURE 164 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE GES 161
FIGURE 165 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x 162
FIGURE 166 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EFFICACITE DE POST-TRAITEMENT DES NO_x 162
FIGURE 167 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO 163
FIGURE 168 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO EN SORTIE MOTEUR (GAUCHE) ET EFFICACITE DE POST-TRAITEMENT (DROITE) 163
FIGURE 169 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE THC 164

FIGURE 170 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE THC EN SORTIE MOTEUR (GAUCHE) ET EFFICACITE DE POST-TRAITEMENT (DROITE) 164
FIGURE 171 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NH_3 165
FIGURE 172 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{23} 165
FIGURE 173 : COMPARAISON TCP CNG VS CNG HYBRIDE – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{10} 166
FIGURE 174 : DIESEL PHEV – COMPROMIS CO_2 VS NO_x – CYCLE URBAN DELIVERY – TAMB = 23°C 167
FIGURE 175 : DIESEL PHEV – ENERGIE TOTALE (THERMIQUE + ELECTRIQUE) A LA ROUE (GAUCHE) ET AU VILEBREQUIN (DROITE) .. 167
FIGURE 176 : DIESEL PHEV – ENERGIE THERMIQUE (GAUCHE) ET ELECTRIQUE (DROITE) 168
FIGURE 177 : DIESEL PHEV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO_2 EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE)168
FIGURE 178 : DIESEL PHEV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE N_2O EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE)169
FIGURE 179 : DIESEL PHEV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NO_x EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE)169
FIGURE 180 : DIESEL PHEV – EFFICACITE DE POST-TRAITEMENT DES NO_x 170
FIGURE 181 : DIESEL PHEV – EVOLUTION TEMPORELLE DES EMISSIONS DE NO_x (GAUCHE) ET DE LA TEMPERATURE AMONT SYSTEME DE POST-TRAITEMENT (DROITE) – CYCLE URBAN DELIVERY 50% – EPUISEMENT DE CHARGE 170
FIGURE 182 : DIESEL PHEV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CH_4 EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE)170
FIGURE 183 : DIESEL PHEV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE CO EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE) 171
FIGURE 184 : DIESEL PHEV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE THC EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE)171
FIGURE 185 : DIESEL PHEV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE NH_3 EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE)171
FIGURE 186 : DIESEL PHEV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{23} EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE)172
FIGURE 187 : DIESEL PHEV – EMISSIONS SPECIFIQUES DE PN_{10} EN FONCTION DE LA DISTANCE (GAUCHE) ET DE L'ENERGIE (DROITE)172
FIGURE 188 : EFFET DE LA PHASE – CO_2 173
FIGURE 189 : EFFET DE LA PHASE – CO 174
FIGURE 190 : EFFET DE LA PHASE – THC 174
FIGURE 191 : EFFET DE LA PHASE – CH_4 175
FIGURE 192 : EFFET DE LA PHASE – NO_x 175
FIGURE 193 : EFFET DE LA PHASE – NH_3 176
FIGURE 194 : EFFET DE LA PHASE – PN_{23} 176
FIGURE 195 : EFFET DE LA PHASE – PN_{10} 177
FIGURE 196 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – CO 178
FIGURE 197 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – FROID VS CHAUD – CO 178
FIGURE 198 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – THC 179
FIGURE 199 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – FROID VS CHAUD – THC 180
FIGURE 200 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – CH_4 181
FIGURE 201 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – FROID VS CHAUD – CH_4 181
FIGURE 202 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – NO_x 182
FIGURE 203 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – FROID VS CHAUD – NO_x 183
FIGURE 204 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – PN_{23} 184
FIGURE 205 : EFFICACITE DES SYSTEMES DE DEPOLLUTION – FROID VS CHAUD – PN_{23} 185
FIGURE 206: EXEMPLE D'UN TRAJET EN "MANŒUVRE" QUI REPRESENTE 10% DES MESURES. 187
FIGURE 207: DISTRIBUTION DE LA DISTANCE PARCOURUE (ANNEAU INTERNE) ET DU TEMPS PASSE (ANNEAU EXTERNE) PAR TYPE DE ROUTE. 188
FIGURE 208: VITESSE MOYENNE PAR TYPE DE ROUTE POUR CHAQUE TRAJET MESURE 188
FIGURE 209: PENTE MOYENNE PAR TYPE DE ROUTE POUR CHAQUE TRAJET MESURE. 189
FIGURE 210: DISTRIBUTION DE L'ALTITUDE DE L'ENSEMBLE DE TRAJETS MESURES. 189
FIGURE 211: (A) DISTRIBUTION DES EMISSIONS DE NO_x PAR VEHICULE. 191
FIGURE 212: EMISSIONS MOYENNES CUMULEES EN FONCTION DE LA DISTANCE TOTALE PARCOURUE DU TRAJET. 191
FIGURE 213: POURCENTAGE DU TEMPS A L'ARRET EN FONCTION DE LA DISTANCE TOTALE PARCOURUE. 192
FIGURE 214: CONTRIBUTION DES EMISSIONS CUMULEES PAR DISTANCE TOTALE PARCOURUE. 193
FIGURE 215: CONTRIBUTION DES EMISSIONS NO_x (ANNEAU EXTERIEUR) ET FREQUENCE D'OCCURRENCE EN TEMPS (ANNEAU CENTRALE) ET EN DISTANCE TOTALE (ANNEAU INTERIEUR) PAR CARBURANT. 194

FIGURE 216 : VARIATION DES EMISSIONS A CHAUD (TEMPERATURE POST-TRAITEMENT > 100°C) MOYENNES PAR TYPE DE CARBURANT EN FONCTION DE LA VITESSE MOYENNE EN USAGE REEL. 195
FIGURE 217: EMISSIONS MOYENNES INSTANTANEES PAR NIVEAU DE PENTE. 196
FIGURE 218: DISTRIBUTION DES EMISSIONS INSTANTANEES CORRELEES A LA TEMPERATURE POST-TRAITEMENT. L'AIRE REPRESENTE L'ECART INTERQUARTILE (25E A 75E PERCENTILES). 198
FIGURE 219: DISTRIBUTION DES EMISSIONS DE NO_x (CEMS, BANC A ROULEAUX ET ESSAIS SUR ROUTE) PAR VEHICULE. 200
FIGURE 220: DISTRIBUTION DES EMISSIONS DE NO_x PAR VEHICULE POUR LES TRAJETS SUPERIEURS A 19 KM PARCOURUS. 201
FIGURE 221: COMPARAISON DE LA DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE A LA SORTIE DU POST-TRAITEMENT ENTRE LES ESSAIS EXPERIMENTAUX ET LE BANC A ROULEAUX. 202
FIGURE 222: CORRELATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA VITESSE EN USAGE REEL PAR PERCENTILES. L'AIRE REPRESENTE L'ECART INTERQUARTILE (25E A 75E PERCENTILES), LA LIGNE POINTILLEE INDIQUE LE 5E PERCENTILE DES TEMPERATURES LES PLUS BASSES.203
FIGURE 223 : (A) DISTRIBUTIONS DES EMISSIONS A CHAUD SUR LA TOTALITE DE CHAQUE TRAJET PAR SOURCE EN ECHELLE LOGARITHMIQUE. 204
FIGURE 224: COMPARAISON DE L'IMPACT DE VITESSE MOYENNE SUR LE NIVEAU D'EMISSIONS A CHAUD EN USAGE REEL PAR TRAJET COMPLET ET PAR TYPE DE ZONE CONTRE L'ETAT DE L'ART COPERT A 0% ET 100% DE CHARGE POUR LA CATEGORIE POIDS LOURDS DIESEL ARTICULES 40 -50 T 205
FIGURE 225 : COMPARAISON AUX SEUILS NORMATIFS – CO 206
FIGURE 226 : COMPARAISON AUX SEUILS NORMATIFS – THC 207
FIGURE 227 : COMPARAISON AUX SEUILS NORMATIFS – CH_4 207
FIGURE 228 : COMPARAISON AUX SEUILS NORMATIFS – NO_x 208
FIGURE 229 : COMPARAISON AUX SEUILS NORMATIFS – NH_3 208
FIGURE 230 : COMPARAISON AUX SEUILS NORMATIFS – N_2O 209
FIGURE 231 : COMPARAISON AUX SEUILS NORMATIFS – PN_{10} 209

14. Table des tableaux

TABLEAU 1 : SYNTHESE DE LA BIBLIOGRAPHIE SUR LES ETUDES COUVRANT LE PERIMETRE DES POIDS LOURD ET DE LEURS EMISSIONS .. 13
TABLEAU 2 : DESCRIPTION DES CATEGORIES DE VEHICULES DE TRANSPORTS DE PASSAGERS OU DE BIENS EN EUROPE [47] 14
TABLEAU 3 : COMPARAISON DES STEPS A A E DE LA NORME EURO VI [27][28] 15
TABLEAU 4 : COMPARAISON EURO VI ET EURO 7 [38] 17
TABLEAU 5 : CLASSIFICATION DES VEHICULES DE CATEGORIES M2, M3, N2, N3 SELON VIGNETTE CRIT'AIR (CERTIFICATS QUALITE DE L'AIR) [49] 18
TABLEAU 6 : SYNTHESE PAR VEHICULE DE LA SOURCE D'ENERGIE CONSIDEREE ET DE LA CLASSIFICATION QUALITE DE L'AIR ASSOCIEE (HTTPS://WWW.LEGIFRANCE.GOUV.FR/LODA/ID/LEGIARTI000049860492/2024-06-30/ 18
TABLEAU 7 : DETAILS DES CYCLES DE CONDUITE REPRODUITS EN LABORATOIRE 23
TABLEAU 8 : MATRICE D'ESSAIS 23
TABLEAU 9 : MASSE EMBARQUEE ET POURCENTAGE DE CHARGE UTILE DES VEHICULES LORS DES ESSAIS ROUTIERS ISC..... 23
TABLEAU 10 : CARACTERISTIQUES DES VEHICULES TESTES..... 28
TABLEAU 11 : CARBURANTS TESTES SELON LE VEHICULE..... 28
TABLEAU 12 : CARACTERISTIQUES DES CARBURANTS TESTES 29
TABLEAU 13 : SYNTHESE DES COMPARAISONS REALISEES..... 29
TABLEAU 14 : CAS DE VALIDATION DES DONNEES ENERGETIQUES ECU 31
TABLEAU 15: DESCRIPTEURS MACROSCOPIQUES DE L'USAGE REEL POUR CHAQUE VEHICULE. 55
TABLEAU 16: DESCRIPTEURS MACROSCOPIQUES DE L'USAGE REEL PAR SEGMENT DU VEHICULE. 56
TABLEAU 17: REPARTITION DU TEMPS, DE LA DISTANCE ET DES EMISSIONS EN FONCTION DE LA DISTANCE TOTALE PARCOURUE POUR CHAQUE TRAJET PAR CARBURANT. 57
TABLEAU 18: REPARTITION DU TEMPS, DE LA DISTANCE ET DES EMISSIONS EN FONCTION DU NIVEAU DE PENTE PAR CARBURANT. 58
TABLEAU 19 : CAPACITES DE PRODUCTION POUR LES PRINCIPAUX CARBURANTS BAS CARBONE DISPONIBLES EN FRANCE, UE ET DANS LE MONDE (IHS / S&P GLOBAL)..... 79
TABLEAU 20 : SYNTHESE DES DEFIS TECHNIQUES, ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DES TECHNOLOGIES/VECTEURS ENERGETIQUES 90
TABLEAU 21 : EMISSIONS MOYENNES ET ECART TYPE SUR LES ESSAIS DE VALIDATION DU MODELE..... 97
TABLEAU 22 : AVL AMA I60 (VOIE AMONT EATS) : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES [..]..... 116
TABLEAU 23 : AVL AMA I60 (VOIE AVAL EATS) : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES [..] 116
TABLEAU 24 : HORIBA QCL (AVAL EATS) : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES [..]..... 116
TABLEAU 25 : HORIBA FTIR (AVAL EATS) : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES ET LIBRAIRIE « DIESEL » [..]..... 117
TABLEAU 26 : HORIBA FTIR (AVAL EATS) : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES ET LIBRAIRIE « CNG » [..]..... 118
TABLEAU 27 : AVL APC+ (AMONT EATS) : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES [..]..... 118
TABLEAU 28 : AVL APC+ (AVAL EATS) : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES [..] 118
TABLEAU 29 : HORIBA SPCS (AVAL EATS) : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES [..] 119
TABLEAU 30 : SYNTHESE DES CONDITIONS DE DILUTION UTILISEES POUR LES SYSTEMES DE COMPTAGE DE PARTICULES PN_{23} ET PN_{10}119
TABLEAU 31 : HORIBA OBS-ONE (AVAL EATS) : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES [..] 120
TABLEAU 32 : HORIBA OBS-ONE (AVAL EATS) : PRINCIPALES DIFFERENCES DE CONFIGURATION ENTRE VEHICULES..... 121
TABLEAU 33: DESCRIPTEURS MACROSCOPIQUES DE L'USAGE REEL POUR CHAQUE VEHICULE. 187
TABLEAU 34: DESCRIPTEURS MACROSCOPIQUES DE L'USAGE REEL PAR SEGMENT DU VEHICULE. 189
TABLEAU 35: REPARTITION DU TEMPS, DE LA DISTANCE ET DES EMISSIONS EN FONCTION DE LA DISTANCE TOTALE PARCOURUE POUR CHAQUE TRAJET PAR CARBURANT. 193
TABLEAU 36: REPARTITION DU TEMPS, DE LA DISTANCE ET DES EMISSIONS EN FONCTION DE LA VITESSE LIMITE PAR CARBURANT. ... 195
TABLEAU 37: REPARTITION DU TEMPS, DE LA DISTANCE ET DES EMISSIONS EN FONCTION DU NIVEAU DE PENTE PAR CARBURANT. ... 196
TABLEAU 38: REPARTITION DU TEMPS, DE LA DISTANCE ET DES EMISSIONS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POST-TRAITEMENT PAR CARBURANT. 198
TABLEAU 39: REPARTITION DU TEMPS, DE LA DISTANCE ET DES EMISSIONS EN FONCTION DU POURCENTAGE DE LA PUISSANCE DEMANDEE AU MOTEUR PAR CARBURANT. 199
TABLEAU 40 : EMISSIONS MEDIANES ENTRE LES ESSAIS EN USAGE REEL ET LES ESSAIS EXPERIMENTAUX POUR LES TRAJETS SUPERIEURS A 19 KM PARCOURUS..... 201

TABLEAU 41: ASSOCIATION D'UN VEHICULE TESTE AVEC L'ETAT DE L'ART COPERT 204