



**HAL**  
open science

## **CAractérisation des Particules des VEhicules Récents et leur Évolution Atmosphérique (CaPVeREA) - Facteurs d'émission des Îhicules Euro 6**

Yao Liu, Simon Martinet, Cédric Louis, Michel Andre, Patrick Tassel, Pascal Perret, Alvaro-Martinez Valiente, Barbara d'Anna

► **To cite this version:**

Yao Liu, Simon Martinet, Cédric Louis, Michel Andre, Patrick Tassel, et al.. CAractérisation des Particules des VEhicules Récents et leur Évolution Atmosphérique (CaPVeREA) - Facteurs d'émission des Îhicules Euro 6. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2017, 34 p. hal-01574966

**HAL Id: hal-01574966**

**<https://hal.science/hal-01574966v1>**

Submitted on 17 Aug 2017

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

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



**IFSTTAR**

INSTITUT FRANÇAIS

DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS,

DE L'AMÉNAGEMENT ET DES RÉSEAUX



# ***CAractérisation des Particules des VEhicules Récents et leur Évolution Atmosphérique (CaPVeREA)***

***- Facteurs d'émission des véhicules Euro 6***

**Livrable L2**

Projet CORTEA - CaPVeREA, convention : 1466C0001

Par :

Yao LIU, Simon MARTINET, Cédric LOUIS, Michel ANDRÉ, Patrick  
TASSEL, Pascal PERRET, Alvaro-Martinez VALIENTE, Barbara  
D'ANNA

*Rapport IFSTTAR-LTE et IRCELYON*

*Février 2017*



# IFSTTAR

INSTITUT FRANÇAIS

DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS,

DE L'AMÉNAGEMENT ET DES RÉSEAUX



Auteurs :

Yao LIU, Chargée de recherche

Simon MARTINET, Doctorant

Cédric LOUIS, Doctorant

Michel ANDRÉ, Directeur de recherche

Patrick TASSEL, Ingénieur d'étude

Pascal PERRET, Assistant ingénieur

Transports et Pollution de l'Air

IFSTTAR, Laboratoire Transports et Environnement

Barbara D'ANNA, Directeur de Recherche CNRS

Alvaro Martinez Valiente, Doctorant

IRCELYON (Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon)

## Fiche bibliographique

1 UR (1 <sup>er</sup> auteur) IFSTTAR-LTE et IRCELYON		2 Projet n° 1466C0001		3 Rapport INRETS n° Rapport IFSTTAR-LTE	
4 Titre CAractérisation des Particules des VEhicules Récents et <i>leur Évolution Atmosphérique (CaPVeREA)</i>					
5 Sous-titre Facteurs d'émission des véhicules Euro 6				6 Langue F	
7 Auteur(s) Yao LIU, Simon MARTINET, Cédric LOUIS, Michel ANDRÉ, Patrick TASSEL, Pascal PERRET, Alvaro-Martinez VALIENTE, Barbara D'ANNA				8 Rattachement ext.	
9 Nom adresse financeur, co-éditeur ADEME				10 N° contrats, conv. 1466C0001	
				11 Date de publication <i>Février 2017</i>	
12 Remarques					
13 Résumé Dans le cadre du projet CaPVeREA, nous proposons d'améliorer des connaissances sur les facteurs d'émission des véhicules Euro 6 essence et Diesel. Les facteurs d'émission des composés règlementés et non-règlementés des deux véhicules testés ont été mesurés avec les cycles Artémis urbain avec le démarrage à froid et à chaud, routier et autoroutier, les cycles homologués NEDC et WLTC. Le démarrage à froid en urbain a induit une sur-émission de PN (nombre de particules), BC (carbone-suie), BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes) et formaldéhyde et une sous-émission de NOx par rapport au démarrage à chaud. Pour le véhicule essence avec un moteur en propulsion, l'émission du CO atteint à $2.7 \cdot 10^4$ mg/km pour le cycle Artémis autoroutier. Ceci pourrait être expliqué par la haute température du gaz d'échappement (environ 600 °C) à haute vitesse en induisant une diminution du temps de combustion. Enfin, les mesures du FTIR montrent des données fiables pour des mesures en-ligne en comparant avec celles de la baie d'analyse. Cependant, quelques modifications sur le paramétrage et sur le montage expérimental seront réalisées pour mieux quantifier les composés proches de leur limite de quantification basse.					
14 Mots clés Véhicule Euro 6, facteur d'émission, composés règlementés et non-règlementés, Diesel, essence, moteur en propulsion			15 Diffusion Libre après publications sur journaux scientifiques		
16 Nombre de pages 34 pages		17 Prix	18 Confidentiel jusqu'au		19 Bibliographie oui

## Publication data form

1 UR (1st author) LTE-IFSTTAR and IRCELYON	2 Project n° 1466C0001	3 INRETS report n° Rapport IFSTTAR-LTE	
4 Title Particle characterization of recent vehicles and their atmospheric evolution			
5 Subtitle Emission factors of tested Euro 6 vehicles		6 Language F	
7 Author(s) Yao LIU, Simon MARTINET, Cédric LOUIS, Michel ANDRÉ, Patrick TASSEL, Pascal PERRET, Alvaro-Martinez VALIENTE, Barbara D'ANNA		8 Affiliation	
9 Sponsor, co-editor, name and address ADEME		10 Contract, conv. n° 1466C0001	11 Publication date <i>Février 2017</i>
12 Notes			
13 Summary This report aims at improving knowledge on Euro 6 gasoline and Diesel emissions. Emission factors of regulated and unregulated compounds have been measured on a chassis dynamometer bench test on Artemis urban with cold and hot start, road, motorway, NEDC and WLTC cycles. Urban cold start induced an over-emission of PN (particle number), BC (black carbon), BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes) and formaldehyde, and under-emission of NOx comparing to hot start. For gasoline vehicle with propulsion engine, CO emission reached to $2.7 \cdot 10^4$ mg/km under Artemis motorway driving condition that can be explained in part by the high exhaust temperature (600 °C) at high speed inducing a decrease of combustion time. Though, only one propulsion vehicle has been tested in this work. It is difficult to confirm whether this high CO emission behavior is an individual emission event or a systematic behavior, and to provide appropriate CO emission factors under high exhaust temperature with propulsion engine. The FTIR measurements show reliable on-line data comparing to those obtained by Horiba emissions measurement system. However, some modifications on the parameterization and the experimental setup will be carried out to better quantify the compounds for which their emissions are closed to their quantification limit.			
Key-words: Euro 6 vehicles, emission factors, regulated and unregulated compounds, Diesel, gasoline, propulsion engine		15 Distribution statement Free after the authors have been published on reviewed journals	
16 Nb of pages 34 pages	17 Price	18 Declassification date	19 Bibliography yes

---

**Table des matières**

<b>1. Résumé.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Matériels et méthodes .....</b>	<b>8</b>
2.1. Description du banc à rouleau et du système d'échantillonnage .....	8
2.2. Méthodes analytiques .....	8
2.2.1. Mesure en ligne des particules et de carbone-suie .....	8
2.2.2. Mesure en ligne des composés en phase gazeuse .....	9
2.2.3. Analyses chimiques sur prélèvements.....	10
2.3. Caractéristique des véhicules testés .....	11
2.4. Cycles de conduite.....	12
<b>3. Description, résultats et discussion par tâche .....</b>	<b>13</b>
3.1. Autres aspects méthodologiques et tests (Tâche 2b, responsable IFSTTAR) .....	13
3.1.1. Développements spécifiques pour le test sur banc monorouleau des véhicules équipés de système ABS/ESP .....	13
3.1.2. Analyse des carburants .....	13
3.2. Facteurs d'émission des véhicules Euro 6 (Tâche 3, responsable IFSTTAR) .....	14
3.2.1. Méthodes de calcul.....	14
3.2.2. Facteurs d'émission mesurés sur cartouches et avec baie d'analyse.....	15
3.2.2.1. Comparaison des mesures de particules entre CPC, ELPI et FMPS.....	20
3.2.2.2. Émissions des particules, de carbone-suie, des composés azotés et des composés réglementés .....	20
3.2.2.3. Émissions des BTEX, des composés carbonylés et des HAP .....	22
3.2.3. Facteurs d'émission mesurés avec le FTIR .....	23
3.3. Étude de l'évolution physico-chimique des particules et des COV en champ proche (Tâche 4, responsable IRCELYON).....	25
<b>4. Conclusion générale et valorisations scientifiques .....</b>	<b>26</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>27</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>28</b>
<b>Annexe 1. Description détail de l'ELPI .....</b>	<b>28</b>
<b>Annexe 2. Limites de quantification des 25 composés suivis par FTIR.....</b>	<b>30</b>
<b>Annexe 3. Liste complète des composés analysés par TERA-Environnement.....</b>	<b>31</b>

---

<b>Index des Figures.....</b>	<b>32</b>
<b>Index des Tableaux.....</b>	<b>33</b>
<b>Index des Annexes .....</b>	<b>34</b>

---

## 1. RÉSUMÉ

La matière particulaire atmosphérique a des impacts climatiques et sanitaires actuellement bien reconnus (Huang et al., 2009 ; Araujo and Nel, 2009). Ses niveaux de concentrations ne baissent pas proportionnellement aux différentes mesures de réduction à la source de cette dernière et de ses précurseurs (e.g O'Driscoll et al., 2016). Cette constatation montre que les sources de particules atmosphériques ne sont pas aussi bien connues qu'on le croyait. En particulier, les émissions atmosphériques des transports sont de toute évidence mal quantifiées, en raison de leur diversité et d'autre part, de difficultés météorologiques et méthodologiques. Par ailleurs, la formation de particules secondaires via la réactivité atmosphérique des polluants émis par le transport routier est encore plus mal appréhendée. L'évaluation de la contribution des transports routiers aux émissions atmosphériques nécessite une meilleure connaissance des émissions des précurseurs des particules en phase gazeuse et des particules, ainsi que de leur évolution physico-chimique et photochimique dans l'atmosphère.

Dans le cadre du projet CaPVeREA, nous proposons d'améliorer les connaissances sur les facteurs influençant l'émission et l'évolution des particules des véhicules particuliers, ainsi que sur leur évolution avec la formation d'aérosols secondaires dans l'atmosphère.

Ce projet s'articule autour de trois axes principaux :

1. Le premier axe consiste à caractériser l'influence des conditions de prélèvement et de mesure des émissions (taux de dilution et température) sur les particules ultrafines, et de développer un système de mesure adapté permettant une bonne quantification de nombre total de particules émises.
2. Le deuxième axe est centré sur la détermination des facteurs d'émission des polluants réglementés, non réglementés et des particules et ainsi que l'évaluation des impacts des nouvelles technologies des moteurs et des systèmes de dépollution ou post-traitement (véhicules Euro 6 diesel et essence en complément des travaux en cours sur les véhicules Euro 5) sur banc rouleau.
3. Le troisième axe est centré sur des études au laboratoire (tubes à écoulement et chambre de simulation) de l'évolution photochimique des particules ultrafines et des composés organiques volatiles (COV) et semi-volatiles émis lors de la combustion avec identification des précurseurs des particules secondaires. Les expérimentations en laboratoire nous permettront d'évaluer les paramètres clés de la formation de l'AOS et seront effectuées en 2017.

Dans la continuité de livrable L1 qui se focalise sur l'impact de la dilution et de la température sur l'émission des particules et leurs caractérisations. Ce présent rapport se focalise sur les facteurs d'émission des composés règlementés et non règlementés des véhicules Euro 6 (tâche 3 du projet).

## 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 2.1. Description du banc à rouleau et du système d'échantillonnage

Les véhicules sélectionnés dans le cadre du projet ont été testés sur le banc à rouleau de l'IFSTTAR. La description détaillée du banc à rouleau est présentée dans le livrable L1. Pour mesurer les facteurs d'émission des composés réglementés et non réglementés, les gaz d'échappement sont prélevés en sortie du tuyau d'échappement et dirigés vers le CVS (Constant Volume Sampler) – avec de l'air de dilution filtré. Les composés visés par ces travaux ont été ensuite échantillonnés ou suivis par différents systèmes d'échantillonnage ou de mesure :

- La mesure en ligne des polluants en phase gazeuse tels que  $\text{NO}_x/\text{NO}_2/\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , les HydroCarbures Totaux (THC) et Non Méthaniques (NMHC) a été réalisée pour l'ensemble des cycles d'essai par la baie d'analyse (HORIBA) après la dilution CVS.
- La mesure en ligne des particules et du carbone-suie a été effectuée par différents analyseurs : CPC, ELPI, AE 33-7, FMPS après la dilution CVS.
- Les prélèvements de la matière particulaire, des BTEX, des HAP et des composés carbonyles ont été réalisés avec la baie de prélèvement.
- La mesure en ligne de certains composés légers en phase gazeuse (formaldéhyde, acétaldéhyde,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ...) a été effectuée avec FTIR après la dilution CVS.

### 2.2. Méthodes analytiques

#### 2.2.1. Mesure en ligne des particules et de carbone-suie

Les particules et le carbone-suie ont été suivis en ligne après le CVS avec un CPC (Condensation Particle Counter), l'ELPI (Electrical Low Pressure Impactor), l'AE 33-7 (Aethalometer) et le FMPS (Fast Mobility Particle Sizer).

- Le CPC (TSI) permet de déterminer le nombre total de particules. Il contient une chambre de condensation en sursaturation du vapeur de butanol permettant de détecter des particules de taille supérieure à 4 nm. Les données récoltées tous les dixièmes de secondes sont moyennées toutes les secondes avec le débit d'entrée du CPC réglé à 1,5 L/min. Un photodétecteur mesure la lumière diffusée lorsque les particules sont soumises à un rayonnement, permettant d'en déduire le nombre soit par comptage individuel (concentration inférieure à  $5,0 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$ ) soit par photométrie (jusqu'à  $10^7 \text{ \#/cm}^3$ ) où la concentration est déterminée à partir de la lumière totale diffusée, basée sur l'étalonnage. L'incertitude sur la mesure de concentration en nombre par le CPC est de 10% à moins de  $5,0 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$ , et de 20% pour des concentrations supérieures.
- L'ELPI (Dekati) permet de déterminer le nombre et la distribution granulométrique des particules. Il est monté avec un « filter stage », un impacteur supplémentaire permettant d'analyser les particules de 7 nm à plus de  $4 \text{ \mu m}$  avec un débit de prélèvement de 10 L/min. Sur

chaque impacteur est disposée une feuille d'aluminium graissée permettant notamment de limiter les rebonds de particules. Le courant maximal mesurable par les électromètres est fixé à 100 pA dans la plupart des cas, permettant un temps de réponse à la seconde et un bruit limité. La masse volumique de particules est fixée à 1 g/cm<sup>3</sup> et une faible correction pour perte par diffusion est appliquée. Les distributions de taille des particules exposées sont normalisées en  $dN/d\log D_p$  où  $d\log D_p = \log \frac{D_{p,n+1}}{D_{p,n}}$  avec  $dN$  la concentration mesurée par le canal  $n$ , et  $D_{p,n}$  la taille des particules mesurées par ce canal. Ceci permet de comparer les distributions de taille sans tenir compte de la résolution. La description détaillée de l'ELPI est présentée en [Annexe 1](#).

- Le FMPS (TSI) permet de déterminer le nombre et la distribution granulométrique des particules entre 5.6 et 560 nm avec 32 canaux. Il utilise la mobilité électrique comme technique de mesure qui est similaire à celle utilisée dans le SMPS. Les données sont récoltées toutes les secondes avec une large plage de concentrations allant de 0 à 10<sup>7</sup> particules/cm<sup>3</sup>. Le débit d'entrée du FMPS est réglé à 8 L/min
- L'AE 33-7 (Ecomasure) permet de suivre la concentration de carbone-suie. Il analyse le carbone élémentaire sur 7 longueurs d'onde de l'UV à l'IR avec une vitesse d'acquisition à la seconde. Le principe de mesure d'AE 33-7 repose donc sur l'atténuation de l'intensité d'un faisceau lumineux à travers un échantillon de poussières atmosphériques déposées sur un filtre. La filtration est effectuée sur une bande filtrante. Cette bande avance automatiquement quand l'atténuation du rayonnement lumineux par les poussières accumulées sur le filtre excède la limite maximale acceptée par l'analyseur. La limite de détection (1h) est de 5 ng/m<sup>3</sup>, avec une plage de concentrations allant de 10 à 10<sup>5</sup> ng/m<sup>3</sup>. Les longueurs d'onde mesurées sont à 370, 470, 525, 590, 660, 880 et 940 nm avec le débit d'entrée à 5 L/min.

### 2.2.2. Mesure en ligne des composés en phase gazeuse

Les analyseurs de composés réglementés sont intégrés dans le CVS, et mesurent la concentration des polluants selon les principes suivants : absorption d'infrarouge (pour CO et CO<sub>2</sub>), détection par ionisation de flamme (pour HC total et CH<sub>4</sub>) et chimiluminescence (pour NO et NO<sub>x</sub>). La quantité de NO<sub>2</sub> est ensuite déterminée par la soustraction :  $[NO_2] = [NO_x] - [NO]$ .

Le FTIR (Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier) (IGS Nicolet Antaris) permet de suivre les composés azotés (NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O...) et des composés organiques légers (Formaldéhyde, Acétaldéhyde, Éthane, Éthylène, Méthane, Benzène...) en phase gazeuse. Le principe de la spectroscopie par transformée de Fourier est basé sur l'utilisation d'une source de lumière à large bande, contenant l'ensemble du spectre des longueurs d'onde à mesurer. La lumière passe par un interféromètre de Michelson — un ensemble de miroirs fixe ou mobile. Au fur et à mesure que le miroir mobile se déplace, chaque longueur d'onde se trouve périodiquement bloquée ou transmise par l'interféromètre, par interférences. Différentes longueurs d'onde sont ainsi modulées à des vitesses différentes, de sorte que, à chaque instant, le faisceau sortant de l'interféromètre possède un spectre différent. Ce faisceau traverse ensuite une cellule de 10 m en BK7 contenant l'échantillon gazeux à analyser et avant d'être

détecté par un détecteur MTC-A. La résolution de FTIR est  $0,5 \text{ cm}^{-1}$ , avec un temps de scan à 1,07s pour une plage de longueur d'onde entre 650 nm et 4000 nm. Les interférogrammes ainsi obtenu sont traités par le logiciel RESULT™. La température de la cellule est contrôlée à 100 °C avec une pression à 650 Torr. Le débit prélèvement d'échantillon est environ 300 NI/h. Les limites de quantifications basses et hautes des 25 composés sont données dans l'Annexe 2.

### 2.2.3. Analyses chimiques sur prélèvements

Pour les prélèvements des BTEX, des HAP et des composés carbonylés sur cartouches, nous avons utilisé les conditions de prélèvement optimisées dans le cadre du projet Fever (financé par ADEME). Les BTEX sont prélevés à 0,5 L/min ; les composés carbonylés sont prélevés à 2 L/min ; enfin les HAP sont prélevés à 0,5 L/min et 50 L/min pour les HAP en phase gazeuse et particulaire, respectivement. La liste complète des composés analysée est présente dans l'Annexe 3.

L'ensemble des analyses chimiques de BTEX, de HAP et de composés carbonylés a été assurée par le prestataire TERA-Environnement. Les principales méthodes et conditions analytiques sont présentées dans le Tableau 1. Les conditions détaillées d'analyse ne peuvent pas être présentées dans ce rapport en raison de clauses de confidentialité imposées par TERA-Environnement.

Tableau 1. Principales méthodes et conditions analytiques

Famille de composés	Support de prélèvement	Technique analytique	Norme suivie	Protocole d'analyse	LQ	Incertitude maximale
BTEX	Tenax	ATD-GC/MS*	ISO 16000-6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermodésorption</li> <li>• GC avec une colonne 5MS</li> <li>• Détection en spectrométrie de masse</li> </ul>	~ ng/support	20%
	Carboxen/Tenax 30/70%		--			
	Carboxen/Tenax 15/85%		--			
	Air toxic		NIOSH 2549			
Composés carbonylés	Cartouche DNPH waters, courte	HPLC/UV <sup>#</sup>	ISO 16000-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Éluion à l'acétonitriles</li> <li>• HPLC sous gradient d'acétonitrile, eau et THF</li> <li>• Détection en fluorescence</li> </ul>	10 à 30 ng/support	15%
	Cartouche DNPH waters, longue				30 à 60 ng/support	
HAP gazeux	ORBO 43	HPLC/FLUO <sup>§</sup>	NIOSH 5506	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extraction à ASE</li> <li>• Évaporation à sec</li> <li>• Reprise d'échantillon</li> <li>• HPLC sous éluion d'acétonitrile/eau</li> <li>• Détection DAD et</li> </ul>	10 à 50 ng/support Sauf acénaphthylène : LQ = 100 ng/support	20%

				fluorescence		
HAP particulaire	Filtre en fibre de quartz calciné à 47 mm		NF X 43- 025	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extraction avec l'acétonitrile à ultrason</li> <li>• HPLC sous élution d'acétonitrile/eau</li> <li>• Détection DAD fluorescence</li> </ul>		

\* ATD-GC-MS : Automated Thermal Desorption - Gas Chromatograph - Mass Spectrometer

# HPCL/UV : High Performance Liquid Chromatography/Ultra Violet Detector

§ HPLC/FLUO : High Performance Liquid Chromatography/ Fluorescence Detector

### 2.3. Caractéristique des véhicules testés

Dans le cadre de la tâche 3, deux véhicules légers Euro 6 ont été testés ; un véhicule Diesel équipé d'un filtre à particule (FAP) catalysé et un véhicule essence à injection directe (ID) avec un moteur en propulsion. Leurs caractéristiques techniques sont listées dans le [Tableau 2](#).

Tableau 2. Caractéristiques techniques des véhicules testés pour la tâche 2

Véhicule	N° 1	N° 2
Marque	Renault	Renault
Model	Twingo	Clio
Catégorie du véhicule	Particulier	Particulier
Type	1,0 Sce	1,5 DCI
Carburant	Essence	Diesel
Norme	Euro 6	Euro 6
Capacité moteur (ccm)	999	1461
Puissance maxi (Ch)	71	75
Veh_eng_speed_Pmax (rpm)	600	3750
Poids à vide (kg)	864	1087
Kilométrage (km)	2 164	4 700
Boite	Manuelle (5 vit)	Manuelle (5 vit)
Système de post-traitement	Catalyseur trois-voies	Catalyseur d'oxydation + FAP catalysé + NOx-Trap
Date mise en circulation	11/12/2015	31/12/2015
Date teste	31/03/2016	14/04/2016
N° d'immatriculation	DY-258-B5	DY-249-QB
Inertie équivalente simulée (Kg)	1020	1130
Nom de calage	505-29-03-16-1020-2	507-11-04-16-1030-1
Cx	0,34	0,32

$S$ (m <sup>2</sup> )	2,288	2,24
$Scx$ (m <sup>2</sup> )	0,777	0,71
$Crr$ (kg/t)	0,008	0,008

## 2.4. Cycles de conduite

Les mesures d'émissions ont été réalisées sur des cycles Artémis urbain, routier et autoroutier (André 2004 ; André et al. 2006) qui sont définis comme étant les plus représentatifs des conditions réelles de conduite ; et aussi des cycles homologués NEDC et WLTC. Ces cycles sont présentés dans la [Figure 1](#).

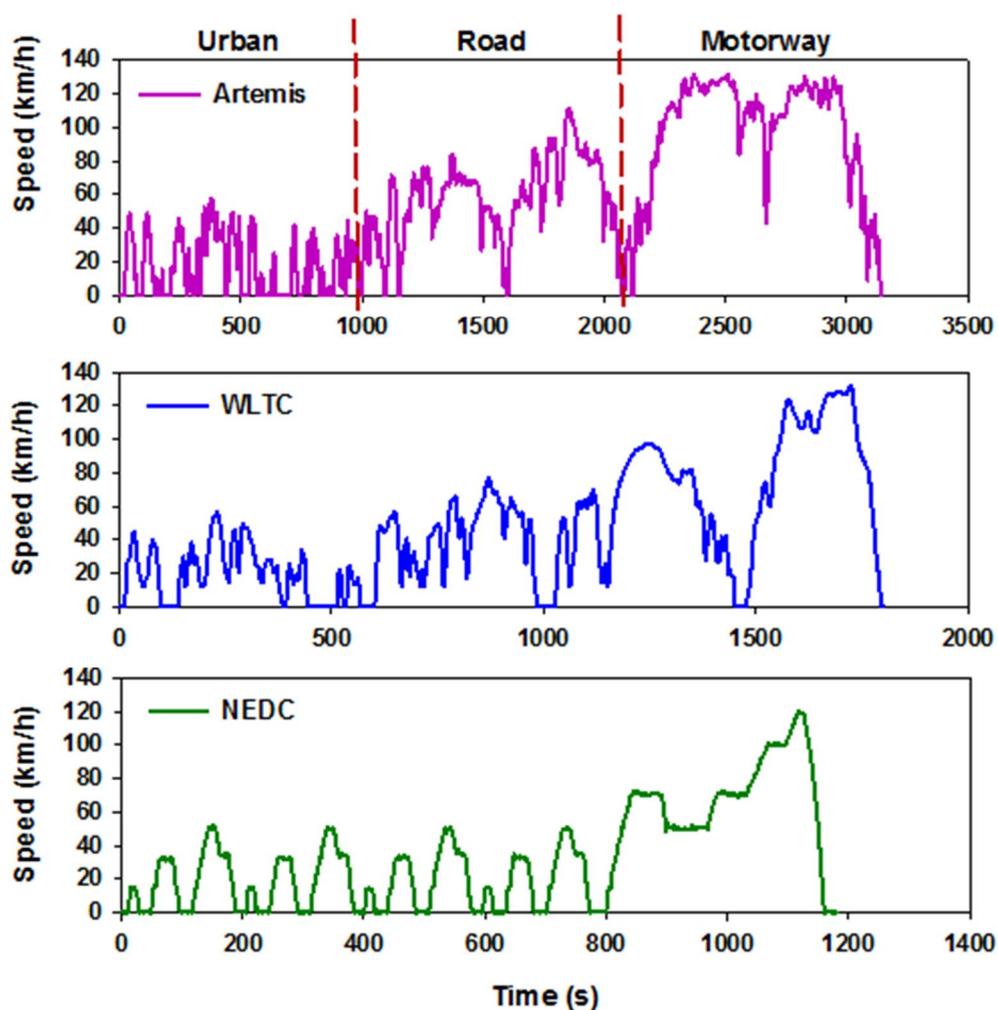


Figure 1. Cycles de conduite Artémis urbain, routier et autoroutier, NEDC et WLTC.

### 3. DESCRIPTION, RÉSULTATS ET DISCUSSION PAR TÂCHE

#### 3.1. Autres aspects méthodologiques et tests (Tâche 2b, responsable IFSTTAR)

##### 3.1.1. Développements spécifiques pour le test sur banc monorouleur des véhicules équipés de système ABS/ESP

Les véhicules récents (Euro 6 en particulier) ou plus anciens de haute gamme sont équipés de systèmes ABS/ESP non débrayables qui interdisent de fait leur passage sur un banc d'essai monorouleur. Ce frein technologique compromet actuellement la mesure des émissions des véhicules les plus récents. Une solution technique consiste à « leurrer » le calculateur déporté spécifique à l'ABS en reproduisant sur l'entrée du capteur de vitesse roues arrière le signal mesuré sur les roues avant. La société Altran, le prestataire en instrumentation, spécialiste des technologies CAN a réalisé cette adaptation (réversible) sur les véhicules retenus. Cependant, cette technologie est développée seulement pour les véhicules chez Renault. Le choix des véhicules est en conséquence limité sur le banc d'essai monorouleur.

##### 3.1.2. Analyse des carburants

Toutes les expériences ont été réalisées en utilisant du carburant commercial (teneur en soufre inférieure à 10 ppm), prélevé à la même station-service pour minimiser la variabilité de la composition du carburant et son impact sur les émissions. De plus, la composition du carburant a été analysée par le laboratoire Intertek afin d'identifier les éventuels effets du carburant sur l'émission des polluants. Les analyses du gazole et de l'essence ont été réalisées en suivant la norme EN 590 et EN 228, respectivement. Le Tableau 3 présente les principales caractéristiques du carburant utilisé.

Tableau 3. Principales caractéristiques du carburant utilisé pour chaque véhicule testé

Véhicule	N° 1	N° 2
Marque	Renault	Renault
Norme	Euro 6	Euro 6
Moteur	Essence Catalyseur trois-voies, ID, traction	Diesel FAP catalysé, NOx-Trap, propulsion
Composition du carburant		
Masse volumique à 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	742	835
Teneur en soufre (mg/kg)	6,7	8,8
Teneur en eau (mg/km)	---	70
Contamination totale (mg/kg)	---	< 12
Hydrocarbures aromatiques totaux (% m)	---	27,3
HAP (% m)	---	3,3
Teneur en plomb (mg/L)	< 2,5	---
Teneur en benzène (% m)	0,44 % (m)	82 mg/kg
Teneur en éthanol (% vol)	7.38	---
Teneur en ETBE (% vol)	4.48	---
Total des composés oxygénés (% vol)	17.58	---
Teneur en oxygène (% m)	3.65	---

Teneur en aromatique (% vol)	26.2	---
Teneur en oléfines (% vol)	13.8	---
Teneur en saturés (% vol)	---	---

ETBE : éther éthyle tertiobutyle

### 3.2. Facteurs d'émission des véhicules Euro 6 (Tâche 3, responsable IFSTTAR)

#### 3.2.1. Méthodes de calcul

Les facteurs d'émission des polluants étudiés ont été calculés à partir de leur concentration mesurée en utilisant deux formules :

Dans le cas des appareils qui donnent la concentration d'un polluant en nombre ou en masse par m<sup>3</sup> ou par cm<sup>3</sup>, la formule suivante est utilisée :

$$EF = \frac{C_{\text{moy}} \times 10^3 \times t_{\text{cycle}} \times Q_{\text{CVS}} \times D}{L_{\text{cycle}}}$$

- $EF$  = Facteur d'émission du polluant en #/km ou en ng/km dans le cas du carbone-suie
- $C_{\text{moy}}$  = Concentration moyenne du polluant sur le cycle en #/cm<sup>3</sup> ou en ng/m<sup>3</sup> pour le carbone-suie
- $10^3$  = Conversion des cm<sup>3</sup> en m<sup>3</sup>
- $t_{\text{cycle}}$  = Durée du cycle en minute
- $Q_{\text{CVS}}$  = Débit du CVS en m<sup>3</sup>/min
- $D$  = Dilution du ou des VKL
- $L_{\text{cycle}}$  = Distance parcourue pendant le cycle en kilomètre

Pour les appareils qui donnent une concentration du polluant en ppm, la formule suivante est utilisée :

$$EF = C_{\text{moy}} \times \frac{M}{M_{\text{moy}}} \times Q_{\text{CVS}} \times \frac{t_{\text{cycle}}}{L_{\text{cycle}}} \times \frac{1}{10^6}$$

- $EF$  = Facteur d'émission du polluant en g/km
- $C_{\text{moy}}$  = Concentration moyenne du polluant mesurée par l'appareil sur le cycle en ppm
- $M$  = Masse molaire du polluant en g/mol
- $M_{\text{moy}}$  = Volume molaire du polluant en L/mol
- $Q_{\text{CVS}}$  = Débit du CVS en m<sup>3</sup>/min
- $t_{\text{cycle}}$  = Durée du cycle en minute
- $L_{\text{cycle}}$  = Distance parcourue pendant le cycle en kilomètre
- $10^6$  = Conversion des mg en g

Pour la baie d'analyse, qui donne une masse totale du polluant pour la durée du cycle en gramme, il suffit de diviser la valeur mesurée par la distance parcourue pendant le cycle en kilomètre. Cela donne alors un facteur d'émission en g/km.

### **3.2.2. Facteurs d'émission mesurés sur cartouches et avec baie d'analyse**

La campagne de mesure a été réalisée en Avril 2016 en collaboration avec IRCELYON. Les facteurs d'émission des composés non-règlementés (les BTEX, les composés carbonylés et les HAP en phase gazeuse et particulaire) et des composés règlementés des véhicules Euro 6 ont été mesurés avec les cycles Artémis urbain avec démarrage froid et chaud, routier et autoroutier, et aussi avec les cycles WLTC et NEDC. Deux types de véhicule sont testés : Euro 6 Diesel FAP catalysé et Euro 6 essence avec système d'injection directe et moteur en propulsion, suite aux tests de la faisabilité d'Euro 6 équipé d'ABS/EPS non débrayable (section 3.1.1). Chaque condition de conduite a été répétée deux fois pour les prélèvements sur cartouches, et 2 à 6 fois pour les mesures en lignes sauf pour NEDC, une seule mesure a été réalisée. Les facteurs d'émission sont présentés dans les

Tableau 4 et

Tableau 5.

Tableau 4. Facteurs d'émission obtenus pour le véhicule Diesel

	ArtROAD	ArtUrb F	ArtUrb C	ArtMW	WLTC F	NEDC F
BC (ng/km)	$(3 \pm 2) \cdot 10^3$	$(2 \pm 0.2) \cdot 10^4$	$(3 \pm 1) \cdot 10^3$	$(4 \pm 0.4) \cdot 10^3$	$(4 \pm 3) \cdot 10^3$	$(8 \pm 1) \cdot 10^4$
Particules CPC (#/km)	< LD	$(2 \pm 0.2) \cdot 10^{11}$	< LD	< LD	$(2 \pm 1) \cdot 10^{10}$	$(3 \pm 0,3) \cdot 10^{12}$
Particules ELPI (#/km)	$(36 \pm 5) \cdot 10^7$	$(2 \pm 0.2) \cdot 10^{11}$	$(16 \pm 6) \cdot 10^8$	< LD	$(1.4 \pm 0,6) \cdot 10^{10}$	$(1,2 \pm 0,3) \cdot 10^{12}$
Particules FMPS (#/km)	$(68 \pm 5) \cdot 10^8$	$(3 \pm 0.3) \cdot 10^{11}$	$(9 \pm 3) \cdot 10^9$	$(5 \pm 1) \cdot 10^9$	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{10}$	$(9 \pm 1) \cdot 10^{11}$
CO <sub>2</sub> MIR (g/km)	80 ± 2	140 ± 4	130 ± 4	108 ± 1	100 ± 2	107 ± 2
CO <sub>2</sub> (g/km)	78 ± 2	143 ± 4	133 ± 3	109 ± 1	100 ± 2	106 ± 2
CO (mg/km)	30 ± 9	263 ± 66	34 ± 12	16 ± 4	100 ± 25	380 ± 95
NO <sub>x</sub> (mg/km)	613 ± 160	610 ± 160	1076 ± 146	201 ± 149	323 ± 85	559 ± 128
NO (mg/km)	406 ± 90	540 ± 120	847 ± 88	157 ± 99	260 ± 57	477 ± 105
NO <sub>2</sub> (mg/km)	207 ± 73	70 ± 47	229 ± 60	45 ± 51	63 ± 60	82 ± 54
HC (mg/km)	12 ± 1	67 ± 17	35 ± 9	16 ± 4	25 ± 6	64 ± 16
CH <sub>4</sub> (mg/km)	6 ± 1	5 ± 0,6	2 ± 0,4	16 ± 4	6 ± 1,4	7 ± 2
Benzène (µg/km)	95 ± 1	471 ± 300	132 ± 10	88 ± 47	300 ± 144	--
Toluène (µg/km)	26 ± 0.3	238 ± 117	39 ± 1	11 ± 2	151 ± 103	--
Éthylbenzène (µg/km)	4.5 ± 1.7	3127 ± 2292	215 ± 0,3	7 ± 3	181 ± 80	--
m+p Xylène (µg/km)	15 ± 3	289 ± 119	64 ± 22	2,6 ± 0,2	175 ± 125	--
o Xylène (µg/km)	56 ± 1	122 ± 64	24 ± 9	1.3 ± 0.1	67 ± 51	--
Naphtalène (µg/km)	1 ± 0.1	8 ± 1	25 ± 2	< DL	13 ± 1	--
Formaldéhyde (µg/km)	11 ± 1	57 ± 20	26 ± 3	8 ± 2	47 ± 25	--
Acétaldéhyde (µg/km)	13 ± 7	150 ± 24	48 ± 15	5 ± 2	115 ± 67	--
Acétone (µg/km)	20 ± 10	257 ± 70	113 ± 36	1 ± 0.1	108 ± 34	--

ArtUrb F/C : cycle Artémis urbain avec démarrage à froid ou à chaud

ArtROAD : cycle Artémis routier

ArtMW : cycle Artémis autoroutier

&lt; LD : inférieur à la limite de détection

-- : pas de mesures pour le polluant

Tableau 5. Facteurs d'émission pour le véhicule essence

	ArtROAD	ArtUrb F	ArtUrb C	ArtMW	WLTC F	NEDC F
BC (ng/km)	$(4 \pm 1) \cdot 10^4$	$(6 \pm 2) \cdot 10^5$	$(4 \pm 3) \cdot 10^4$	$(9,5 \pm 3,4) \cdot 10^5$	$(4 \pm 1) \cdot 10^5$	$(4 \pm 1) \pm 1 \cdot 10^5$
Particules CPC (#/km)	$(3 \pm 1) \cdot 10^{13}$	$(2 \pm 1,2) \cdot 10^{12}$	$(3 \pm 2) \cdot 10^{12}$	$(3 \pm 0,3) \cdot 10^{14}$	$(8 \pm 1) \cdot 10^{13}$	$(1 \pm 0,3) \cdot 10^{13}$
Particules FMPS (#/km)	$(22 \pm 7) \cdot 10^{12}$	$(3 \pm 1,5) \cdot 10^{12}$	$(3 \pm 1,5) \cdot 10^{12}$	$(16 \pm 2) \cdot 10^{13}$	$(55 \pm 17) \cdot 10^{12}$	$(6 \pm 3) \cdot 10^{12}$
Particules ELPI (#/km)	$(20 \pm 3) \cdot 10^{12}$	$(14 \pm 7) \cdot 10^{11}$	$(23 \pm 13) \cdot 10^{11}$	$(13 \pm 1) \cdot 10^{13}$	$(42 \pm 24) \cdot 10^{12}$	--
CO <sub>2</sub> MIR (g/km)	92 ± 8	189 ± 15	152 ± 13	--	121 ± 10	--
CO <sub>2</sub> (g/km)	91 ± 2	174 ± 5	155 ± 6	129 ± 0,3	115 ± 3,6	111 ± 3
CO (mg/km)	125 ± 67	105 ± 23	32 ± 13	$(27 \pm 6) \cdot 10^3$	1217 ± 165	417 ± 92
NO <sub>x</sub> (mg/km)	4 ± 0,5	10 ± 1,4	14 ± 2	3 ± 1	15 ± 2	6 ± 2
NO (mg/km)	4 ± 0,5	10 ± 1,4	13 ± 2	3 ± 1	14 ± 2	6 ± 2
NO <sub>2</sub> (mg/km)	0,1 ± 0,07	0,3 ± 0,2	0,04 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,3 ± 0,2	0,1 ± 0,07
HC (mg/km)	2 ± 1	11 ± 1	3 ± 5	75 ± 39	34 ± 9	50 ± 13
CH <sub>4</sub> (mg/km)	0,5 ± 0,4	0,5 ± 0,1	0,3 ± 0,1	8 ± 1	4 ± 2	3 ± 2
Benzène (µg/km)	53 ± 8	12 ± 7	3 ± 1	223 ± 15	403 ± 56	--
Toluène (µg/km)	64 ± 19	63 ± 25	7 ± 2	334 ± 17	1588 ± 675	--
Éthylbenzène (µg/km)	16 ± 10	48 ± 20	3 ± 2	62 ± 23	528 ± 265	--
m+p Xylène (µg/km)	44 ± 27	202 ± 89	8 ± 2	163 ± 4	1790 ± 974	--
o Xylène (µg/km)	20 ± 10	87 ± 40	4 ± 1	69 ± 5	546 ± 181	--
Naphtalène (µg/km)	6 ± 1,8	51 ± 42	3 ± 0,2	3 ± 0,3	11 ± 8	--
Formaldéhyde (µg/km)	6 ± 3,7	24 ± 2	14 ± 3	86 ± 15	35 ± 3	--
Acétaldéhyde (µg/km)	3 ± 2,6	5 ± 0,5	7 ± 3,4	6 ± 1	16 ± 1	--
Acétone (µg/km)	1 ± 0,1	12 ± 14	< DL	7 ± 0,9	< DL	--
Pyrène (µg/km)	< LD	< LD	< LD	$1 \cdot 10^{-1}$	< LD	--
Benzo(a) antracène (µg/km)	< LD	$6,8 \cdot 10^{-3}$	< LD	$43 \cdot 10^{-3}$	< LD	--
Benzo(b+j) fluoranthène (µg/km)	< LD	< LD	< LD	$34 \cdot 10^{-3}$	< LD	--

### 3.2.2.1. Comparaison des mesures de particules entre CPC, ELPI et FMPS

La concentration en nombre des particules a été quantifiée avec le CPC, l'ELPI et le FMPS simultanément. Les comparaisons entre ces trois analyseurs ont été effectuées pour l'ensemble des conditions de conduite Artémis afin de valider notre méthode de quantification (Figure 2). Nous avons observé une bonne linéarité entre les trois appareils de mesure pour la concentration des PN inférieur à  $5,0 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$ . (Figure 2, à gauche) avec les coefficients de la corrélation linéaire proches de 1. Pour les concentrations de PN supérieur à  $5,0 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$ , les mesures d'ELPI et de FMPS montre une bonne corrélation (Figure 2, droite). Cependant, le CPC avec la méthode en photométrie mesure 2 fois plus de particules par rapport à la mesure d'ELPI et FMPS.

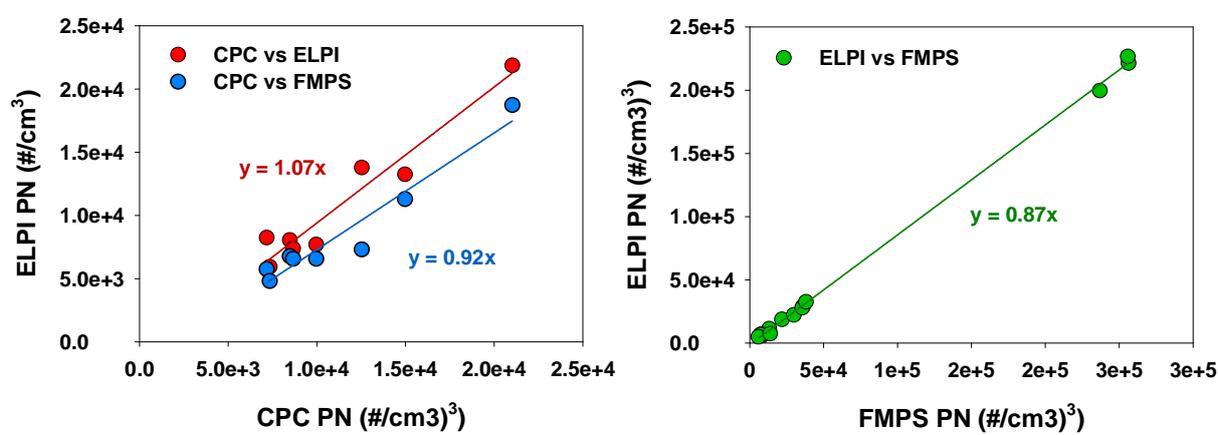


Figure 2. Comparaison des concentrations des particules mesurées par le CPC, l'ELPI et le FMPS pour l'ensemble des conditions expérimentales.

### 3.2.2.2. Émissions des particules, de carbone-suie, des composés azotés et des composés réglementés

Les émissions de particules en nombre sont les plus importantes pour l'essence avec des facteurs d'émission allant jusqu'à  $2,9 \cdot 10^{14}$  particules/km pour le cycle autoroutier. Les facteurs d'émission sont de l'ordre de  $2,5 \cdot 10^{13}$  particules/km pour le cycle routier et de  $2,5 \cdot 10^{12}$  particules/km pour le cycle urbain. Nous n'observons pas de différence entre les cycles urbains avec démarrage à froid et à chaud. Entre les cycles homologués, le cycle WLTC émet 7 à 10 fois plus de particules que le NEDC. Le Diesel équipé d'un FAP émet peu de particules pour les cycles routier, autoroutier et urbain avec démarrage à chaud. Pour le cycle urbain avec démarrage à froid, l'émission des particules est environ  $2,5 \cdot 10^{11}$  particules/km. Pour les émissions de carbone-suie, celles-ci sont corrélées positivement avec les émissions de particules. Ses émissions sont plus élevées en urbain avec démarrage à froid et en autoroutier, respectivement pour le véhicule Diesel et essence.

Les émissions de NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> et NO sont très différentes entre les deux véhicules. Les facteurs d'émission des NO<sub>x</sub> pour le véhicule essence sont faibles, entre 3 et 15 mg/km, alors pour le véhicule Diesel ils sont de 10 à 300 fois plus élevés selon les conditions de conduite (210 à 1076 mg/km) (Tableau 4 et Tableau 5). En comparant avec les véhicules Euro 4 et Euro 5 testés dans le cadre du projet FEVER (financé par ADEME), le véhicule Euro 6 G DI émet 6 à 10 fois moins de NO<sub>x</sub> (Figure 3, gauche). Les facteurs d'émissions des NO<sub>x</sub> sont 1,4 à 1,8 fois plus élevés pour le cycle urbain avec démarrage à chaud en comparant avec le démarrage à froid. En comparant avec les cycles NEDC et WLTC, l'émission moyenne des cycles Artemis induit 1,2 à 2 fois plus de NO<sub>x</sub>, sauf pour le véhicule Euro 5 G DI, pour lequel le cycle NEDC induit 3 fois plus de NO<sub>x</sub> par rapport à la moyenne des cycles Artémis. Pour l'ensemble des véhicules Diesel testés (dans FEVER et CaPVeREA), l'émission de NO<sub>x</sub> est significativement au-dessus de la limite d'émission à respecter dans le cadre de la norme Euro 6b, qui est de 80 mg/km.

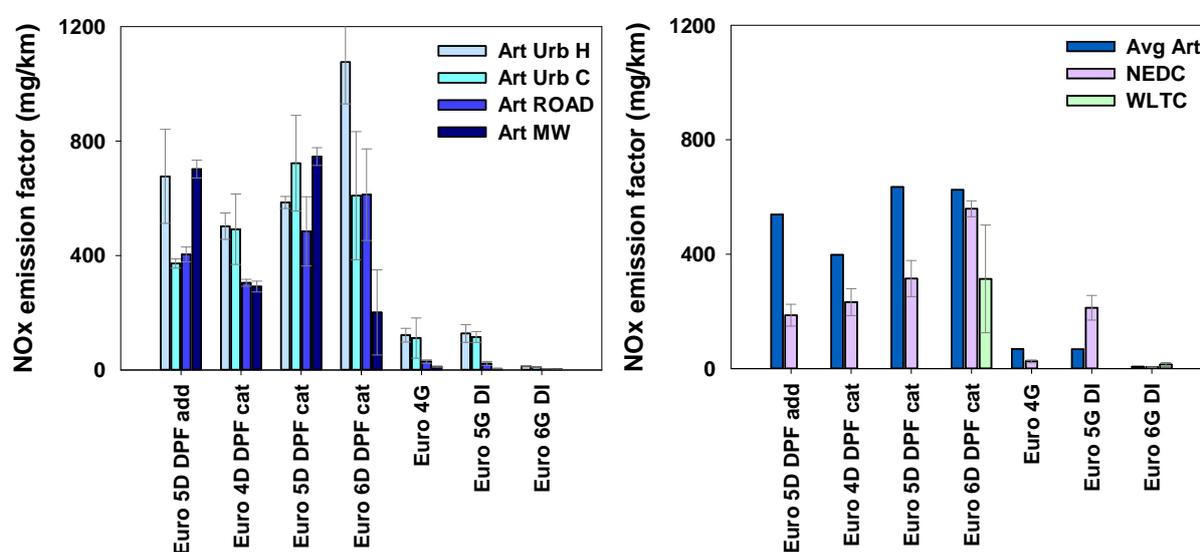


Figure 3. Facteur d'émission de NO<sub>x</sub> avec cycles Artemis urbain, routier et autoroutier (gauche), NEDC et WLTC, avec la comparaison entre des émissions moyennes de NO<sub>x</sub> pour ensemble des cycles Artémis et les cycles d'homologation NEDC et WLTC (droite). Les véhicules Euro 4 et 5 sont testés dans le cadre du projet FEVER, les véhicules Euro 6 sont testés dans le cadre de ce projet.

Les facteurs d'émission du CO<sub>2</sub> sont compris entre 79 et 141,5 mg/km pour le véhicule Diesel, et entre 91,5 et 181,5 mg/km pour le véhicule essence. Des facteurs plus importants sont constatés pour l'essence pour toutes les conditions de conduite. L'urbain avec démarrage à froid induit une surémission de 20 % par rapport à l'urbain avec démarrage à chaud pour les deux véhicules testés. Les émissions de CO<sub>2</sub> ont été mesurées avec deux appareils différents, le MIR et la baie d'analyse. Les valeurs mesurées entre les deux analyseurs montrent une très bonne cohérence avec un écart relatif de 2 %. Pour le CO, les facteurs d'émission du Diesel vont de 16 à 380 mg/km. Pour le véhicule essence, ils vont de 32 à 125 mg/km pour les cycles Artémis urbain et routier. Son émission atteint à 2.7.10<sup>4</sup> mg/km pour le cycle Artémis autoroutier. Pour ce véhicule essence testé, le moteur se trouve à l'arrière en propulsion et les

gaz en sortie du pot d'échappement sont à environ 600 °C lorsque le moteur fonctionne à haut régime (cycle autoroutier). Cette forte émission pourrait être en partie expliquée par la haute température des gaz d'échappement à grande vitesse. Lorsque la température d'échappement augmente avec la vitesse du véhicule, le temps requis pour la combustion diminue, par conséquent, l'émission de CO augmente. Cette baisse d'efficacité de transformation par le pot catalytique est aussi montrée par une augmentation d'émission d'HC pendant le cycle autoroutier. Les résultats similaires ont été observés par [Ghazikhani \(2014\)](#) qui montre que l'émission de CO est 4 fois plus élevée à 300 °C comparant à 200 °C. Le démarrage à froid du cycle urbain induit 7 fois plus d'émissions pour le véhicule Diesel et 3 fois plus pour le véhicule essence par rapport au démarrage à chaud. Le même phénomène a été observé pour le HC, nous observons des émissions 2 fois plus importantes pour le véhicule Diesel et 4 fois plus importantes pour le véhicule essence pour le cycle urbain avec démarrage à froid.

### 3.2.2.3. Émissions des BTEX, des composés carbonylés et des HAP

Pour les composés non-réglés, les facteurs d'émission des BTEX sont compris entre 25 et 850 µg/km pour le véhicule essence et entre 110 et 4240 µg/km pour le Diesel. Pour l'essence, le facteur d'émission le plus important est observé pour le cycle autoroutier. Le démarrage à froid induit 4 à 25 fois plus d'émission en comparant avec le démarrage à chaud. Pour le Diesel, le facteur d'émission le plus élevé est pour le cycle urbain avec démarrage à froid qui est environ 10 fois plus importante par rapport à un démarrage à chaud. De manière générale, le véhicule Diesel émet plus de BTEX. Pour les HAP, leurs émissions en phase gazeuse et particulaire sont inférieures à la limite de détection pour les deux véhicules testés. Les Aldéhydes (Formaldéhyde et Acétaldéhyde) sont émis en quantité plus importante par le véhicule Diesel. Les cycles avec démarrage à froid induisent 10 fois plus d'émission par rapport aux cycles avec démarrage à chaud, routier et autoroutier. Pour le véhicule essence, les facteurs d'émission des Aldéhydes pendant le cycle autoroutier sont 4 fois plus élevés par rapport aux cycles urbains et 10 fois plus élevés par rapport au cycle routier.

Avec l'ensemble des véhicules Diesel Euro 4 à Euro 6 testés dans le projet FEVER et ce projet, certaines corrélations linéaires entre les composés réglementés et non-réglés ont été observées. Figure 4 montre les corrélations positives entre l'émission d'acétaldéhyde et de formaldéhyde en fonction du CO, et les émissions du benzène, du toluène et des xylènes en fonction de HC, avec un coefficient de linéarité entre 0,6 et 0,8 selon les composés. Contrairement aux composés réglementés, les émissions des composés non-réglés ne sont pas toujours mesurées. Ainsi, à partir des équations de corrélation données dans la Figure 4, il est possible d'estimer les facteurs d'émission du benzène, du toluène, du xylène, du formaldéhyde et de l'acétaldéhyde avec des mesures de HC et de CO pour les véhicules Diesel Euro 4-6.

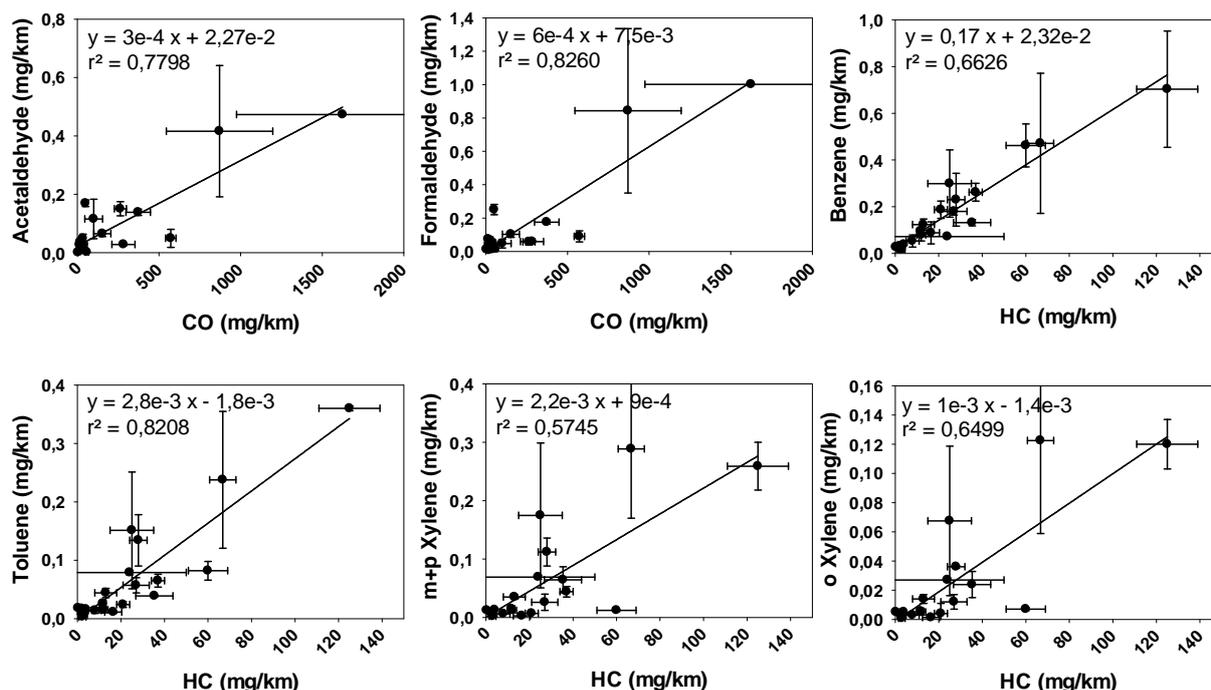


Figure 4. Corrélations linéaires entre les composés règlementés et non-règlementés obtenues pour les véhicules Diesel Euro 4 à Euro 6 testés dans le projet FEVER et ce projet pour les cycles WLTC, NEDC et Artémis.

### 3.2.3. Facteurs d'émission mesurés avec le FTIR

Les facteurs d'émission de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, HC, Ethane, Ethène, Acétylène, Propane, Propene, 1.3-Butadiène, Iso-butyène, n-Pentane, Iso-octane, Benzène, Toluène, Éthylbenzène, Xylène, Formaldéhyde et Acétaldéhyde ont aussi mesurés avec le FTIR. Les limites de quantification hautes et basses sont présentées en [Annexe 2](#). Le Tableau 6 présente les facteurs d'émission des composés pour lesquels leurs émissions sont au-dessus de la limite de quantification.

Tableau 6. Facteurs d'émission pour le véhicule Diesel, mesurés avec le FTIR

Composés	ArtROAD	ArtUrb F	ArtUrb C	ArtMW	NEDC	WLTC
<b>Diesel</b>						
CO (mg/km)	13 ± 7	192 ± 32	9 ± 9	3 ± 2,6	275	62 ± 38
NO (mg/km)	347 ± 79	429 ± 153	721 ± 95	125 ± 83	430	212 ± 159
NO <sub>2</sub> (mg/km)	78 ± 25	22 ± 11	70 ± 24	22 ± 13	15	16 ± 17
NO <sub>x</sub> (mg/km)	425 ± 102	444 ± 168	792 ± 118	136 ± 96	445	224 ± 175
N <sub>2</sub> O (mg/km)	0,16 ± 0,11	2 ± 0,3	< LD	< LD	3	0,7 ± 0,5
NH <sub>3</sub> (mg/km)	< LD	< LD	11 ± 1	2 ± 0,7	< LD	< LD
Éthane (mg/km)	5,5 ± 0,4	7 ± 3	9 ± 2	6 ± 0,3	5	6 ± 0,5
Éthène (mg/km)	5,5 ± 1,1	54 ± 3	14 ± 2,5	5 ± 0,1	60	20 ± 6
Propane (mg/km)	4 ± 0,4	< LD	< LD	10 ± 1,3	< LD	< LD

CH <sub>4</sub> (mg/km)	< LD	< LD	< LD	15 ± 11	2	< LD
-------------------------	------	------	------	---------	---	------

ArtUrb F/C : cycle Artémis urbain avec démarrage à froid ou à chaud

ArtROAD : cycle Artémis routier

ArtMW : cycle Artémis autoroutier

< LD : inférieur à la limite de détection

Pour la plupart des composés qui peuvent être suivis par le FTIR, la concentration mesurée est inférieure à la limite de quantification de FTIR. De plus, pour le véhicule essence testé, nous avons réalisé une dilution de 10 ou 100 fois après le CVS pour la forte émission de particules. Cependant, cette dilution est trop élevée et n'est pas adaptée pour la mesure de FTIR. Une voie de FTIR séparée de la mesure des particules après le CVS ou directement à l'échappement sans passer par le CVS sera mise en place pour les futures mesures des véhicules Euro 3 à Euro 5 dans le cadre du projet CEGEP.

En comparant avec les mesures de la baie d'analyse pour CO, NO<sub>x</sub>, NO avec FTIR, nous avons observé que la concentration mesurée par la baie d'analyse est au même niveau à l'incertitude près par rapport à celle mesurée par le FTIR. Ceci indique que le système FTIR fournit des données fiables pour des mesures en-ligne (Figure 5).

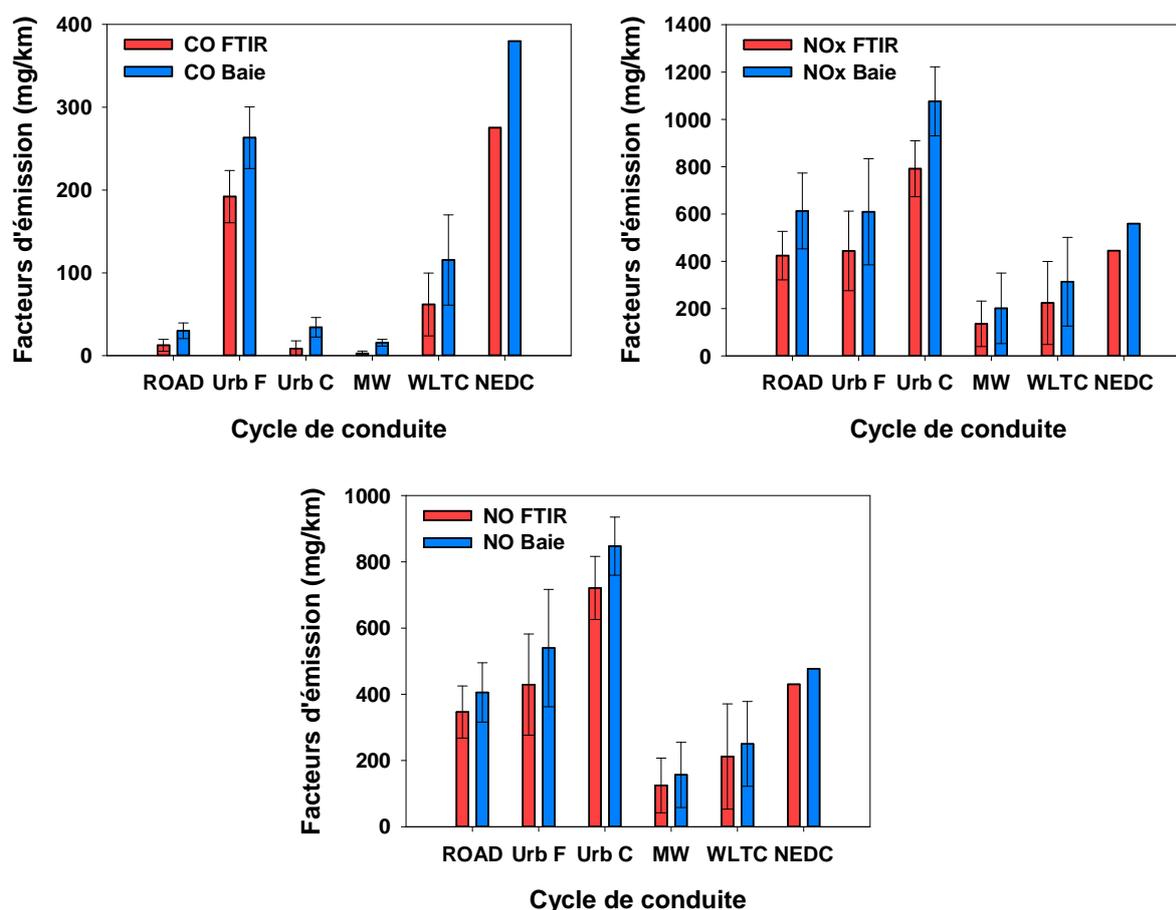


Figure 5. Comparaison entre les mesures du FTIR (bar rouge) et de la baie d'analyse (bar bleu) pour le CO, NO<sub>x</sub> et NO, avec les cycles Artémis Urbain, Routier, Autoroutier, WLTC et NEDC

Enfin, pour les mesures de CO<sub>2</sub>, les limites de quantification calibrées pour notre FTIR sont de 0,1 à 3%, qui sont supérieures à la concentration mesurée après la dilution CVS. De plus, l'absorbance de CO<sub>2</sub> est très interférée par l'absorbance de l'eau (humidité présente dans l'échappement), induisant des difficultés sur sa quantification précise selon les longueurs d'onde d'absorption. Trois solutions ou optimisations seront réalisées : 1) Nous avons contacté le fournisseur pour la possibilité d'ajouter quelques calibrations de CO<sub>2</sub> de basse concentration (100 ppm, donc 0,01%), en intégrant avec la méthode de mesure des 25 composés ; 2) Nous allons diminuer le nombre de scan donc augmente le temps d'acquisition, c'est-à-dire environ 1 scan / 20 secondes au lieu d'1 scan/s, ce qui permet de diminuer le bruit de fond du FTIR ; 3) Utiliser le FTIR directement à l'échappement sans passer par le CVS, ceci permettra aussi de mieux quantifier d'autres composés pour lesquels leurs émissions sont proches de la limite basse de la quantification.

### **3.3. Étude de l'évolution physico-chimique des particules et des COV en champ proche (Tâche 4, responsable IRCELYON)**

Les campagnes de mesure sont prévues courant 2017.

#### 4. CONCLUSION GÉNÉRALE ET VALORISATIONS SCIENTIFIQUES

Le projet CaPVeREA a été commencé en juillet 2014 dans des bonnes conditions de travail. Les tests de la tâche 3 ont été réalisés avec le planning prévu initialement dans le projet. Les résultats obtenus ont permis de bien répondre les objectifs de cette tâche. Les facteurs d'émission des composés règlementés et non-règlementés des deux véhicules Euro 6 Diesel et essence ont été mesurés, avec les cycles Artémis urbain avec le démarrage à froid et à chaud, routier et autoroutier, les cycles homologués NEDC et WLTC. Le démarrage à froid a induit une sur-émission de PN, BC, BTEX et formaldéhyde et une sous-émission de NOx par rapport au démarrage à chaud. Pour le véhicule essence avec un moteur en propulsion, l'émission du CO atteint à  $2.7 \cdot 10^4$  mg/km pour le cycle Artémis autoroutier avec également une augmentation d'émission d'HC. Ceci pourrait être expliqué par la haute température du gaz d'échappement (environ 600 °C) à haute vitesse en induisant une diminution du temps de combustion. Cependant, un seul véhicule propulsion a été testé dans le cadre de ce projet, cette haute d'émission du CO pourrait représenter un évènement individuel propre à ce véhicule. Enfin, les mesures du FTIR montrent des données fiables pour des mesures en-ligne en comparant avec celles de la baie d'analyse. Cependant, quelques modifications sur le paramétrage et sur le montage expérimental seront réalisées pour mieux quantifier les composés proches de leur limite de quantification basse.

Deux articles sont en cours de rédaction pour la revue scientifique : Environmental science and technology et Aerosol and air quality research, sur les facteurs d'émission des polluants et aussi l'analyse statistique sur l'impact de la condition de conduite et de la technologie des véhicules.

**BIBLIOGRAPHIE**

- Araujo J.A., Nel A.E. Particulate matter and atherosclerosis: role of particle size, composition and oxidative stress. *Particle And Fibre Toxicology*, 6, 24, 2009.
- Bach, C., Schreiber, D., Alvarez, R., Lienin, S. (2008) Characterization of exhaust gas and particle emissions of modern gasoline, diesel and natural gas vehicles. Article Template -EMPA20080579.pdf. (s. d.). Consulté à l'adresse  
[http://library.eawag-empa.ch/empa\\_publications\\_2008\\_open\\_access/EMPA20080579.pdf](http://library.eawag-empa.ch/empa_publications_2008_open_access/EMPA20080579.pdf)
- Ghazikhani, M., Hatami, M., Safari, B., Domiri Ganji, D., 2014. Experimental investigation of exhaust temperature and delivery ratio effect on emissions and performance of a gasoline–ethanol two-stroke engine. *Case Studies in Thermal Engineering* 2, 82–90. doi:10.1016/j.csite.2014.01.001
- Huang Y.C.T., Li Z.W., Carter J.D., Soukup J.M., Schwartz D.A., Yang I.V. Fine ambient particle induce oxidative stress and metal binding gznzs in human alveolar macrophages. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 41, 544-552, 2009.
- Louis, C., Liu, Y., Tassel, P., Perret, P., Chaumond, A., & André, M. (2016). PAH, BTEX, carbonyl compound, black-carbon, NO<sub>2</sub> and ultrafine particle dynamometer bench emissions for Euro 4 and Euro 5 diesel and gasoline passenger cars. *Atmospheric Environment*, 141, 80-95. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.055>
- O'Driscoll, R., ApSimon, H.M., Oxley, T., Molden, N., Stettler, M.E.J., Thiyagarajah, A., 2016. A Portable Emissions Measurement System (PEMS) study of NO<sub>x</sub> and primary NO<sub>2</sub> emissions from Euro 6 diesel passenger cars and comparison with COPERT emission factors. *Atmospheric Environment* 145, 81–91. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.09.021

## ANNEXES

## Annexe 1. Description détail de l'ELPI

Tableau 7. Caractéristiques des impacteurs de l'ELPI, dont les limites de détection en nombre de particules.

Impacteur	D50 (µm)	Di (µm)	dlogDp*	Nombre min. (#/cm <sup>3</sup> )	Nombre max. (#/cm <sup>3</sup> )
Filter stage	0,007	0,022	0,632	250	6,9.10 <sup>7</sup>
Stage 1	0,030	0,042	0,294	50	1,4.10 <sup>7</sup>
Stage 2	0,059	0,078	0,246	23	6,1.10 <sup>6</sup>
Stage 3	0,104	0,132	0,208	12	3,1.10 <sup>6</sup>
Stage 4	0,168	0,208	0,185	6	1,7.10 <sup>6</sup>
Stage 5	0,257	0,319	0,188	3,7	9,8.10 <sup>5</sup>
Stage 6	0,396	0,505	0,211	2	5,4.10 <sup>5</sup>
Stage 7	0,643	0,802	0,192	1,1	2,9.10 <sup>5</sup>
Stage 8	1,000	1,273	0,210	0,6	1,6.10 <sup>5</sup>
Stage 9	1,620	2,004	0,185	0,33	8,8.10 <sup>4</sup>
Stage 10	2,480	3,154	0,209	0,17	4,5.10 <sup>4</sup>
Stage 11	4,010	6,408	0,407	0,10	2,0.10 <sup>4</sup>

\*  $\log_{10} \left( \frac{D_i}{D_{50}} \right)$

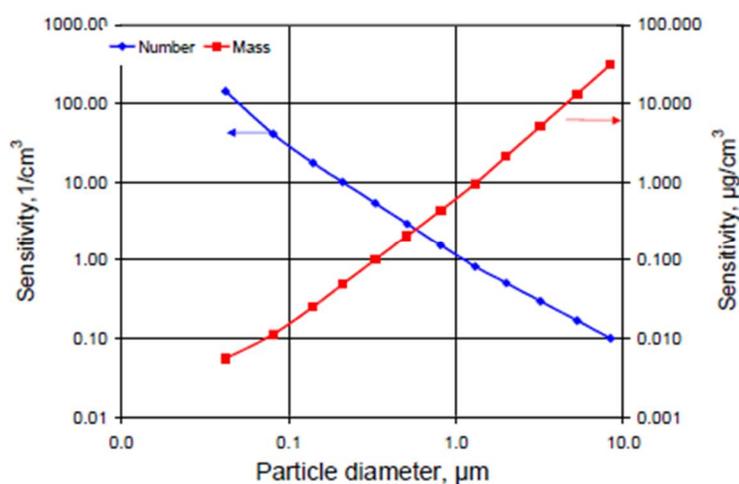


Figure 6. Précision de l'ELPI (Dekati – ELPI user manual)

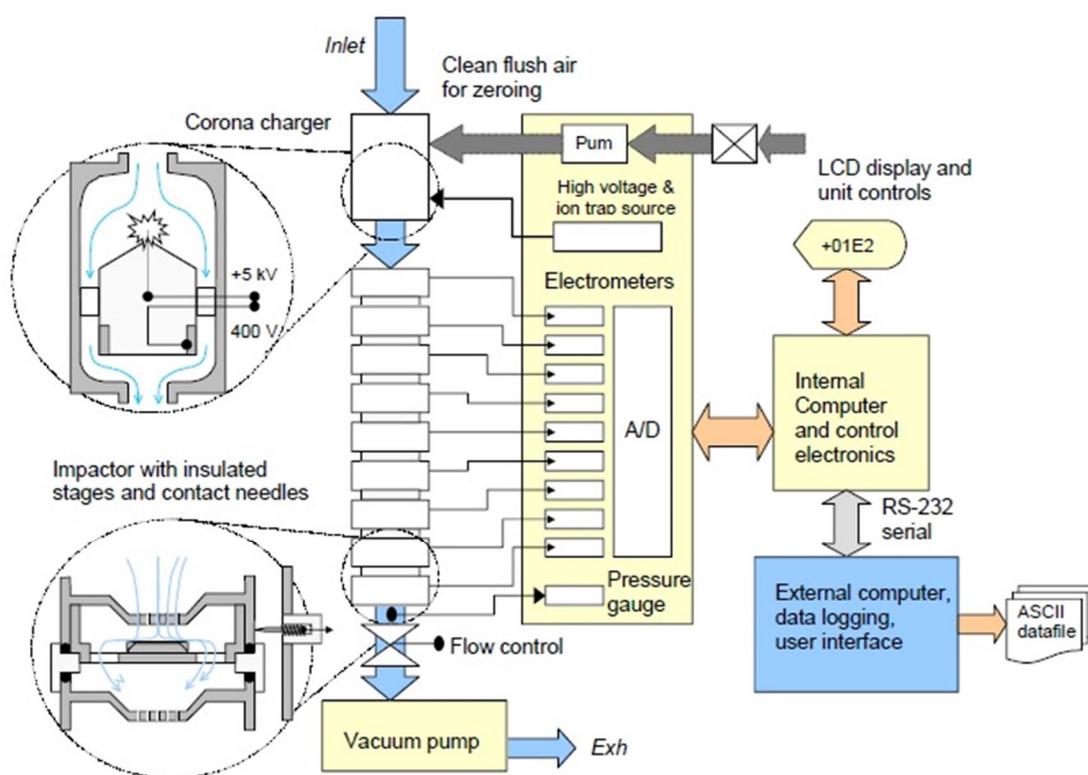


Figure 7. Schéma de principe de l'ELPI (Dekati - ELPI user manual).

## Annexe 2. Limites de quantification des 25 composés suivis par FTIR

Tableau 8. Limites de quantification haute et basse des 25 composés d'IGS Antaris

Composés	Limite de quantification	Composés	Limite de quantification
Acéaldéhyde	5 – 100 ppm	2-méthylpropène	1 – 100 ppm
Acétylène	1 – 100 ppm	MTBE, ETBE	4 – 100 ppm
Ammocia	1 – 200 ppm	NO <sub>2</sub>	5 – 100 ppm
1,3-Butadiène	1 – 100 ppm	N <sub>2</sub> O	1 – 100 ppm
CO <sub>2</sub>	0,1 – 3 %	NO	1 – 1000 ppm
CO	1 ppm – 1 %	NO <sub>x</sub>	1 – 1000 ppm
Éthane	1 – 100 ppm	Propylène	1 – 100 ppm
Éthylène	1 – 100 ppm	SO <sub>2</sub>	5 – 100 ppm
Éthanol	1 – 100 ppm	THC	1 – 500 ppm
Formaldéhyde	1 – 100 ppm	H <sub>2</sub> O	1 – 3 %
Méthane	1 – 1000 ppm	Benzène	75 ppm
Toluène	75 ppm	Xylènes	75 ppm
Éthylbenzène	75 ppm		

---

**Annexe 3. Liste complète des composés analysés par TERA-Environnement**

BTEX : Benzène, Toluène, Éthylbenzène, m-Xylène, p-Xylène, o-Xylène

Composés carbonylés : Formaldéhyde, Acétaldéhyde, Acétone, Acroléine, Propionaldéhyde, Crotonaldéhyde, Méthacroléïne, Butanal, Benzaldéhyde, Pentanal, Hexanal

HAP en phases gazeuse et particulaire : Naphtalène, Acénaphtylène, Acénaphtène, Fluorène, Phénanthrène, Antracène, Fluoranthène, Pyrène, Benzo(a)antracène, Chrysène, Benzo(b,j)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(a)pyrène, Dibenz(a,h)anthracène, Benzo(g,h,i)perylène, Indeno(1,2,3-c,d)pyrène

**INDEX DES FIGURES**

Figure 1. Cycles de conduite Artémis urbain, routier et autoroutier, NEDC et WLTC. ....	12
Figure 2. Comparaison des concentrations des particules mesurées par le CPC, l'ELPI et le FMPS pour l'ensemble des conditions expérimentales.....	20
Figure 3. Facteur d'émission de NOx avec cycles Artemis urbain, routier et autoroutier (gauche), NEDC et WLTC, avec la comparaison entre des émissions moyennes de NOx pour ensemble des cycles Artémis et les cycles d'homologation NEDC et WLTC (droite). Les véhicules Euro 4 et 5 sont testés dans le cadre du projet FEVER, les véhicules Euro 6 sont testés dans le cadre de ce projet. ....	21
Figure 4. Corrélations linaires entre les composés règlementés et non-règlementés obtenues pour les véhicules Diesel Euro 4 à Euro 6 testés dans le projet FEVER et ce projet pour les cycles WLTC, NEDC et Artémis.....	23
Figure 5. Comparaison entre les mesures du FTIR (bar rouge) et de la baie d'analyse (bar bleu) pour le CO, NOx et NO.....	24
Figure 6. Précision de l'ELPI (Dekati – ELPI user manual) .....	28
Figure 7. Schéma de principe de l'ELPI (Dekati - ELPI user manual). ....	29

**INDEX DES TABLEAUX**

Tableau 1. Principales méthodes et conditions analytiques .....	10
Tableau 2. Caractéristiques techniques des véhicules testés pour la tâche 2 .....	11
Tableau 3. Principales caractéristiques du carburant utilisé pour chaque véhicule testé.....	13
Tableau 4. Facteurs d'émission obtenus pour le véhicule Diesel.....	18
Tableau 5. Facteurs d'émission pour le véhicule essence .....	19
Tableau 6. Facteurs d'émission pour le véhicule Diesel, mesurés avec le FTIR .....	23
Tableau 7. Caractéristiques des impacteurs de l'ELPI, dont les limites de détection en nombre de particules. ....	28
Tableau 8. Limites de quantification haute et basse des 25 composés d'IGS Antaris.....	30

**INDEX DES ANNEXES**

Annexe 1. Description détail de l'ELPI .....28  
Annexe 2. Limites de quantification des 25 composés suivis par FTIR.....30  
Annexe 3. Liste complète des composés analysés par TERA-Environnement .....31