



**HAL**  
open science

## **CAractérisation des Particules des VEhicules Récents et leur Évolution Atmosphérique (CaPVeREA) - Impact de la dilution et de la température sur l'émission des particules et leurs caractérisations**

Yao Liu, Cédric Louis, Michel Andre, Patrick Tassel, Pascal Perret, Barbara d'Anna, Antoinette Boreave, Badr R'Mili

### ► **To cite this version:**

Yao Liu, Cédric Louis, Michel Andre, Patrick Tassel, Pascal Perret, et al.. CAractérisation des Particules des VEhicules Récents et leur Évolution Atmosphérique (CaPVeREA) - Impact de la dilution et de la température sur l'émission des particules et leurs caractérisations. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2016, 18 p. hal-01574827

**HAL Id: hal-01574827**

**<https://hal.science/hal-01574827>**

Submitted on 24 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 Véhicules Récents et leur Évolution Atmosphérique (CaPVeREA)***

- ***Impact de la dilution et de la température sur l'émission des particules et leurs caractérisations***

## **Livrable L1**

Projet CORTEA - CaPVeREA, convention : 1466C0001

Par :

Yao LIU, Cédric LOUIS, Michel ANDRÉ, Patrick TASSEL, Pascal PERRET, Barbara D'ANNA, Antoinette BOREAVE, Badr R'MILI

*Rapport IFSTTAR-LTE et IRCELYON*

*Février 2016*



# IFSTTAR

INSTITUT FRANÇAIS  
DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS,  
DE L'AMÉNAGEMENT ET DES RÉSEAUX



Auteurs :

Yao LIU, Chargée de recherche

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

Antoinette BOREAVE, Ingénieur d'étude

Badr R'MILI, Post-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 Impact de la dilution et de la température sur l'émission des particules et leurs caractérisations		6 Langue F	
7 Auteur(s) Yao LIU, Cédric LOUIS, Michel ANDRÉ, Patrick TASSEL, Pascal PERRET, Barbara D'ANNA, Antoinette BOREAVE, Badr R'MILI		8 Rattachement ext.	
9 Nom adresse financeur, co-éditeur ADEME		10 N° contrats, conv. 1466C0001	
		11 Date de publication <i>Février 2016</i>	
12 Remarques			
13 Résumé Dans le cadre du projet CaPVeREA, nous proposons une étude dédiée pour caractériser l'influence de conditions de prélèvement et de mesure (taux de dilution et température) sur l'émission des particules ultrafines. La mise en œuvre de mesures d'émission à l'échappement et après CVS d'un véhicule à injection directe d'essence (IDE) et Diesel Euro 5 a été réalisée. Les facteurs d'émissions ont été caractérisés au cours d'une campagne d'essais réalisée au banc à rouleaux et les résultats entre échappement et CVS ont été comparés. Les effets de la dilution et de la température montrent que les phénomènes de nucléation, de condensation et de coagulation sont favorisés à faible ratio de dilution (3-16) et de température (50°C). Ceci indique que les conditions de CVS, de basse température de dilution primaire, ne sont pas optimales et pourraient favoriser des éventuels artéfacts sur la quantification de particules. Différentes techniques analytiques ont été évaluées en regard de leur potentiel d'analyse des particules ultrafines de diamètre inférieur à 30 nm. La morphologie des particules sera caractérisée à l'aide de la microscopie électronique (MEB et MET). L'identification des espèces chimiques par spectrométrie de masse sera réalisée dans les phases suivantes du projet.			
14 Mots clés Véhicule Euro 6, Dilution, température, émission des particules, facteur d'émission, composés non-règlementés, évolution atmosphérique, photochimie, aérosol organique secondaire		15 Diffusion Libre après publications sur journaux scientifiques	
16 Nombre de pages 49 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 Dilution ratio and temperature impact on particle emissions and their characterisation				6 Language F	
7 Author(s) Yao LIU, Cédric LOUIS, Michel ANDRÉ, Patrick TASSEL, Pascal PERRET, Barbara D'ANNA, Antoinette BOREAVE, Badr R'MILI				8 Affiliation	
9 Sponsor, co-editor, name and address ADEME				10 Contract, conv. n° 1466C0001	
				11 Publication date <i>Février 2016</i>	
12 Notes					
13 Summary This report aims at improving knowledge on dilution ratio and temperature impact on particle emission. All experiments have been performed at chassis dynamometer bench with Euro 5 gasoline (DI) and Euro 5 Diesel (DPF) vehicles. Particle missions at different dilution ratio and temperature have been characterized directly at tailpipe and compared with CVS results. Dilution and temperature impacts showed that the nucleation, condensation and coagulation phenomena were favored at low dilution ratio (3-16) and temperature (50°C), which indicated that the CVS condition – low temperature and low dilution ratio – was not optimal and might induce artifacts on particle quantification. Different analytical techniques were also used to characterize ultrafine particles with diameter less than 30 nm. Particle morphology has been characterized using Electron Microscopy (MEB and MET). Chemical identification using mass spectrometry will be presented in next report.					
Key-words: Dilution, temperature, particle emission, passenger car, emission factor, non-regulated compounds, evolution atmospheric, photo-chemistry, secondary organic aerosol			15 Distribution statement Free after the authors have been published on reviewed journals		
16 Nb of pages 49 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>9</b>
2.1. Description du banc à rouleau et du système d'échantillonnage .....	9
2.2. Méthodes analytiques .....	10
2.2.1. Mesure après la dilution CVS.....	10
2.2.1.1. Mesure en ligne des particules et de carbone-suie .....	10
2.2.1.2. Caractérisation de la composition chimique des particules et la morphologie .....	11
2.2.1.3. Mesure en ligne des composés en phase gazeuse.....	12
2.2.2. Mesures à l'échappement (Tâche 2a).....	13
2.2.2.1. Système de dilution.....	13
2.2.2.2. Mesure en ligne des particules et de carbone-suie .....	13
2.3. Caractéristique des véhicules testés .....	14
2.4. Cycles de conduite.....	15
<b>3. Description, résultats et discussion par tâche .....</b>	<b>16</b>
3.1. Développement d'un système de dilution contrôlé à l'échappement (Tâche 2a, responsable IFSTTAR) .....	16
3.1.1. Tests préliminaires sur les conditions expérimentales du FPS .....	16
3.1.2. Conditions expérimentales.....	16
3.1.3. Comparaison des mesures de particules entre CPC et ELPI .....	18
3.1.4. Résultat sur l'impact des conditions de dilution et de température sur l'émission des particules et leur caractérisation .....	18
3.1.4.1. Effet de la température et de la dilution sur l'émission de particules .....	19
3.1.4.2. Distribution granulométrique des particules à l'échappement.....	22
3.1.4.3. Caractérisation chimique et granulométrique des particules après le CVS (IRCELYON)	23
3.1.4.3.1. Véhicules essence IDE .....	23
3.1.4.3.2. Véhicules diesel FAP.....	25
3.1.4.3.3. Bilan des émissions des deux véhicules .....	28
3.1.4.4. Facteurs d'émission des particules directement à l'échappement et après le CVS ...	30
3.1.4.5. Comparaison des facteurs d'émission entre les mesures d'échappement et du CVS	32
3.1.5. Conclusion .....	34
3.2. Autres aspects méthodologiques et tests (Tâche 2b, responsable IFSTTAR) .....	35
3.2.1. Synchronisation du temps de réponse entre mesure directe à l'échappement et CVS .....	35
3.2.2. Développements spécifiques pour le test sur banc monorouleau des véhicules équipés de système ABS/ESP .....	36
3.2.3. Mise au point et calibration de l'IGS.....	36

---

3.3. Facteurs d'émission des véhicules Euro 6 (Tâche 3, responsable IFSTTAR) .....	37
3.4. Étude de l'évolution physico-chimique des particules et des COV en champ proche (Tâche 4, responsable IRCELYON) .....	38
<b>4. Conclusion générale et valorisations scientifiques .....</b>	<b>39</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>40</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>42</b>
<b>Annexe 1. Description détail de l'ELPI .....</b>	<b>42</b>
<b>Annexe 2. Liste complète des composés analysés par TERA-Environnement.....</b>	<b>44</b>
<b>Annexe 3. Impact de la température et de ratio de dilution en régime stabilisé à 70 km/h .....</b>	<b>45</b>
<b>Index des Figures.....</b>	<b>46</b>
<b>Index des Tableaux.....</b>	<b>48</b>
<b>Index des Annexes .....</b>	<b>49</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 Harrison et al. 2008). 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 (Charron, 2010). 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 :

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.

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.

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.

Ce premier document fait état des différents travaux réalisés à ce jour dans le cadre du projet CaPVeREA :

Tâche 2, Développements méthodologiques pour la caractérisation des particules :

Tâche 2a, Développement d'un système de dilution contrôlé à l'échappement ;

Tâche 2b, Autres aspects méthodologiques et tests.

Il présente les tous premiers résultats disponibles concernant la mise au point directement à l'échappement d'un système de mesure à dilution et température contrôlée et l'impact de la dilution et de température sur l'émission des particules. Il présente aussi la comparaison de la quantification des

particules à l'échappement mesurées via le système de prélèvement direct à l'échappement et en parallèle via le CVS (Constant Volume Sampler).

## 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. Il s'agit d'un banc mono-rouleau pour véhicules légers qui simule le roulage sur route et permet la mesure des différentes caractéristiques de fonctionnement du véhicule (puissance, vitesse...). Les gaz d'échappement sont prélevés en sortie du tuyau d'échappement et dirigés simultanément vers deux systèmes d'échantillonnage - directement à l'échappement et via le CVS (Constant Volume Sampler) (Figure 1) – avec de l'air de dilution filtré. La mise au point du système de dilution couplé avec divers analyseurs directement à l'échappement fait l'objectif de la Tâche 2a « Développement d'un système de dilution contrôlé à l'échappement ».

Les particules, le carbone-suie et les composés en phase gazeuse visés par ces travaux ont été ensuite suivis par différents système d'échantillonnage ou de mesure (Figure 1) :

- 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 à l'échappement ; et CPC, SMPS+E, MAAP après la dilution CVS.
- La composition chimique des particules a été caractérisée par AMS après la dilution CVS.
- La mise en place et des tests sur le FTIR après la dilution CVS ont aussi été réalisés dans la Tâche 2 afin de suivre certains composés azotés et organiques légers.

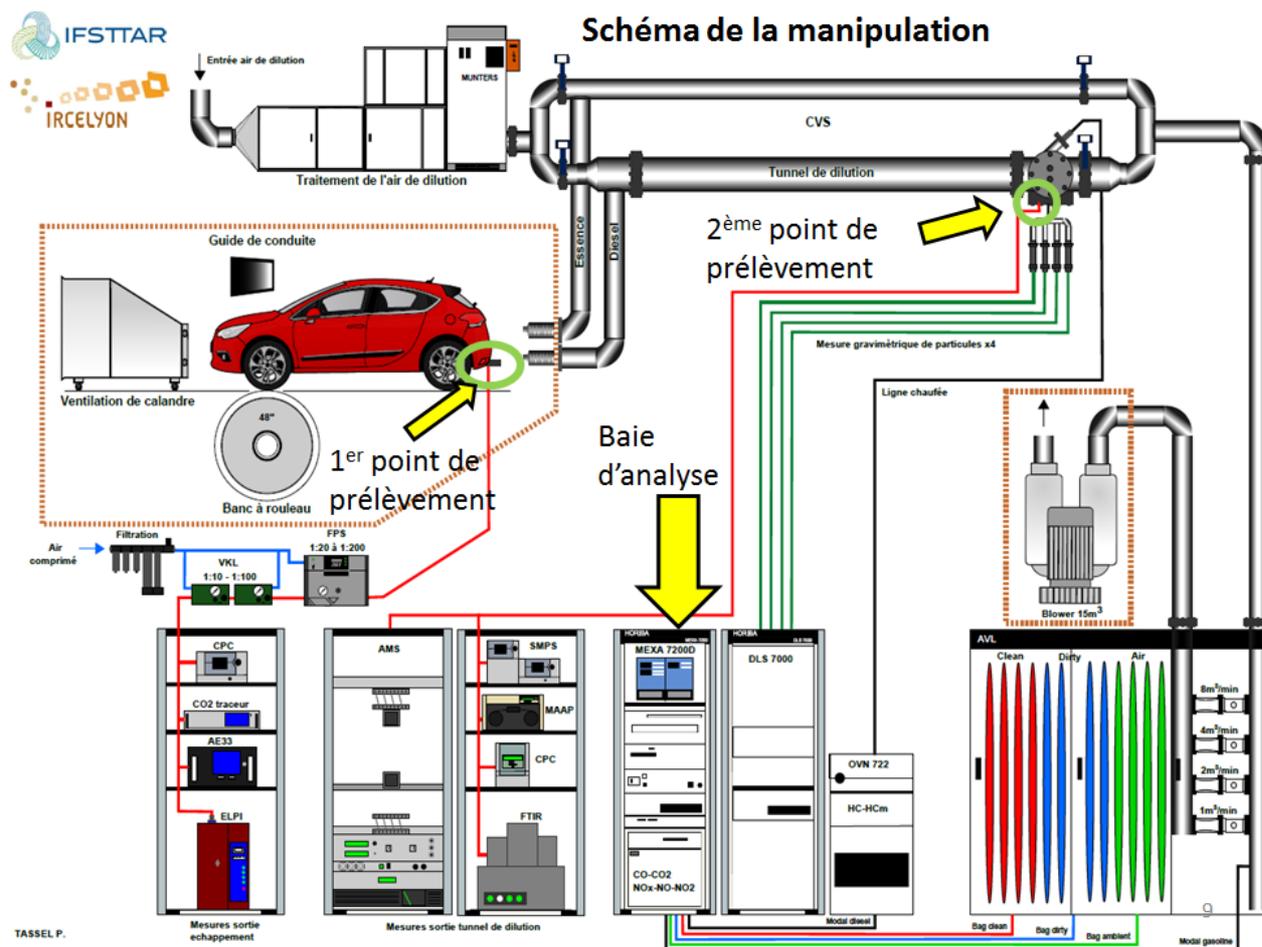


Figure 1. Schéma du système d'échantillonnage

## 2.2. Méthodes analytiques

L'ensemble des instruments de mesure est mis en œuvre par LTE-IFSTTAR et IRCELYON.

### 2.2.1. Mesure après la dilution CVS

#### 2.2.1.1. 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), un SMPS+E (Scanning Mobility Particle Sizer with Faraday Cup Electrometer) et un MAAAP (Multi Angle Absorption Photometer).

- Le CPC (TSI 3772) permet de mesurer un nombre total de particules. Il possède une chambre de butanol, où les particules sont exposées à une vapeur saturée d'alcool à 39 °C. Les échantillons passent ensuite dans un tube de condensation maintenu à 14 °C, dans lequel les particules grossissent pour attendre une dizaine de micromètre, avant d'être détectées par un

photodétecteur. Le débit d'entrée du CPC est à 1 L/min, avec la gamme de détection entre 1 et  $10^4$  particules/cm<sup>3</sup> pour une taille minimale détectable de 7 nm.

- Le SMPS+E (Grimm) est un granulomètre équipé d'une nano-colonne DMA et d'un compteur de particules utilisant une cavité Faraday (un électromètre). Il fournit une distribution en taille des particules entre 1 et 64 nm sur 27 canaux. Le SMPS+E est ainsi particulièrement adapté pour mesurer les particules ultrafines et à des concentrations relativement élevées (jusqu'à  $1.10^8$  particules/cm<sup>3</sup>). Il fonctionne avec un débit d'entrée de 1 L/min pour un débit d'accompagnement (sheath air flow) de 10 L/min.
- Le MAAP (modèle 5012) permet de mesurer la concentration en masse de carbone-suie. Son principe de fonctionnement est donné par Petzold et al., 2004. Une source lumineuse à 670 nm est pointée vers un échantillon de particules déposé par filtration continuellement sur une bande en fibre de quartz. Des photo-détecteurs mesurent la lumière transmise et celle réfléchiée à des angles spécifiques : 0°, 130° et 165°. L'intensité de la lumière transmise et celle de la lumière réfléchiée sont intégrés ainsi en continu. Cela permet de définir une intensité de lumière réellement atténuée (absorbée par le carbone-suies) réduisant ainsi l'impact de celle réfléchiée sur la mesure. L'atténuation de la lumière est ainsi proportionnelle à la quantité de matière de carbones suies déposées. La concentration de carbone-suie est intégrée chaque minute et est calculée grâce au modèle de Petzold ([Petzold et al., 2004](#)).

#### 2.2.1.2. Caractérisation de la composition chimique des particules et la morphologie

La composition chimique et la morphologie des particules du véhicule Diesel ont été caractérisées par C-TOF-AMS (Compact Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer) et le Grille MET (Microscopie électronique en transmission). Ces résultats qui ne sont pas encore finalisés et notamment les analyses AMS feront part du prochain rapport.

- L' "Aerosol Mass Spectrometer" (AMS) est un spectromètre de masse à aérosols qui permet d'obtenir la composition chimique de la partie volatile et semi-volatile des particules ainsi que la distribution en taille des aérosols lorsque l'on travaille en mode alterné. Il est donc possible de connaître la composition chimique d'une particule pour une granulométrie donnée (si les particules sont suffisamment abondantes pour la granulométrie étudiée). L'instrument se compose de trois parties. i) l'échantillonnage est fait à partir de la pression atmosphérique. Le débit obtenu est de l'ordre de 80cc/min. Les aérosols sont focalisés grâce à un ensemble de 5 lentilles aérodynamiques. ii) la mesure du temps de vol des aérosols est possible grâce à un "chopper" (disque en rotation à 150Hz avec deux fentes) qui détermine un flux discontinu de particules qui vont pouvoir se distribuer plus distinctement de la plus petite à la plus grosse au fur et à mesure de leur progression dans le vide. iii) le spectromètre de masse à temps de vol (Compact Time-of-Flight ou CTOF, TOFWERK). Les particules accélérées dans le vide arrivent sur une plaque de tungstène portée à une température de l'ordre de 700°C ou les parties non réfractaires de celles-ci sont immédiatement vaporisées (cette définition inclut tout composé chimique capable de vaporiser à 700°C dans la milliseconde) ([Drewnick et al., 2005](#)), puis

ionisées par impact électronique à 70eV. Les ions positifs sont dirigés vers l'intérieur du spectromètre pour l'analyse chimique. L'instrument donne ainsi la composition chimique de la partie non-réfractaire des particules vaporisées. Pour notre étude l'AMS a travaillé en mode alterné. Dans un premier temps nous avons fait l'acquisition du spectre de masse général de l'échantillon, ce spectre étant le résultat de la différence entre une mesure chopper ouvert ou tout l'échantillon est analysé pendant 10s, et une mesure chopper fermé correspondant à une mesure du background pendant aussi 10s. Dans un deuxième temps nous avons fait l'acquisition de la distribution en taille des aérosols en mesurant leur temps de vol pendant un temps de 30s. Ainsi, toutes les 50s nous avons un cycle de mesure.

- Le prélèvement sur la grille MET sont réalisés grâce au système de prélèvement MPS (Mini Particle Sampler) développé par R'mili (2013). Ce système consiste à utiliser une grille MET à membrane poreuse pour le prélèvement de particules par filtration. La membrane est constituée de carbone amorphe microporeuse de faible épaisseur (5 nm à 20 nm). Les particules entraînées par le flux gazeux se déposent sur la grille par impaction, interception et diffusion en fonction de leur diamètre. Pour notre étude, les grilles de type Quantifoil 1.2/1.3 400 mesh ont été utilisées

### 2.2.1.3. 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 :  $[\text{NO}_2] = [\text{NO}_x] - [\text{NO}]$ .

Le FTIR (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 2 m en BKr contenant l'échantillon gazeux à analyser et avant d'être détecté par un détecteur MTC-A. La résolution de FTIR est 0,5 cm<sup>-1</sup>, avec un temps de scan à 1,07s pour une plage de longueur d'onde entre 650 nm et 4000 nm. Les interférogrammes ainsi obtenus 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.

## 2.2.2. Mesures à l'échappement (Tâche 2a)

### 2.2.2.1. Système de dilution

Le FPS-4000 (Fine Particle Sampler) (DEKATI) a été utilisé afin d'assurer la dilution à l'échappement. Il permet d'un échantillonnage des particules dans des conditions constantes et reproductibles. Une première dilution est réalisée au plus près du point de prélèvement avec la température contrôlée. L'air de dilution est introduit via les perforations de la paroi, limitant les risques de perte des particules par diffusion, notamment. Les températures de la sonde ( $T_{sonde}$ ) et de l'air de dilution ( $T_{dilution}$ ) peuvent être ajustées. Un second diluteur, de type éjecteur, aspire l'échantillon déjà dilué et lui applique une dilution supplémentaire. Le FPS contrôle en temps réel tous les paramètres de dilution, notamment les ratios de dilution (DR total et DR primaire) avec le débit de prélèvement d'échantillon, permettant de calculer ensuite la concentration réelle de l'échantillon mesuré. Les différentes dilutions totales (dilution primaire + dilution secondaire) demandées à FPS durant nos expériences varient de 8 à 100 qui sont assurées par la différente combinaison entre les 8 électrovannes. En sortie du FPS, un ou deux simples diluteurs VKL10 (PALAS) ont été mises en place permettant d'obtenir une dilution successive en combinant avec le FPS. Les ratios de dilution totaux en tenant compte le FPS et les deux VKL peuvent aller de 8 à 20 000, avec la température de l'air de dilution primaire de 0°C à 350°C. L'échantillon a été ensuite réparti vers l'ELPI (débit 10 L/min) et l'AE 33-7 (débit 5 L/min) oet CPC (débit 0,3 l/min).

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

Les particules et le carbone-suie ont été suivis en ligne directement à l'échappement avec le CPC (Condensation Particle Counter), l'ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) et l'AE 33-7 (Aethalometer).

- 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 une large plage de concentrations allant de 0 à  $10^6$  particules/cm<sup>3</sup>. Le débit d'entrée du CPC est réglé à 1,5 L/min.
- 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 µm 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  $d\log D_p = \log_{10} \left( \frac{D_{p_{n+1}}}{D_{p_n}} \right)$  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](#).

- L'AE 33-7 (Ecomesure) 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.

### 2.3. Caractéristique des véhicules testés

Dans le cadre de la tâche 2, deux véhicules légers Euro 5 ont été testés ; un véhicule Diesel équipé d'un filtre à particule (FAP) et un véhicule essence à injection directe (ID). Leurs caractéristiques techniques sont listées dans le [Tableau 1](#).

Tableau 1. Caractéristiques techniques des véhicules testés pour la tâche 2

Véhicule	N° 1	N° 2
Marque	SEAT	Renault
Model	Altea XL	Clio III
Catégorie du véhicule	Particulier	Particulier
Type	1,2 TSI	1.5 DCI
Carburant	Essence	Diesel
Norme	Euro 5	Euro 5
Capacité moteur (ccm)	1197	1461
Puissance maxi (Ch)	105	75
Veh_eng_speed_Pmax (rpm)	5000	3750
Poids à vide (kg)	1320	1090
Kilométrage (km)	25 844	87 073
Boite	Manuelle (5 vit)	Manuelle (5 vit)
Système de post-traitement	Catalyseur trois-voies	Catalyseur d'oxydation + FAP
Date mise en circulation	27/02/2014	17/02/2012
Date teste	31/03/2015	15/04/2015
N° d'immatriculation	DD-686-6LP	CB-359-PX
Inertie équivalente simulée (Kg)	1360	1130
Nom de calage	500-30-03-15-1360-01	499-05-03-15-1130-01
Cx	0,31	0,34
S (m <sup>2</sup> )	2,508	2,306
Scx (m <sup>2</sup> )	0,777	0,784
Crr (kg/t)	0,008	0,008

## 2.4. Cycles de conduite

Les mesures d'émissions ont été réalisées sur des cycles Artémis urbain et autoroutier (André 2004 ; André et al. 2006). Ces cycles sont définis comme étant les plus représentatifs des conditions réelles de conduite (Figure 2). Des mesures en régime stabilisé à 70 km/h ont été également réalisées.

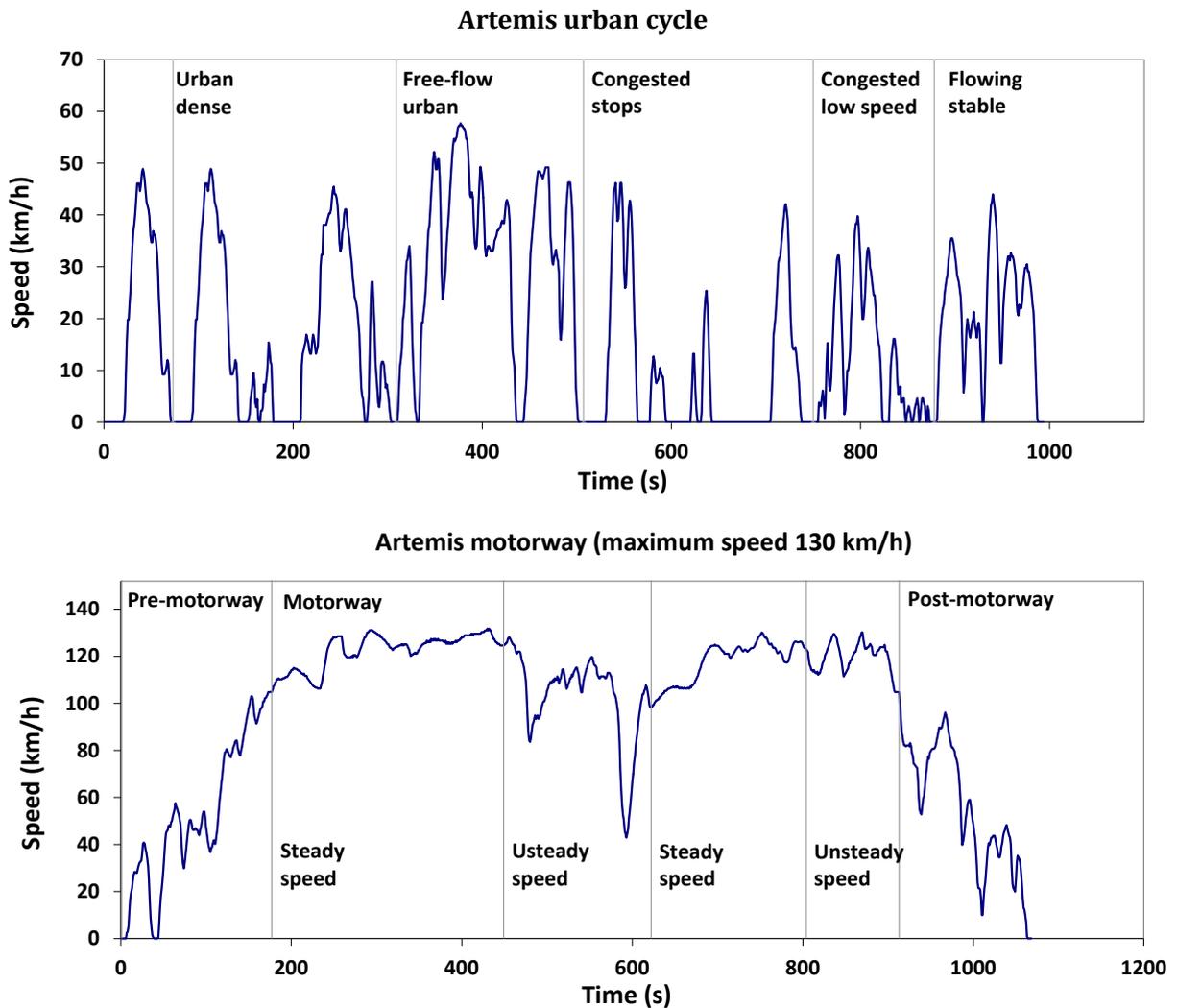


Figure 2. Cycles de conduite Artémis urbain, routier et autoroutier (André, 2004)

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

#### 3.1. Développement d'un système de dilution contrôlé à l'échappement (Tâche 2a, responsable IFSTTAR)

##### 3.1.1. Tests préliminaires sur les conditions expérimentales du FPS

Dans une optique de mettre en place un système de dilution contrôlé et adapté, les tests avec différentes dilutions (primaire et secondaire) ont été réalisés par combinaisons des 8 électrovannes du FPS. Pour un ratio de dilution donné, plusieurs combinaisons d'électrovannes peuvent être configurées par le FPS. Afin d'utiliser toujours la même combinaison il est nécessaire de connaître les ratios de dilution pour chacune des différentes configurations. Les tests ont été réalisés avec de l'air ambiant. Les différentes configurations des électrovannes sont présentées dans le [Tableau 2](#), ainsi que les débits d'échantillon prélevé, les débits de dilution primaires et les ratios de dilution totaux.

Tableau 2. Débit d'échantillon prélevé, dilution primaire et ratio de dilution totale du FPS avec différentes configurations des électrovannes.

Configuration électrovannes du FPS	Dilution primaire (L/min)	Ratio de dilution totale	Débit d'échantillon prélevé (L/min)
2, 3, 4	12,3	8	15,8
1, 2, 7	11,3	12	13,7
1, 2, 8	8,8	16	16,8
1, 2, 5, 6	21	20	7,3
1, 2, 5, 7	22,2	24	5,9
1, 2, 3, 6, 7	23	26	5,1
1, 2, 6, 7	24	30	4
1, 2, 3, 5, 6	25	37	3,8
1, 2, 3, 4, 7	24,6	40	4,1
1, 2, 5, 8	25,8	56	2,5
1, 2, 6, 8	28,3	67	2,1
1, 2, 3, 4, 8	28,7	100	1,6

##### 3.1.2. Conditions expérimentales

La campagne de mesure sur l'impact des conditions de dilution et de température sur l'émission de particules et leur caractérisation a été réalisée du 31/03/2015 au 06/05/2015 sur le banc à rouleau à IFSTTAR avec IRCELYON. Les cycles de conduite ont été choisis selon les résultats obtenus sur les émissions des particules observés dans le cadre du projet FEVER (Financé par ADEME). Les émissions de particules ont été suivies avec une température de dilution variant de 50 °C à 150 °C et des ratios de dilution variant de 30 à 4000 pour le véhicule essence et de 8 à 4000 pour le Diesel, contrôlés par les

conditions de FPS présentées dans la section 3.1.1. L'ensemble des conditions et la répétition des mesures sont présentés dans le [Tableau 3](#).

Tableau 3. Tableau récapitulatif des conditions expérimentales pour les véhicules essence et Diesel avec les différentes conditions de conduite.

<b>Véhicule Essence</b>						
	T=50 °C		T=100 °C		T=150 °C	
	Dilution	Nombre de mesures	Dilution	Nombre de mesures	Dilution	Nombre de mesures
Arturb F*	100	1	100	1	100	1
	1000	1	1000	1	1000	1
	2000	1	-	-	-	-
ArtMW#	30	3	30	3	30	3
	100	2	100	3	100	3
	400	3	400	3	400	3
	1000	3	1000	3	1000	3
	2000	3	2000	3	2000	3
	4000	3	4000	2	4000	3
Stabilisé à 70km/h	100	2	100	2	100	3
	1000	2	1000	2	1000	3
	2000	2	2000	2	2000	3

<b>Véhicule Diesel</b>						
	T=50 °C		T=100 °C		T=150 °C	
	Dilution	Nombre de mesures	Dilution	Nombre de mesures	Dilution	Nombre de mesures
Arturb F*	100	2	100	1	-	-
	1000	1	1000	1	-	-
	2000	1	2000	1	-	-
ArtMW#	8	2	8	2	8	2
	12	2	12	2	12	2
	16	2	16	2	16	2
	30	4	30	2	30	2
	56	2	56	2	56	2
	100	2	100	2	100	2
	1000	2	1000	2	1000	2
	2000	1	2000	2	2000	2
	4000	2	4000	2	4000	2
Stabilisé à 70km/h	8	2	8	2	8	2
	12	2	12	2	12	2
	16	2	16	2	16	2
	20	2	20	2	20	2
	30	1	30	1	30	2

	100	2	100	1	100	2
	1000	3	1000	2	1000	2
	2000	3	2000	2	2000	2

\*ArturbF : Cycle Artémis urbain à démarrage froid

#ArtMW : Cycle Artémis autoroutier à 130 km/h

- : Pas de cycle réalisé

### 3.1.3. Comparaison des mesures de particules entre CPC et ELPI

La concentration en nombre de particules a été quantifiée avec le CPC et l'ELPI simultanément et directement à l'échappement. Les comparaisons entre ces deux analyseurs ont été effectuées pour l'ensemble des conditions expérimentales (dilution, température) avec les différentes conditions de conduite citées dans le [Tableau 3](#) afin de valider notre méthode de quantification ([Figure 3](#)). Nous avons observé une bonne linéarité entre les deux appareils de mesure. Le coefficient de la corrélation linéaire est proche de 1.

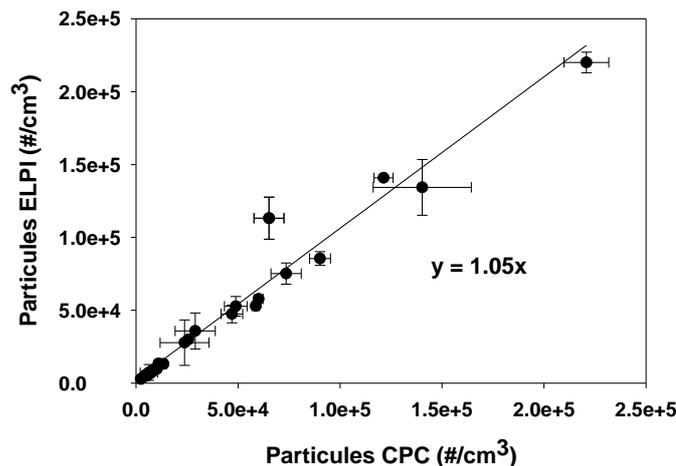


Figure 3. Comparaison des concentrations des particules mesurées par l'ELPI et par le CPC pour le véhicule essence pour l'ensemble des conditions expérimentales.

### 3.1.4. Résultat sur l'impact des conditions de dilution et de température sur l'émission des particules et leur caractérisation

Après l'émission, on peut considérer que les particules subissent deux étapes différentes de dilution: la phase 'échappement-à-route' et la phase 'route-à-ambiant'. La première phase est souvent indépendante des conditions atmosphériques. Le taux de dilution peut atteindre entre 1000 et 4000 en seulement quelques secondes après l'émission ([Zhang et al., 2004](#)). La deuxième phase dépend de la turbulence atmosphérique. Le taux de dilution est autour de 10 en 3-10 minutes ([Zhang et al, 2004](#); [Shi](#)

et al, 2002). Les taux de dilution sont des facteurs influençant fortement la formation de particules ultrafines (Morawska et al, 2008; Jacobson et al, 2005 et 2004; Zhang et al, 2004). Avec un taux de dilution élevé, la température de gaz d'échappement pourrait décroître rapidement à la température ambiante quelques secondes après l'émission, ce qui entraîne des impacts importants en terme de thermodynamique des particules (Zhang et al., 2004). Plusieurs études se sont aussi focalisées sur l'évolution des particules à l'échappement par des mesures au banc à rouleaux avec des conditions de dilution contrôlées ou bien dans l'atmosphère ambiante (Ning et al., 2010 ; Casati et al., 2007 ; Ronkko et al., 2006 ; Giechaskiel et al., 2005 ; Jacobson et al., 2005 and 2004 ; Mathis et al., 2004). Cependant, le protocole de la quantification des particules ultrafines à l'émission reste incertain avec notamment un besoin de connaissance sur leur comportement et évolution sous différentes conditions atmosphériques. De plus, dans plupart des cas, les particules émises par les véhicules à moteur Diesel et essence sont quantifiées par le système PMP (Programme de Mesure de Particule). Le PMP mesure des particules après le CVS en prévoyant un système chauffant à 300 à 400 °C et un comptage des particules de taille supérieure à 23 nm. De plus, certains travaux ont montré que l'utilisation d'un système strict de pré-conditionnement tel que le CVS ne semble pas approprié pour la mesure en nombre des particules (Giechaskiel et al., 2010 ; Giechaskiel et al., 2007 ; Mathis et al., 2005).

Dans l'objectif de mieux quantifier et comprendre l'évolution des particules à l'émission dans des conditions les plus proches de celles rencontrées dans l'atmosphère, nous avons réalisé des travaux directement à l'échappement sur une gamme de ratio de dilution entre 8 et 4000 et de température entre 50 et 150 °C, afin d'améliorer la compréhension de l'impact de la dilution et température sur l'émission des particules. Les mesures après le CVS ont aussi été réalisées en parallèle permettant de caractériser l'impact des différents systèmes de prélèvement / mesure sur la formation et la quantification des particules et leurs propriétés physico-chimiques.

#### **3.1.4.1. Effet de la température et de la dilution sur l'émission de particules**

L'effet de la dilution totale et de la température sur l'émission de particules a été caractérisé pour une gamme de dilution totale entre 30 et 4000 et de température à 50, 100 et 150 °C pour le véhicule essence. Les émissions des particules directement à l'échappement à différents ratios de dilutions totaux et températures de dilution sont présentées dans la [Figure 4 a](#) pour les cycles autoroutiers. **De manière systématique, la quantité de particules émises diminue lorsque la température augmente. Une température de 50 °C induit ainsi des quantités de particules 2 à 4 fois plus élevées que celles mesurées à une température élevée (150 °C), selon le ratio de dilution testé (30 à 4000).** Ces résultats sont aussi supportés par les analyses en fonction de la taille des particules suivies par l'ELPI, qui montrent une augmentation de quantité des particules à la basse température et qui concerne principalement les particules entre 22 nm (plateau de 7 à 30 nm) et 78 nm (plateau de 59 à 104 nm) ([Figure 4 b](#)). Selon [Zhang et al \(2004\)](#), une chute rapide de la température conduit à une diminution exponentielle de la pression de vapeur des composés. Par conséquent, les composés semi-volatiles pourraient condenser et induire un changement significatif du nombre de particules via les processus de nucléation et de condensation. Ces observations sont en accord avec un certain nombre de travaux

antérieurs (Beckers et al., 2009 ; Casati et al., 2007 ; Virtanen et al., 2006 ; Burtcher, 2005 ; Mathis et al., 2005 ; Bukowiecki et al., 2003). La même tendance a également été observée pour le véhicule Diesel. Cependant, les émissions de véhicules Diesel avec FAP sont très faibles, proche du niveau de fond dans la plupart des cas. Les résultats sont ainsi moins fiables et représentatifs et ne sont donc pas présentés dans ce rapport.

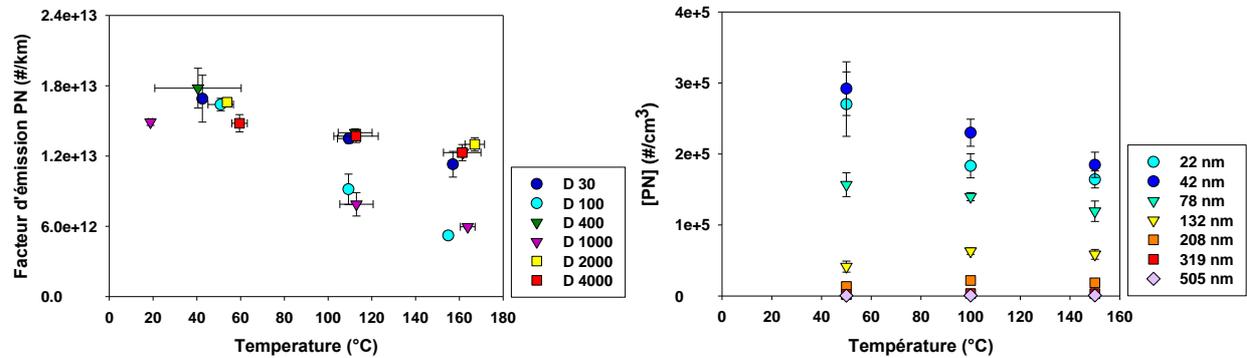


Figure 4. a) Facteurs d'émission des particules en autoroutier mesurée à l'échappement en fonction de la température de dilution à différents ratios de dilution totaux pour le véhicule essence mesurés par ELPI. b) Concentration de particules mesurée par les 7 premiers impacteurs de l'ELPI en fonction de la température avec un ratio de dilution de 30 pour le véhicule essence sous conditions Artémis autoroutier.

Nous avons également observé que les effets de la température sont plus significatifs pour les ratios de dilution de 100 et de 1000 (Figure 4 et Figure 24 (Annexe 3)). Cette différence pourrait s'expliquer par la variation du taux de dilution primaire réalisée par le FPS qui est autour de 15 pour une dilution totale de 100 et 1000, et entre 3 à 5 pour une dilution totale à 30, 400, 2000 et 4000. **Cette dilution primaire semble donc être un paramètre important dans la détermination du nombre de particules.** Les valeurs du ratio de dilution primaire et du débit d'échantillon prélevé à l'échappement réalisés par le FPS en fonction de ratio de dilution total choisi sont présentées dans le Tableau 4 avec le ratio de dilution du CVS pour les cycles ArtMW.

Tableau 4. Dilution primaire et débit d'échantillon prélevé à l'échappement fournis par FPS en fonction de la dilution totale choisie avec le ratio de dilution du CVS pour les cycles ArtMW.

Ratio de dilution totale	Ratio de dilution primaire	Débit d'échantillon prélevé à l'échappement (L/min)	Ratio de dilution du CVS pour les cycles ArtMW
30	4,9	4,5	13
100	16,1	1,1	
400	5,4	3,7	
1000	15,3	1,6	
2000	3,1	6,5	
4000	5,4	3,9	

Afin de caractériser l'effet de la dilution totale sur l'émission de particules sous les mêmes conditions expérimentales et de s'affranchir de l'impact de la dilution primaire induit par le FPS, on n'a pas pris en compte les dilutions à 100 et à 1000 qui ont un ratio de dilution primaire élevé. L'impact de la dilution primaire dû au FPS sera discuté avec la Figure 6. Théoriquement, la concentration  $C$  à une dilution donnée est représentée par la fonction :

$$C = C_0 \times \frac{1}{DR},$$

où  $C_0$  est la concentration sans dilution et DR est le ratio de dilution.

La concentration des particules émises en fonction de  $\frac{1}{DRT}$  (1 / ratio de dilution totale) à 50, 100 et 150 °C est présentée dans la Figure 5 avec un zoom sur les forts ratios de dilution (à droite). Nous avons observé une linéarité entre la concentration de particules et les différents ratios de dilution qui ont été variés entre 30 et 4000. Les coefficients de puissance sont autour de 1 pour les trois différentes températures étudiées. Cette relation de linéarité indique que cette gamme de dilution n'induit pas une influence significative sur la quantité de particules à l'émission.

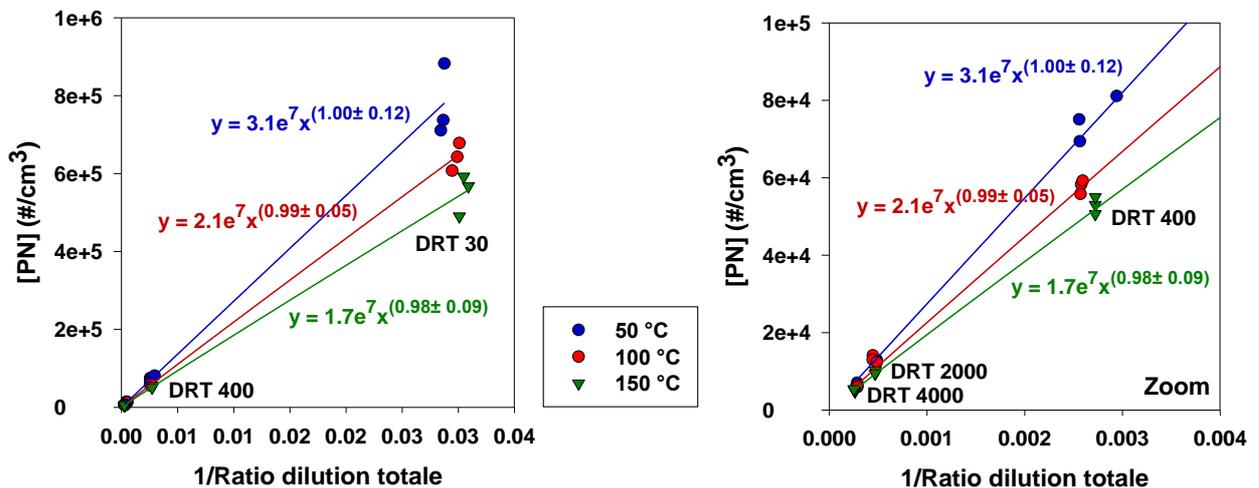


Figure 5. Concentration des particules mesurée en fonction de  $\frac{1}{DRT}$  à 50, 100 et 150 °C pour le véhicule essence avec le cycle Artémis autoroutier avec un zoom sur le fort ratio de dilution (à droite). DRT : ratio de dilution total.

Lors de la dilution primaire du FPS, les ratios de dilution peuvent varier entre 3 et 16, ces valeurs sont dictées par les limitations instrumentales des systèmes de dilution disponible à ce jour. L'impact de cette première dilution sur l'émission de particules a aussi été caractérisé. Figure 6 a et b présentent la concentration de particules émises en fonction de  $\frac{1}{DRP}$  (1 / ratio de dilution primaire) à 50, 100 et 150 °C. Contrairement à la dépendance linéaire observée par rapport à la dilution totale (voir Figure 5), ici (Figure 6 a) la concentration de particules évolue en suivant une allure de puissance pour 100 et 150 °C avec des coefficients de 1,48 et 1,29, respectivement. Cependant, à 50 °C, le coefficient de puissance est à 1.04, donc reste relativement proche de 1.

La Figure 6 b présente les émissions de particules normalisées par les ratios de dilution primaire. Pour un ratio de dilution primaire autour de 3 une faible variabilité des concentrations de particules observées (entre  $2\text{-}3 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ , Figure 6 b) indépendamment des températures testées. Dans ces conditions la concentration de vapeurs condensables doit être si élevée que des phénomènes de nucléation dominant à n'importe quelle température de dilution primaire. La Figure 6 b montre aussi qu'à 50 °C la dilution primaire ne joue pas un rôle important, le nombre de particules est constante autour de  $(2.5 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3)$  indépendamment de la valeur de la dilution primaire testée (entre 3 et 16). À cette température de l'air de dilution les phénomènes de nucléation sont très significatifs et dominant l'effet de la dilution primaire dans le range des valeurs testées (dilution 3-16). Ceci révèle que les conditions de dilution dans le CVS, avec une basse température de dilution primaire, ne sont pas optimales et pourraient favoriser des éventuels artéfacts sur la quantification des particules (voir section 3.1.4.5). Moins de particules sont observées pour une dilution primaire relativement importante (autour de 15) et une température élevée (à 150 °C). Ces conditions pourraient représenter celles du FPS afin de minimiser des artéfacts de mesure.

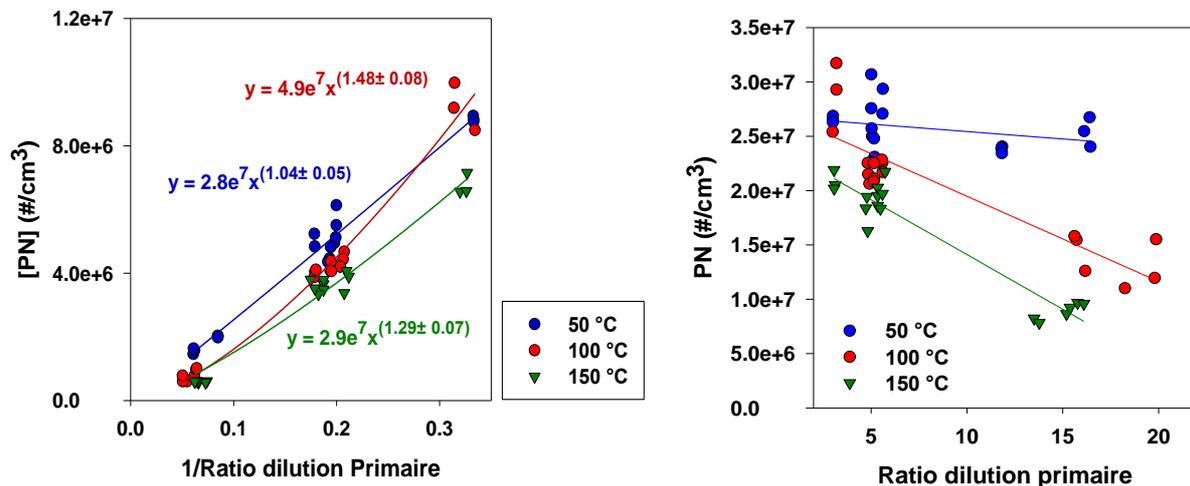


Figure 6. a) Concentration de particules mesurée en fonction de  $\frac{1}{DRP}$  à 50, 100 et 150 °C pour le véhicule essence avec le cycle Artémis autoroutier. DRP : ratio de dilution primaire. b) même plot mais normalisée selon les ratios de dilution primaire.

### 3.1.4.2. Distribution granulométrique des particules à l'échappement

Concernant la taille des particules, leurs comportements sont similaires pour toutes les conditions de dilution étudiées. Un exemple de l'effet de la température à 50, 100 et 150 °C, avec une dilution totale à 30 et 100 est présenté dans la Figure 7. Nous avons bien retrouvé une diminution de la concentration des particules avec une augmentation de la température. Cependant l'allure de la distribution granulométrique des particules ne semble pas être influencée par cette variation de la température. Cette observation pourrait être expliquée par le phénomène de nucléation qui domine par rapport aux phénomènes de coagulation et condensation. Cependant, en raison d'une faible résolution d'ELPI sur la

distribution en taille de particules entre 7 et 30 nm, cette observation sera vérifiée au cours du projet. Des expériences supplémentaires avec le nouvel analyseur FMPS (Fast Mobility Particle Sizer) seront réalisées courant avril 2016.

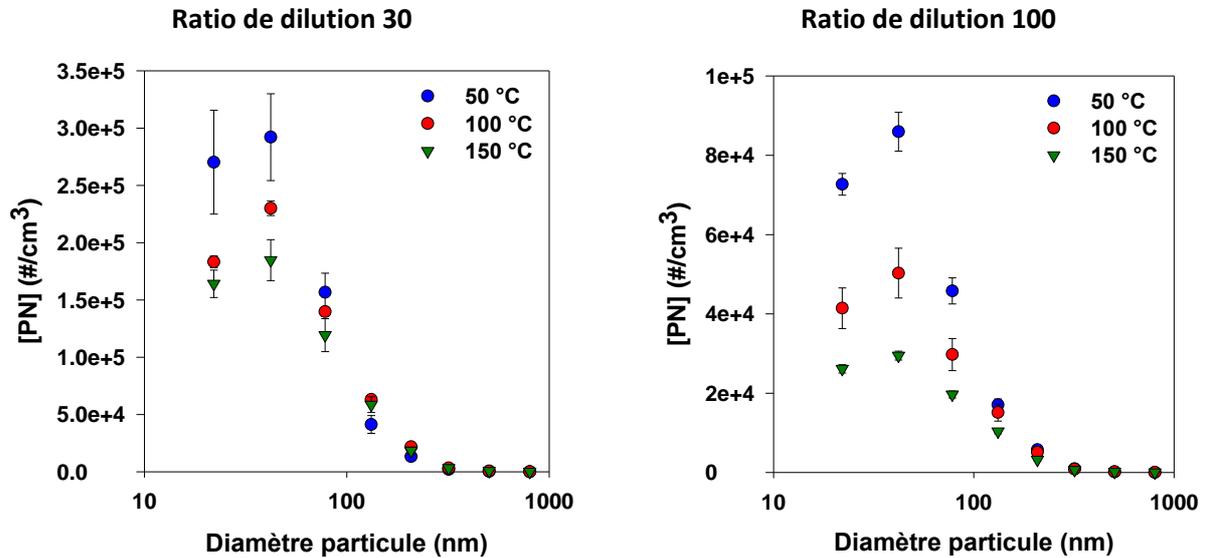


Figure 7. Un exemple de la distribution en taille des particules à 50, 100 et 150 °C du véhicule essence pour le cycle Artémis autoroutier avec une dilution total de 30 et de 100.

### 3.1.4.3. Caractérisation chimique et granulométrique des particules après le CVS (IRCELYON)

#### 3.1.4.3.1 Véhicules essence IDE

- Véhicule essence IDE : Cycle Artémis Urbain

La [Figure 8](#) présente un exemple de l'évolution temporelle de la distribution et de la concentration des particules émis durant un cycle ARTEMIS urbain démarré à froid. Dans ces conditions, le véhicule IDE ne semble émettre des particules dans la gamme des particules ultrafines étudié (inférieure à 60 nm) pouvant être assimilé à un phénomène de nucléation. En dessous de 20 nm le signal observé est dû au bruit de fond des électromètres. Par ailleurs, les distributions en tailles des particules émises semblent commencer au delà de 50 nm soit à la limite haute de la fenêtre de détection de l'instrument. Ce constat est confirmé par les analyses MET réalisé sur un même cycle sur une durée de 2 minutes. Le résultat d'analyse est donné par la [Figure 9](#). On peut en effet observer des particules de nature fractale qui correspondent à des suies de carbone émises en mode accumulation voir en mode croissance.

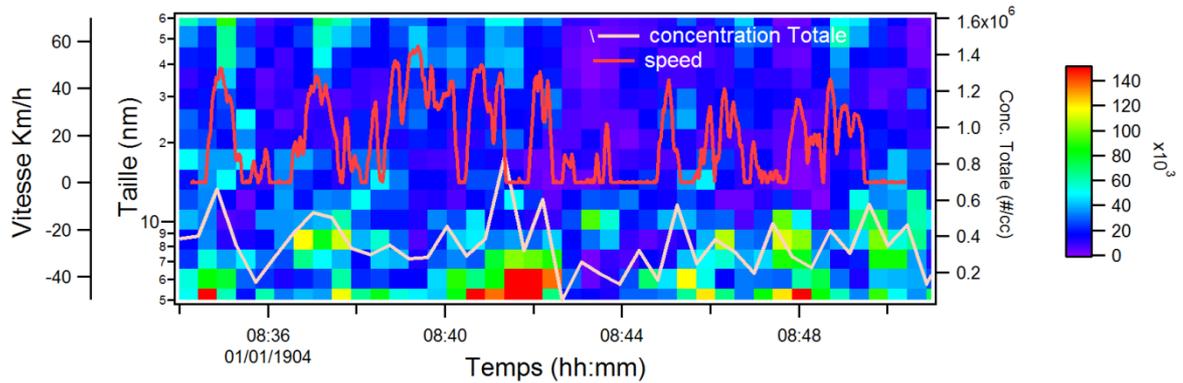


Figure 8 : Mesure SMPS+E - Évolution temporelle de la concentration en nombre de particules ( $\# / \text{cc}$ ) et leur granulométrie lors d'un cycle urbain démarré à froid dans le CVS

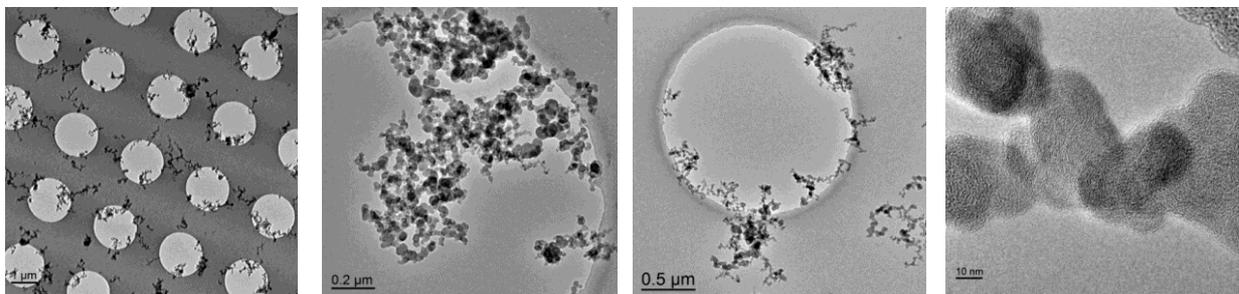


Figure 9 : analyse MET – prélèvement réalisé sur 2 minutes lors d'un démarrage à froid d'un cycle Artémis urbain (CVS).

- Véhicule essence IDE : Cycle Artémis autoroutier (Motorway)

La [Figure 10](#) présente un exemple de l'évolution temporelle de la distribution et de la concentration des particules émises durant un cycle ARTEMIS autoroutier. Comme évoqué précédemment les cycles autoroutiers suivis font suite aux cycles urbains démarrés à froid. À l'exception du milieu du cycle les distributions en taille des particules semble cette fois commencer à partir de 20 à 30 nm. Par rapport au cycle urbain, les particules émises dans ces conditions ont ainsi des diamètres relativement réduits.

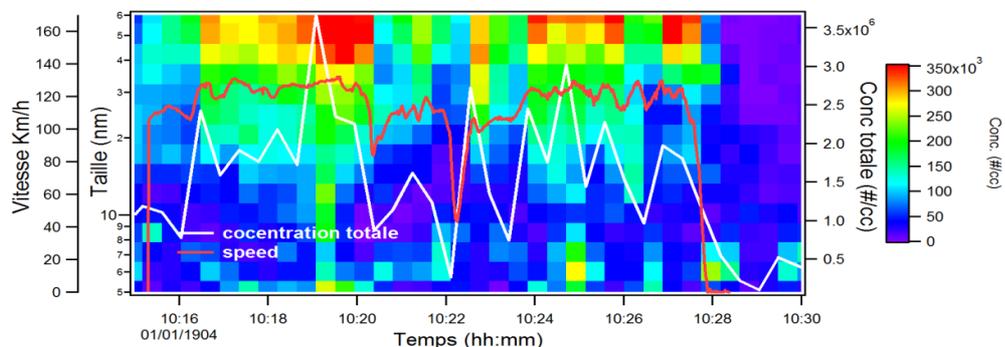


Figure 10 : Évolution temporelle de la concentration en nombre de particules ( $\# / \text{cc}$ ) et leur granulométrie lors du cycle autoroutier.

Deux prélèvements ont été réalisés sur un même cycle ; un premier d'une durée de 2 minutes à partir du début du cycle et un deuxième, tout de suite après, sur une durée de 4 minutes et 30 secondes. La [Figure 11](#) présente les résultats d'analyse respectivement par les quatre images à gauche (a.) et par les deux images à droites (b.)

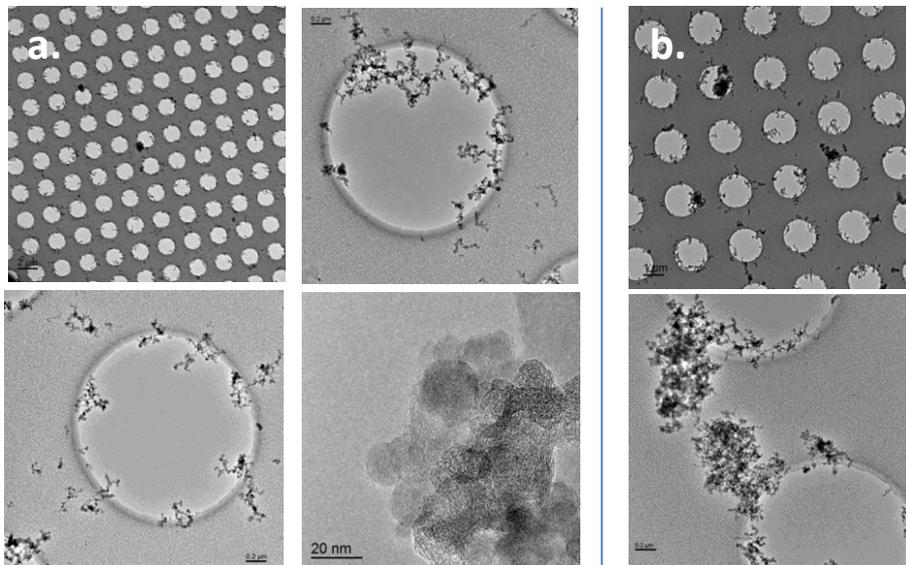


Figure 11 : Analyses MET – prélèvements réalisés lors d'un cycle ARTEMIS routier

Au début du cycle on peut observer essentiellement de fines agglomérats de suie de carbone. Plus tard des amas de suies de carbones de diamètres de l'ordre du micromètre apparaissent également. De toute évidence, quelque soit le cycle suivi les véhicules IDE semblent émettre une quantité importante de suies de carbone en mode accumulation et aussi en mode croissance.

#### 3.1.4.3.2 Véhicules diesel FAP

##### ○ Véhicule diesel FAP : Cycle Artémis Urbain

La [Figure 12](#) montre l'évolution temporelle de la distribution en taille des particules fine (mesure mesure SMPS) et ultrafines (mesure SMPS+E) et de la concentration en carbone suie (mesure MAAP) émis durant un cycle ARTEMIS urbain démarré à froid.

Le démarrage à froid est accompagné d'une émission significative de particules en mode accumulation avec un diamètre moyen variant entre 70 et 200 nm (mesure SMPS). Ces émissions durent plus de 10 minutes et correspondent comme l'indique la mesure MAAP au carbone noir ou carbone suie. Des particules ultrafines de diamètres inférieurs à 4 nm sont également observées toutefois avec des concentrations dans la limite basse de détection du SMPS+E.

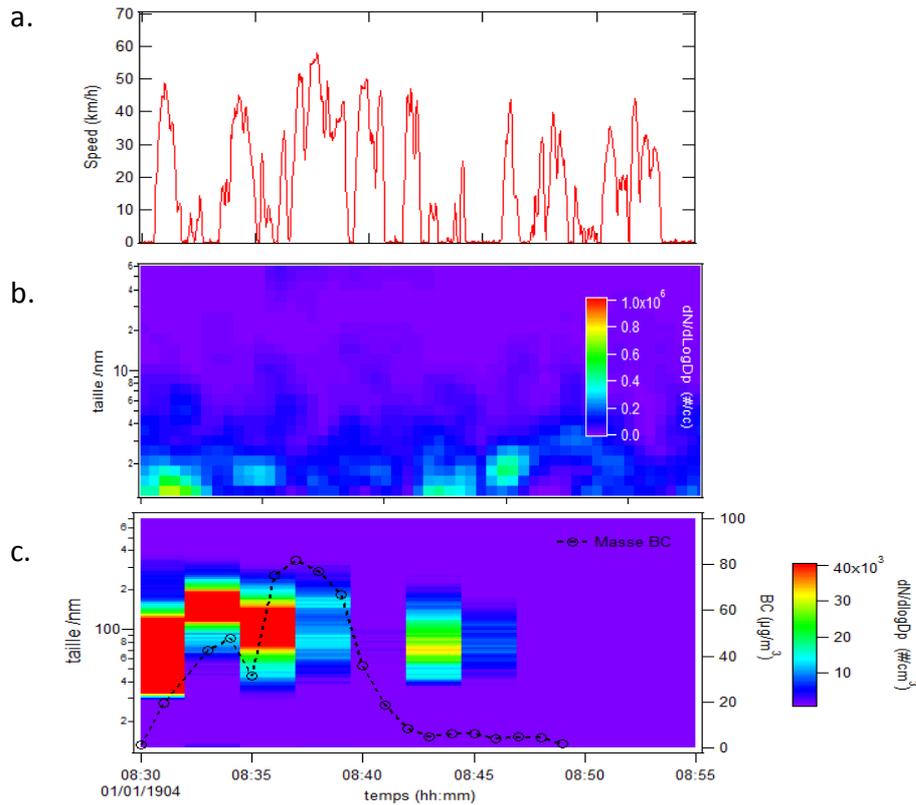


Figure 12 : évolution temporelle de la distribution en taille des particules et de la concentration en carbone suie émis durant un cycle Artémis urbain démarré à froid. (a.) cycle Artémis urbain, (b.) analyse SMPS+ (c.) analyse SMPS et mesure MAAP en carbone noir (Black Carbon : BC)

Deux prélèvements ont été réalisés sur un même cycle : un premier d'une durée de 5 minutes à partir du début du cycle et un deuxième, tout de suite après, sur une durée de 5 minutes également. La [Figure 13](#) présente les résultats d'analyse respectivement par les quatre images à gauche (a.) et par les deux images à droites (b.) présente les résultats de grille MET. On peut observer dans l'ensemble de fines agglomérats de suie de carbone, des amas de suie et de très fine agrégats en carbone amorphe. La présence de suies de carbone est en accord avec les mesures SMPS et MAAP ci-dessus. Les fines agrégats en carbone amorphe peuvent être dus au phénomène de nucléation post-dilution et par ailleurs une réorganisation sur la surface de la membrane de la grille après leur prélèvement. Ce dernier point mérite d'être approfondi en parallèle des investigations cherchant à définir les précurseurs menant à la nucléation et la formation de particules secondaires.

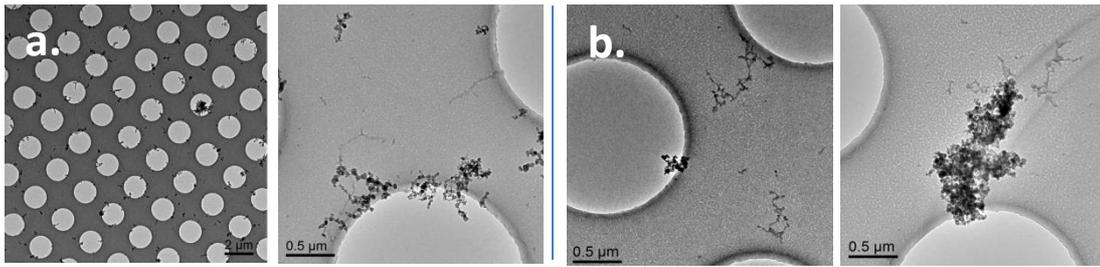


Figure 13. Analyse MET - Prélèvement réalisé lors d'un démarrage à froid d'un cycle Artémis urbain.

- Véhicule diesel FAP : Cycle Artémis autoroutier (Motorway)

Sur le graphe de la Figure 14, nous avons tracé les quatre cycles autoroutiers de la matinée.

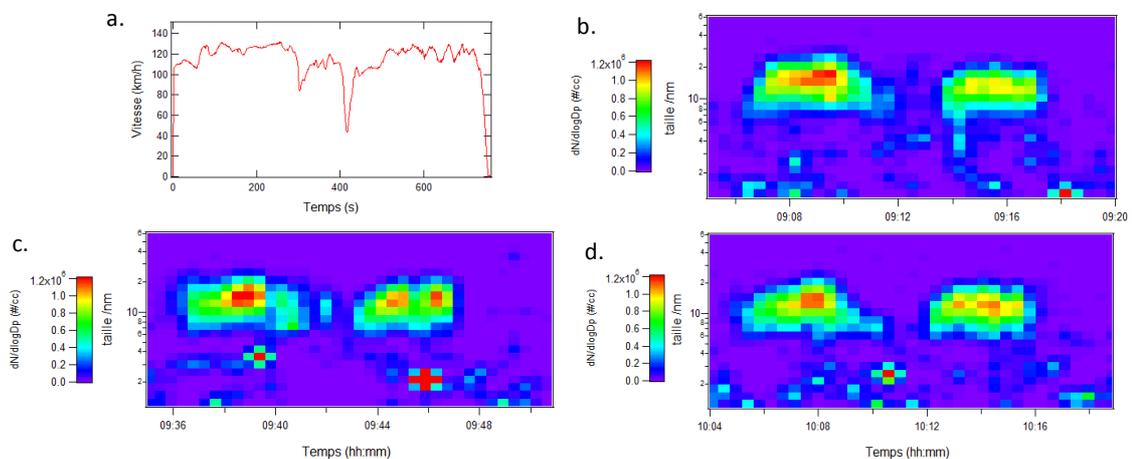


Figure 14 : mesure SMPS+E - évolution temporelle de la distribution en taille des particules émis durant trois cycles ARTEMIS autoroutier successifs. (a.) cycle ARTEMIS autoroutier, (b.) cycle 1, (c.) cycle 2, (d.) cycle 3.

Comme on peut l'observer les cycles autoroutiers sont systématiquement accompagnés d'émissions significatives de particules ultrafines de diamètre moyenne de l'ordre 15 nm. Sur ces cycles, le mode accumulation précédemment observé sur le cycle urbain démarré à froid avait disparu laissant place à ces modes de nucléation. Ces derniers et leurs concentrations sont à considérer en prenant compte la dilution et son impact sur la nucléation et la formation de nouvelles particules.

La Figure 15 représente des résultats de deux prélèvements réalisés sur un des cycles Artémis autoroutier; un premier d'une durée de 5 minutes à partir du début du cycle et un deuxième, tout de suite après, sur une durée de 5 minutes également. Les résultats obtenus sont présentés respectivement par les images à gauche (a.) et par les images à droites (b.). On peut observer

uniquement des agrégats en carbone amorphe. Comme évoqué précédemment la présence de ces agrégats peuvent avoir un lien avec les épisodes de nucléation observés à l'aide du SMPS+E.

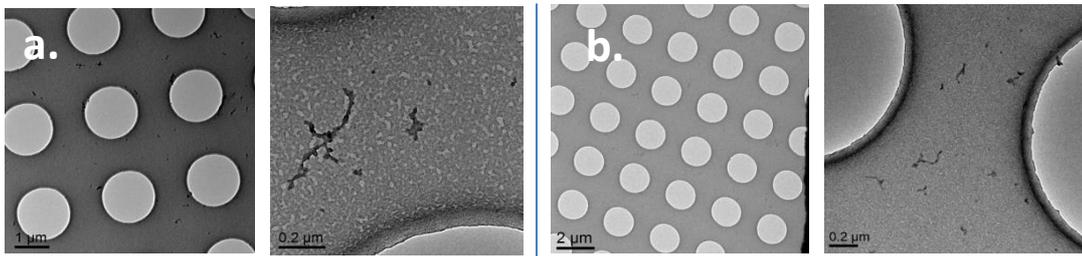


Figure 15. Analyses MET - Prélèvements réalisés lors d'un cycle Artémis autoroutier

### 3.1.4.3.3 Bilan des émissions des deux véhicules

La Figure 16 représente le bilan des concentrations moyennes des particules (mesure CPC) et des masses moyennes par unité du kilomètre en carbone-suie (mesure MAAP) émis par le véhicule IDE mesurées derrière un CVS sur les deux cycles Artémis urbain et autoroutier. Dans un premier temps un VKL a été mis en aval du CVS et par ailleurs un autre a été rajouté en série. Ainsi les taux de dilutions variaient entre de 10 et 100 respectivement, ce en plus de la dilution du CVS qui elle est variable.

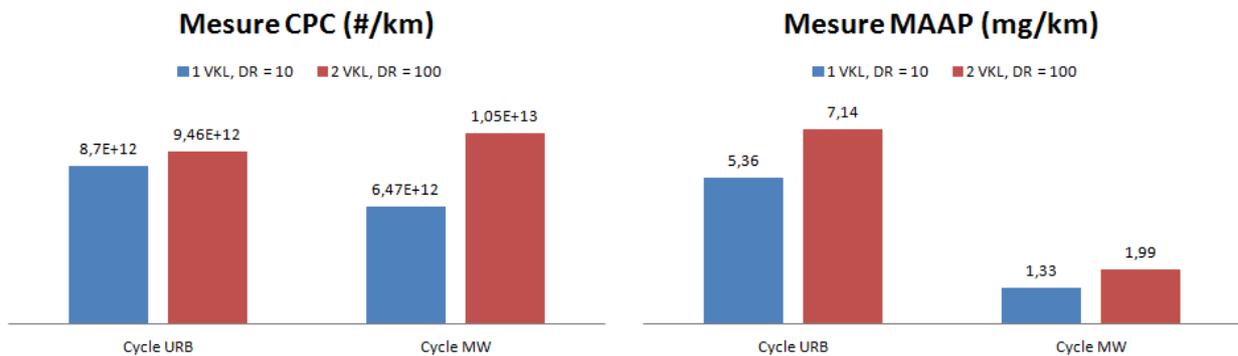


Figure 16 : Représentation des facteurs d'émission en nombre et en masse, pour différents taux de dilution (véhicule essence IDE Euro 5).

Ces histogrammes montrent ainsi d'une part les facteurs d'émission en masse et en nombre selon les cycles suivis et d'autre part l'effet de la dilution sur ces concentration.

Le facteur d'émission en nombre (mesure CPC) varie d'un cycle à l'autre et d'un taux de dilution à l'autre. Comparé au cycle urbain (URB), il est moins important lors du cycle autoroutier (MW) avec un seul VKL (DR = 10) et plus important avec deux VKL (DR =100). Toutefois, quel que soit le cycle, ce facteur d'émission est toujours plus important avec deux VKL.

En ce qui concerne le facteur d'émission en masse (mesure MAAP), quel que soit le taux de dilution appliqué, il est environ quatre fois moins important lors des cycles autoroutier comparés aux cycles urbains. Comme évoqué précédemment, le véhicule IDE émet une quantité importante de suies de carbone qui lors des cycles autoroutiers (démarrés à chaud) semblent avoir des diamètres relativement réduits. Cela impacte ainsi sur la masse totale mesurée. Par ailleurs avec un taux de dilution de 100 fois, les masses mesurées sont toujours plus importantes.

**Les taux de dilutions appliqués ont ainsi un impact sur les niveaux de concentration en nombre et en masse mesurés. Cela peut être expliqué dans les deux cas par un problème de saturation de nos instruments lorsque le taux de dilution est relativement faible. Toutefois, la dilution à température ambiante favorise également les phénomènes de nucléation et mène ainsi à une augmentation de la concentration en nombre totale de particules émises.**

La Figure 17 représente le bilan des concentrations moyennes des particules (mesure CPC) et des masses moyennes par unité du kilomètre en carbone-suie (mesure MAAP) émis par le véhicule diesel FAP mesurées derrière un CVS sur les deux cycles Artémis urbain et autoroutier. Ces valeurs sont représentées selon trois taux de dilutions différents, 10, 40 et 100 respectivement.

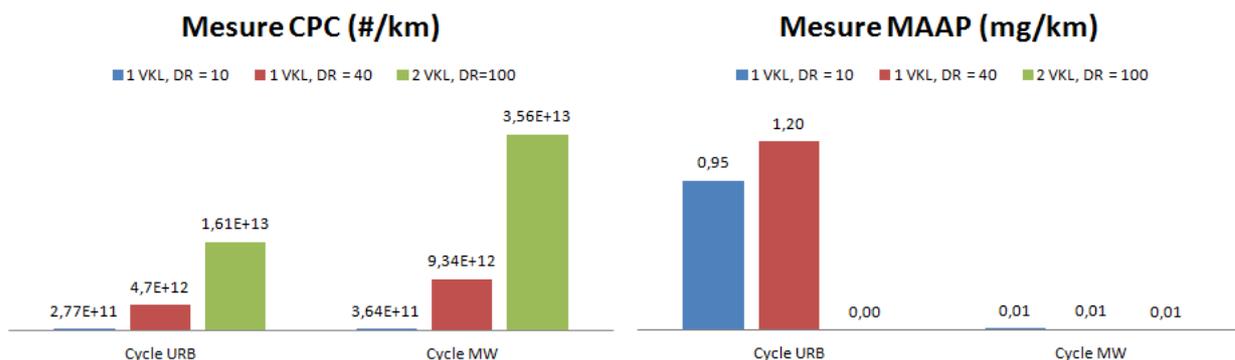


Figure 17 : Représentation des facteurs d'émission en nombre et en masse, pour différents taux de dilution (véhicule Diesel Euro 5).

Quel que soit le taux de dilution, le facteur d'émission en nombre de particules (mesure CPC) est plus important lors des cycles autoroutier (MW) comparés aux cycles urbains (URB). Par ailleurs plus le taux de dilution est important plus ce facteur est important. Il varie ainsi entre  $10^{11}$  à  $10^{13}$  (#/km).

Le facteur d'émission en masse de carbone noir (mesure MAAP) est de l'ordre 1 (mg/km) lors des cycles Artémis urbain démarrés ainsi à froid (0,004 mg/km avec un taux de dilution de 100 fois : On atteint en effet, la limite basse de détection du MAAP) et est dans la limite basse de détection du MAAP lors des cycles Artémis autoroutiers démarrés ainsi à chaud.

Lors des cycles urbains démarrés à froid les particules sont émises dans tous les modes (nucléation, accumulation et croissance). En corrélation avec les analyses MET et les mesures SMPS présentées précédemment, les deux dernières modes correspondent en effet essentiellement à des agglomérats et

à des amas de suies de carbone. Lors des cycles autoroutiers démarrés ainsi à chaud, seul le mode nucléation persiste et est d'avantage impacté par le taux de dilution utilisé.

#### 3.1.4.4. Facteurs d'émission des particules directement à l'échappement et après le CVS

Les facteurs d'émission des particules des véhicules Diesel et essence testés avec les différentes conditions de conduite sont présentés dans les [Tableau 5](#) et [Tableau 6](#). Ils sont estimés à partir des mesures du CPC et de l'ELPI directement à l'échappement avec différents ratios de dilution et températures, et après le CVS à 25 °C avec un ratio de dilution de 13 en moyenne. Les valeurs des facteurs d'émission directement à l'échappement présentées dans les tableaux sont des valeurs moyennes de 2 ou 3 mesures répétitives réalisées avec les mêmes conditions expérimentales. Pour les facteurs d'émission après le CVS, une valeur moyenne sur 4 à 6 mesures répétitives est présentée.

Tableau 5. Facteurs d'émissions des particules directement à l'échappement et après le CVS avec l'ELPI et les CPC pour le véhicule essence.

Température (°C)	Ratio de dilution	Cycle de conduite	FE CPC à l'échappement (#/km)	FE ELPI à l'échappement (#/km)	FE CPC après CVS (#/km)	
50	35,0	ArtMW <sup>#</sup>	$1,9 \cdot 10^{13} \pm 1,4 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^{13} \pm 2,0 \cdot 10^{12}$	$1,1 \cdot 10^{13} \pm 5 \cdot 10^{11}$	
50	112,4	ArtMW	$1,7 \cdot 10^{13} \pm 8,5 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^{13} \pm 5,3 \cdot 10^{11}$		
50	373,6	ArtMW	$1,8 \cdot 10^{13} \pm 1,8 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{13} \pm 1,7 \cdot 10^{12}$		
50	796,5	ArtMW	$1,3 \cdot 10^{13} \pm 2,4 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{13} \pm 2,8 \cdot 10^{11}$		
50	2069,6	ArtMW	$1,6 \cdot 10^{13} \pm 3,0 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^{13} \pm 1,8 \cdot 10^{11}$		
50	3540,3	ArtMW	$1,4 \cdot 10^{13} \pm 5,6 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{13} \pm 7,4 \cdot 10^{11}$		
100	33,6	ArtMW	$1,9 \cdot 10^{13} \pm 1,9 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{13} \pm 4,0 \cdot 10^{11}$		
100	109,0	ArtMW	$9,6 \cdot 10^{12} \pm 1,7 \cdot 10^{12}$	$9,2 \cdot 10^{12} \pm 1,3 \cdot 10^{12}$		
100	387,4	ArtMW	$1,5 \cdot 10^{13} \pm 5,3 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{13} \pm 3,4 \cdot 10^{11}$		
100	1342,6	ArtMW	$7,6 \cdot 10^{12} \pm 9,2 \cdot 10^{11}$	$7,9 \cdot 10^{12} \pm 1,0 \cdot 10^{12}$		
100	2184,7	ArtMW	$1,8 \cdot 10^{13} \pm 2,3 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{13} \pm 1,3 \cdot 10^{12}$		
100	3517,5	ArtMW	$1,3 \cdot 10^{13} \pm 4,5 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{13} \pm 5,4 \cdot 10^{11}$		
150	32,8	ArtMW	$1,8 \cdot 10^{13} \pm 1,4 \cdot 10^{12}$	$1,1 \cdot 10^{13} \pm 1,1 \cdot 10^{12}$		
150	96,6	ArtMW	$5,5 \cdot 10^{12} \pm 3,2 \cdot 10^{11}$	$5,2 \cdot 10^{12} \pm 2,9 \cdot 10^{11}$		
150	367,4	ArtMW	$1,4 \cdot 10^{13} \pm 4,1 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{13} \pm 3,4 \cdot 10^{11}$		
150	1082,5	ArtMW	$6,1 \cdot 10^{12} \pm 1,7 \cdot 10^{11}$	$6,0 \cdot 10^{12} \pm 1,1 \cdot 10^{11}$		
150	2130,3	ArtMW	$1,4 \cdot 10^{13} \pm 3,3 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{13} \pm 5,7 \cdot 10^{11}$		
150	3892,7	ArtMW	$1,3 \cdot 10^{13} \pm 6,9 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{13} \pm 6,9 \cdot 10^{11}$		
50	120,4	ArturbF*	$8,4 \cdot 10^{12} \pm 1,1 \cdot 10^{12}$	$1,5 \cdot 10^{13} \pm 2,1 \cdot 10^{12}$		$8,4 \cdot 10^{12} \pm 8,0 \cdot 10^{11}$
50	793,8	ArturbF	$8,2 \cdot 10^{13} \pm 1,1 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{13} \pm 1,6 \cdot 10^{12}$		
50	2408,5	ArturbF	$1,6 \cdot 10^{13} \pm 1,9 \cdot 10^{12}$	$1,6 \cdot 10^{13} \pm 2,1 \cdot 10^{12}$		
100	112,3	ArturbF	$5,6 \cdot 10^{12} \pm 7,1 \cdot 10^{11}$	$6,1 \cdot 10^{12} \pm 8,5 \cdot 10^{11}$		
100	938,3	ArturbF	$4,6 \cdot 10^{12} \pm 5,7 \cdot 10^{11}$	$5,4 \cdot 10^{12} \pm 7,7 \cdot 10^{11}$		
150	92,1	ArturbF	$4,4 \cdot 10^{12} \pm 5,3 \cdot 10^{11}$	$4,5 \cdot 10^{12} \pm 6,1 \cdot 10^{11}$		

50	96,7	70km/h	$4,2 \cdot 10^{12} \pm 9,3 \cdot 10^{11}$	$4,9 \cdot 10^{12} \pm 8,4 \cdot 10^{10}$	
50	984,1	70km/h	$3,8 \cdot 10^{12} \pm 3,9 \cdot 10^{11}$	$4,6 \cdot 10^{12} \pm 2,4 \cdot 10^{11}$	
50	2015,5	70km/h	$6,0 \cdot 10^{12} \pm 1,2 \cdot 10^{12}$	$6,3 \cdot 10^{12} \pm 1,7 \cdot 10^{12}$	
100	126,3	70km/h	$1,3 \cdot 10^{12} \pm 1,8 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^{12} \pm 2,3 \cdot 10^{11}$	
100	1230,9	70km/h	$1,4 \cdot 10^{12} \pm 2,0 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^{12} \pm 2,4 \cdot 10^{11}$	
100	2156,0	70km/h	$5,6 \cdot 10^{12} \pm 2,2 \cdot 10^{11}$	$5,5 \cdot 10^{12} \pm 2,4 \cdot 10^{10}$	
150	110,5	70km/h	$9,2 \cdot 10^{11} \pm 4,1 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{12} \pm 5,4 \cdot 10^{11}$	
150	950,0	70km/h	$2,0 \cdot 10^{12} \pm 2,5 \cdot 10^{11}$	$2,2 \cdot 10^{12} \pm 5,5 \cdot 10^{11}$	
150	2022,5	70km/h	$5,3 \cdot 10^{12} \pm 3,4 \cdot 10^{11}$	$5,4 \cdot 10^{12} \pm 8,2 \cdot 10^{11}$	

\*ArturbF : Cycle Artemis urbain à démarrage froid

#ArtMW : Cycle Artémis autoroutier à 130 km/h

70 km/h : Régime stabilisé à 70 km/h

Tableau 6. Facteurs d'émissions des particules directement à l'échappement et après le CVS avec l'ELPI et les CPC pour le véhicule Diesel.

Température (°C)	Ratio de dilution	Cycle de conduite	FE CPC à l'échappement (#/km)	FE ELPI à l'échappement (#/km)	FE CPC après le CVS (#/km)
50	8,2	ArtMW#	$1,9 \cdot 10^{11} \pm 8,2 \cdot 10^9$	$6,4 \cdot 10^{10} \pm 3,4 \cdot 10^{10}$	$3,3 \cdot 10^{13} \pm 2,7 \cdot 10^{12}$
100	8,3	ArtMW	$1,7 \cdot 10^{10} \pm 6,4 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^9 \pm 7,8 \cdot 10^7$	
100	13,1	ArtMW	$4,0 \cdot 10^9 \pm 2,2 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^9 \pm 6,4 \cdot 10^8$	
100	33,7	ArtMW	$8,9 \cdot 10^9 \pm 1,6 \cdot 10^9$	$4,0 \cdot 10^9 \pm 1,1 \cdot 10^9$	
100	61,9	ArtMW	$3,4 \cdot 10^{10} \pm 9,8 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{10} \pm 3,6 \cdot 10^8$	
100	103,8	ArtMW	$3,1 \cdot 10^{10} \pm 6,1 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^{10} \pm 2,3 \cdot 10^9$	
150	8,2	ArtMW	$3,1 \cdot 10^{10} \pm 1,7 \cdot 10^{10}$	$5,7 \cdot 10^9 \pm 6,0 \cdot 10^8$	
150	13,0	ArtMW	$1,1 \cdot 10^{10} \pm 1,2 \cdot 10^{10}$	$8,3 \cdot 10^9 \pm 8,2 \cdot 10^8$	
50	96,3	ArturbF*	$1,8 \cdot 10^{11} \pm 1,0 \cdot 10^{11}$	$2,2 \cdot 10^{11} \pm 1,1 \cdot 10^{11}$	
50	1261,5	ArturbF	$2,0 \cdot 10^{11} \pm 1,0 \cdot 10^{11}$	$1,7 \cdot 10^{11} \pm 8,5 \cdot 10^{10}$	
50	2123,1	ArturbF	$1,8 \cdot 10^{11} \pm 9,0 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^{11} \pm 1,1 \cdot 10^{10}$	
100	96,0	ArturbF	$3,0 \cdot 10^{11} \pm 1,5 \cdot 10^{11}$	$3,3 \cdot 10^{11} \pm 1,7 \cdot 10^{11}$	
100	1004,5	ArturbF	$1,3 \cdot 10^{11} \pm 6,5 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10} \pm 6,5 \cdot 10^9$	
100	2316,1	ArturbF	$3,9 \cdot 10^{11} \pm 2,0 \cdot 10^{11}$	$4,2 \cdot 10^{11} \pm 2,1 \cdot 10^{11}$	
50	7,8	70km/h	$2,3 \cdot 10^{10} \pm 1,2 \cdot 10^{10}$	$6,2 \cdot 10^9 \pm 3,1 \cdot 10^9$	
50	12,3	70km/h	$1,4 \cdot 10^{10} \pm 7,0 \cdot 10^9$	$2,7 \cdot 10^9 \pm 1,4 \cdot 10^9$	
50	16,3	70km/h	$1,6 \cdot 10^{10} \pm 8,1 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^{10} \pm 5,0 \cdot 10^9$	
100	8,1	70km/h	$3,0 \cdot 10^{10} \pm 7,7 \cdot 10^9$	$9,3 \cdot 10^9 \pm 4,9 \cdot 10^8$	
100	12,8	70km/h	$3,2 \cdot 10^{10} \pm 1,8 \cdot 10^9$	$9,6 \cdot 10^9 \pm 8,1 \cdot 10^8$	
150	7,9	70km/h	$2,0 \cdot 10^{10} \pm 1,6 \cdot 10^{10}$	$7,6 \cdot 10^9 \pm 5,7 \cdot 10^9$	
150	12,5	70km/h	$1,2 \cdot 10^{10} \pm 1,4 \cdot 10^{10}$	$4,7 \cdot 10^9 \pm 4,1 \cdot 10^9$	

\*ArturbF : Cycle Artemis urbain à démarrage froid

#ArtMW : Cycle Artémis autoroutier à 130 km/h

70 km/h : Régime stabilisé à 70 km/h

Pour les véhicules essence ID et Diesel FAP, les émissions des particules directement à l'échappement ont été suivies avec des ratios de dilution variés de 30 à 4000 et de 8 à 4000, respectivement, à 50 °C, 100 °C et 150 °C. Cependant, les émissions des particules du Diesel FAP sont proches du niveau de fond pour la plupart des conditions expérimentales. En conséquence, seules les valeurs supérieures à 3 fois le niveau de fond sont présentées dans le [Tableau 6](#). La quantité de particules émise par le véhicule essence mesurée directement à l'échappement est de l'ordre de  $10^{13}$  #/km en autoroutier, et  $10^{12}$  #/km en condition urbaine et régime stabilisé à 70 km/h. Les émissions sont environ 1000 fois plus élevées que celles du véhicule Diesel FAP (l'ordre de  $10^{10}$  #/km en moyenne). Pour ce qui concerne les facteurs d'émission de particules après le CVS, les deux véhicules montrent des valeurs en nombre de particules du même ordre de grandeur,  $10^{13}$  #/km en autoroutier et de  $10^{12}$  #/km en urbain avec démarrage froid. Ce constat pose quelques questionnements sur la dynamique des particules ou des clusters de nucléation dans le CVS et nécessairement pose un questionnement sur la fiabilité de ces mesures. Des explications détaillées sont présentées dans la section suivante.

### 3.1.4.5. Comparaison des facteurs d'émission entre les mesures d'échappement et du CVS

Afin de comparer les mesures directement à l'échappement avec celles après le CVS (réalisé à 25 °C et ratio de dilution moyenne à 13 pour autoroutier), nous avons choisi les facteurs d'émission mesurés dans les conditions les plus proches de celles de CVS, donc à 50 °C avec ratio de dilution à environ 8 et 30 pour le Diesel et essence, respectivement, en autoroutier. Nous avons observé que pour le véhicule essence avec injection directe, le CVS a entraîné une sous-émission d'environ 40% du nombre de particules par rapport aux mesures à l'échappement. En revanche, pour le véhicule Diesel FAP, le CVS a induit une surémission d'environ 150 fois plus de particules par rapport à l'échappement ([Figure 18](#)).

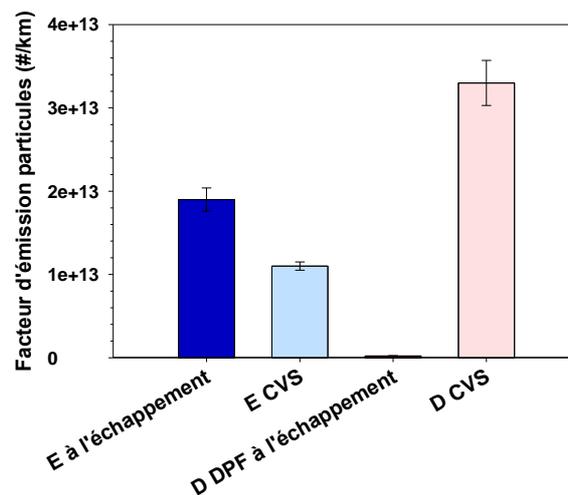


Figure 18. Comparaison des facteurs d'émission directement à l'échappement et après le CVS pour les véhicules essence (histogramme bleu) et Diesel (histogramme rouge) pour le cycle Artémis autoroutier. E : essence ; D DPF : Diesel avec filtre à particule.

Pour le véhicule Diesel, nous avons observé une sur-émission des particules après le CVS, cette sur-émission pourrait être expliquée par le phénomène de nucléation, probablement due à l'effet d'une dilution froide. La nucléation décrit la formation de clusters (de l'ordre du nm) à partir des composés peu volatils en phase gazeuse. Ce qui induit une augmentation du nombre de particules à très faible taille. Ce phénomène de nucléation a été observé dans les tunnels ([Weingartner et al., 1997](#); [Kittelson and Watts, 2000](#)) ou avec des systèmes de dilution à faible ratio de dilution ou basse température, par exemple les conditions de CVS ([Johnson et al., 2009](#) ; [Marjamäki and Keskinen, 2001](#) ; [Kayes et al., 1998](#)). À l'échappement, les particules émises pourraient être des nano particules ou des clusters de taille inférieure à 7 nm pas détectables par nos instruments de mesure (ELPI limite à 7 nm). La quantité détectée était donc proche du niveau de fond. Cependant, les conditions de CVS à faible ratio de dilution (11-13) et surtout basse température des gaz de dilution pourraient favoriser la nucléation et induire le grossissement des particules à la taille détectable ([Figure 19 \(b\)](#)).

Pour le véhicule essence, l'ensemble des phénomènes de nucléation, de condensation et de coagulation peuvent entrer en jeu dans le CVS puisque la quantité de particules émise est suffisamment importante. La condensation est un phénomène de transfert de molécules de la phase gazeuse vers la phase particulaire préexistante. Ce processus induit une augmentation de la taille des particules sans que leur nombre en soit affecté. Par contre, la coagulation est un phénomène de collision entre deux particules, préférablement de taille différente, qui résulte en l'augmentation de leur taille et une diminution du nombre total de particules. Ce phénomène a lieu notamment en conditions pour lesquelles les concentrations des particules sont importantes. Ces phénomènes pourraient expliquer la sous-émission de la quantité des particules mais avec leur diamètre plus élevé après le CVS en comparant avec les émissions à l'échappement ([Figure 19 \(a\)](#)).

La distribution granulométrique des particules des véhicules essence (à gauche) et Diesel (à droite) mesurée directement à l'échappement et après le CVS est présentée dans la [Figure 19](#). Nous avons observé que la taille des particules directement à l'échappement est centrée sur 30 nm et 7 nm pour le véhicule essence et Diesel, respectivement. Cependant, la taille des particules mesurée après le CVS est supérieure à 56 nm pour essence et entre 15 et 20 nm pour Diesel. Cette observation est en accord avec la présence des phénomènes de nucléation, condensation et coagulation dans le CVS. Il indique que le CVS induit des artéfacts à la fois sur la quantification et la distribution en taille des particules.

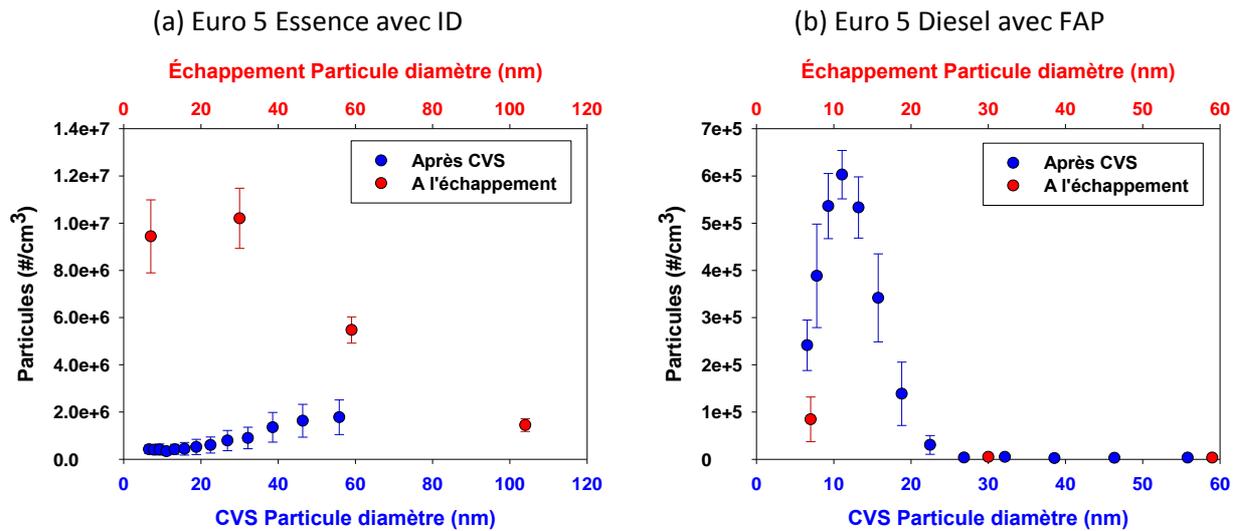


Figure 19. Distribution granulométrique des particules à l'échappement mesurée par ELPI et après le CVS mesurée par SMPS+E durant le cycle autoroutier. a) le véhicule Euro 5 essence avec injection directe ; b) le véhicule Euro 5 Diesel avec filtre à particule.

### 3.1.5. Conclusion

L'étude amenée sur le véhicule Diesel Euro 5 montre que l'utilisation des nouvelles technologies de réduction des émissions (DOC+FAP catalysé) est très efficace et notamment met en évidence une importante réduction de l'émission en masse des particules. D'après les mesures en CVS, le nombre de particules émises satisfait la norme en vigueur Euro 5 de  $6 \times 10^{11} \text{ \#/km}$  néanmoins deux observations peuvent être faites: a) lors du démarrage à froid des particules de grosse taille (agglomérats de suies) sont émises dans les premiers 600 secondes; b) lors des cycles autoroutiers l'émission de particules ultrafines (15-20 nm) avec une concentration total sur un cycle autour de  $3-4 \times 10^9 \text{ \#/cm}^3$  est observée (condition CVS : ratio de dilution autour de 10, à 25 °C). Cette présence de particules ultrafines devrait être prise en compte dans le proche futur. Comme déjà évoqué le protocole de mesure PMP ne prend pas en compte cette fraction de particules. La toxicité de ces particules est en partie liée à leur taille, c'est-à-dire à ils peuvent pénétrer au plus profond des alvéoles pulmonaires.

L'effet de la température et du ratio de dilution a été étudié durant nos expériences. La faible température à 50 °C induit une augmentation de 2 à 4 fois de la quantité des particules émises par rapport à la température élevée (150 °C) en fonction de ratio de dilution. Cela peut être expliqué par le phénomène de nucléation qui est favorisé à faible température. L'augmentation du nombre de particules est principalement observable pour les particules de faible taille entre 22 nm (plateau de 7 à 30 nm) et 78 nm (plateau de 59 à 104 nm) par l'ELPI.

Les expériences réalisées au sein du projet CAPVEREA montrent que la quantité de particules est inversement proportionnelle au ratio de dilution totale. Cette linéarité est observée pour une gamme de dilution entre 30 et 4000 qui pourrait indiquer que la dilution atmosphérique pour l'étape de

l'échappement-à-route (entre 1000 et 4000) n'induit pas une influence significative sur la quantité de particules.

Pour un ratio de dilution primaire faible autour de 3 les phénomènes de nucléation dominant à n'importe quelle température de dilution primaire (testées 50, 100 et 150 °C). Pour un air de dilution primaire à 50 °C les phénomènes de nucléation deviennent très significatifs et dominant l'effet de la dilution primaire dans le range des valeurs testées (dilution 3-16). **Cela indique que les conditions de CVS pourraient donc favoriser ces phénomènes additionnels et créer des éventuels artéfacts de quantification des particules.** Moins de particules sont observées pour une dilution primaire relativement importante (autour de 15) et une température élevée (à 150 °C). Ces conditions pourraient représenter celles du FPS afin de minimiser des artéfacts de mesure.

La comparaison entre des mesures directement à l'échappement (à 50 °C avec ratio de dilution à environ 8 et 30 pour le Diesel et essence) et celles après le CVS (réalisé à 25 °C et ratio de dilution moyenne à 13 pour autoroutier) montre que le CVS entraîne une sous-estimation des émissions d'environ 2 fois du nombre de particules par rapport à l'échappement pour le véhicule essence. En revanche, pour le véhicule Diesel FAP, le CVS a induit une surestimation des émissions d'environ 150 fois plus de nombre de particules. De plus, la distribution en taille des particules mesurée après le CVS est supérieure à 56 nm pour essence et entre 15 et 20 nm pour Diesel. En comparant avec celle mesurée à l'échappement (30 nm et 7 nm pour le véhicule essence et Diesel, respectivement), il indique que les conditions de CVS induisent des phénomènes de nucléation, de condensation et de coagulation en fonction du type de véhicule testé et la technique de dépollution et des dilutions dans le CVS.

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

#### **3.2.1. Synchronisation du temps de réponse entre mesure directe à l'échappement et CVS**

Afin d'utiliser des données instantanées en ligne et de comparer les mesures directement à l'échappement et après le CVS, il est nécessaire de vérifier la synchronisation des analyseurs en temps. Plusieurs paramètres induisant des décalages ont été pris en compte : débit du prélèvement, longueurs de tuyaux, temps de réponse de l'appareil.... Afin d'établir l'état de la synchronisation à l'échappement et après le CVS, nous avons comparé les données du CPC utilisées à l'échappement et celles utilisées après le CVS. Pour le CVS (273 mm en diamètre et 2,8 m en longueur), le temps parcouru du gaz d'échappement dans les tuyaux de conduite avec la dilution est environ 0,8 seconde. Ce temps de parcours est comparable avec le montage réalisé directement à l'échappement (tuyaux ¼ de pouces avec une longueur de 4 m) qui est environ 0,6 seconde. Un zoom de profil d'émission des particules en autoroutier entre 580 et 720 secondes est présenté dans la [Figure 20](#) pour le véhicule essence. Nous avons observé que les profils d'émission suivis par le CPC directement à l'échappement et après le CVS sont bien corrélés en temps.

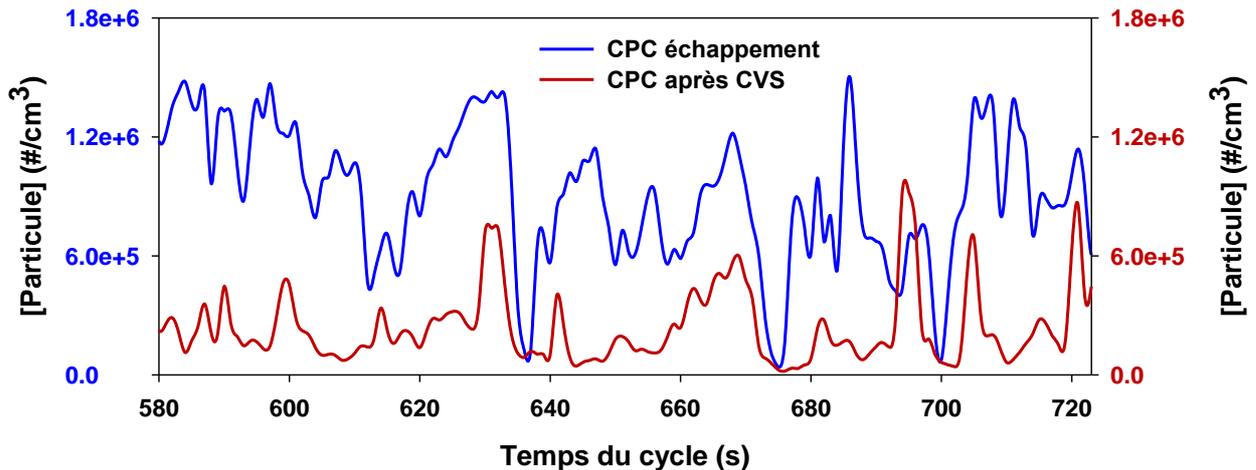


Figure 20. Concentration des particules mesurée par le CPC à l'échappement (bleu) et après CVS (rouge) pendant le cycle autoroutier pour le véhicule essence.

### 3.2.2. 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. Un prestataire en instrumentation, spécialiste des technologies CAN réalisera cette adaptation (réversible) sur les véhicules retenus, en mettant en œuvre une technique déjà éprouvée chez Renault. Les tests sur cette faisabilité sont programmés en mi-Mars 2016 avec la société Altran.

### 3.2.3. Mise au point et calibration de l'IGS

L'analyseur de gaz IGS (Industrial Gas System) Antaris en utilisant la méthode d'analyse FTIR (Fourier Transform InfraRed spectroscopy) a été mis en place après le CVS durant la campagne réalisée en avril 2015. L'IGS permet de détecter et quantifier 25 composés : 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. Les limites de quantification haute et basse sont présentées dans le [Tableau 7](#). Les concentrations de ces composés sont suivies simultanément avec une résolution de 0,5 cm<sup>-1</sup> et une fréquence jusqu'à 5Hz. Un exemple de profil d'émission de benzène et propane est illustré dans la [Figure 21](#) durant le cycle Artemis autoroutier pour le véhicule Diesel, avec un temps de collection de 1,065s et une vitesse optique de 3,80 m/s.

Tableau 7. Limites de quantification haute et basse des 25 composés d'IGS Antaris

Composés	Limite de quantification	Composés	Limite de quantification
Acétaldéhyde	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 %	NOx	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		

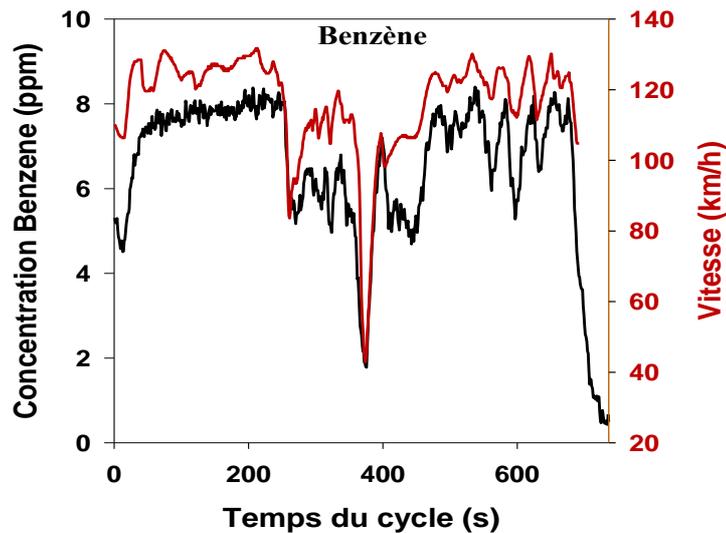


Figure 21. Exemple de profil d'émission de Benzène après CVS pendant le cycle autoroutier pour le véhicule Diesel avec le profil de vitesse du cycle.

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

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 seront mesurées à l'aide d'un banc à rouleau de l'IFSTTAR avec les cycles Artémis urbain avec démarrage froid et chaud, routier et autoroutier, et éventuellement avec les cycles ERMES ou WLTC. Les mesures seront réalisées

avec deux types de véhicule : Euro 6 diesel (FAP) et Euro 6 essence avec système d'injection directe, suite aux tests de la faisabilité d'Euro 6 équipé d'ABS/EPS non débrayable (section 3.2.2). Cette campagne de mesure avec IRCELYON est prévue en Avril 2016.

### **3.4. 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 2016 et 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 2 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 effets de la dilution et de la température montrent que les phénomènes de nucléation, de condensation et de coagulation sont favorisés à faible ratio de dilution et de température. Ceci indique que les conditions de CVS, de basse température de dilution primaire, ne sont pas optimales et pourraient favoriser des éventuels artéfacts sur la quantification de particules. Moins de particules sont observées pour une dilution primaire relativement forte (supérieur à 5) et une température élevée (à 150 °C). Ces conditions du FPS seront utilisées pour les prochaines campagnes de mesure afin de minimiser des artéfacts.

Les résultats obtenus dans la tâche 2 seront présentés la conférence internationale TAP 2016 (Transport and Air Pollution). Un ou deux articles seraient prévus courant 2016 dans les revues scientifiques (atmospheric environment, journal of aerosol science, environmental science and technology...), sur l'impact de la dilution et température sur l'émission de particule véhiculaire et leur caractérisation chimique et morphologique.

**BIBLIOGRAPHIE**

- André M. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Science of The Total Environment* 334–335, 73-84, 2004.
- André M., Joumard R., Vidon R., Tassel P., Perret P. Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars. *Atmospheric Environment* 40, 5944-5953, 2006.
- André M., Chanut H., Pasquier A., Pellet C., Montenon A. Modélisation et estimation des émissions de polluants du trafic routier. Rapport 7.1, 2014.
- Bukowiecki N., Dommen J., Prévôt A.S.H., Weingartner E. and Baltensperger U. Fine and ultrafine particles in the Zürich (Switzerland) area measured with a mobile laboratory: an assessment of the seasonal and regional variation throughout a year. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3, 1477-1494, 2003.
- Burtscher H. Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review. *Journal of Aerosol Science*, 36, 895-932, 2005.
- Casati R., Scheer V., Vogt R. and Benter T. Measurement of nucleation and soot mode particle emission from a diesel passenger car in real world and laboratory in situ dilution. *Atmospheric Environment*, 41(10), 2125-2135, 2007.
- R'mili, B. Le Bihan, O. Aguerre-Chariol, O. Dutouquet, C. Fréjafon. Particle sampling by TEM grid filtration. *Journal of Aerosol science and technology*, 47, 767-775, 2013.
- Johnson, K.C., Durbin, T.D., Jung, H., Chaudhary, A., III, D.R.C., Herner, J.D., Robertson, W.H., Huai, T., Ayala, A., Kittelson, D., 2009. Evaluation of the European PMP Methodologies during On-Road and Chassis Dynamometer Testing for DPF Equipped Heavy-Duty Diesel Vehicles. *Aerosol Science and Technology* 43, 962–969. doi:10.1080/02786820903074810
- Marko Marjamäki and Jorma Keskinen. 2001. Vehicle exhaust particulates characterisation, properties, instrumentation and sampling requirements. European Commission – DG TrEn, 5th Framework Programme Competitive and Sustainable Growth Sustainable Mobility and Intermodality.
- Mathis U., Mohr M. and Forss A. Comprehensive particle characterization of modern gasoline and diesel passenger cars at low ambient temperatures. *Atmospheric Environment*, 39, 107-117, 2005.
- Kayes D., Hochgref S. 1998. Investigation of the dilution process for measurement of particulate matter from spark ignition engines ; Sae Technical paper series 982601.
- Kittelson D. and Watts, W. 2000. Roadway measurements of diesel exhaust aerosols. 19th annual AAAR Conference, St. Louis, Missouri 2000.
- Virtanen A., Rönkkö T., Kannosto J., Ristimäki J., Mäkelä J.M., Keskinen J., Pakkanen T., Hillamo R., Pirjola L. and Hämeri K. Winter and summer time size distributions and densities of traffic-related aerosol particles at a busy highway in Helsinki. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 2411-2421, 2006.
- Weingartner E., Keller W., Stahel W.A., Burtscher H., Baltensperger U. 1997. Aerosol emission in a road tunnel ; *Atmospheric environment*, vol 31, No 3, 451-462.

- Zhang K.M. and Wexler A.S. Evolution of particle number distribution near roadways— Part I: analysis of aerosol dynamics and its implications for engine emission measurement. *Atmospheric Environment*, 38, 6643-6653, 2004.
- Shi J.P., Harrison R.M., Evans D.E., Alam A., Barnes C., Carter G. A method for measuring particle number emissions from vehicles driving on the road. *Environmental Technology*, 23, 1-14, 2002.
- Morawska L., Ristovski Z., Jayaratne E.R. Keogh D.U., Ling X. Ambient Nano- and ultrafine particles from motor vehicle emissions : characteristic, ambient processing and implications on human exposure. *Atmos. Environ.*, 42, 8113-8138, 2008.
- Jacobson M.Z., Ketelson D.B., Watts W.F. Enhanced coagulation due to evaporation and its effect on nanoparticle evolution. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 9486-9492, 2005.
- Jacobson M.Z., Seinfeld J.H. Evolution of nanoparticle size and mixing state near the point of emission. *Atmos. Environ.*, 38, 1839-1850, 2004.
- Ning Z., Sioutas C. Atmospheric processes influencing aerosols generated by combustion and the inference of their impact on public exposure: a review. *Aerosol and Air Quality Research*, 10, 43–58, 2010.
- Giechaskiel B., Chirico R., DeCarlo P.F., Clairotte M., Adam T., Martini G., Heringa M.F., Richter R., Prévôt A.S.H., Baltensperger U., Astorga C. Evaluation of the particle measurement programme (PMP) protocol to remove the vehicles' exhaust aerosol volatile phase. *Science of the Total Environment*, 408, 5106-5116, 2010.
- Giechaskiel B., Ntziachristos L., Samaras Z., Casati R., Volker S., Rainer V. Effect of speed and speed transition on the formation of nucleation mode particles from a light duty diesel vehicle. *SAE*, No 2007-01-1110, 2007.
- Giechaskiel B., Ntziachristos L., Samaras Z., Scheer V., Casati R., Vogt R. Formation potential of vehicle exhaust nucleation mode particles on-road and in the laboratory. *Atmospheric Environment* 39, 3191–3198, 2005.
- Ronkko, T., Virtanen, A., Vaaraslahti, K., Keskinen, J., Pirjola, L. and Lappi, M. (2006). Effect of Dilution Conditions and Driving Parameters on Nucleation Mode Particles in Diesel Exhaust: Laboratory and On-Road Study. *Atmos. Environ.*, 40, 2893-2901, 2006.
- Mathis U., Ristimäki J., Mohr M., Keskinen J., Ntziachristos L., Samaras Z., Mikkanen P. Sampling conditions for the measurement of nucleation mode particles in the exhaust of a diesel vehicle. *Aerosol Science and Technology*, 38, 1149–1160, 2004.
- Beckers, J., Stoffels, W.W., Kroesen, G.M.W., 2009. Temperature dependence of nucleation and growth of nanoparticles in low pressure Ar/CH<sub>4</sub> RF discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics* 42, 155206. doi:10.1088/0022-3727/42/15/155206

## ANNEXES

## Annexe 1. Description détail de l'ELPI

Tableau 8. 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>

$$*dlogDp = \log_{10} \left( \frac{Dp_{n+1}}{Dp_n} \right)$$

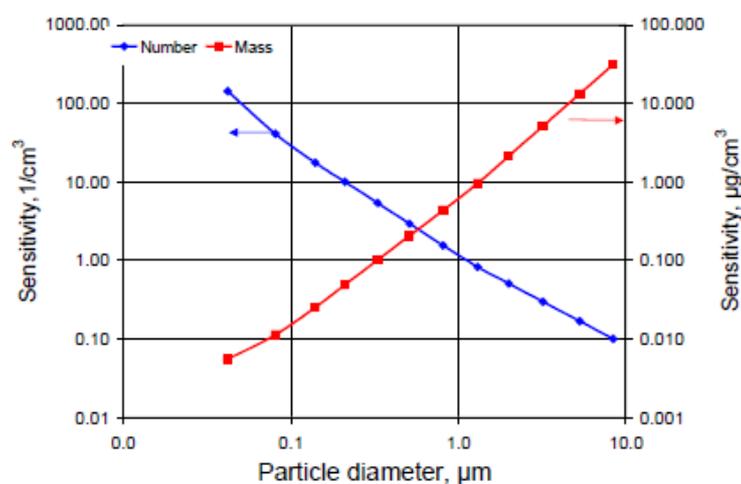


Figure 22. Précision de l'ELPI (Dekati – ELPI user manual)

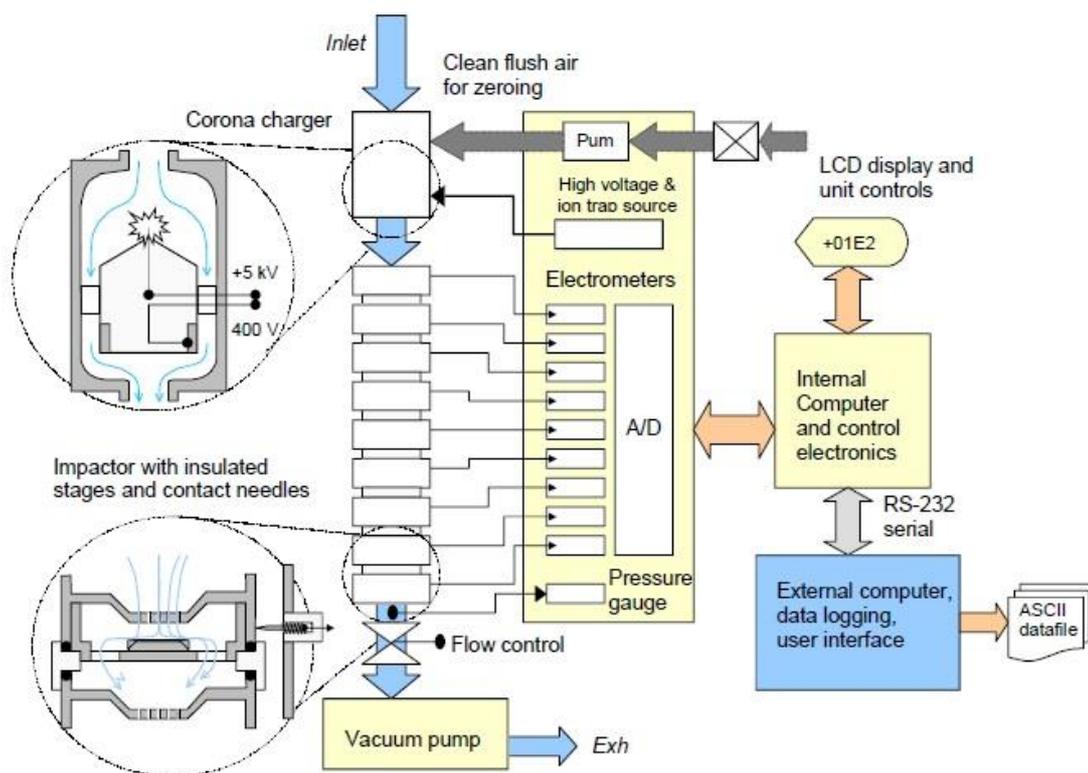


Figure 23. Schéma de principe de l'ELPI (Dekati - ELPI user manual).

---

**Annexe 2. Liste complète des composés analysés par TERA-Environnement**

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

Composés carbonylés : Formaldéhyde, Acétaldéhyde, Acétone, Acroléïne, 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

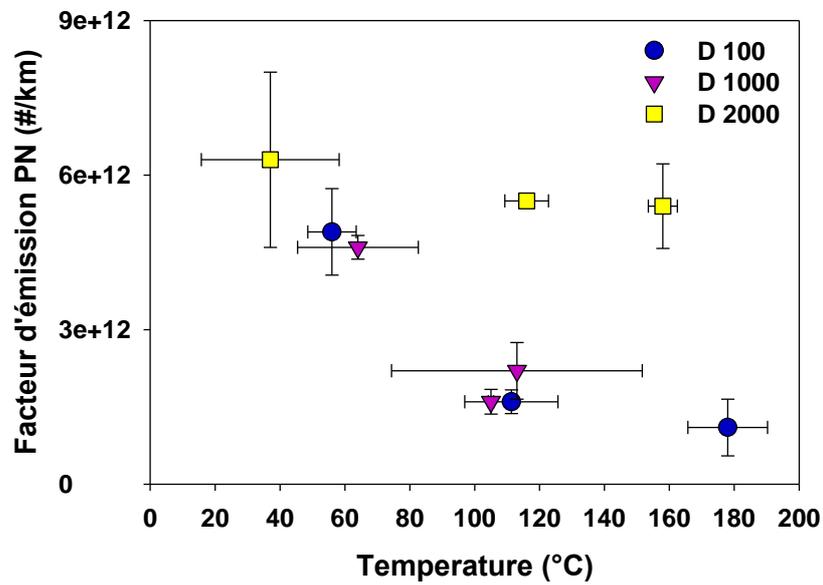
**Annexe 3. Impact de la température et de ratio de dilution en régime stabilisé à 70 km/h**

Figure 24. Facteurs d'émission des particules en régime stabilisé mesurées à l'échappement en fonction de la température de dilution à différents ratios de dilution totaux pour le véhicule essence mesurés par ELPI.

## INDEX DES FIGURES

Figure 1. Schéma du système d'échantillonnage .....	10
Figure 2. Cycles de conduite Artémis urbain, routier et autoroutier (André, 2004) .....	15
Figure 3. Comparaison des concentrations des particules mesurées par l'ELPI et par le CPC pour le véhicule essence pour l'ensemble des conditions expérimentales. ....	18
Figure 4. a) Facteurs d'émission des particules en autoroutier mesurée à l'échappement en fonction de la température de dilution à différents ratios de dilution totaux pour le véhicule essence mesurés par ELPI. b) Concentration de particules mesurée par les 7 premiers impacteurs de l'ELPI en fonction de la température avec un ratio de dilution de 30 pour le véhicule essence sous conditions Artémis autoroutier.....	20
Figure 5. Concentration des particules mesurée en fonction de $1DRT$ à 50, 100 et 150 °C pour le véhicule essence avec le cycle Artémis autoroutier avec un zoom sur le fort ratio de dilution (à droite). $DRT$ : ratio de dilution total. ....	21
Figure 6. a) Concentration de particules mesurée en fonction de $1DRP$ à 50, 100 et 150 °C pour le véhicule essence avec le cycle Artémis autoroutier. $DRP$ : ratio de dilution primaire. b) même plot mais normalisée selon les ratios de dilution primaire.....	22
Figure 7. Un exemple de la distribution en taille des particules à 50, 100 et 150 °C du véhicule essence pour le cycle Artémis autoroutier avec une dilution total de 30 et de 100.....	23
Figure 8 : Mesure SMPS+E - Évolution temporelle de la concentration en nombre de particules (# /cc) et leur granulométrie lors d'un cycle urbain démarré à froid dans le CVS.....	24
Figure 9 : analyse MET – prélèvement réalisé sur 2 minutes lors d'un démarrage à froid d'un cycle Artémis urbain (CVS). ....	24
Figure 10 : Évolution temporelle de la concentration en nombre de particules (# /cc) et leur granulométrie lors du cycle autoroutier.....	24
Figure 11 : Analyses MET – prélèvements réalisés lors d'un cycle ARTEMIS routier.....	25
Figure 12 : évolution temporelle de la distribution en taille des particules et de la concentration en carbone suie émis durant un cycle Artémis urbain démarré à froid. (a.) cycle Artémis urbain, (b.) analyse SMPS+ (c.) analyse SMPS et mesure MAAP en carbone noire (Black Carbon : BC).....	26
Figure 13. Analyse MET - Prélèvement réalisé lors d'un démarrage à froid d'un cycle Artémis urbain...	27
Figure 14 : mesure SMPS+E - évolution temporelle de la distribution en taille des particules émis durant trois cycles ARTEMIS autoroutier successifs. (a.) cycle ARTEMIS autoroutier, (b.) cycle 1, (c.) cycle 2, (d.) cycle 3. ....	27
Figure 15. Analyses MET - Prélèvements réalisés lors d'un cycle Artémis autoroutier .....	28
Figure 16 : Représentation des facteurs d'émission en nombre et en masse, pour différents taux de dilution (véhicule essence IDE Euro 5).....	28
Figure 17 : Représentation des facteurs d'émission en nombre et en masse, pour différents taux de dilution (véhicule Diesel Euro 5). ....	29

---

Figure 18. Comparaison des facteurs d'émission directement à l'échappement et après le CVS pour les véhicules essence (histogramme bleu) et Diesel (histogramme rouge) pour le cycle Artémis autoroutier. E : essence ; D DPF : Diesel avec filtre à particule. ....	32
Figure 19. Distribution granulométrique des particules à l'échappement mesurée par ELPI et après le CVS mesurée par SMPS+E durant le cycle autoroutier. a) le véhicule Euro 5 essence avec injection directe ; b) le véhicule Euro 5 Diesel avec filtre à particule.....	34
Figure 20. Concentration des particules mesurée par le CPC à l'échappement (bleu) et après CVS (rouge) pendant le cycle autoroutier pour le véhicule essence.....	36
Figure 21. Exemple de profil d'émission de Benzène après CVS pendant le cycle autoroutier pour le véhicule Diesel avec le profil de vitesse du cycle.....	37
Figure 22. Précision de l'ELPI (Dekati – ELPI user manual).....	42
Figure 23. Schéma de principe de l'ELPI (Dekati - ELPI user manual). ....	43
Figure 24. Facteurs d'émission des particules en régime stabilisé mesurées à l'échappement en fonction de la température de dilution à différents ratios de dilution totaux pour le véhicule essence mesurés par ELPI. ....	45

**INDEX DES TABLEAUX**

Tableau 1. Caractéristiques techniques des véhicules testés pour la tâche 2 .....	14
Tableau 2. Débit d'échantillon prélevé, dilution primaire et ratio de dilution totale du FPS avec différentes configurations des électrovannes. ....	16
Tableau 3. Tableau récapitulatif des conditions expérimentales pour les véhicules essence et Diesel avec les différentes conditions de conduite. ....	17
Tableau 4. Dilution primaire et débit d'échantillon prélevé à l'échappement fournis par FPS en fonction de la dilution totale choisie avec le ratio de dilution du CVS pour les cycles ArtMW. ....	20
Tableau 5. Facteurs d'émissions des particules directement à l'échappement et après le CVS avec l'ELPI et les CPC pour le véhicule essence.....	30
Tableau 6. Facteurs d'émissions des particules directement à l'échappement et après le CVS avec l'ELPI et les CPC pour le véhicule Diesel.....	31
Tableau 7. Limites de quantification haute et basse des 25 composés d'IGS Antaris.....	37
Tableau 8. Caractéristiques des impacteurs de l'ELPI, dont les limites de détection en nombre de particules. ....	42

**INDEX DES ANNEXES**

Annexe 1. Description détail de l'ELPI .....42  
Annexe 2. Liste complète des composés analysés par TERA-Environnement .....44  
Annexe 3. Impact de la température et de ratio de dilution en régime stabilisé à 70 km/h.....45