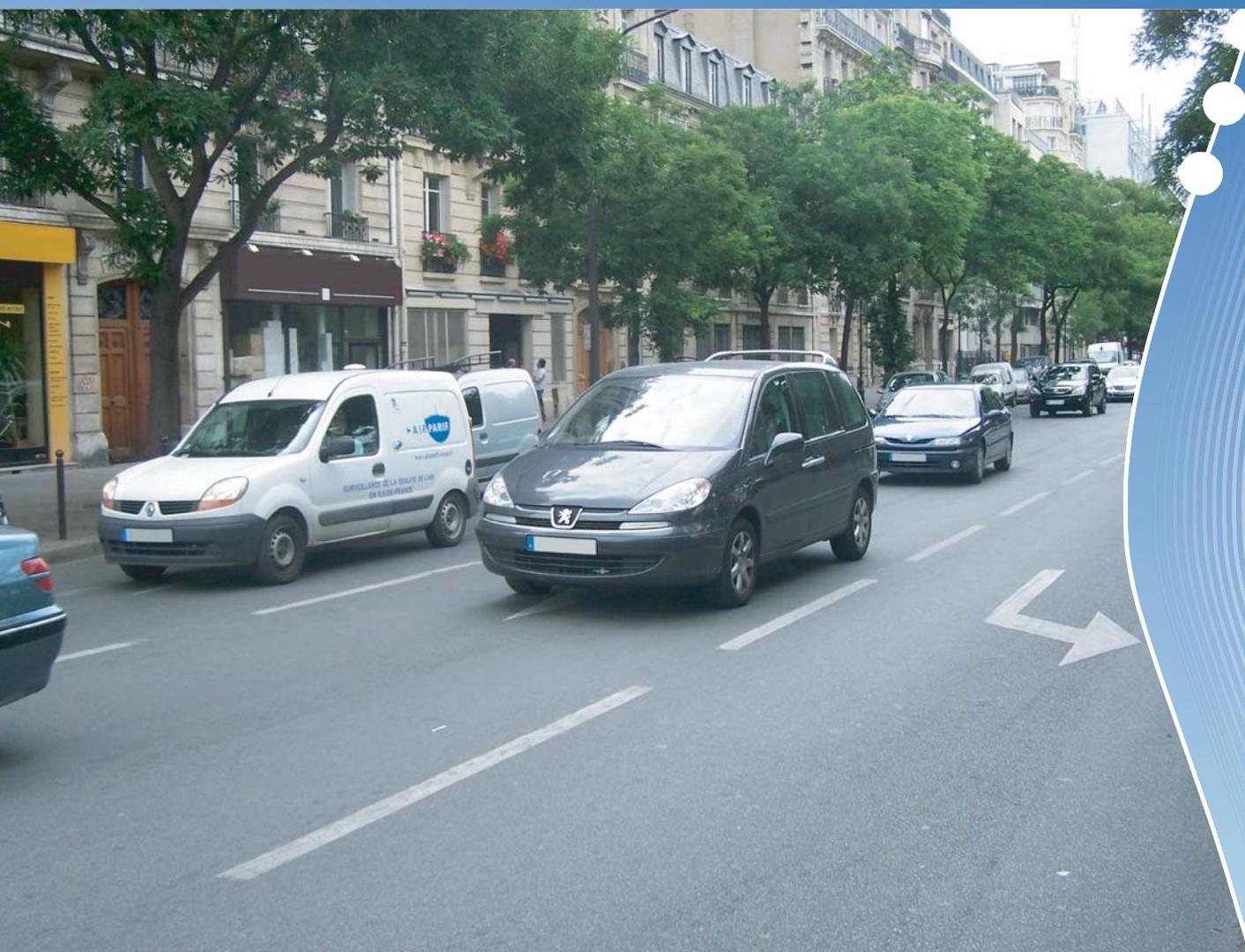


# EXPOSITION DES AUTOMOBILISTES FRANCILIENS À LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE LIÉE AU TRAFIC ROUTIER

Octobre 2009





Surveillance de la Qualité de l'Air  
en Île-de-France

**EXPOSITION DES AUTOMOBILISTES  
FRANCILIENS A LA POLLUTION  
ATMOSPHERIQUE LIEE AU TRAFIC ROUTIER :  
TRAJET « DOMICILE-TRAVAIL »**

**OCTOBRE 2009**

**AIRPARIF**  
Surveillance de la Qualité de l'Air  
en Île-de-France

**EXPOSITION DES AUTOMOBILISTES  
FRANCILIENS A LA POLLUTION  
ATMOSPHERIQUE LIEE AU TRAFIC ROUTIER :  
TRAJET « DOMICILE-TRAVAIL »**

---

**OCTOBRE 2009**

---

**AIRPARIF Surveillance de la Qualité de l'Air en Île-de-France**

7, rue Crillon 75004 PARIS – Tél. : 01.44.59.47.64 - Fax : 01.44.59.47.67 -

[www.airparif.asso.fr](http://www.airparif.asso.fr)

---

## SOMMAIRE

1.	Introduction .....	4
2.	Matériel de mesure .....	6
2.1	Le véhicule .....	6
2.2	Analyseur d'oxydes d'azote.....	8
2.3	Comptage de particules .....	9
3.	Récupération, stockage et traitement des données.....	10
4.	Les déplacements des franciliens.....	12
4.1	Quelques éléments généraux sur les déplacements des Franciliens .....	12
4.2	Les automobilistes franciliens lors de leurs déplacements « Domicile - Travail ».....	14
5.	Méthodologie et élaboration des trajets « Domicile-Travail » .....	15
5.1	Choix des trajets « Domicile-Travail » .....	15
5.1.1	Les pôles d'emplois.....	15
5.1.2	Les points de départ.....	18
5.1.3	Élaboration de circuits .....	22
5.1.4	Répétition des trajets.....	26
5.2	Période de mesure .....	26
5.3	Protocole de mesure.....	27
6.	Réalisation de l'étude.....	29
6.1	Réalisation des trajets.....	31
7.	Résultats .....	37
7.1	Quels niveaux rencontrés ? .....	37
7.1.1	Sur l'ensemble des parcours .....	37
7.1.2	Différence de niveau entre les trajets du matin et du soir ? .....	39
7.1.3	Selon les typologies géographiques des parcours.....	41
7.2	Variabilité des teneurs au sein d'une même zone.....	49
7.2.1	Impact des tunnels .....	51
7.2.2	Variabilité des teneurs en Grande-Couronne : impact de l'environnement.....	55
7.3	Impact du véhicule de devant .....	59
7.4	Perspectives : mesures d'autres polluants.....	63
7.4.1	Benzène.....	63
7.4.2	Concentrations massiques de particules .....	65
8.	Conclusion .....	66

## 1. Introduction

Dans le cadre du développement des connaissances sur l'exposition individuelle, l'étude de l'exposition à la pollution atmosphérique des franciliens lors de leurs déplacements est menée à Airparif. Un projet, financé en grande partie par l'AFSSET<sup>1</sup> via une convention scientifique, concerne l'exposition des automobilistes franciliens à la qualité de l'air dans le cadre de leurs trajets « Domicile-Travail ».

Les travaux d'ores et déjà engagés par AIRPARIF et qui se poursuivront dans les années à venir visent à renforcer la connaissance des phénomènes de pollution liés au trafic routier et celle de l'exposition individuelle à la pollution notamment selon les modes de transport utilisés. En effet, la part des déplacements pèse lourd dans l'exposition totale d'une personne à la pollution atmosphérique, plus particulièrement en Île-de-France compte tenu de la durée de déplacement, du nombre de personnes et des niveaux de pollution rencontrés.

Pour évaluer l'exposition de tout un chacun à la pollution atmosphérique, il est non seulement nécessaire de prendre en compte la qualité de l'air extérieur mesurée par les AASQA (associations agréées de surveillance de la qualité de l'air dont fait partie AIRPARIF) mais aussi celle des lieux que l'on traverse tout au long de la journée et notamment du mode de transport utilisé.

Afin d'apporter de nouvelles connaissances dans le domaine de l'exposition individuelle à la pollution atmosphérique, AIRPARIF a donc lancé un certain nombre d'études en lien avec ce sujet. Certaines études visent à évaluer s'il existe une différence dans l'exposition journalière à la pollution atmosphérique en fonction des modes de transport utilisés. C'est le cas de l'étude commandée par l'AFSSET (Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail) en 2006 consistant à mesurer l'exposition d'un panel de 150 franciliens selon le mode de transport qu'ils utilisent<sup>2</sup>. D'autres études s'attachent plutôt à caractériser de manière précise la qualité de l'air dans un micro-environnement particulier (voiture,...). C'est le cas de l'étude<sup>3</sup> menée par AIRPARIF avec la mise au point d'un laboratoire mobile permettant des mesures dans le flux de circulation. Cette étude a apporté des premiers résultats sur la connaissance des niveaux de concentration rencontrés à l'intérieur et à l'extérieur d'un véhicule en fonction de la typologie des axes empruntés (autoroute, rue parisienne, tunnels...) et des conditions de circulation. Elle fait le lien avec les travaux engagés sur la pollution le long des axes routiers (sur le Périphérique, porte de Bagnolet, et plus récemment porte de Gentilly, principaux axes routiers de l'Essonne, etc.). D'autres travaux de recherches sur cette thématique, effectués par l'INSERM<sup>4</sup> et le CERTAM<sup>5</sup> dans le cadre d'une étude commandée par l'AFSSET, corroborent ces premiers résultats et ont permis des échanges techniques sur les méthodes utilisées.

L'objectif de la présente étude est de fournir des informations sur l'exposition des franciliens dans leur automobile lors des trajets « Domicile-Travail ». Ces éléments permettront de compléter les enseignements sur l'exposition des franciliens dans les différents environnements rencontrés au cours d'une journée pour simuler l'exposition type de différents groupes de franciliens (en fonction de leur budget « espace - temps ») et fournir des éléments plus précis aux organismes de santé qui étudient l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé. En effet, un modèle de calcul de l'exposition des franciliens a été développé par AIRPARIF dans le cadre d'un projet PRIMEQUAL<sup>6</sup>. Les résultats de cette étude permettront d'affiner la partie « exposition lors des trajets domicile-travail », les informations utilisées dans le module de calcul

---

<sup>1</sup> Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail.

<sup>2</sup> « Caractérisation de l'exposition personnelle d'un échantillon de Franciliens », février 2008.

<sup>3</sup> « Mesures dans le flux de circulation – Étude exploratoire », septembre 2007.

<sup>4</sup> Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale.

<sup>5</sup> Centre d'Études et de Recherche en Aérothermie Moteur.

<sup>6</sup> « Évolution de l'exposition des Franciliens à la pollution atmosphérique au cours de la journée », décembre 2001.

actuel étant des niveaux de proximité au trafic automobile mesurés ou calculés. Or les mesures réalisées dans le flux de circulation confirment que les niveaux auxquels sont soumis les automobilistes sont plus élevés.

Afin d'évaluer l'exposition des franciliens lors de leur trajet « Domicile-Travail » en voiture, l'étude est menée en plusieurs étapes, à savoir :

- Mise au point du dispositif de mesure embarqué, notamment pour l'autonomie des moyens de mesure embarquée dans la voiture ;

- Examen des trajets « Domicile-Travail » pour définir un échantillon de trajets à étudier selon un découpage en trois zones de l'Île-de-France (Paris, Petite-Couronne et Grande-Couronne). Pour ce faire, des enquêtes sur les déplacements récentes ont été exploitées (Bases de données INSEE, Enquête Globale des Transports...);

- Réalisation des mesures et leur exploitation. Des concentrations moyennes par type de trajet (Paris → Paris, Petite-Couronne → Grande-Couronne, Grande-Couronne → Paris,...) sont établies. Ainsi, l'exposition des franciliens peut être estimée à partir de la concentration moyenne relevée dans l'habitacle du véhicule pour chaque type de trajet durant leurs trajets « Domicile – Travail ».

Parallèlement à cette étude, le suivi de l'exposition des cyclistes, dont les trajets sont de plus en plus nombreux, a également été étudié au travers des différents aménagements de voirie qu'ils empruntent. Un rapport sur le sujet décrivant la méthodologie et les résultats obtenus a été réalisé : « INFLUENCE DES AMENAGEMENTS DE VOIRIE SUR L'EXPOSITION DES CYCLISTES A LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE »<sup>7</sup>.

L'objectif de ce volet était d'obtenir des premiers résultats de l'exposition d'un cycliste en fonction des aménagements urbains empruntés (voies de bus ouvertes aux cyclistes, de pistes ou de voies cyclables).

---

<sup>7</sup> [http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/Rvelo\\_20090217.pdf](http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/Rvelo_20090217.pdf)

## 2. Matériel de mesure

La mesure des particules et des oxydes d'azote à bord d'un véhicule demande un équipement spécifique et des appareils de mesure adaptés.

### 2.1 Le véhicule

Le véhicule permettant de réaliser cette étude devait répondre à trois principaux critères :

- Avoir un volume de l'habitacle proche d'une berline ;
- Permettre de maintenir une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  dans l'habitacle (contrainte météorologique pour les appareils de mesure) ;
- Être équipé d'une alimentation 220 volts alternatifs avec une autonomie d'environ 8h.

Le véhicule choisi est un Renault KANGOO, équipé d'une cloison médiane, permettant de séparer les analyseurs, des pompes et batteries qui représentent une source de chaleur. Cette séparation permet une réduction du volume de l'habitacle de l'utilitaire, se rapprochant de ce fait d'une voiture particulière, et de permettre une meilleure régulation de la température à l'aide de la ventilation ou de la climatisation si besoin. En effet, pour le bon fonctionnement des matériels, la température de l'habitacle doit être comprise entre  $15^{\circ}\text{C}$  et  $25^{\circ}\text{C}$ .



(a) Véhicule dans le flux de circulation



(b) moyens de mesure installés dans le véhicule

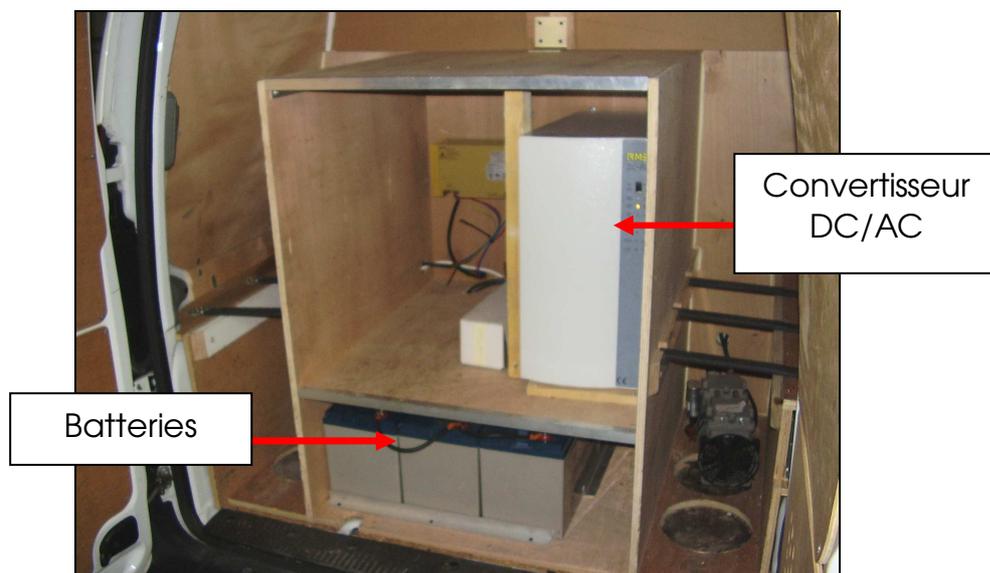
**Figure 1 : Illustration du véhicule permettant les mesures de pollution atmosphérique dans le flux de circulation.**

La génération d'un courant alternatif de 220 volts « de qualité » est indispensable pour assurer le bon fonctionnement des analyseurs mesurant les oxydes d'azote (NOx) et de particules. Après quelques essais, le choix s'est arrêté sur un convertisseur DC/AC (Cf. Figure 2) modifié pour pouvoir passer sur deux modes de fonctionnement :

- 1<sup>er</sup> mode : Ce mode est le mode repos à l'arrêt du véhicule où les batteries sont en charge et les matériels sont directement sur le secteur 220 Volts.

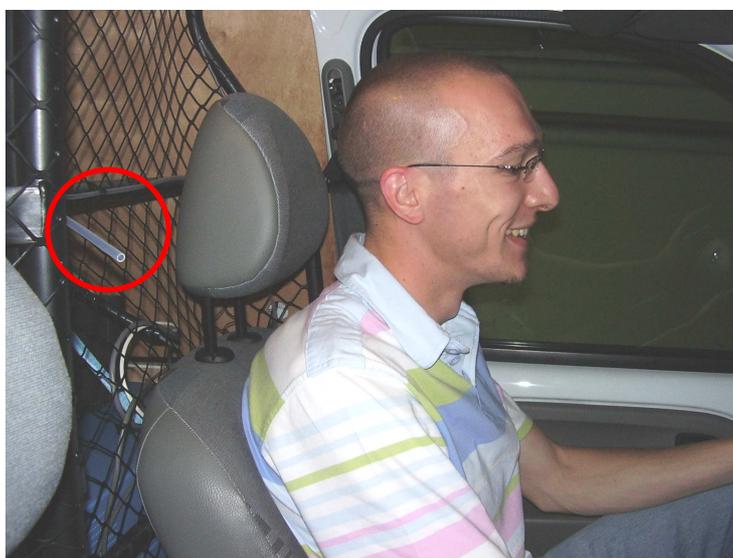
- 2<sup>ème</sup> mode : Il consiste à fournir un 220 V alternatif à partir du 24 V continu fourni par six batteries. Lors des mesures embarquées le générateur est dans ce mode. Le passage d'un mode à l'autre est réalisé à l'aide d'un module Switch. Grâce à ce module, il n'y a aucune microcoupure entre chaque mode et lors de la déconnexion du véhicule.

La Figure 2 illustre le matériel embarqué à l'arrière du véhicule permettant le fonctionnement autonome des moyens de mesure automatique lors des différents parcours. Cela est possible grâce à la mise en place de batteries et d'un convertisseur DC/AC.



**Figure 2 : Matériel embarqué permettant le fonctionnement autonome des appareils de mesure automatique : batteries, convertisseur électrique.**

Afin de mesurer la qualité de l'air à laquelle l'automobiliste est exposé durant son trajet, la ligne de prélèvement est placée à hauteur de visage pour représenter au mieux son exposition (Cf. Figure 3) dans l'habitacle.



**Figure 3 : Ligne de prélèvement à hauteur du visage de l'automobiliste.**

## 2.2 Analyseur d'oxydes d'azote

L'analyseur d'oxydes d'azote choisi est un Model 42i de marque Thermo Scientific. Cet analyseur est équipé d'une boucle de retard permettant une analyse simultanée des voies Monoxyde d'azote « NO » et Oxydes d'azote « NOx ». Cette spécificité est indispensable pour les régimes transitoires des concentrations de pollution présentes à proximité du trafic routier.

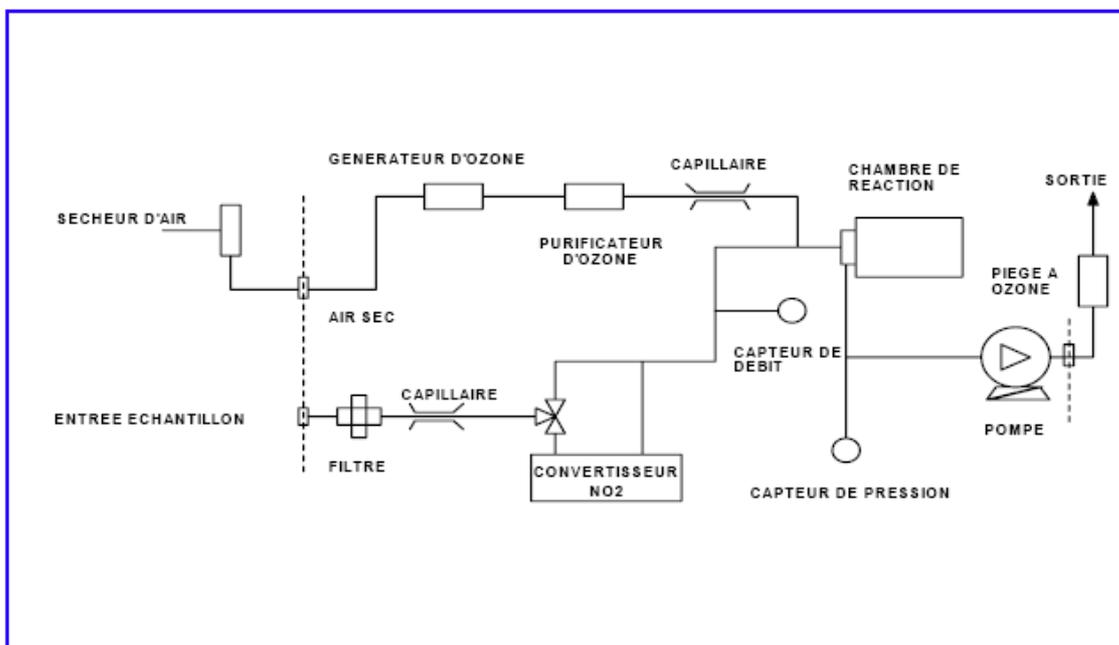


Figure 4 : Schéma du principe de fonctionnement d'un analyseur mono-chambre.

Cet analyseur est de type « mono chambre », ces cycles sont de 10 secondes sur la voie NO et de 10 secondes sur la voie NOx.

Son fonctionnement est basé sur le principe de la réaction du monoxyde d'azote (NO) sur l'ozone (O<sub>3</sub>). Cette réaction produit une radiation lumineuse dont l'intensité est directement proportionnelle à la concentration de NO. Lorsque la molécule de NO<sub>2</sub> formée revient à son état d'énergie stable, elle émet une radiation dans les infrarouges.



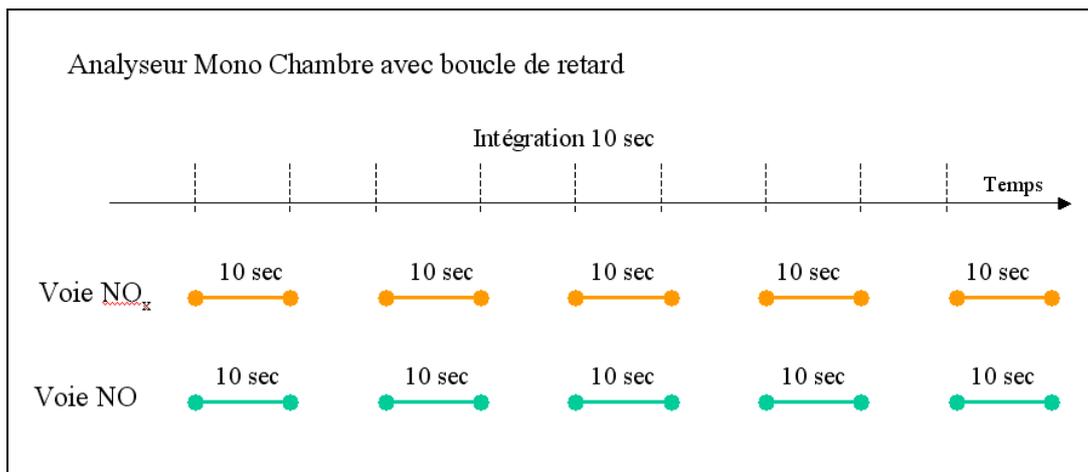
Le NO<sub>2</sub> doit être tout d'abord converti en NO avant de pouvoir être mesuré. Ceci est réalisé par un convertisseur au molybdène chauffé à 325°C environ.

L'air ambiant passe une électrovanne qui dirige l'échantillon, soit directement vers la chambre de réaction (Voie NO), soit via le convertisseur (Voie NOx).

Un ozoniseur génère la quantité requise d'ozone pour assurer la réaction de chimiluminescence. L'ozone réagit avec NO et produit du NO<sub>2</sub>. Un photomultiplicateur mesure la luminescence du NO<sub>2</sub>.

Les concentrations de NO et de NOx sont stockées en mémoire. La différence entre ces deux concentrations représente la concentration en NO<sub>2</sub>.

L'analyseur délivre ces valeurs de concentrations NO, NO<sub>2</sub> et NOx en affichage face avant et en sorties analogiques ou numériques.



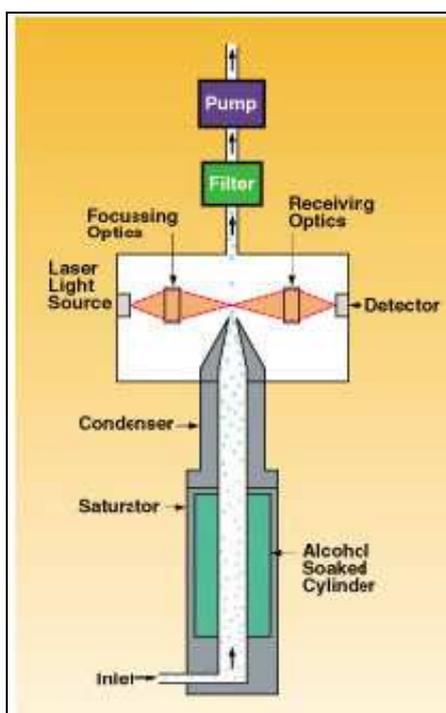
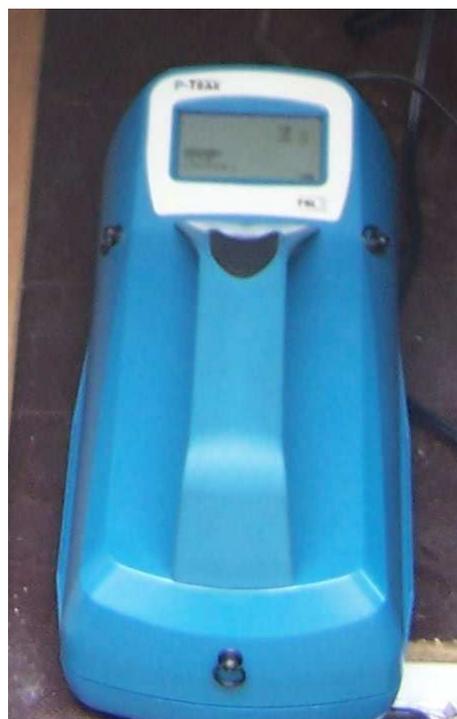
**Figure 5 : Principe analytique avec boucle de retard.**

L'intégration est réalisée sur 10 secondes (Moyenne 10 secondes rafraîchie toutes les dix secondes), l'affichage est rafraîchi toutes les 10 secondes avec une acquisition au même pas de temps.

### 2.3 Comptage de particules

Les particules ultrafines sont mesurées dans l'habitacle à l'aide d'un appareil permettant le comptage de ces particules.

Le compteur de particules ultrafines P-TRAK détecte les particules à partir de 0,02 micron, jusqu'à plus de 1 micron. Il est destiné à la mesure de la qualité de l'air intérieur. Il permet également la mesure des poussières diesel ou autres poussières ultrafines dans l'environnement. Le principe de mesure utilisé est celui des compteurs de particules à condensation, c'est-à-dire que les particules sont saturées d'alcool avant leur mesure par diffraction lumineuse. Cet appareil est portable et peut être utilisé sur batterie.



#### Quelques informations :

- Gamme de concentration : 0 à  $5 \cdot 10^5$  particules/cm<sup>3</sup>
- Taille des particules : 0,02 à 1 micron
- Débit : 100 cm<sup>3</sup>/min.

**Figure 6 : Illustration et schéma du principe de fonctionnement du P-TRACK.**

L'objectif de l'utilisation de ce matériel est de disposer de données durant des phénomènes très rapides, visibles uniquement avec cet appareil réagissant à la seconde. Cela permet d'identifier un « épiphénomène » comme par exemple lors du démarrage d'un véhicule « polluant » devant le véhicule laboratoire.

Afin d'atténuer les vibrations durant les trajets, le P-Track est installé dans une « valise<sup>8</sup> » dans laquelle des blocs de mousse ont été placés pour le maintien de l'appareil de mesure (Cf. Figure 7).



Figure 7 : Mise en place du P-Track calé par des blocs de mousse dans une « valise<sup>8</sup> ».

### 3. Récupération, stockage et traitement des données

Lors d'un trajet, trois systèmes permettent la récupération de données de mesure :

- Le stockage des concentrations d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>, NO et NO<sub>2</sub>) au pas de temps de 10 secondes et d'un contact permettant de marquer l'acquisition des points de départ et d'arrivée d'un trajet.

- L'acquisition des données SIG (Système d'information géographique) : Longitude, Latitude et Altitude (Coordonnées Lambert II), les distances parcourues en mètres ainsi que la vitesse du véhicule en km/h et ceci toutes les 10 secondes également. Une extraction des trajets au format MAPINFO est réalisée afin de faciliter l'expertise.

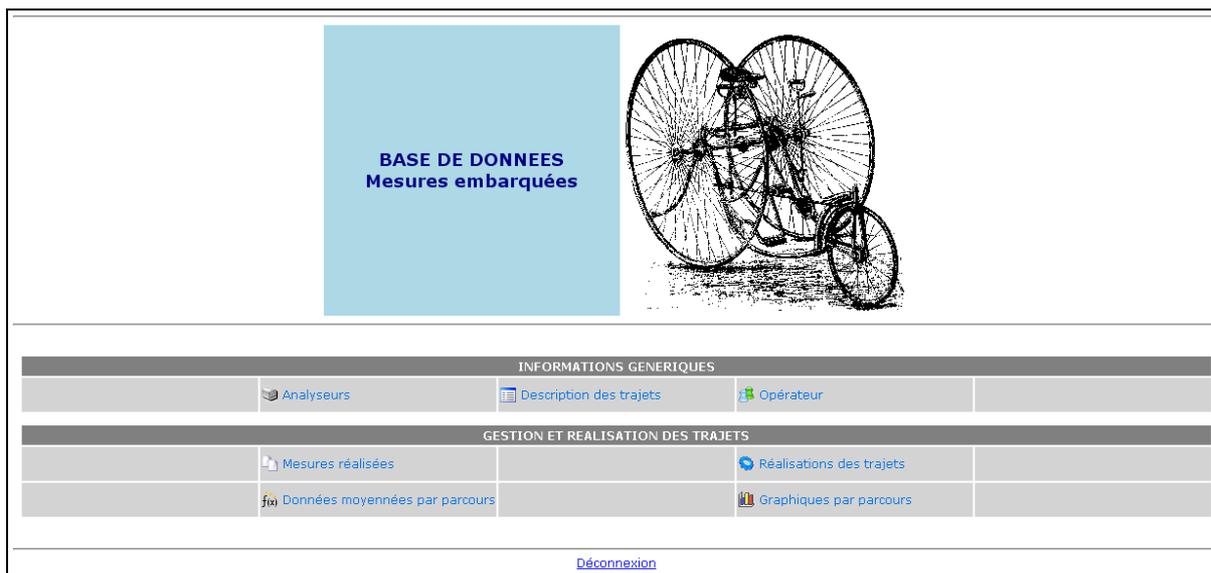
- L'acquisition des comptages de particules, réalisés toutes les secondes par le P-Track.

La quantité importante de données acquises, nous a contraint à développer une base de données permettant d'exploiter au mieux les résultats. Le développement a été réalisé sous PHP<sup>9</sup> pour l'interface graphique et sous MySQL pour la base de données à proprement dite (Cf. Figure 8).

---

<sup>8</sup> Coffret de protection pour les instruments de mesure.

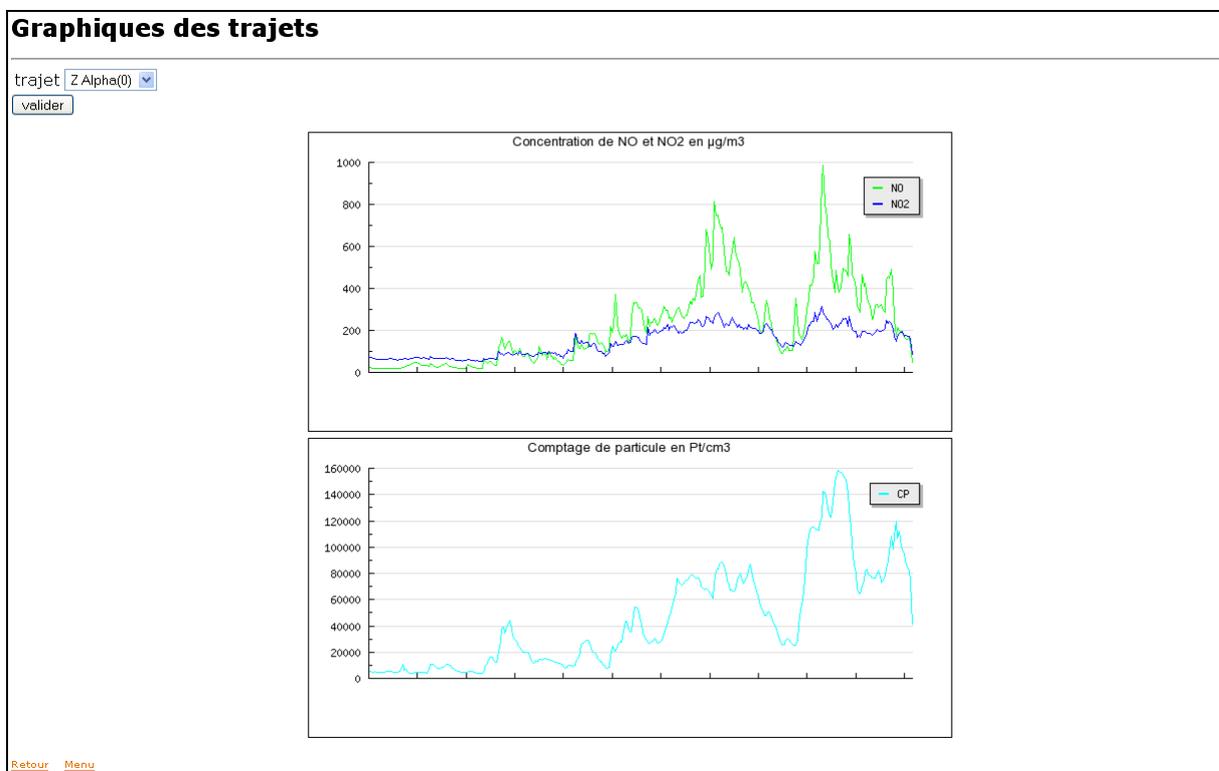
<sup>9</sup> Hypertext Preprocessor.



**Figure 8 : Interface de la base de données développées dans le cadre de cette étude.**

Les principaux traitements sont la conversion des concentrations du ppb aux  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  standardisés à 20°C et 1013 hPa, la réalisation des moyennes 10 secondes du P-Track, la synchronisation des trois systèmes de mesure sur une même base de temps, une validation journalière des données 10 secondes et une validation hebdomadaire pour les moyennes de trajet.

Grâce à la mise en œuvre de la base de données et d’une interface graphique, la visualisation des données est possible dès la fin des mesures.



**Figure 9 : Interface permettant la visualisation des données recueillies durant les différents trajets pour les oxydes d’azote et les particules.**

## 4. Les déplacements des franciliens

### 4.1 Quelques éléments généraux sur les déplacements des Franciliens

Les déplacements des franciliens sont étudiés depuis de nombreuses années au travers notamment de l'Enquête Globale des Transports (EGT<sup>10</sup>), à laquelle différents acteurs régionaux (DREIF<sup>11</sup>, IAURIF<sup>12</sup>, Direction régionale de l'INSEE<sup>13</sup>,...) ont participé. Cette enquête, menée depuis 1976, permet de suivre l'évolution des déplacements en Île-de-France. La dernière enquête a été réalisée entre 2001 et 2002. Celle-ci permet de mettre en relief différents résultats concernant la mobilité des Franciliens en fonction, notamment, du mode de transport utilisé, du motif de déplacement, etc.

En moyenne, un Francilien se déplace quotidiennement 3,5 fois en prenant majoritairement sa voiture. En effet, 44 % des déplacements sont réalisés en voiture avec cependant une disparité selon la zone de résidence avec une utilisation accrue de ce mode de transport au fur et à mesure que l'on s'éloigne de Paris pour atteindre une utilisation à hauteur de 60 % en Grande-Couronne (Cf. Figure 10).

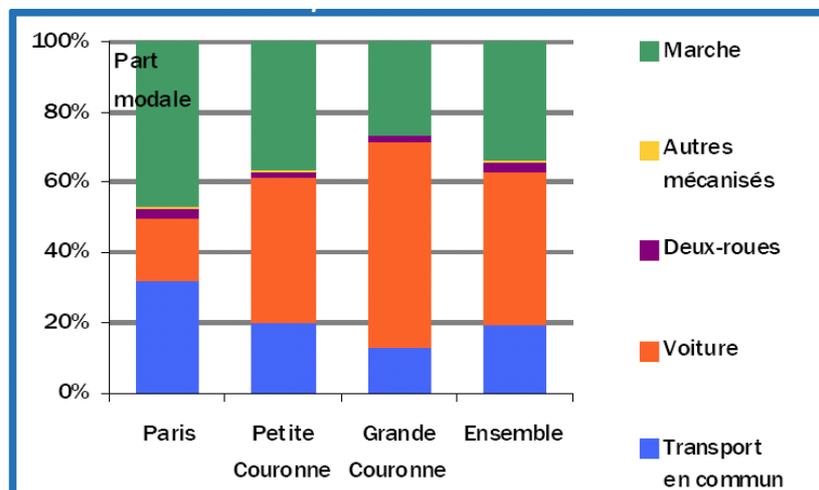


Figure 10 : Part des modes de transports en 2001 selon la zone de résidence (Source : EGT 2001).

Ces différents déplacements sont partagés entre les motifs privés (faire des achats, aller au cinéma...) pour un peu plus de la moitié (52 %) et pour des motifs obligés (travail, étude...). Cela représente quotidiennement pour les actifs franciliens ayant un emploi 6,5 millions de déplacements entre leur domicile et leur lieu de travail.

En étudiant les moyens de transport utilisés selon les motifs de déplacement (Figure 11), il apparaît que les trajets « Domicile-Travail » sont principalement réalisés en voiture. Néanmoins, ces trajets ne sont pas les principaux motifs de déplacement en voiture puisqu'une large part des déplacements est consacrée aux loisirs et autres motifs (faire des achats, aller voir des amis...).

<sup>10</sup> « Les déplacements des Franciliens en 2001-2002 : Enquête Globale des Transports » - Direction Régionale de l'Équipement Île-de-France – août 2004.

<sup>11</sup> Direction Régionale de l'Équipement Île-de-France.

<sup>12</sup> Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Île-de-France.

<sup>13</sup> Institut National de la Statistique et des Études Économiques.

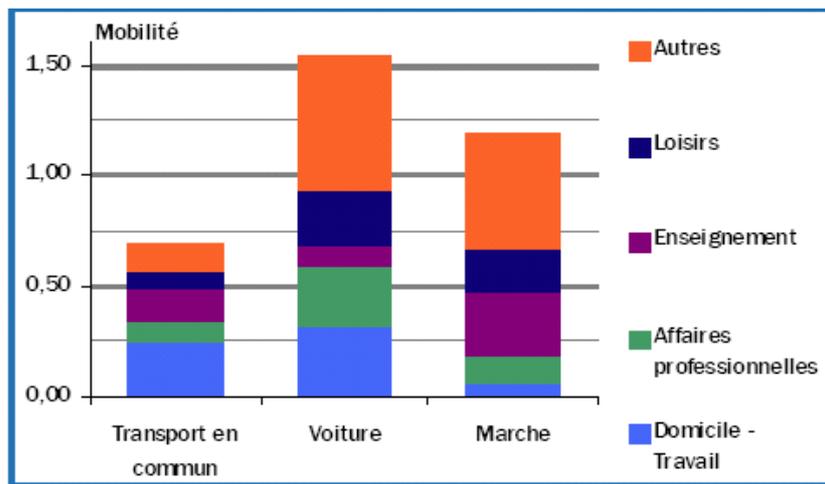


Figure 11 : Nombre moyen de déplacements par jour et par personne selon le motif et le mode de transport (Source : EGT 2001).

Concernant la répartition géographique des déplacements (tout mode de transport), ils se font en grande partie au sein de la zone du lieu de résidence. En effet, les déplacements des Parisiens sont essentiellement réalisés dans Paris (78 %) et de la même manière pour les habitants de la Petite-Couronne (77 %) et de la Grande-Couronne (82 %). C'est notamment le cas des déplacements privés (loisirs...) correspondant à des trajets le plus souvent de proximité.

La voiture reste le mode de transport le plus utilisé pour les déplacements en banlieue, plus particulièrement en Grande-Couronne, et lors des déplacements entre la Petite et la Grande-Couronne (Cf. Figure 12). Au contraire, les déplacements dans Paris, où l'offre de transport en commun est importante, sont principalement réalisés à pied ou en transport en commun.

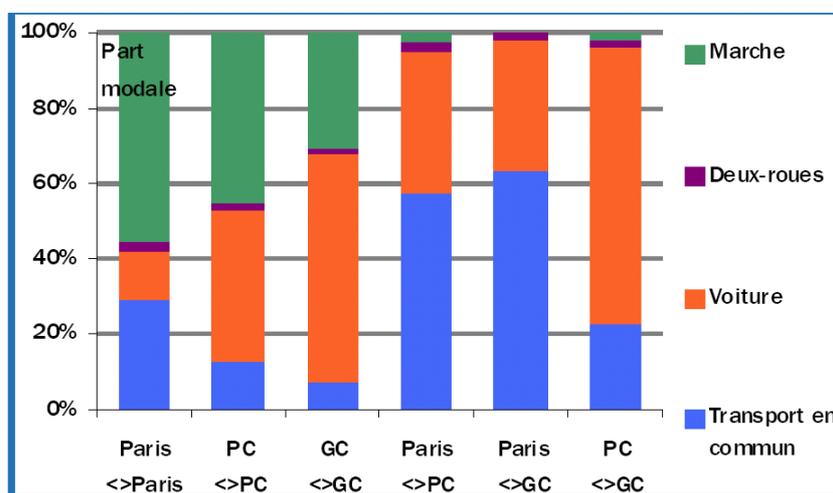


Figure 12 : Part des modes de transport dans le nombre de déplacements en 2001 selon le type de liaison (Source : EGT 2001).

Les liaisons entre zones peuvent également être étudiées selon le motif de déplacement (Cf. Figure 13). Les déplacements entre les différentes zones ont pour principal motif le travail. Par exemple, les liaisons entre Paris et la Grande-Couronne sont en majorité (50 %) des déplacements « Domicile-Travail ». Ceux-ci sont cependant réalisés en grande partie en transport en commun.

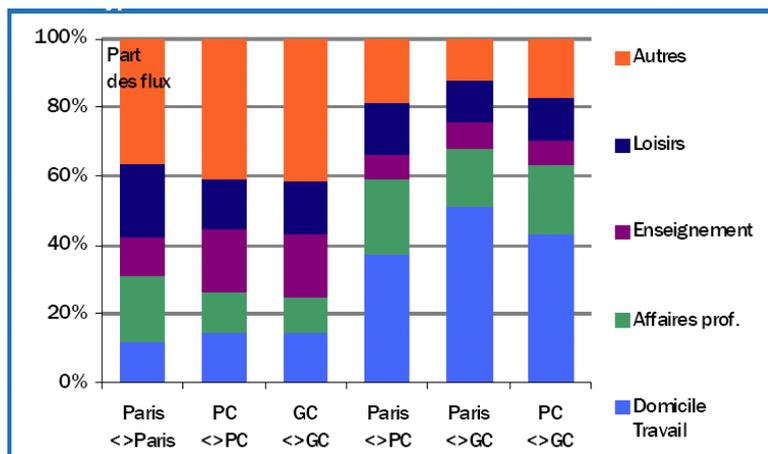


Figure 13 : Part des motifs dans le nombre de déplacements en 2001 selon le type de liaison (Source : EGT 2001).

#### 4.2 Les automobilistes franciliens lors de leurs déplacements « Domicile - Travail »

Le nombre de déplacements « Domicile-Travail » en voiture selon le découpage en trois zones de l'Île-de-France (Paris – Petite-Couronne et Grande-Couronne) est présenté dans le Tableau 1.

Les déplacements « Domicile-Travail » en voiture particulière sont principalement réalisés au sein d'une même zone et en grande majorité en Grande-Couronne avec plus de 862 000 actifs utilisant leur véhicule pour aller travailler. Cela représente 43 % des individus utilisant une voiture particulière pour les déplacements « Domicile-Travail » sur l'ensemble de l'Île-de-France.

Secondairement, cette proportion est de 22 % pour les habitants de la Petite-Couronne allant travailler dans cette même zone géographique, soit plus de 450 000 personnes.

De / Vers	Petite Couronne	Grande Couronne	Paris	TOTAL
Petite Couronne	452 387	116 346	113 736	<b>682 469</b>
Grande Couronne	237 096	862 098	71 206	<b>1 170 400</b>
Paris	66 887	28 727	79 910	<b>175 524</b>
<b>TOTAL</b>	<b>756 370</b>	<b>1 007 171</b>	<b>264 852</b>	<b>2 028 393</b>

Tableau 1 : Nombre d'individus utilisant une voiture particulière (VP) pour les déplacements « Domicile-Travail » par zones géographiques (Source INSEE – recensement 1999).

Près de 185 000 actifs résidant à l'extérieur de Paris (Petite et Grande Couronne) utilisent leur voiture pour aller travailler dans la Capitale. La voiture est également utilisée par près de 80 000 parisiens pour aller travailler au sein même de Paris.

Les lieux de travail des franciliens sont, de manière générale, principalement répartis sur des pôles d'emploi. C'est également le cas si l'on considère uniquement les emplois des personnes se déplaçant en voiture pour aller travailler (Cf. Figure 14). Dans ce cadre, la majorité des communes ont un nombre d'emplois inférieur à 1 000 alors que d'autres peuvent atteindre pour la Grande-Couronne jusqu'à plus de 48 000 emplois (Roissy-en-France) et pour la Petite-Couronne plus de 28 000 emplois (Nanterre).

## 5. Méthodologie et élaboration des trajets « Domicile-Travail »

Afin d'identifier les points de départ et d'arrivée des trajets « Domicile-Travail » une base de données a été achetée auprès de l'INSEE. Cette base de données, appelée « Communes... Mobilités Travail - Études » fournit, grâce au recensement de 1999, les informations communales sur le nombre de personnes se déplaçant à destination de leur lieu de travail selon les modes de transport utilisés. Elle permet ainsi d'identifier pour chaque commune d'Île-de-France le nombre de personnes allant y travailler en voiture.

### 5.1. Choix des trajets « Domicile-Travail »

#### 5.1.1 Les pôles d'emplois

Afin de sélectionner les points d'arrivée dans la Petite et la Grande Couronne, il est nécessaire d'identifier les pôles d'emplois dont l'attractivité est la plus importante sur les salariés utilisant leur voiture pour venir travailler.

Paris est considérée dans la Base de Données « Communes... Mobilités Domicile-Travail » comme une seule et même commune. Le nombre d'emplois par arrondissement est cependant fourni dans l'ANNEXE 1, mais pour tous modes de déplacements confondus.

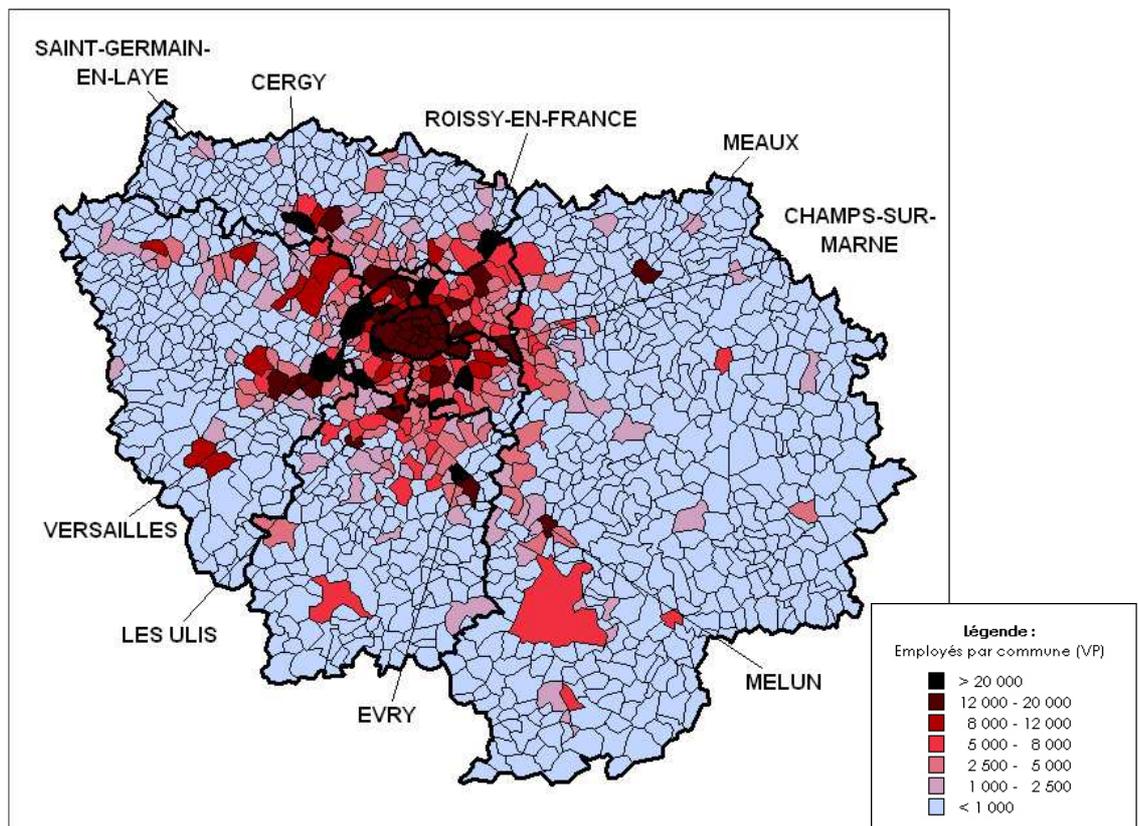


Figure 14 : Carte des emplois par commune en Île-de-France dont les salariés viennent en voiture (d'après source INSEE).

La Figure 14 illustre, pour chaque commune francilienne, le nombre d'employés utilisant leur voiture pour venir y travailler. Ces pôles d'emplois permettent ainsi de déterminer les communes d'arrivées lors des choix des trajets « Domicile-Travail ». À partir de cette cartographie neuf pôles d'emplois au sein de la Grande-Couronne ont été choisis.

Le choix des pôles d'emplois s'est fait à la fois en fonction du nombre d'actifs utilisant leur voiture pour se rendre sur leur lieu de travail et de la localisation géographique des principaux pôles d'emplois afin d'avoir une répartition spatiale la plus homogène possible sur l'ensemble de l'Île-de-France.

Un pôle d'emploi peut regrouper plusieurs communes comme celui de Cergy, où des communes périphériques offrent également de nombreux emplois comme cela est le cas à Pontoise ou encore Saint-Ouen-l'Aumône ou au contraire une seule commune qui concentre les emplois dans une large zone géographique comme à Meaux, en Seine-et-Marne.

Les neuf pôles d'emplois identifiés en Grande-Couronne sont les suivants<sup>14</sup> :

- « Cergy » regroupant les communes de Cergy, Pontoise et Saint-Ouen-l'Aumône ;
- « Roissy-en-France » ;
- « Meaux » ;
- « Marne-la-Vallée » avec les communes de Torcy, Champs-sur-Marne, Noisiel, Lagny-sur-Marne ;
- « Melun » ;
- « Évry » avec les communes d'Évry et de Corbeil-Essonnes ;
- « Orsay » regroupant les communes d'Orsay, Les Ulis, Palaiseau et Massy ;
- « Versailles » rassemblant les communes de Versailles, Guyancourt et Vélizy-Villacoublay ;
- « Saint-Germain-en-Laye » avec Saint-Germain-en-Laye et la commune de Poissy.

Ces pôles d'emplois regroupent 457 500 emplois, soit 28 % de ceux de la Grande-Couronne. Enfin, ils drainent quotidiennement 294 200 personnes qui utilisent leur voiture pour venir y travailler. C'est ainsi près des deux tiers (64 %) des salariés qui utilisent leur voiture pour se rendre sur leur lieu de travail dans les neuf pôles définis.

Plusieurs pôles d'emplois localisés dans les villes nouvelles d'Île-de-France de la Grande-Couronne attirent de nombreux migrants alternants. En effet, dans de nombreux pôles, l'offre d'emplois est excédentaire par rapport au nombre d'habitant y résidant. A Évry, c'est un peu moins de deux emplois offerts pour un actif résident. De la même manière, l'offre d'emploi est excédentaire à Saint-Quentin-en-Yvelines ou encore dans la zone de Roissy qui représente 3 % de l'emploi régional.

Le même travail a été réalisé pour la Petite-Couronne en sélectionnant huit pôles d'emplois. Ils sont situés dans un espace urbain relativement homogène contrairement aux pôles d'emplois de la Grande-Couronne.

La Figure 15 illustre par communes le nombre d'employés utilisant leur voiture pour venir y travailler en zoomant sur la Petite-Couronne et Paris, ce qui permet de mettre en relief les huit pôles d'emplois suivant :

- « Vitry-sur-Seine » dont font partie les communes de Vitry-sur-Seine et d'Ivry-sur-Seine ;
- « Orly » avec les communes d'Orly et de Rungis ;
- « Créteil » défini avec les communes de Créteil et de Saint-Maur-des-Fossés ;
- « Montreuil » avec Montreuil, Vincennes et Fontenay-sous-Bois ;

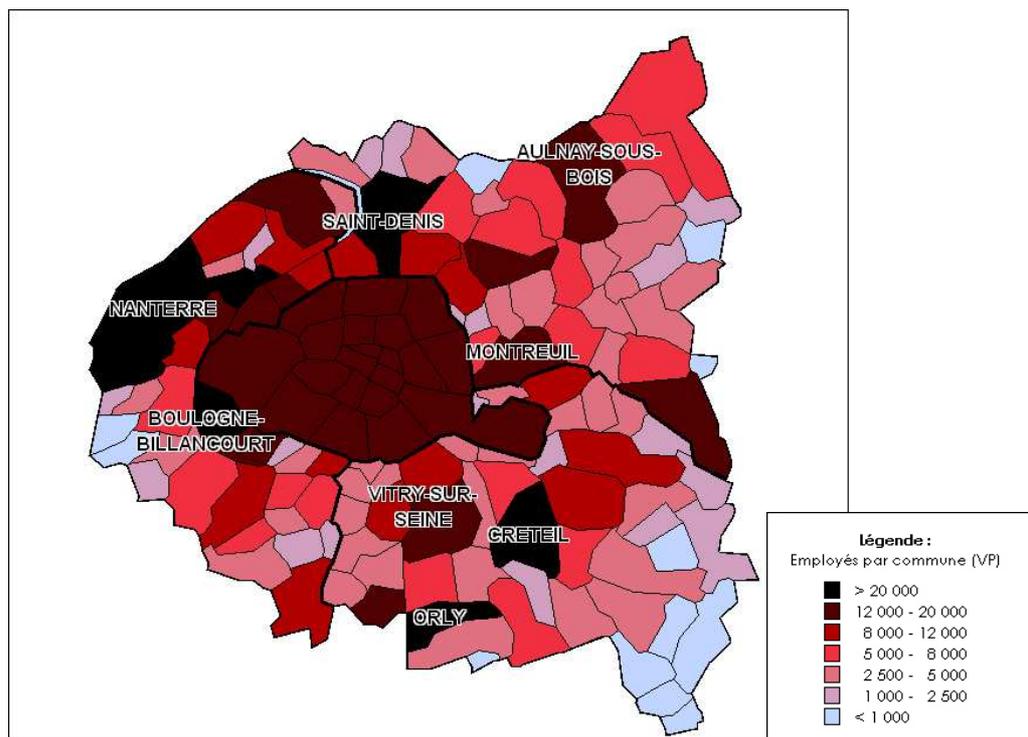
---

<sup>14</sup> Les différents pôles d'emplois ont également été déterminés suivant la classification de l'INSEE qui a découpé le territoire régional d'Île-de-France en 26 zones d'emplois au travers de son travail sur les principales données socioéconomiques. Ces différentes zones sont déterminées notamment par les déplacements « Domicile-Travail ». Étude sur les 26 zones d'emplois de l'Île-de-France – INSEE – CRCI Paris Île-de-France DRTEFP - avril 2006.

- « Aulnay-sous-Bois » regroupant Aulnay-sous-Bois et Villepinte ;
- « Saint-Denis » avec Saint-Denis, Saint-Ouen et Aubervilliers ;
- « La Défense » dont les communes de Nanterre, Courbevoie et Puteaux composent le pôle d'emplois ;
- « Boulogne-Billancourt » avec les communes de Boulogne-Billancourt et d'Issy-les-Moulineaux ».

Ces pôles d'emplois représentent 718 400 emplois au sein de la Petite-Couronne, soit 41 % des emplois de cette zone.

Parmi les actifs venant travailler dans ces pôles d'emplois, 311 700 franciliens utilisent leur voiture. C'est ainsi 43 % des salariés de ces pôles d'emplois qui utilisent leur voiture pour aller y travailler.



**Figure 15 : Carte des emplois à Paris et Petite-Couronne dont les salariés viennent en voiture (d'après source INSEE).**

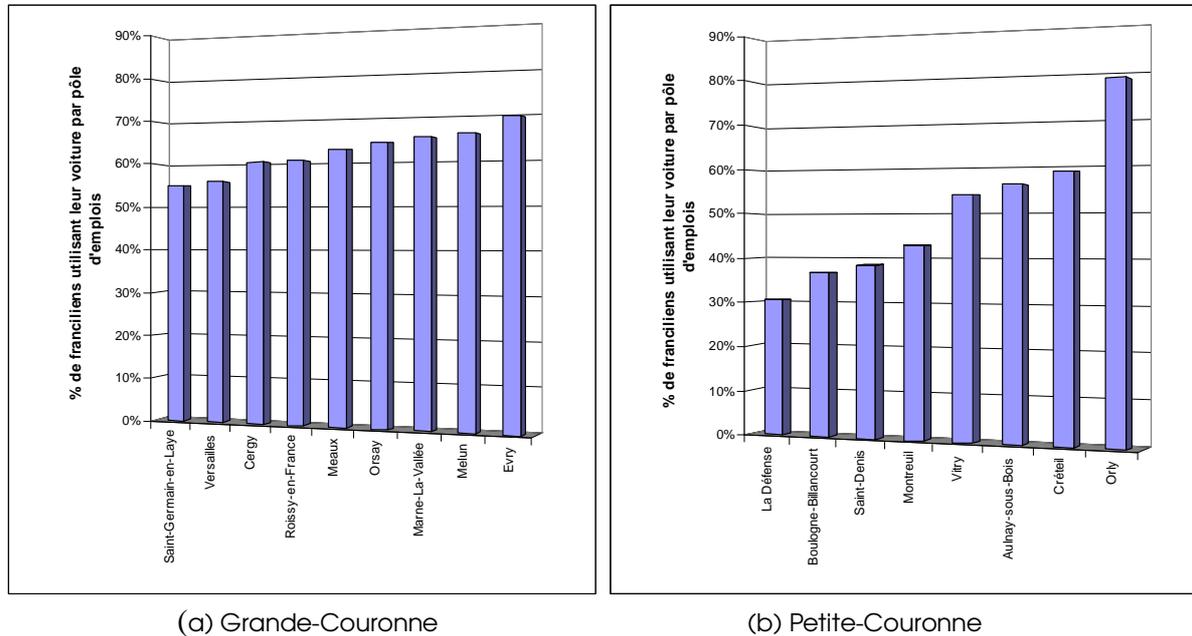
#### *Zoom sur le pôle d'emplois de La Défense :*

Le quartier de La Défense (Puteaux, Courbevoie, Nanterre) attire chaque jour 535 000 salariés ce qui est largement supérieur au nombre d'actifs résidents dans ces communes. Les déplacements « Domicile-travail » vers le pôle d'emplois de « La Défense » sont en grande majorité réalisés en transport en commun. Ce pôle d'emplois, très bien desservi par les transports en commun (RER, Métro, Train, Tramway) compte tout de même un nombre important de salariés s'y rendant en voiture. Ce mode de transport<sup>15</sup> est particulièrement utilisé par les salariés habitant dans les Hauts-de-Seine (23 %) et dans une moindre mesure par les Val-d'Oisiens (11 %) et les Yvelinois (10 %).

La Figure 16 illustre pour chaque pôle d'emplois préalablement défini la part (en %) des franciliens utilisant leur voiture pour aller y travailler.

<sup>15</sup> Source : « Paris - La Défense, moteur d'attractivité internationale de l'Île-de-France » - Rapport de la Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris – EPAD - Mars 2007

Il est à noter que plus on est éloigné de Paris plus la part des franciliens utilisant leur voiture pour effectuer les trajets « Domicile-Travail » est importante. L'offre de transport en commun étant moins importante au fur et à mesure que l'on s'éloigne du cœur dense de l'agglomération parisienne (Cf. Figure 16), la part des déplacements en voiture pour aller travailler augmente.



**Figure 16 : Part (en %) des franciliens utilisant comme moyen de transport leur voiture pour aller travailler dans les pôles d'emplois définis en Grande-Couronne (a) et en Petite-Couronne (b).**

Les pôles d'emplois situés en périphérie immédiate de Paris, tels que La Défense, Boulogne-Billancourt ou encore Saint-Denis, enregistrent une faible part de salariés utilisant leur voiture pour se rendre au travail du fait principalement d'une meilleure desserte par les transports en commun. Ainsi seulement 30 % des salariés du pôle d'emplois de La Défense viennent y travailler en voiture bien que cela représente un nombre important de salariés venant travailler en voiture (66 870 salariés – Cf. ANNEXE 2). A l'inverse, toujours au sein de la Petite-Couronne parisienne, les pôles d'emplois à la limite de la Grande-Couronne comptent une part plus importante de salariés qui utilisent leur voiture. C'est le cas pour Aulnay-sous-Bois, Créteil et plus encore Orly où près de quatre salariés sur cinq utilisent leur voiture pour venir y travailler.

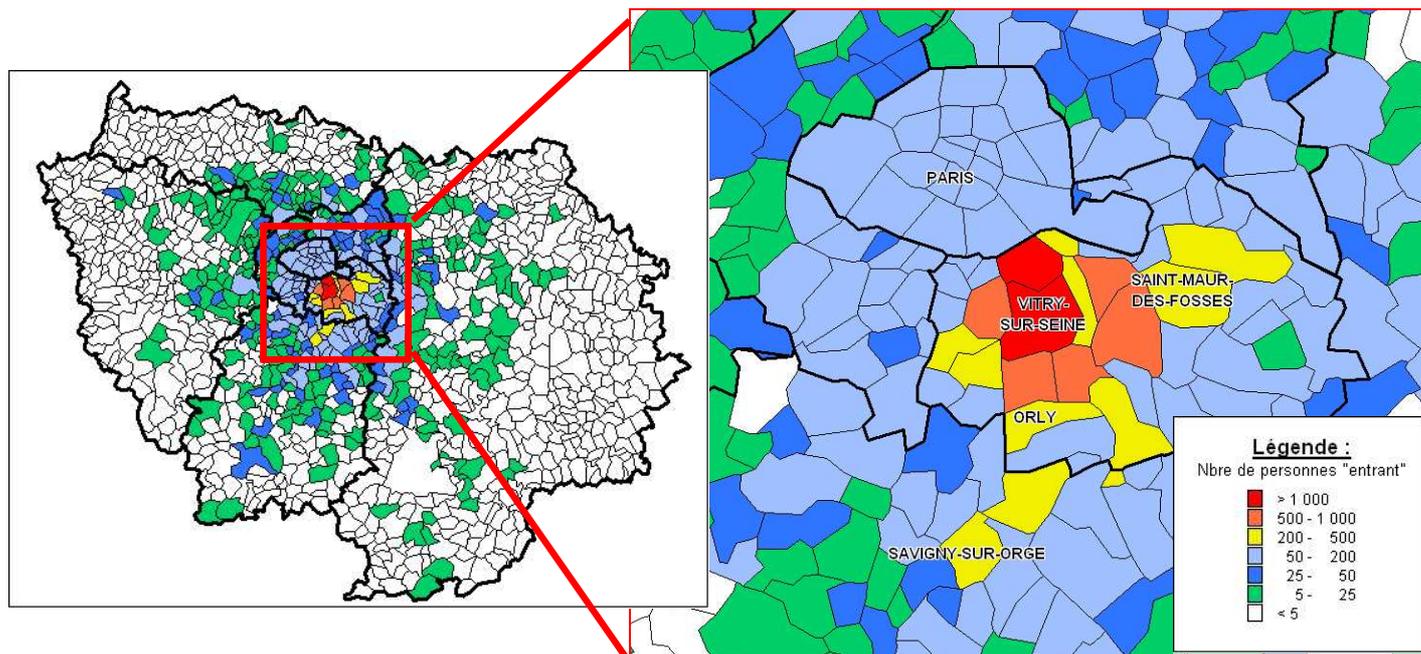
En Grande-Couronne (Cf. Figure 16-b), le pourcentage de salariés qui utilisent leur voiture pour aller travailler aux pôles d'emplois choisis est en moyenne plus important qu'en Petite-Couronne avec une hétérogénéité moins forte (part d'automobilistes compris entre 55 % (Saint-Germain-en-Laye) et 69 % (Évry) contre 31 % (La Défense) et 78 % (Orly) pour la Petite-Couronne).

Il est à noter que le pôle d'emplois de « Versailles » présente le nombre le plus important de salariés se déplaçant en voiture pour aller travailler (près de 93 000) parmi les pôles d'emplois définis.

### 5.1.2 Les points de départ

Après avoir défini les points d'arrivées des trajets pendulaires « Domicile-Travail » correspondant aux pôles d'emplois déterminés précédemment, il est nécessaire de connaître les points de départ des différents salariés travaillant dans ces pôles.

Toujours à partir de la Base de Données « Communes... Mobilités Travail – Étude »<sup>16</sup> de l'INSEE un travail de cartographie et d'identification des points de départs a été réalisé.



**Figure 17 : Cartographie du nombre de salariés « entrant » dans le pôle d'emplois de « Vitry-sur-Seine » pour y venir travailler et utilisant leur voiture comme moyen de transport.**

Pour l'ensemble des pôles d'emplois, à savoir 18 pôles (dont celui de Paris), une cartographie, par commune, du nombre de salariés utilisant leur voiture pour aller y travailler a été effectuée (Cf. ANNEXE 3). Ainsi à partir de la cartographie réalisée pour chaque pôle d'emplois (point d'arrivée), une commune de départ peut être choisie en fonction du nombre de salariés prenant leur voiture pour aller travailler dans le pôle d'emplois déterminé.

La Figure 17 illustre la cartographie communale sur l'ensemble de la région du nombre de salariés utilisant leur voiture pour se rendre à leur travail situé dans le pôle d'emplois de Vitry-sur-Seine dont font partie les communes de Vitry-sur-Seine et d'Ivry-sur-Seine.

Cet exemple permet d'identifier les communes d'où arrivent les salariés en voiture pour venir travailler dans le pôle d'emplois de Vitry-sur-Seine selon leur nombre. L'attractivité de ce pôle d'emplois se fait principalement au sein de la Petite-Couronne et plus précisément sur le même département (Val-de-Marne). Sur cet exemple, plusieurs communes peuvent être choisies comme point de départ pour les trajets ayant comme lieu d'arrivée le pôle d'emplois de « Vitry-sur-Seine » au vu de la cartographie de la Figure 17 :

- Le Sud du Val-de-Marne, autour de la commune d'Orly, est une zone où le nombre de salariés utilisant leur voiture est important. Ce trajet permet d'établir une concentration moyenne pour un parcours interne à la Petite-Couronne ;
- De la même manière, les communes situées à l'Est de Vitry-sur-Seine avec notamment Saint-Maur-des-Fossés caractérisent des trajets au sein de la Petite-Couronne ;
- Le Nord de l'Essonne, avec notamment la commune de Savigny-sur-Orge, observe un nombre important de salariés utilisant leur voiture pour aller travailler dans le pôle d'emplois de Vitry-sur-Seine. Le trajet entre ces communes fait partie des déplacements entre les zones de la Grande-Couronne et la Petite-Couronne.

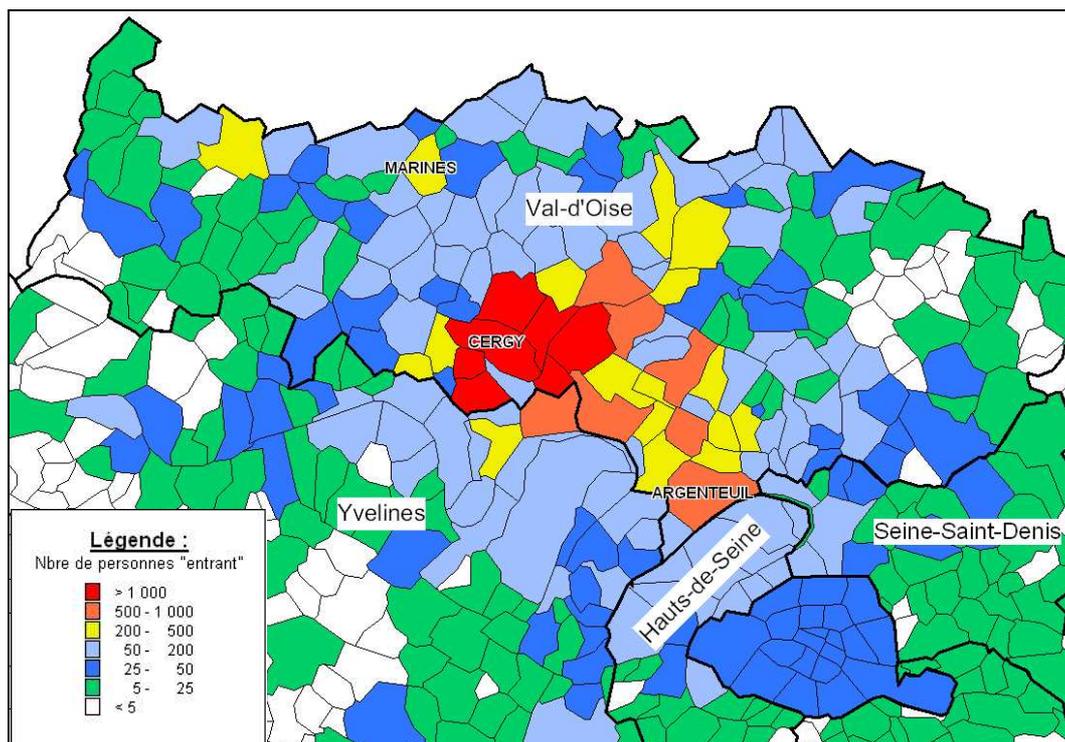
<sup>16</sup> D'après le recensement de 1999 - INSEE.

- Paris Intra-Muros représente un nombre important d'actifs utilisant leur voiture pour venir travailler dans ce pôle d'emplois. De ce fait, Paris est un point de départ pour se rendre vers le pôle d'emplois de « Vitry-sur-Seine » ce qui caractérise un trajet entre les zones de Paris et de la Petite-Couronne ;

Ainsi, ce pôle d'emplois a une attraction marquée auprès des salariés utilisant leur voiture pour venir y travailler, et cela sur chaque domaine d'étude (Paris, Petite-Couronne et Grande-Couronne).

L'espace urbain étant relativement homogène au sein de la Petite-Couronne, nous n'avons volontairement pas pris les communes limitrophes aux pôles d'emplois comme point de départ (correspondant généralement à une part importante de salariés) afin d'obtenir des temps de parcours significatifs pour l'estimation des concentrations moyennes de chaque parcours.

En Petite-Couronne, l'urbanisme est relativement comparable et homogène sur les trois départements qui la composent. *A contrario*, la Grande-Couronne est composée d'une zone urbaine dense en périphérie de la Petite-Couronne, qui délimite l'agglomération parisienne<sup>17</sup>, et d'une zone dont l'environnement est plus rural dans sa partie extérieure. Ainsi, les trajets « Domicile-Travail » vers un pôle d'emplois au cœur de la Grande-Couronne, comme celui de « Cergy », peuvent être différents avec une attractivité exercée sur les résidents des communes limitrophes de la Petite-Couronne, telle qu'Argenteuil située en milieu urbain dense dans l'agglomération, mais aussi sur les salariés résidant en limite de région (Marines) où l'environnement est beaucoup plus rural (Cf. Figure 18).



**Figure 18 : Cartographie du nombre de salariés « entrant » dans le pôle d'emplois de « Cergy » pour y venir travailler et utilisant leur voiture comme moyen de transport.**

<sup>17</sup> Définition INSEE : L'agglomération urbaine (ou unité urbaine) est un ensemble de communes qui comporte sur son territoire une zone bâtie d'au moins 2 000 habitants où aucune habitation n'est séparée de la plus proche de plus de 200 mètres. En outre, chaque commune concernée possède plus de la moitié de sa population dans cette zone bâtie.

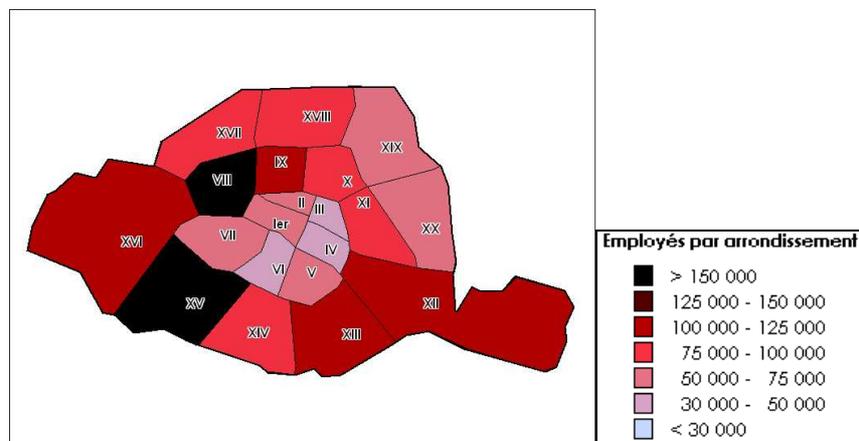
De ce fait, deux types de trajets « Domicile-Travail » sont à étudier au sein de la Grande-Couronne sur ce même pôle d'emplois avec un trajet empruntant des axes dont le trafic est important en milieu urbain et au contraire un trajet en grande partie en zone rurale empruntant des axes secondaires. Ces deux trajets de la Grande-Couronne vers le pôle d'emplois de « Cergy » sont réalisés afin de prendre en compte la disparité géographique ainsi que la différence de densité du trafic routier de ces trajets pouvant entraîner une exposition différente des automobilistes lors de leurs déplacements « Domicile-travail ».

Un troisième groupe interne à la Grande-Couronne dont les déplacements « Domicile-Travail » sont effectués uniquement en zone rurale n'est pas considéré dans cette étude. Les niveaux d'expositions pour ces trajets peuvent être appréhendés à partir des niveaux de fond mesurés en zone rurale (axes secondaires, faible densité de trafic...).

Pour le pôle d'emplois parisien, où près de 80 000 personnes réalisent des déplacements « Domicile-Travail » en voiture, une dizaine de trajets intra-Muros ont été définis.

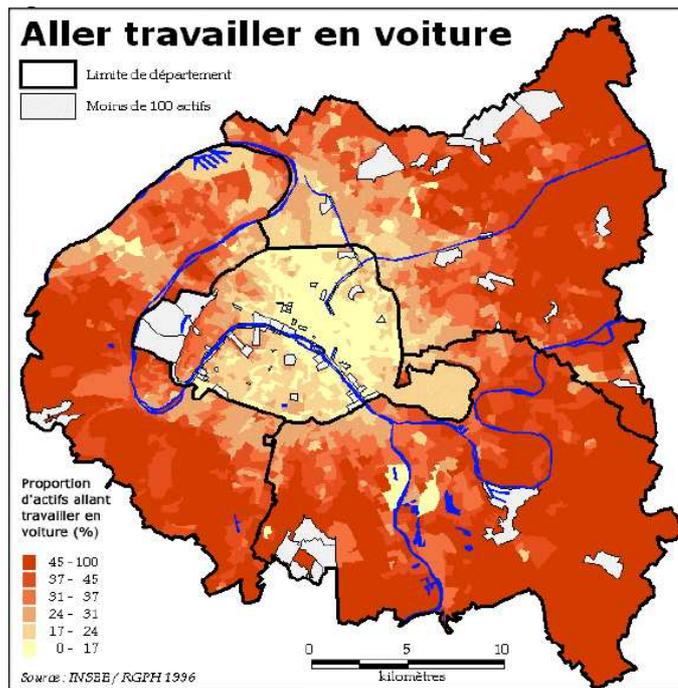
Afin de déterminer ces trajets, deux éléments d'information ont été croisés, à savoir :

- La cartographie par arrondissement du nombre d'emplois, tous modes de déplacements confondus sachant que la Base de Données « Communes... Mobilités Domicile-Travail » ne dispose pas de l'information à l'échelle de l'arrondissement (Cf. Figure 19). Dans Paris, l'attractivité d'un arrondissement ne peut être reliée à des points de départ comme c'est le cas pour les Petite et Grande Couronnes. Les points de départs sont retenus par défaut à partir des zones ayant une forte proportion d'actifs allant travailler en voiture (Cf. Figure 20).
- Cartographie de la proportion d'actifs prenant leur voiture pour aller travailler selon leur lieu de résidence (Cf. Figure 20).



**Figure 19 : Nombre d'emplois dans Paris selon les arrondissements (Source : INSEE).**

D'après la Figure 19, les emplois dans la Capitale sont principalement situés dans le VIII<sup>ème</sup> et le XV<sup>ème</sup> arrondissement avec respectivement 163 000 et 157 000 emplois. Les arrondissements du cœur de Paris offrent un nombre d'emplois moins important avec 30 000 dans le III<sup>ème</sup>, 41 400 dans le IV<sup>ème</sup> et 44 000 dans le VI<sup>ème</sup>.



**Figure 20 : Proportion d'actifs (en %) allant travailler en voiture à Paris et en Petite-Couronne selon un découpage à l'Iris®.**

Sur la carte de la Figure 20, on retrouve dans la partie Est de la Capitale une faible proportion de salariés parisiens allant travailler en voiture, avec moins de 17 % des actifs.

Dans Paris des disparités existent suivant les arrondissements avec une proportion de salariés allant travailler en voiture plus importante à l'Ouest et au Sud de Paris, principalement pour les habitants du XVI<sup>ème</sup> arrondissement, où un peu moins de la moitié des salariés utilisent leur voiture.

**Les différentes cartographies réalisées sur l'ensemble de l'Île-de-France (ANNEXE 3) ont ainsi permis de définir plusieurs trajets suivant diverses typologies en prenant en compte les communes où il y a le plus de salariés se rendant aux pôles d'emplois définis.**

### 5.1.3 Élaboration de circuits

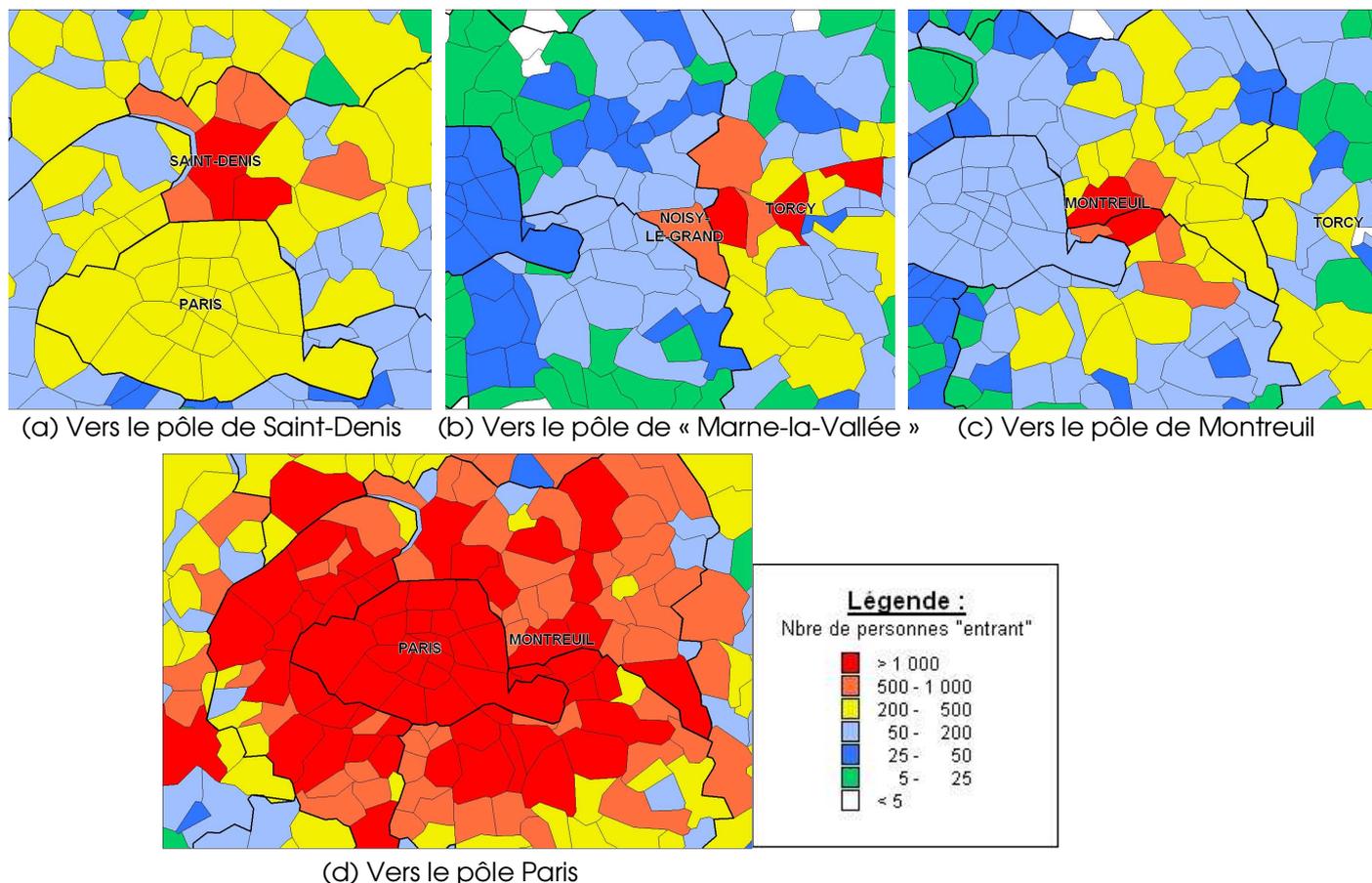
Il existe différentes typologies de trajets « Domicile – Travail » en prenant en compte les trois zones géographiques définies : Paris – Petite-Couronne – Grande-Couronne. Il y a de ce fait neuf typologies possibles de trajets, à savoir :

- Intra Paris ;
- De Paris vers la Petite-Couronne ;
- De Paris vers la Grande-Couronne : Compte tenu de la très faible proportion (1 % du total francilien) des trajets « Domicile – Travail » réalisés en voiture de Paris en direction de la Grande-Couronne cette typologie de trajet ne fera pas l'objet de mesure dans le flux de circulation ;
- Intra Petite-Couronne ;
- De la Petite-Couronne vers Paris ;
- De la Petite-Couronne vers la Grande-Couronne ;
- Intra Grande-Couronne ;
- De la Grande-Couronne vers Paris ;
- De la Grande-Couronne vers la Petite-Couronne.

Afin de multiplier les mesures dans le flux de circulation pour chaque typologie de trajets, des circuits ont été élaborés.

Un circuit correspond à un enchaînement de trajets préalablement définis suivant les cartographies du nombre de salariés utilisant leur voiture pour se rendre dans les pôles d'emplois.

Sur l'exemple de la Figure 22, la cartographie des « entrants » en voiture pour les pôles d'emplois de « Saint-Denis », de « Marne-la-Vallée », de « Montreuil » et de Paris ont été utilisées pour l'élaboration de ce circuit (Cf. Figure 21).



**Figure 21 : Cartographies du nombre de salariés utilisant leur voiture pour se rendre dans les pôles d'emplois définis pour l'élaboration d'un circuit de mesure.**

Un circuit permet d'établir une concentration moyenne lors d'un déplacement « Domicile-Travail » en direction de différents pôles d'emplois prédéfinis et selon des trajets de typologies différentes. Ici, ce circuit permet de réaliser 4 trajets à savoir, de Paris en direction du pôle d'emplois de Saint-Denis ce qui correspond à un trajet « Paris → Petite-Couronne », puis de « la Petite-Couronne vers la Grande-Couronne » en réalisant au préalable un trajet de liaison entre Saint-Denis et Noisy-le-Grand. Ce trajet de liaison ne correspond pas à un trajet déterminé, Noisy-le-Grand n'étant pas défini comme un pôle d'emplois. Il ne rentre donc pas dans le calcul des concentrations moyennes « Domicile-Travail » d'un automobiliste. Est ensuite réalisé un trajet d'une commune de départ (Noisy-le-Grand) où le nombre de personnes utilisant leur voiture pour ce rendre au pôle d'emplois de « Marne-la-Vallée » (ici défini par la commune de Torcy) est important.

Ce circuit permet de relever le niveau moyen dans l'habitacle d'un véhicule suivant la liaison « Grande-Couronne → Petite-Couronne » défini par le trajet entre Torcy et Montreuil et enfin « Petite-Couronne → Paris » au départ de la commune de Montreuil. Un exemple de trajet réalisé en voiture pour ce circuit est illustré en ANNEXE 5.

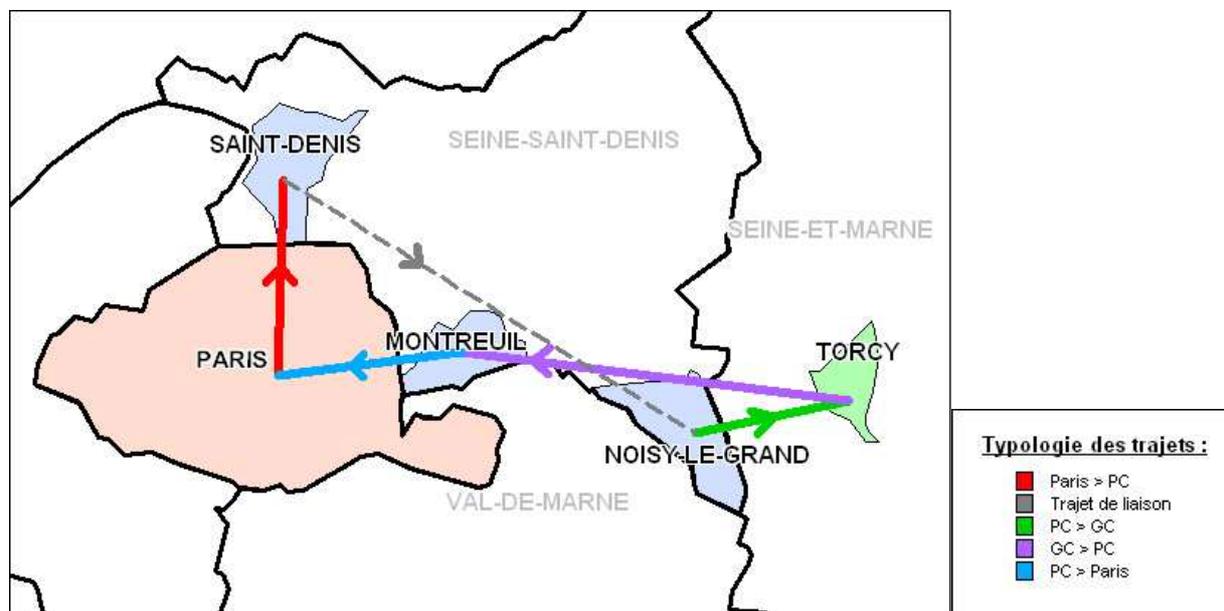


Figure 22 : Exemple d'un circuit défini permettant la mesure dans le flux de circulation selon différentes typologies de trajet lors des déplacements « Domicile-Travail ».

De la même manière, 22 circuits ont été définis (voir ANNEXE 4) entraînant au final un nombre de trajets compris entre 10 et 14 selon les différentes zones (Cf. Tableau 2).

	De Paris	De Petite Couronne	De Grande Couronne
Vers Paris	13	10	10
Vers Petite Couronne	10	11	10
Vers Grande Couronne	****	10	14

Tableau 2 : Nombre de trajets identifiés par zone.

Le choix de plusieurs trajets s'explique par un souci de représentativité de l'ensemble des parcours effectués par les franciliens. Chaque trajet est ensuite effectué à plusieurs reprises de manière équitable entre les heures de pointe du matin et celles du soir. Les trajets sont réalisés le matin en direction des pôles d'emplois (« Domicile – Travail ») et le soir dans le sens inverse (« Travail-Domicile »), autrement dit des pôles d'emplois aux communes de résidences de salariés.

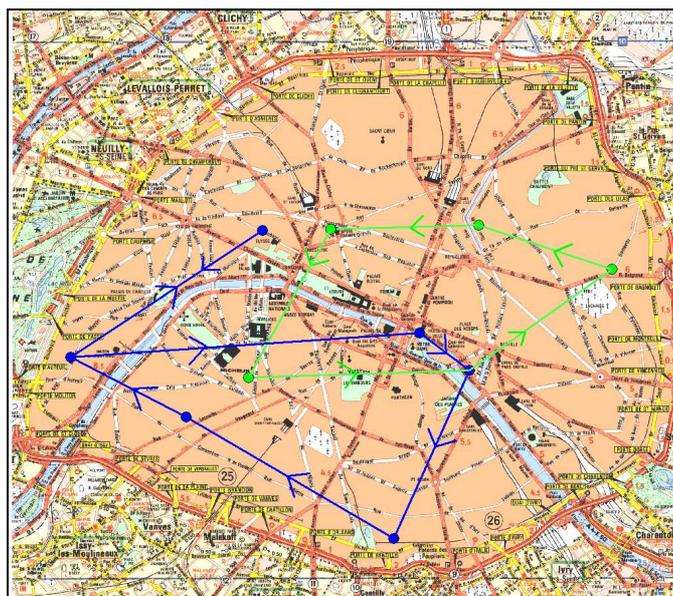
Un nombre de trajets compris entre 1 et 5 est réalisé en direction des pôles d'emplois (Cf. Tableau 3).

Pôle d'emplois	Total	De Paris	De Petite Couronne	De Grande Couronne
Aulnay / Villepinte	3	1	1	1
Montreuil	5	2	2	1
Saint Denis	4	2	1	1
Créteil	4	1	1	2
La Défense	4	1	1	2
Orly	4	1	2	1
Vitry-sur-Seine	4	1	2	1
Boulogne	3	1	1	1
Cergy	2		0	2
Meaux	1		0	1
Roissy	4		3	1
Saint-Germain	3		1	2
Marne-la-Vallée	3		2	1
Versailles	3		1	2
Évry	3		1	2
Melun	1		0	1
Orsay	4		2	2

**Tableau 3 : Nombre de trajets « aller – retour » ayant comme point d'arrivée (le matin : « Domicile – Travail ») et de départ (le soir : « Travail – Domicile ») les pôles d'emplois définis.**

Le trajet réalisé en voiture lors d'un déplacement « Domicile-Travail » de Paris vers la Grande-Couronne n'a pas été retenu sachant que le nombre de personnes réalisant ce trajet est très faible à l'échelle de l'Île-de-France avec moins de 1 % (Voir Chapitre 4.2).

Concernant les trajets Paris Intra-Muros, deux circuits ont été définis (Cf. Figure 23) prenant en compte à la fois le nombre d'emplois par arrondissement et la proportion d'actifs parisiens allant travailler en voiture. Ainsi, le nombre de trajets est plus important dans l'Ouest et le Sud parisien car d'une part les emplois y sont nombreux et d'autre part la proportion d'actifs utilisant leur voiture pour aller travailler est plus forte dans ce secteur de la Capitale.



**Figure 23 : Illustration des deux circuits retenus dans le cadre des mesures dans le flux de circulation lors des déplacements « Domicile-Travail » en voiture dans Paris Intra-Muros.**

### 5.1.4 Répétition des trajets

Chaque trajet est au minimum effectué une fois durant la période de pointe du matin et celle du soir. L'ensemble des trajets présentant les communes de départ et d'arrivée, la typologie des trajets et les pôles d'emplois concernés, sont présentés dans l'ANNEXE 4 sous forme de circuits.

	De Paris	De Petite Couronne	De Grande Couronne
Vers Paris	39	34	32
Vers Petite Couronne	34	38	34
Vers Grande Couronne		32	40

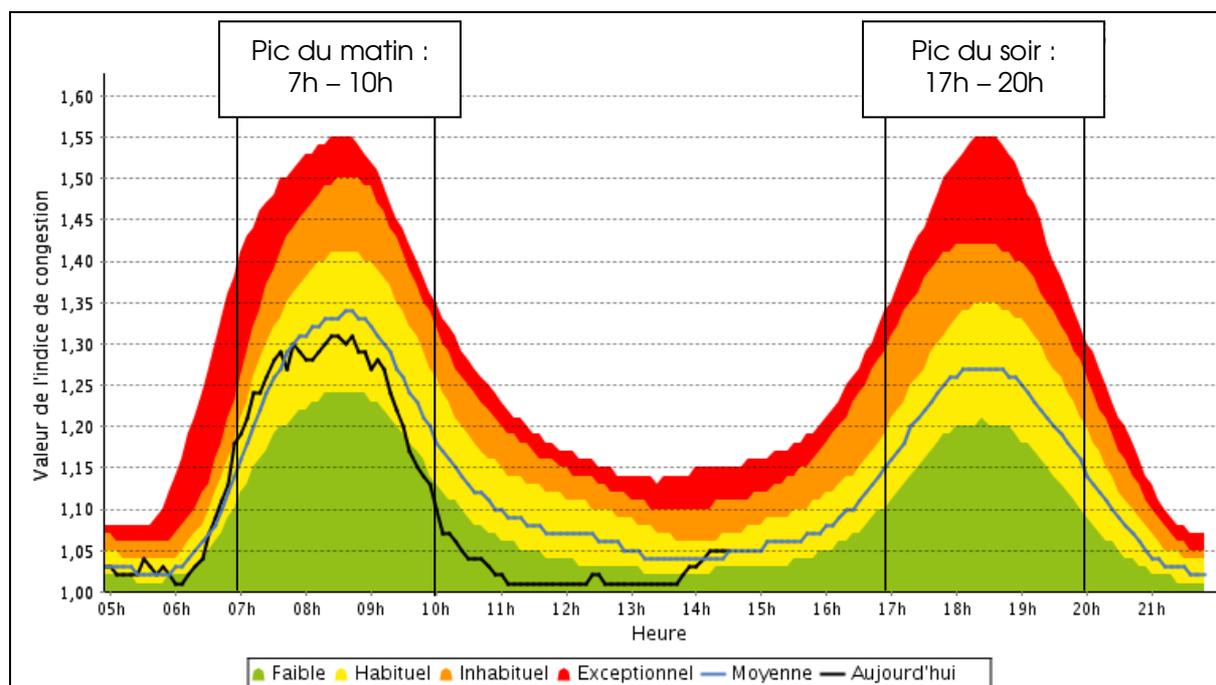
**Tableau 4 : Nombre de données par typologie de trajet.**

Les différents circuits seront réalisés le même nombre de fois le matin et le soir afin d'avoir une situation moyenne ne dépendant pas de la période de la journée.

### 5.2. Période de mesure

Les mesures sont réalisées aux heures de pointe du trafic routier afin d'être le plus proche possible des situations de la grande majorité des trajets « Domicile-Travail ».

Les mesures dans le flux de circulation sont donc réalisées le matin entre 7h et 10h et en fin d'après-midi lors des heures de « sorties de bureaux » entre 17h et 20h.



**Figure 24 : Indice de congestion sur les principaux axes d'Île-de-France (Source Direction Interdépartementale des Routes d'Île-de-France).**

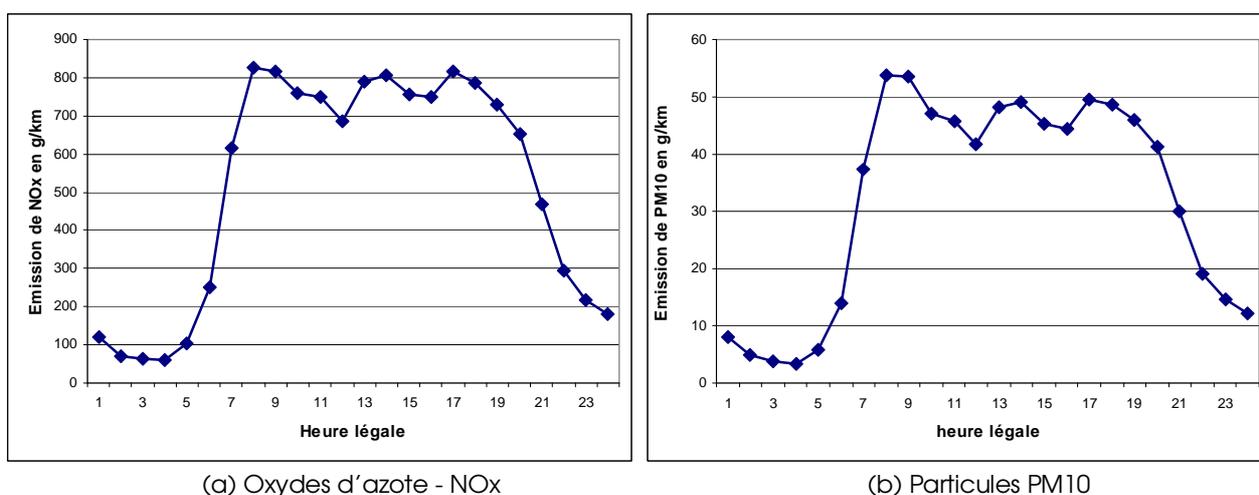
Ces horaires correspondent aux heures de pointes du trafic routier durant lesquelles la congestion est importante sur les principaux axes franciliens comme cela est illustré sur la Figure 24. Cet indice synthétique<sup>18</sup> représente la congestion (exprimée en temps de parcours)

<sup>18</sup> Source : Directions Interdépartementales des Routes d'Île-de-France - <http://www.sytadin.fr/>.

par rapport à la situation moyenne, sur l'ensemble du réseau constitué principalement d'autoroutes urbaines d'une longueur cumulée de 700 km. Il est représenté par une courbe évoluant dans la journée, située par rapport à la courbe moyenne de l'année et des jours de grande congestion (plage rouge de la courbe) ou de situation fluide (plage verte de la courbe).

Le profil journalier des émissions de polluants atmosphériques présente naturellement aux heures de pointe du trafic routier les maxima au cours de la journée, comme illustré à la Figure 25 pour les oxydes d'azote et les particules PM10.

Ce profil journalier moyen des émissions a été obtenu sur cinq jours ouvrés durant le mois d'octobre 2007, octobre étant un mois représentatif d'une situation moyenne à l'échelle de l'année. Ce profil découle du calcul des émissions sur les principaux axes franciliens définis pour 10 500 km de voirie (projet HEAVEN<sup>19</sup>).



**Figure 25 : Émissions moyennes des oxydes d'azote et de Particules PM10 en gramme par kilomètre en Île-de-France (échantillon de cinq jours ouvrés d'octobre 2007).**

### 5.3. Protocole de mesure

Les mesures dans le flux de circulation durant les différents trajets déterminés suivent un protocole défini dans le but d'harmoniser les divers éléments pouvant interférer sur les résultats.

Ainsi, les points de départs correspondent aux Mairies des communes. De la même manière, les points d'arrivée (identifiés comme pôle d'emplois) correspondent également aux Mairies des communes mentionnées ou un point identifié pour une zone d'emplois comme c'est le cas pour La Défense. En effet, le pôle d'emplois de La Défense est situé au cœur de trois communes (Nanterre, Courbevoie et Puteaux), c'est pourquoi le point d'arrivée est situé spécifiquement là où travaillent la grande majorité des salariés de ces communes.

Si les points de départ et d'arrivée sont définis, les trajets entre les deux points ne sont pas déterminés. Ainsi, les trajets entre les communes sont fixés par le conducteur en restant tout de même dans une logique « réaliste » (grands axes, ...), ceci afin d'être le plus représentatif de l'ensemble des conducteurs franciliens. En effet pour un même trajet « théorique », le circuit emprunté entre le point de départ et celui d'arrivée peut être différent, par exemple en

<sup>19</sup> Projet européen HEAVEN en collaboration avec la DREIF (Direction régionale de l'Équipement d'Île-de-France) et la Mairie de Paris : <http://www.AIRPARIF.asso.fr/page.php?rubrique=modelisation&article=heaven>.

fonction du conducteur, du trafic du jour et des aléas (accidents...). Cette variabilité ne doit pas être « gommée » par la contrainte d'un trajet fixe qui pourrait également entraîner un biais dans les résultats.

Au cours d'un circuit, il est nécessaire de faire un arrêt de quelques minutes entre chaque trajet pour aérer le véhicule afin de ne pas influencer les résultats en raison de la persistance des polluants dans l'habitacle en l'absence d'aération.

Enfin, concernant l'intérieur du véhicule, il n'y a pas de restriction sur l'utilisation de la ventilation mécanique ou de l'ouverture de la fenêtre, seul le tabagisme est prohibé.

## 6. Réalisation de l'étude

Avant le démarrage des mesures, la méthodologie de l'étude (choix des trajets...) a été présentée aux acteurs principaux des transports en Île-de-France (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Île-de-France - IAURIF, Syndicat des Transports d'Île-de-France -STIF, Observatoire des déplacements, Direction de la Voirie et des Déplacements de la ville de Paris...).

Une fois les éléments techniques développés et validés, les mesures dans l'habitacle du véhicule ont pu commencer début juin. Elles se sont poursuivies pendant l'été hormis entre le 15 juillet et le 15 août, période durant laquelle le trafic routier est particulièrement faible ce qui ne permet pas de caractériser la qualité de l'air dans des conditions relativement normales du trafic routier. La période estivale permet le suivi de l'exposition des automobilistes lors de périodes propices à la formation de l'ozone, entraînant de ce fait des niveaux de dioxyde d'azote importants au plus près des grands axes de circulation (transformation chimique entre les oxydes d'azote et l'ozone).

La période hivernale a fait également l'objet de mesures sur l'ensemble des circuits établis afin d'obtenir des résultats lors de conditions météorologiques et de trafic routier différentes de l'été.

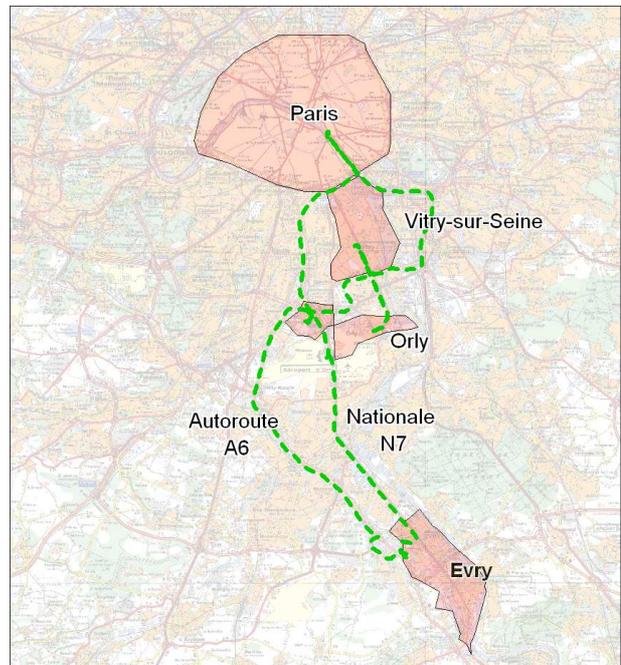
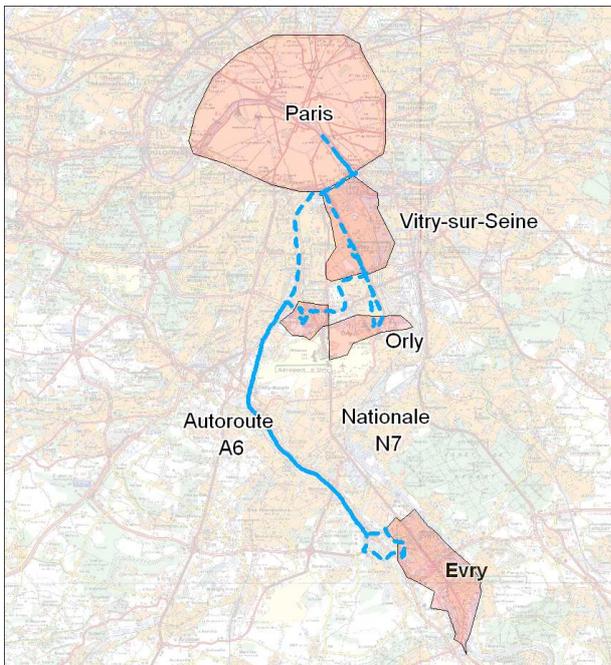
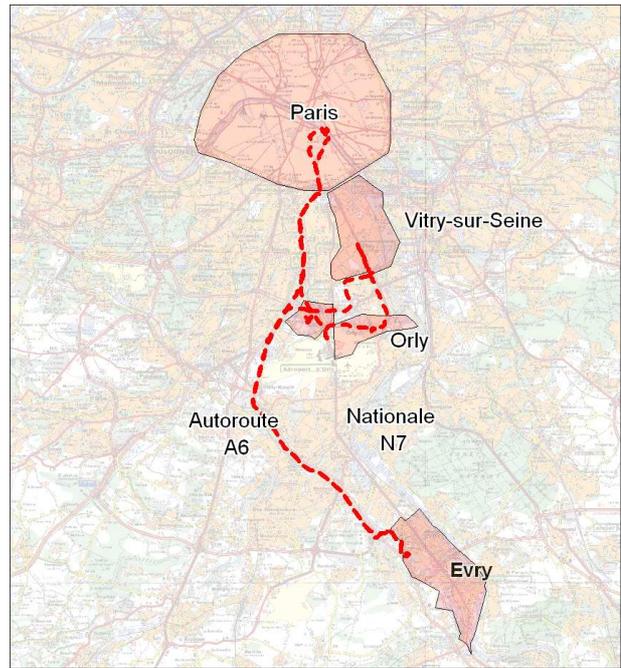
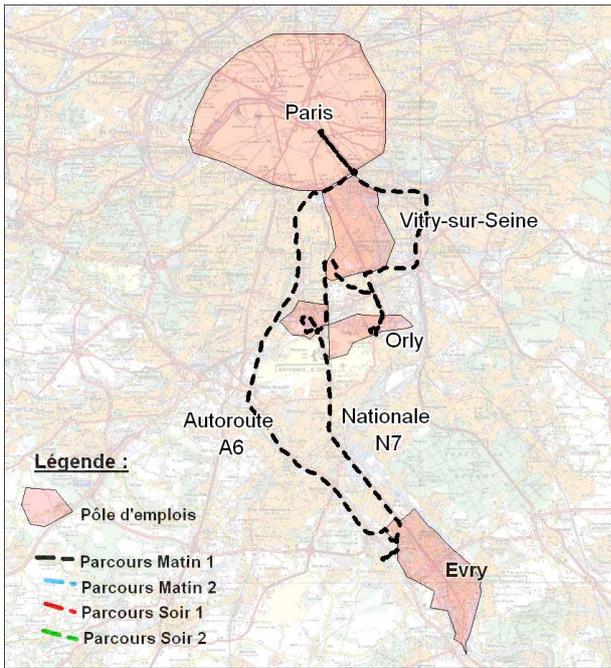
Au total, 282 trajets « Domicile – Travail » ont été réalisés sous la forme de circuits, ce qui représente 72 circuits effectués pour moitié le matin (7h – 10h) et le soir (17h – 20h). C'est ainsi plus de 108 000 données de qualité de l'air (NO<sub>2</sub> et comptage de particules) qui ont été recueillies au pas de temps 10 secondes sur les huit typologies de trajets « Domicile-Travail » définis.

La mise en place d'une caméra vidéo et d'un GPS dans la mesure du possible, facilite l'interprétation des données notamment lors de phénomène particulier, aussi bien en terme de trafic routier (densité, fluidité...) que de configuration d'axe (tunnel...).

La cartographie des trajets réalisés est également possible grâce aux données géographiques obtenues à l'aide du GPS. Cela permet d'identifier les axes empruntés pour réaliser les trajets et ainsi de déterminer les éventuelles différences de trajets empruntés ou encore le trafic du jour (axe saturé, accident...).

La Figure 26 illustre les trajets effectués lors des quatre réalisations du circuit « N » correspondant aux déplacements « Domicile-travail » vers les pôles d'emplois de Paris, Vitry-sur-Seine, Orly et Évry. Cette cartographie permet de prendre en compte les différents axes empruntés selon les diverses réalisations de ce circuit.

On remarque par exemple sur ces circuits effectués, que le trajet entre Rungis (pôle d'emplois « d'Orly ») et le pôle d'emplois « d'Évry » est réalisé soit par l'autoroute A6 pour deux des quatre trajets, soit par la Route Nationale 7 pour les deux autres.



**Figure 26 : Exemple de trajets réalisés à quatre reprises (2 fois le matin et 2 fois le soir) correspondant au circuit « N ».**

## 6.1. Réalisation des trajets

Les données recueillies par le GPS permettent d'analyser pour chaque trajet le temps de parcours et le nombre de kilomètres parcourus.

### 6.1.1 Les kilomètres effectués en voiture

Au total près de 4 300 kilomètres<sup>20</sup> ont été réalisés en voiture en direction des pôles d'emplois (le matin : trajet « Domicile-Travail » ; le soir : trajet « travail-Domicile »). La Figure 27 illustre tous les trajets réalisés en voiture dans le cadre de déplacements « Domicile-Travail » vers les pôles d'emplois les plus importants d'Île-de-France.

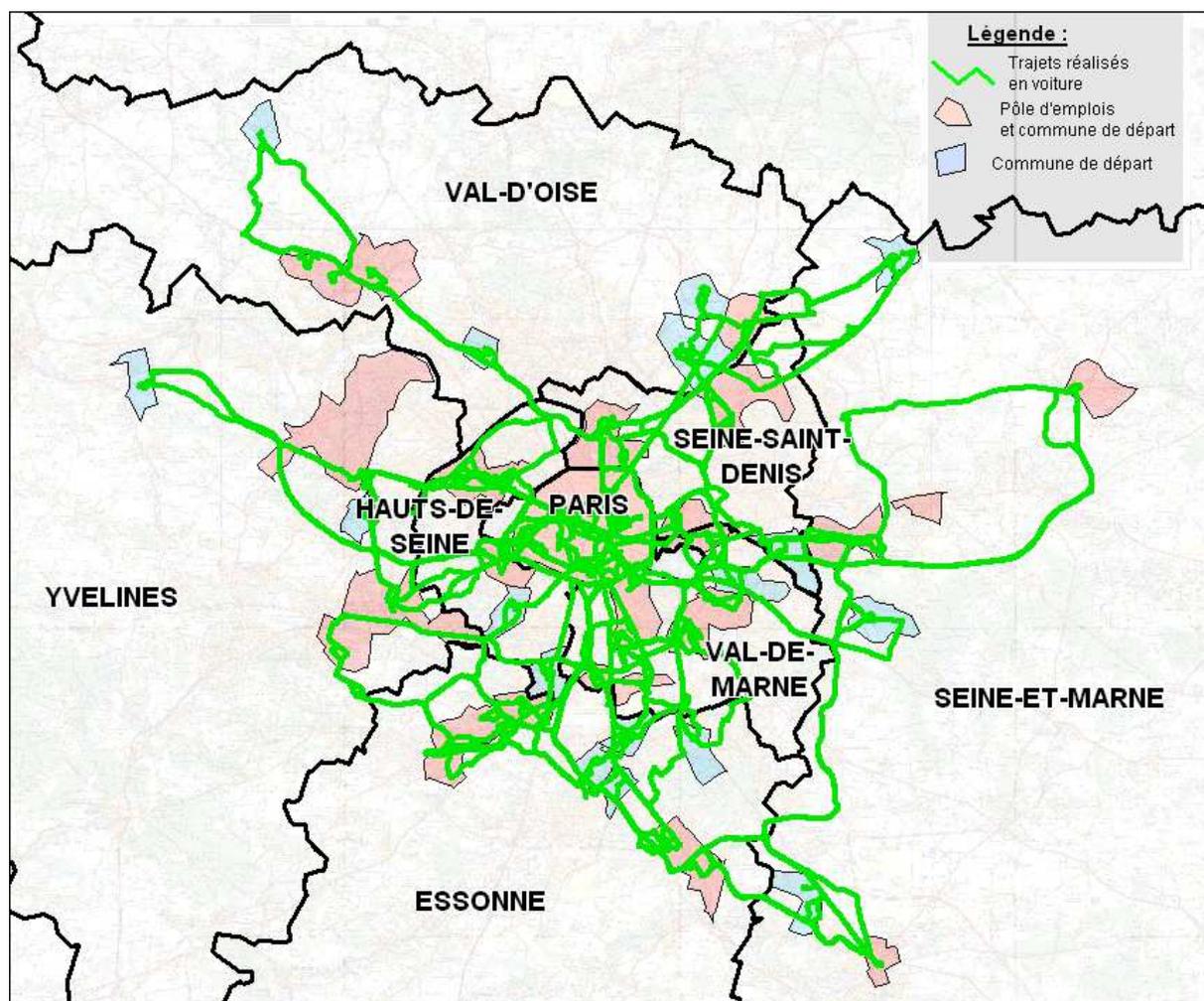


Figure 27 : Illustration de tous les trajets effectués en voiture correspondant à des déplacements « Domicile-travail » en direction des pôles d'emplois les plus importants préalablement définis.

Lors de l'étude, c'est en moyenne 16 kilomètres qui ont été parcourus, quel que soit les zones géographiques considérées, pour effectuer les trajets « Domicile-Travail ». D'après l'EGT (Cf. Figure 28) le nombre de kilomètre réalisé en voiture pour le motif « Domicile-Travail » est de près de 10 km.

<sup>20</sup> Sur la plupart des circuits accomplis, des trajets de liaison ont été réalisés afin de se rendre aux communes définies comme étant des points de départ vers les pôles d'emplois. Ces trajets de liaison représentent en plus, 1 520 kilomètres où les mesures ont été enregistrées mais ne correspondent pas à des trajets « Domicile-Travail » comme cela a été défini (Cf. Chapitre 5).

Afin de comparer au mieux la distance parcourue dans le cadre de l'étude et de l'EGT, une pondération par le nombre d'automobilistes circulant en voiture selon les différentes typologies géographiques a été réalisée. En réalisant ce calcul, le nombre de kilomètres parcouru en voiture pour le motif « Domicile-Travail » reste identique, à savoir 16 km. Par rapport aux données de l'EGT (9.7 km), le nombre de kilomètres effectués dans le cadre de l'étude (16 km) est supérieur. Cela est notamment dû aux déplacements les plus courts, uniquement au sein d'une même commune par exemple, qui ne sont pas pris en compte dans notre étude.

MOTIF	MODE	Tous modes	Total mécanisé	TC	Voiture	Deux-roues	Autres mécanisés	Marche
Domicile - Travail		9,8	10,7	12,4	9,7	7,5	6,9	0,9
Affaires professionnelles		7,1	8,8	8,8	8,9	5,8	7,9	0,6
Enseignement		3,0	5,4	6,6	3,5	2,3	6,8	0,6
Loisirs		4,4	6,4	6,5	6,5	3,7	4,3	0,8
Autres		2,8	4,2	5,2	4,0	2,6	5,9	0,6
Ensemble		5,0	7,1	8,7	6,4	5,1	5,9	0,6

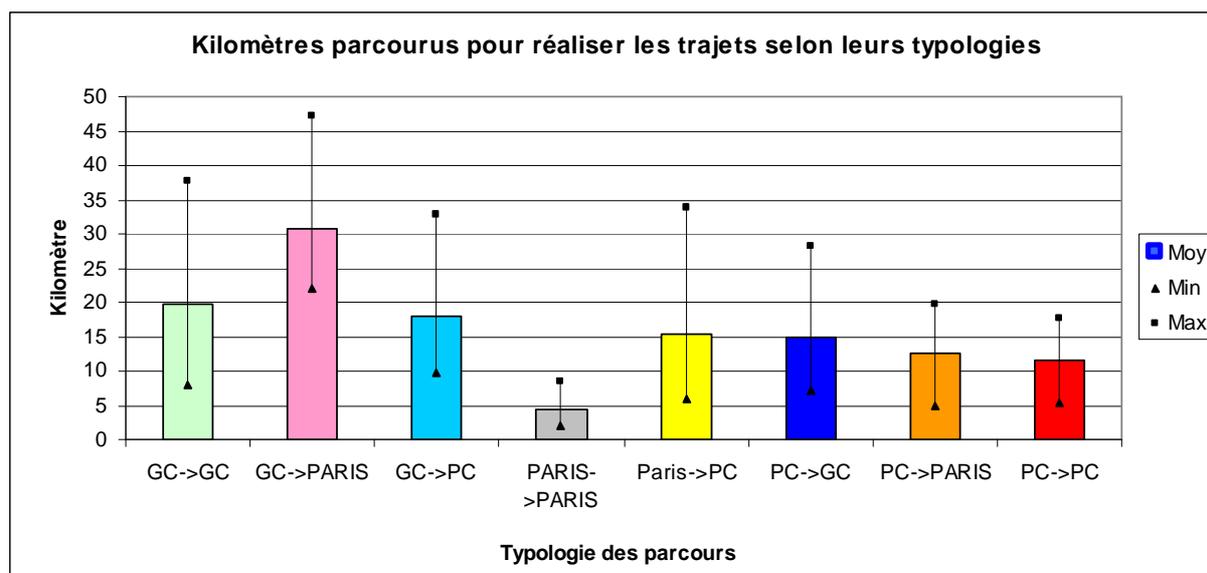
**Figure 28 : Nombre de kilomètres moyen d'un déplacement selon le mode et le motif en 2001 (Source : EGT).**

La Figure 29 illustre, selon les typologies de trajets « Domicile-Travail », le nombre moyen de kilomètres effectué. Le minimum (triangle) et le maximum (carré) de kilomètre par typologie sont également présentés sur cette figure.

La variabilité du nombre de kilomètres est importante selon les typologies de déplacement considérées. On retrouve ainsi les parcours les plus courts pour les trajets « Paris → Paris » avec en moyenne une distance de 4.5 kilomètres parcourue et les plus longs lors des trajets « Grande-Couronne → Paris » où en moyenne plus de 31 kilomètres sont effectués en voiture.

Les trois typologies ayant pour point de départ des trajets « Domicile-Travail » une commune située en Grande-Couronne correspondent aux déplacements en moyenne les plus longs, compris entre 18 et 31 kilomètres.

Enfin, les déplacements « Domicile-Travail » réalisés au sein d'une même zone, pour les typologies « Paris → Paris » et « Petite-Couronne → Petite-Couronne » correspondent aux trajets les plus courts avec respectivement en moyenne 4.5 km et 11.5 km.



**Figure 29 : Nombre moyen de kilomètres parcourus pour réaliser les trajets selon les typologies. Les minimums (triangle) et maximums (carré) sont également mentionnés.**

Dans une même typologie, la variabilité du nombre de kilomètres parcourus dans le cadre des déplacements « Domicile-Travail » est également importante. On retrouve par exemple une différence de 30 kilomètres entre le trajet « Domicile-Travail » le plus court et le plus long effectué en « Grande-Couronne ».

### 6.1.2 Le temps passé en voiture

Globalement, la durée moyenne, quel que soit le parcours « Domicile-Travail », est de 33 minutes avec une variabilité importante selon les trajets effectués allant de 10 minutes pour le trajet le plus court à 1h30 pour le plus long respectivement lors d'un trajet « Paris → Paris » et un « Grande-Couronne → Petite-Couronne ».

La Figure 30 illustre la durée moyenne d'un déplacement selon le mode de transport et le motif suite à l'Enquête Global des Transports. La durée moyenne d'un déplacement « Domicile-Travail » effectuée en voiture est encadrée en rouge.

D'après l'EGT, la durée moyenne des déplacements « Domicile-Travail » en voiture était de 30 minutes en 2001. La pondération du temps de parcours par le nombre d'automobilistes francilien se déplaçant pour le motif « Domicile-Travail » selon les différentes typologies géographiques a été réalisée afin de comparer au mieux les données issues de notre étude avec celles de l'EGT. On obtient alors un temps moyen de parcours au travers des différents trajets réalisés en voiture dans le cadre de l'étude de 31 minutes, soit du même ordre de grandeur que la durée moyenne obtenue par l'EGT.

MOTIF	MODE	Tous modes	Total mécanisé	TC	Voiture	Deux-roues	Autres mécanisés	Marche
Domicile - Travail		36	39	53	30	23	33	14
Affaires professionnelles		30	35	45	31	27	31	11
Enseignement		21	30	39	15	14	34	13
Loisirs		24	26	41	21	22	29	20
Autres		16	19	36	16	14	29	12
Ensemble		24	29	45	22	21	30	14

**Figure 30 : Durée moyenne d'un déplacement selon le mode et le motif en 2001 (Source : EGT).**

La Figure 31 illustre le temps moyen passé pour effectuer les différents parcours, ainsi que les temps minimum (triangle) et maximum (carré), par typologie géographique des déplacements « Domicile-Travail » effectués en voiture.

Il est à noter que le temps de parcours pour les déplacements « Domicile-Travail » en voiture pour les trajets « Grande-Couronne → Grande-Couronne » est de l'ordre de 30 minutes, soit parmi les temps moyens les plus faibles alors que le nombre de kilomètre pour cette même zone est la deuxième plus importante. La vitesse moyenne sur cette typologie correspond à la plus importante relevées durant l'étude (Cf. ANNEXE 6).

Si les trajets réalisés en voiture sont les plus courts en terme de durée et de distance pour les déplacements « Paris → Paris », la circulation dans cette zone correspond également à la vitesse moyenne la plus faible avec seulement 15 km/h.

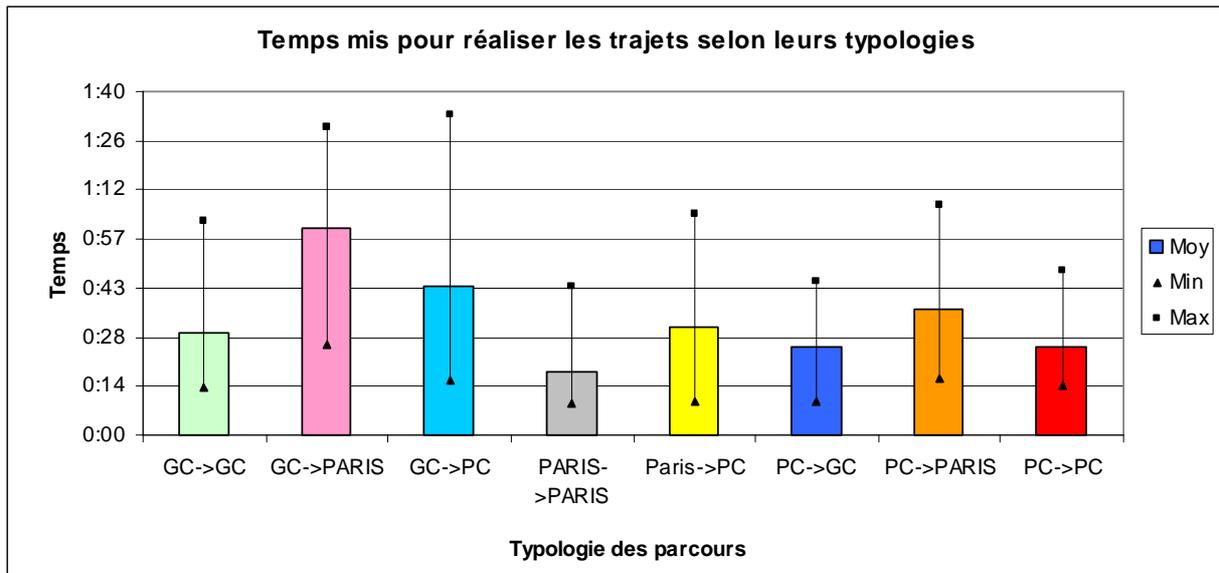


Figure 31 : Temps passé pour réaliser les différents trajets selon les typologies. Les minimums (triangle) et maximums (carré) sont également mentionnés.

### 6.1.3 Zoom sur la variabilité intra-zone

Comme les deux paragraphes précédents l'ont illustré au travers du nombre de kilomètres et des temps minimum et maximum mis pour parcourir les trajets « Domicile-Travail » en voiture, la variabilité de ces paramètres est très importante. Ce constat est également vrai pour les différents trajets effectués dans les typologies géographiques similaires.

La multiplication des trajets a été préférée à seulement l'étude de quelques routes spécifiques afin de prendre en compte le maximum de « chemins » réalisés en voiture par les actifs dans les différentes typologies définies.

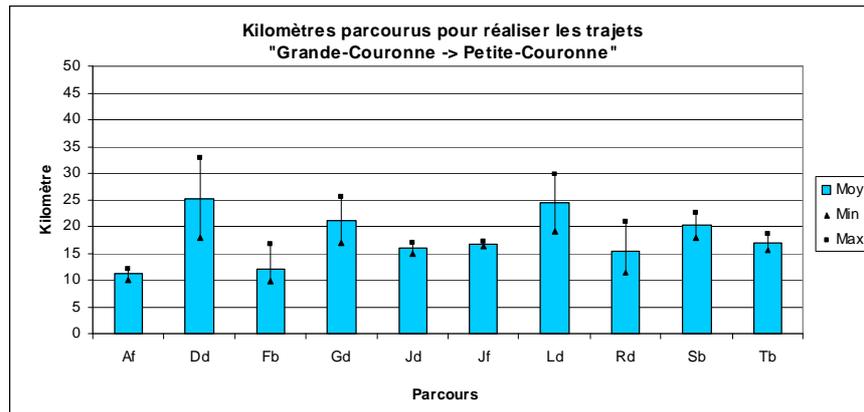
Les différents parcours ne sont donc effectués qu'à quelques reprises. Ainsi, par exemple pour les trajets « Grande-Couronne → Petite-Couronne », ceux-ci ont été réalisés soit à 4 reprises<sup>21</sup> (2 matins et 2 soirs) soit à deux reprises<sup>22</sup> (1 matin et 1 soir).

La Figure 32 illustre les kilomètres parcourus et le temps mis pour effectuer les différents trajets « Domicile-Travail » lors des liaisons « Grande-Couronne -> Petite-Couronne ».

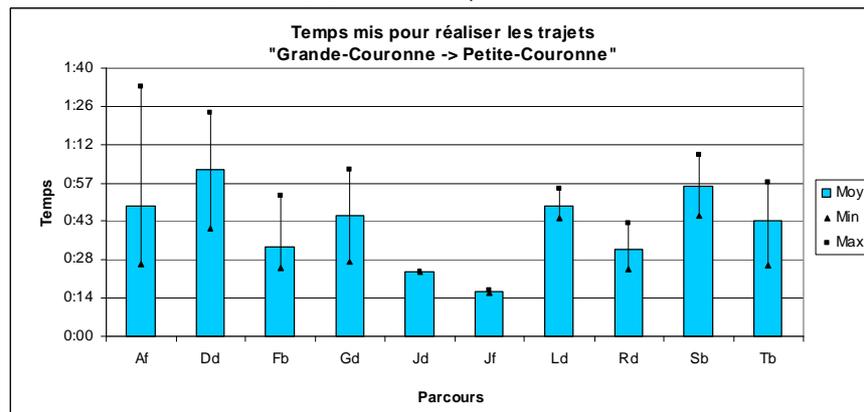
Au sein d'une même typologie de trajets « Domicile-Travail », la variabilité en terme de kilomètres parcourus et de temps passé pour aller travailler à un pôle d'emplois est importante.

<sup>21</sup> Trajets Af, Dd, Pb, Ld, Rd, Sb et Tb.

<sup>22</sup> Trajets Gd, Jd et Jf.



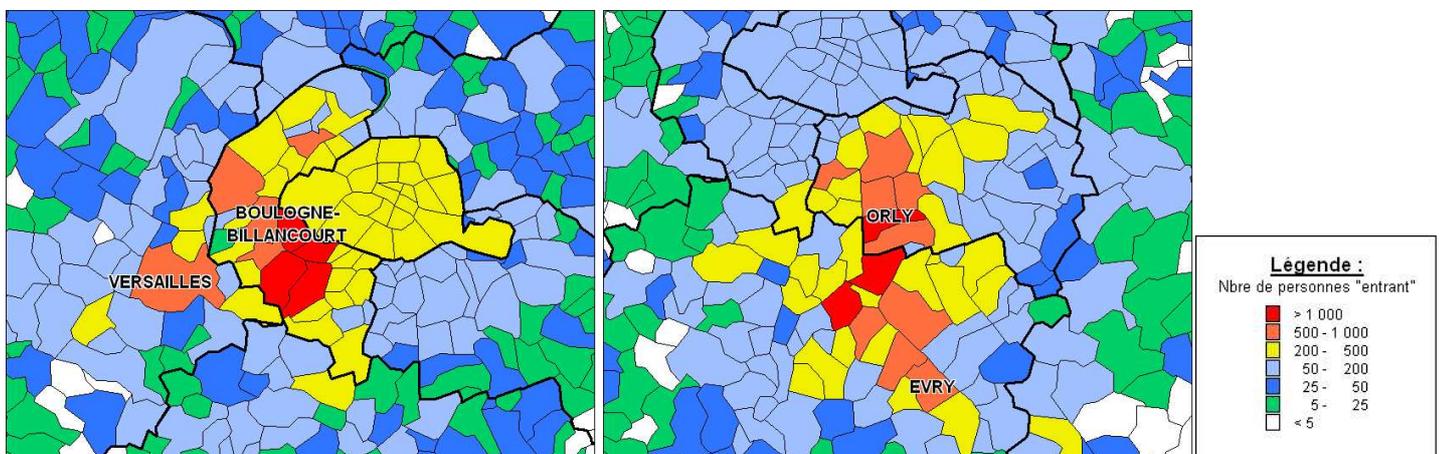
(a) Kilomètres parcourus



(b) Temps de parcours

**Figure 32 : Kilomètres et temps de parcours sur les trajets « Domicile-Travail » réalisés dans le cadre des déplacements « Grande-Couronne -> Petite-Couronne ».**

Au sein de la typologie « Grande-Couronne → Petite-Couronne », le trajet le plus long réalisé en voiture pour accéder à un pôle d'emplois a été celui effectué entre Évry et Orly (trajet Dd) avec une moyenne d'un peu plus de 25 km parcourus. A l'inverse, la distance la plus courte a été réalisée pour les trajets entre Versailles et le pôle d'emplois de « Boulogne-Billancourt » avec un peu plus de 10 km. Cette différence est due à un « rayonnement » du pôle d'emplois « d'Orly » sur les communes de la Grande-Couronne plus important que celui de « Boulogne-Billancourt » (Cf. Figure 33).



(a) Pôle d'emplois de « Boulogne-Billancourt »

(b) Pôle d'emplois « d'Orly »

**Figure 33 : Cartographies du nombre de salariés utilisant leur voiture pour se rendre dans les pôles d'emplois de « Boulogne-Billancourt » (a) et « d'Orly » (b).**

Quant à la durée de trajet, si celle-ci dépend à la fois de la distance parcourue et du type d'axe emprunté, elle est principalement liée aux conditions de circulation. C'est ainsi que l'on retrouve sur le trajet le plus court (Af) la durée de parcours la plus longue compte tenu de conditions de circulation particulièrement denses. Les 10 km à réaliser entre le pôle d'emplois de « Boulogne-Billancourt » et Versailles ont ainsi été effectués en une heure et demi.

*L'ensemble des graphiques illustrant les paramètres du temps de trajet et de la distance parcourue recueillis à l'aide du GPS embarqué est présenté en ANNEXE 7 pour chaque typologie géographique.*

## 7. Résultats

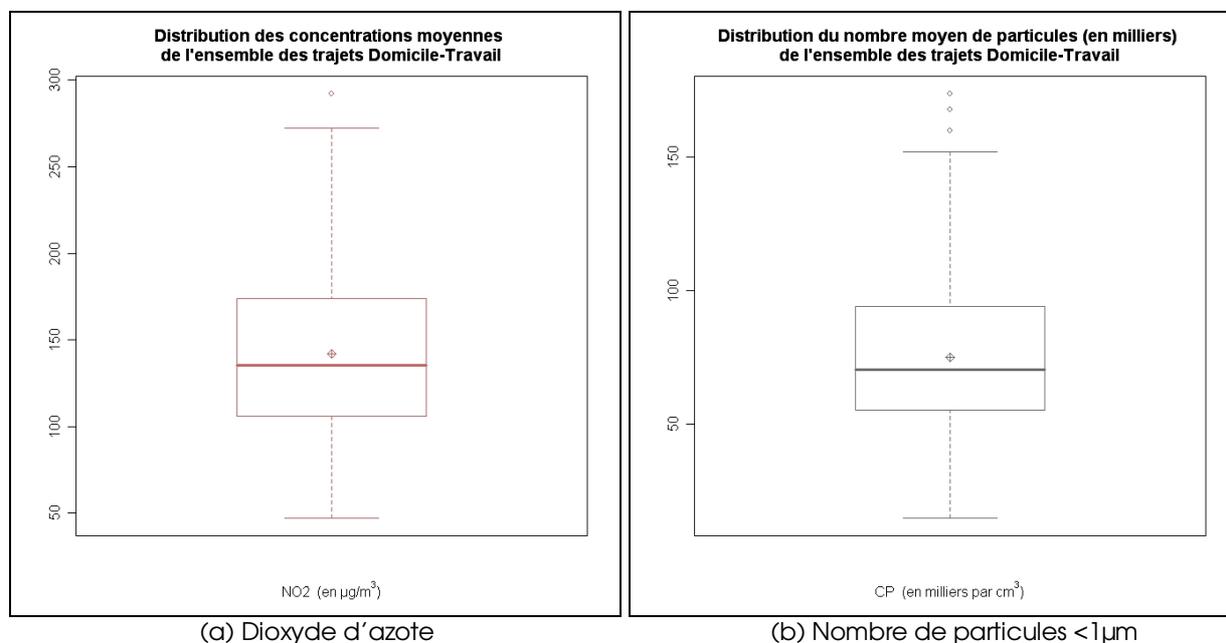
Les niveaux de pollution atmosphérique mesurés dans l'habitacle de la voiture sont étudiés notamment en fonction de la période de mesure (matin – soir) et suivant la typologie des trajets effectués. Certains éléments statistiques (médiane, moyenne, min/max, percentile 75...) présentés sous la forme d'une « boîte à moustaches », également appelée « boxplot » (Cf. présentation de cet outil en ANNEXE 8) permettent d'étudier les données mesurées pour les différents polluants. De plus, à l'aide d'une caméra embarquée dans la voiture, une analyse détaillée des résultats en fonction de facteurs pouvant influencer l'exposition de l'automobiliste (véhicules spécifiques, type d'axe et infrastructure tel qu'un tunnel...) a été réalisée. Le trafic routier, qui fait partie de ces facteurs d'influence, est une source majeure d'oxydes d'azote. Si d'autres sources contribuent au niveau de fond<sup>23</sup>, en proximité routière, les variations de l'exposition au NO<sub>2</sub> sont surtout liées au trafic routier et notamment à l'importance du flux de circulation et aux émissions du véhicule précédent.

Concernant les particules, même si leurs sources sont en premier lieu imputables aux émissions à l'échappement du trafic routier, d'autres facteurs influencent les niveaux mesurés. La remise en suspension des particules en fait notamment partie (pouvant être due à la circulation des véhicules mais aussi à l'intensité du vent).

### 7.1. Quels niveaux rencontrés ?

#### 7.1.1 Sur l'ensemble des parcours

Ce chapitre s'attache à présenter la distribution des niveaux de pollution atmosphérique rencontrés au cours des différents trajets « Domicile-Travail » effectués en voiture quelles que soient les typologies. Les répartitions des teneurs moyennes mesurées dans l'habitacle de la voiture sont illustrées par les boîtes à moustaches de la Figure 34 pour le dioxyde d'azote (a) et le nombre de particules (b).



**Figure 34 : Distribution (boîtes à moustaches) des données moyennes de NO<sub>2</sub> (a) et de particules (b) enregistrés sur l'ensemble des trajets.**

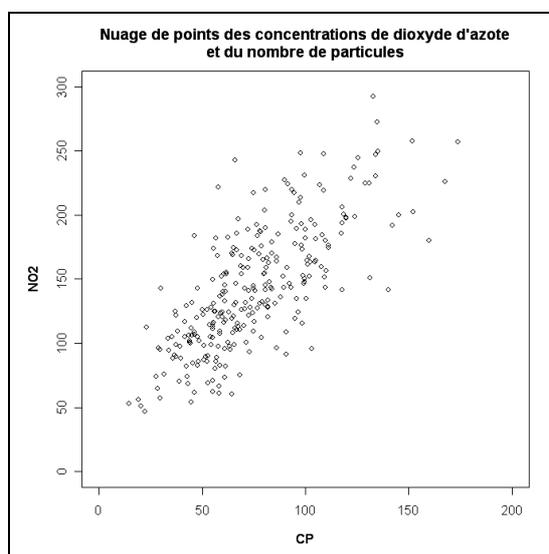
<sup>23</sup> L'exposition d'un automobiliste comprend à la fois le niveau de fond d'un large secteur dans lequel il se trouve (correspond au niveau minimum d'exposition) et le niveau de proximité engendré par le trafic routier.

Sur l'ensemble des trajets réalisés, la teneur moyenne de dioxyde d'azote (Cf. Figure 34 – a) mesurée dans l'habitacle est de 142  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les concentrations moyennes de  $\text{NO}_2$  sont pour moitié comprises entre 106 et 174  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les données enregistrées lors des trajets réalisés en voiture sont hétérogènes puisque l'on retrouve un niveau maximum de 292  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sur un trajet et un minimum de 47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pour donner un ordre de grandeur à ces niveaux mesurés dans l'habitacle, on observe sur la même période de mesure une moyenne 137  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{NO}_2$  à proximité immédiate du Boulevard Périphérique à hauteur de la Porte d'Auteuil (station permanente du réseau fixe d'Airparif). En situation de fond, dans le cœur dense de Paris, on enregistre toujours sur la même période une concentration moyenne de  $\text{NO}_2$  de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Cette même diversité des niveaux est observée pour le nombre de particules enregistré dans l'habitacle avec une variabilité allant de 15 000 à 174 000 particules par  $\text{cm}^3$  en moyenne sur les trajets réalisés. Sur l'ensemble des trajets en voiture, le nombre moyen de particules par  $\text{cm}^3$  mesuré est de 75 000, avec la moitié des données comprise entre 55 000 et 94 000 particules par  $\text{cm}^3$ . Les particules ne sont pas mesurées en nombre sur le réseau fixe d'Airparif mais en masse ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) comme la réglementation l'exige. Toujours dans un souci de donner un ordre de grandeur du nombre de particules mesuré dans l'habitacle au cours de la campagne, les données enregistrées lors de trajets réalisés dans le cadre de l'étude en « tricycle<sup>24</sup> » peuvent être présentées à titre d'exemple. Ainsi, sur les parcours effectués en tricycle, le nombre moyen de particules mesuré par trajet était de 38 500. La variabilité selon les trajets était comprise entre 11 800 (borne basse) à 74 400 (borne haute) particules par  $\text{cm}^3$ .

Il est à noter toutefois que ces données recueillies en tricycle en empruntant régulièrement des aménagements dédiés aux cyclistes à Paris ne peuvent pas être directement comparées à celles mesurées dans l'habitacle de la voiture (trajets, axes empruntés, conditions de circulation différents).

Les niveaux moyens de dioxyde d'azote et le nombre moyen de particules mesurés dans l'habitacle sont liés sur l'ensemble des trajets réalisés. On retrouve une concordance entre les deux variables<sup>25</sup> (dioxyde d'azote et particules) comme cela est illustré à la Figure 35.



**Figure 35 : Nuage de points des concentrations moyennes de dioxyde d'azote et du nombre moyen de particules relevés dans l'habitacle sur l'ensemble des trajets réalisés en voiture durant la campagne.**

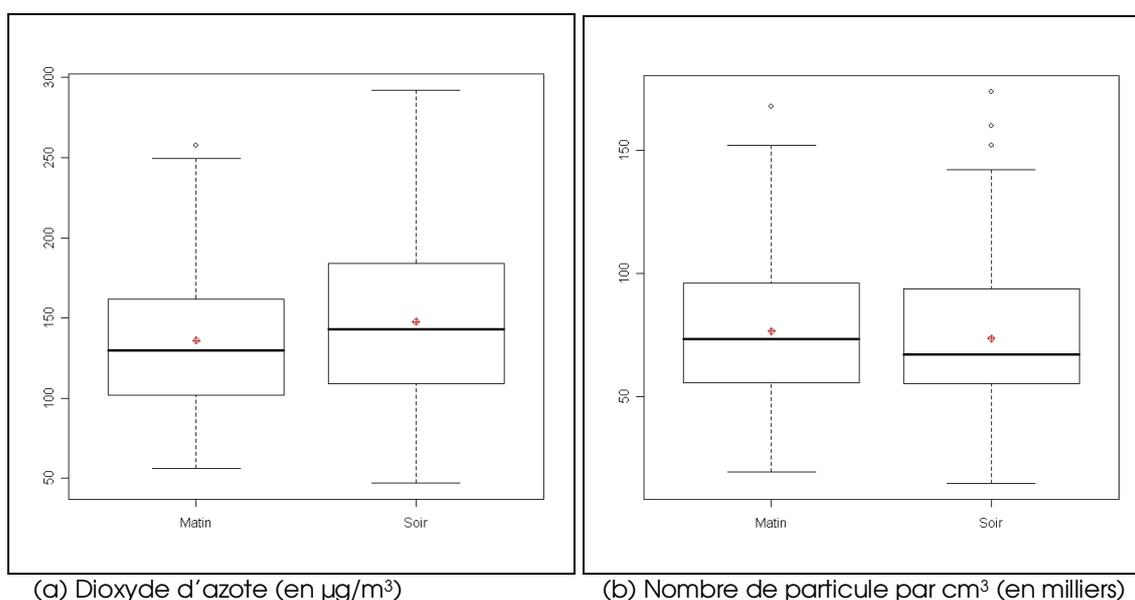
<sup>24</sup> « Influence des aménagements de voirie sur l'exposition des cyclistes à la pollution atmosphérique. » - Airparif, février 2009 : [http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/Rvelo\\_20090217.pdf](http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/Rvelo_20090217.pdf).

<sup>25</sup> Coefficient de corrélation de 0.74.

### 7.1.2 Différence de niveau entre les trajets du matin et du soir ?

Les trajets « Domicile-Travail » sont effectués le matin et le soir. Dans le premier cas, le déplacement en voiture est effectué des communes de résidence en direction des pôles d'emplois définis, et dans le second cas des pôles d'emplois vers les communes où résident les employés. Avant d'effectuer toute comparaison de données selon les niveaux mesurés dans les différentes typologies, il est instructif d'étudier s'il existe une différence suivant la période de mesure. Autrement dit, y a-t-il une différence des niveaux de pollution entre les trajets ayant fait l'objet de mesure le matin (en direction des pôles d'emplois) et ceux du soir (trajet retour, des pôles d'emplois vers les communes de résidence) ?

La Figure 36 présente les distributions des teneurs de dioxyde d'azote (a) et du nombre de particules (b) mesurées dans l'habitable suivant les trajets effectués le matin et le soir.



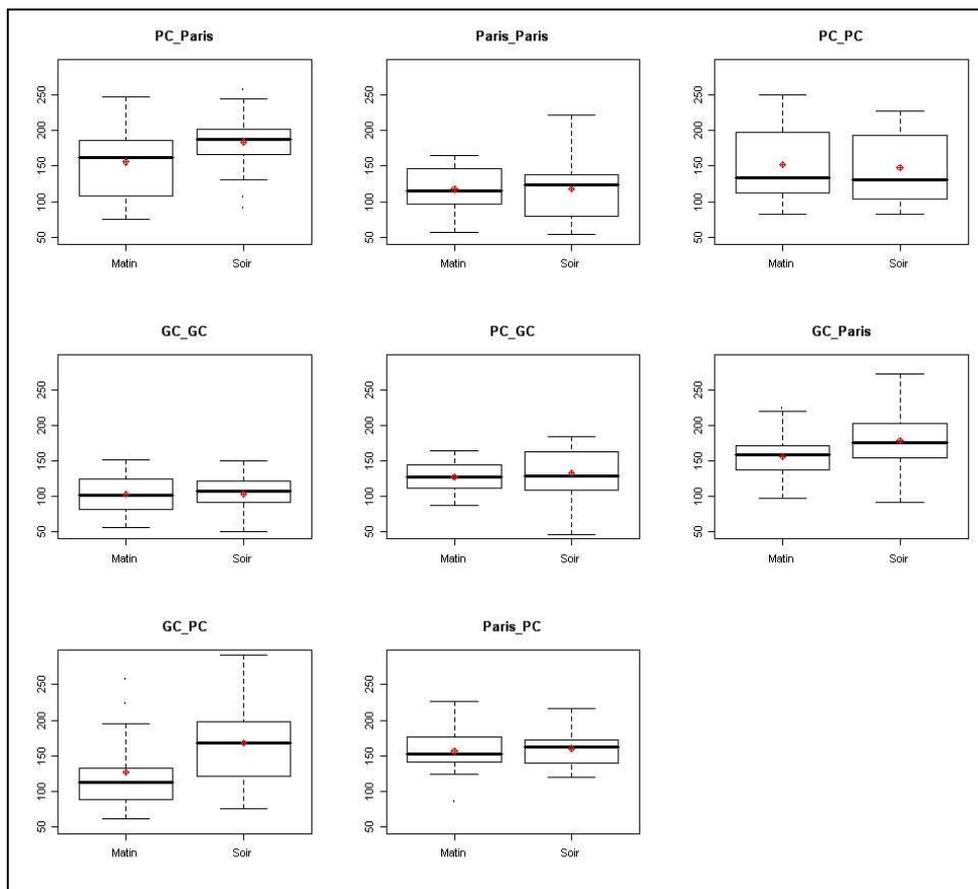
**Figure 36 : Distribution des teneurs de dioxyde d'azote (a) et le nombre de particules (b) mesurées dans l'habitable selon la période des trajets « Domicile-Travail », matin – soir.**

Pour le dioxyde d'azote, les niveaux rencontrés le soir sont en moyenne significativement plus importants que ceux du matin d'environ 10 % (148 µg/m³ le soir contre 136 µg/m³ le matin)<sup>26</sup>. Ce n'est en revanche pas le cas pour les particules (74 000 particules par cm³ le soir contre 74 000 particules par cm³ le matin), les niveaux ne pouvant être différenciés par des tests statistiques<sup>26</sup>.

Néanmoins, la différence des niveaux moyens de dioxyde d'azote entre le matin et le soir ne se retrouve pas dans l'ensemble des typologies de trajets (Cf. Figure 37). Elle est en réalité significative seulement pour la typologie « Grande-Couronne → Petite-Couronne » (169 µg/m³ le soir contre 127 µg/m³ le matin)<sup>26</sup>.

Le caractère « atypique » de la différence de niveaux de dioxyde d'azote enregistrés entre le matin et le soir sur les trajets réalisés de la « Grande-Couronne » à la « Petite-Couronne » est également mis en relief puisque en ôtant cette typologie de l'ensemble des données, les niveaux de NO<sub>2</sub> entre le matin et le soir ne sont plus significativement différents<sup>26</sup>.

<sup>26</sup> Test statistique de Student de comparaison des moyennes (lorsque la Normalité et l'homoscédasticité sont vérifiées) ou test non paramétrique de Wilcoxon, au niveau d'erreur 5 %.



**Figure 37 : Distribution des teneurs de dioxyde d'azote mesurées dans l'habitacle selon la typologie géographique des trajets et la période des déplacements « Domicile-Travail » effectuées le matin et le soir.**

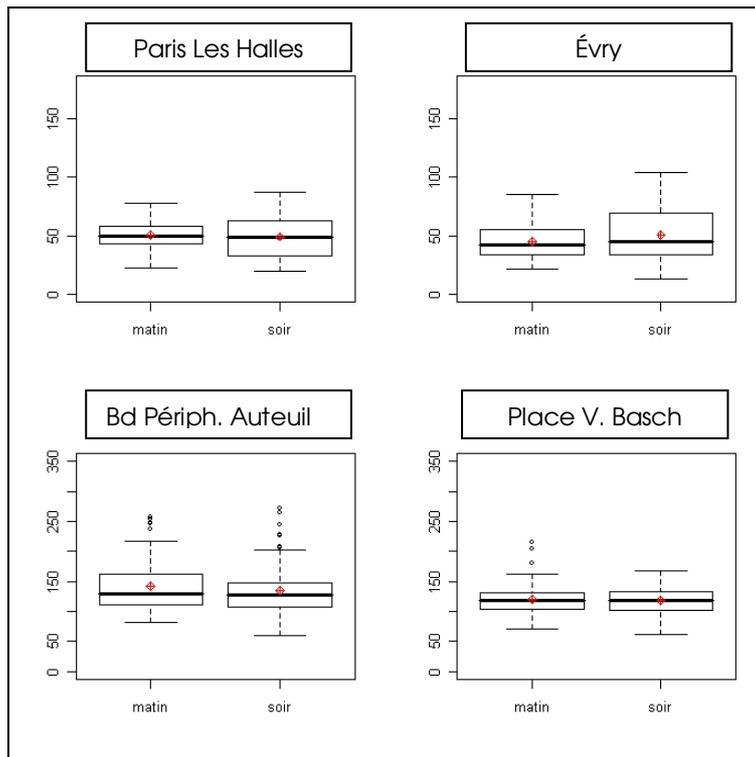
La distribution des niveaux de NO<sub>2</sub> a également été étudiée sur quatre stations fixes du réseau permanent d'Airparif au travers des données relevées le matin et le soir sur la même période que celle ayant fait l'objet de mesures « Domicile-Travail » en voiture.

La Figure 38 présente les distributions des teneurs de dioxyde d'azote mesurées sur des stations fixes du réseau permanent d'Airparif, d'une part en situation de fond au cœur de la Capitale (Paris Les Halles) et en Grande-Couronne à la station d'Évry et d'autre part à proximité du trafic routier aux stations d'Auteuil, située au droit du Boulevard Périphérique et de Place V. Basch caractérisant une grande place parisienne.

De la même manière que ce que l'on retrouve sur l'ensemble des typologies (hormis « Grande-Couronne → Petite-Couronne ») les différences de niveaux entre le matin et le soir sur les stations fixes étudiées ne sont pas significatives à partir des données du réseau des jours et des périodes concernés par les mesures en voiture.

Il est à noter que la variabilité des teneurs de dioxyde d'azote en situation de proximité au trafic routier (Auteuil et Place V. Basch) est similaire quelle que soit la période, ce qui n'est pas le cas en situation de fond où la variabilité est significativement plus importante le soir<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> Test de Fischer au niveau d'erreur de 5 %.



**Figure 38 : Distribution des teneurs de dioxyde d'azote de stations du réseau permanent d'Airparif (Paris Les Halles et Évry stations de fond, Auteuil et Place V. Basch stations de proximité au trafic), durant les périodes de mesures effectuées dans l'habitacle, matin et soir.**

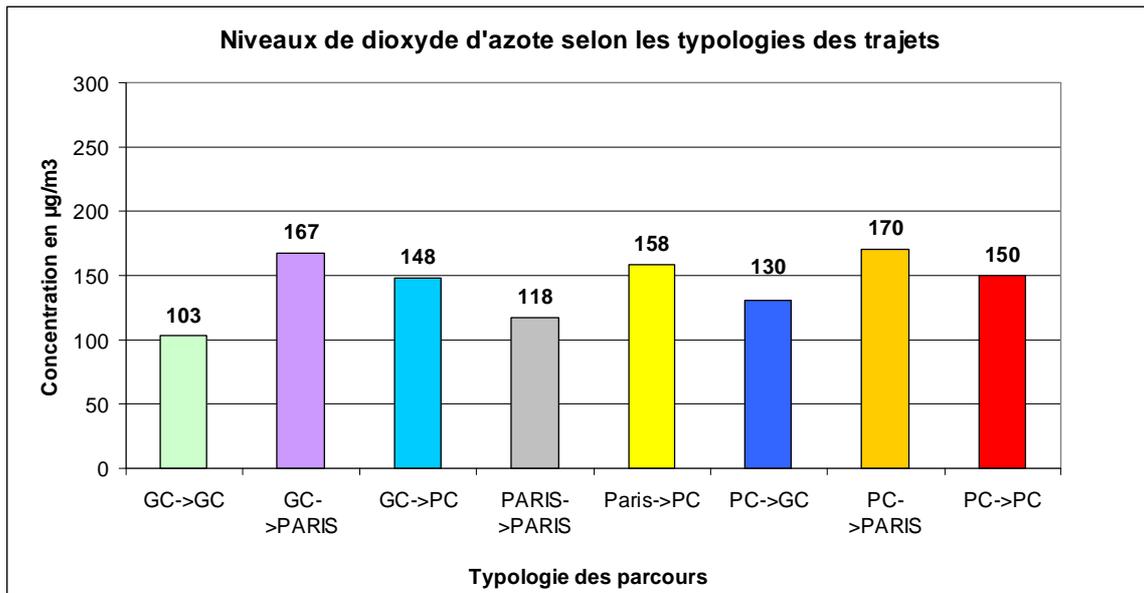
Concernant le comptage de particules (Cf. ANNEXE 9), aucune différence significative<sup>26</sup> n'a pu être mise en évidence entre les trajets « Domicile-Travail » réalisés le matin (aller) et ceux effectués le soir (retour) sur l'ensemble des trajets et selon les typologies.

**Pour les trajets « Domicile-Travail » effectués en voiture, les différences de variabilité et de niveaux moyens de pollution dans l'habitacle suivant les parcours réalisés le matin (aller, en direction du pôle d'emplois) et le soir (retour, en direction de la commune de résidence) n'ont pu être démontrées. Les données recueillies lors de l'étude sont donc comparables selon la période de circulation.**

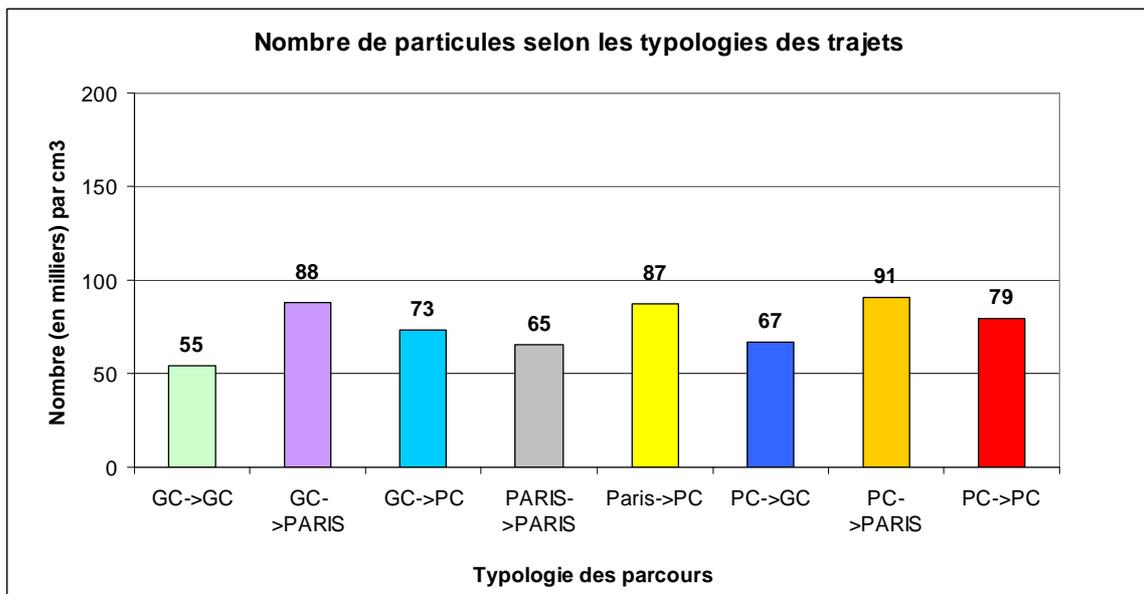
### 7.1.3 Selon les typologies géographiques des parcours

Les mesures en voiture ont été effectuées selon les huit typologies préalablement définies. Cela permet une comparaison des niveaux de pollution relevés dans l'habitacle en fonction des déplacements « Domicile-Travail » réalisés au sein des différentes zones géographiques de l'Île-de-France.

La Figure 39 illustre pour les deux polluants mesurés dans l'habitacle de la voiture les niveaux moyens enregistrés selon les différentes typologies.



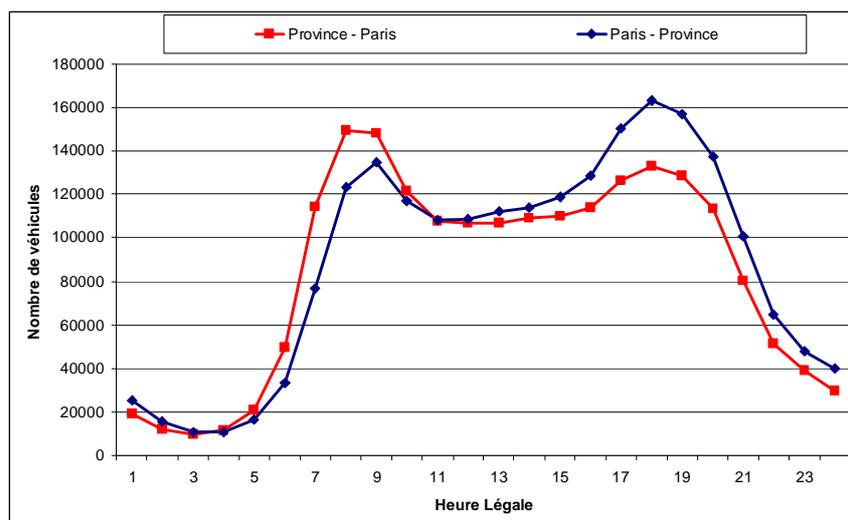
(a) Dioxyde d'azote – NO<sub>2</sub>



(b) Nombre de particules

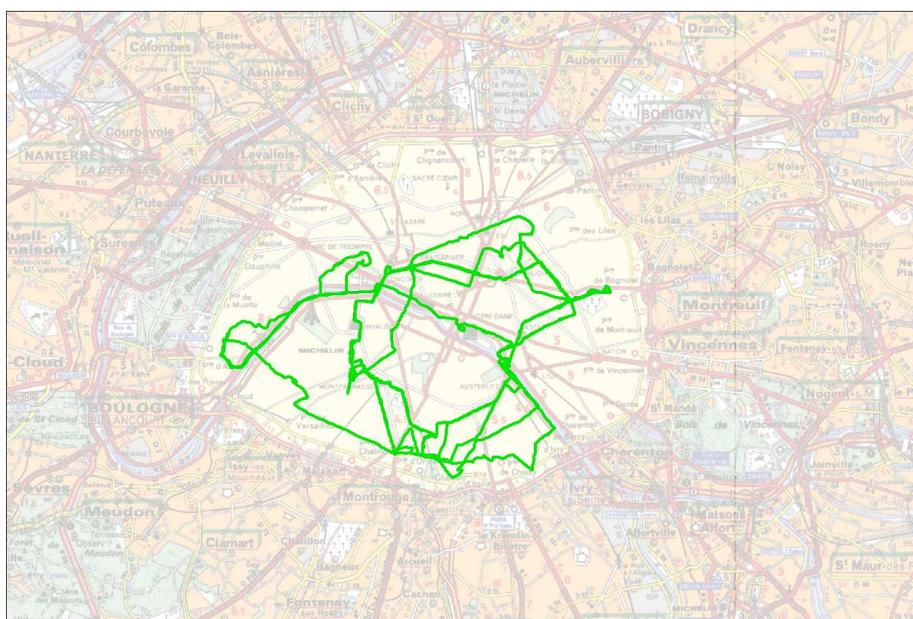
**Figure 39 : Niveaux moyens de dioxyde d'azote (a) et nombre moyen de particules (b) des trajets réalisés selon des typologies géographiques.**

Les teneurs moyennes de dioxyde d'azote les plus élevées mesurées dans l'habitacle ont été relevées lors des trajets « Petite-Couronne → Paris » et « Grande-Couronne → Paris » avec 170 µg/m<sup>3</sup> et 167 µg/m<sup>3</sup>. Ces trajets caractérisent des déplacements en direction de Paris où le trafic est le plus dense (avec de grandes voies de circulation : autoroutes urbaines...). En effet, comme le montre le profil journalier de la Figure 40, le trafic routier est le plus dense le matin dans le sens « Province-Paris » (en rouge) et le soir dans le sens des retours « Paris-Province » (en bleu).



**Figure 40 : Profils journaliers 2008 du nombre de véhicules sur les axes SIREDO selon le sens de circulation « Paris-Province » et « Province-Paris » (d'après données de la Direction Interdépartementale des Routes Île-de-France).**

A l'inverse, les trajets de la typologie « Grande-Couronne → Grande-Couronne », présentent les concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> les plus faibles avec une moyenne sur l'ensemble des parcours de 103 µg/m<sup>3</sup>. Cela est principalement dû à un trafic routier moins dense au sein de la « Grande-Couronne » sur des axes de circulation moins importants et à un niveau de fond plus faible dans cette zone géographique. En effet, les teneurs de fond de dioxyde d'azote diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du cœur dense de l'agglomération parisienne où les émissions de ce polluant sont les plus importantes, compte tenu de la densité urbaine et du trafic routier.



**Figure 41 : Trajets réalisés en voiture lors des déplacements « Domicile-Travail » au sein de la typologie « Paris → Paris ».**

Après les déplacements « Domicile-Travail » internes à la « Grande-Couronne », ceux effectués au sein de Paris présentent les teneurs de dioxyde d'azote les plus faibles (118 µg/m<sup>3</sup>). Malgré le niveau de fond qui est le plus élevé à Paris, les trajets en voiture effectués dans la Capitale (Cf. Figure 41) n'ont pas concerné les axes routiers les plus denses tels que le Boulevard

Périphérique. Les axes utilisés étaient essentiellement secondaires avec un trafic routier plus faible. A l'inverse, dans la plupart des trajets effectués dans les autres typologies, des axes majeurs tels que le Boulevard Périphérique, les autoroutes urbaines et périurbaines ainsi que les nationales ont été empruntés. Du fait d'une distance plus importante à parcourir pour se déplacer en direction des pôles d'emplois des autres typologies, les axes majeurs d'Île-de-France sont largement empruntés contrairement aux déplacements internes à Paris où les distances sont plus courtes et se limitent aux axes internes à Paris.

Après les trajets internes effectués dans la zone « Paris » et « Grande-Couronne », on retrouve les niveaux moyens de dioxyde d'azote mesurés lors des trajets entre la « Petite-Couronne » et la « Grande-Couronne ». Les trajets réalisés en voiture de la Petite-Couronne en direction des pôles d'emplois de la « Grande-Couronne », présentent des teneurs de NO<sub>2</sub> plus faibles avec une concentration moyenne dans l'habitacle de 130 µg/m<sup>3</sup>, contre près de 150 µg/m<sup>3</sup> dans le sens de circulation inverse. En circulant dans le sens Province-Paris, autrement dit dans le sens où le trafic routier est le plus dense, les teneurs de dioxyde d'azote sont plus élevées.

Néanmoins, compte tenu de la grande variabilité des mesures (et du nombre restreint de parcours réalisés) lors des différents trajets « Grande-Couronne → Petite-Couronne » aucune différence significative n'a pu être mise en évidence avec les données des trajets « Petite-Couronne → Grande-Couronne » lors des tests statistiques.

La hiérarchie du nombre moyen de particules est similaire à celle relevée pour le dioxyde d'azote. Ainsi, de la même manière que pour le dioxyde d'azote, les deux trajets « Domicile-Travail » dont le nombre moyen de particules est le plus élevé sont les trajets « Grande-Couronne → Paris » et « Petite-Couronne → Paris » avec 88 000 et 91 000 particules par cm<sup>3</sup>. On retrouve également les trajets « Domicile-Travail » effectués au sein de la « Grande-Couronne » et de « Paris » avec les nombres de particules dans l'habitacle les plus faibles (respectivement 55 000 et 67 000 particules par cm<sup>3</sup>).

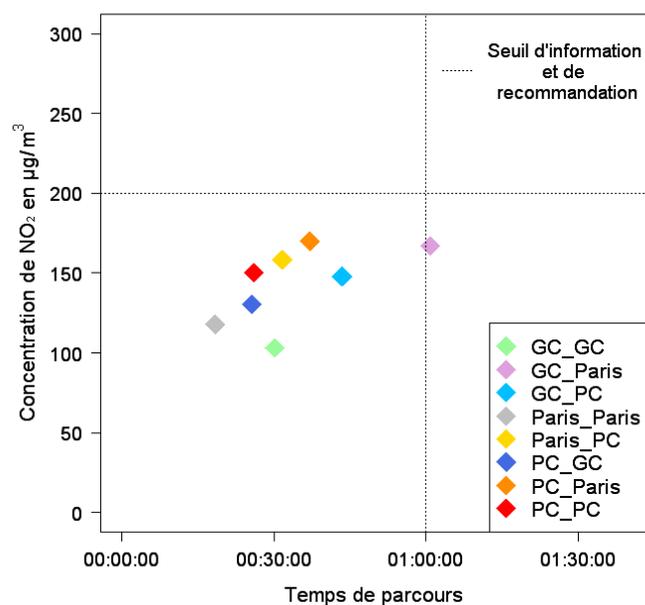
La Figure 42 illustre l'exposition d'un automobiliste en prenant en compte les concentrations moyennes de dioxyde d'azote auxquelles il est exposé dans son habitacle lors des trajets « Domicile-Travail » et le temps moyen<sup>28</sup> de parcours selon les différents types de trajets définis.

Les parcours réalisés entre la Grande-Couronne et Paris (en violet) présentent les temps moyens de trajet les plus longs (1 heure) et les niveaux moyens de dioxyde d'azote parmi les plus importants (167 µg/m<sup>3</sup>). Les trajets entre la Petite-Couronne et Paris présentent des niveaux moyens de NO<sub>2</sub> comparables (170 µg/m<sup>3</sup>) avec cependant un temps moyen de parcours largement inférieur (37 minutes).

A l'inverse, les trajets « Domicile-Travail » réalisés dans « Paris » présentent les teneurs moyennes de NO<sub>2</sub> parmi les plus faibles (118 µg/m<sup>3</sup>) pour un temps moyen de parcours le plus faible (18 minutes).

---

<sup>28</sup> Il est à noter que ces trajets sont réalisés le matin (aller) et le soir (retour). Par conséquent le temps moyen d'exposition dans les transports au cours d'une journée pour un individu utilisant un véhicule pour se rendre au travail est deux fois plus important.



**Figure 42 : Exposition moyenne au dioxyde d'azote lors des trajets « Domicile-Travail » en fonction du temps moyen de parcours par type de parcours.**

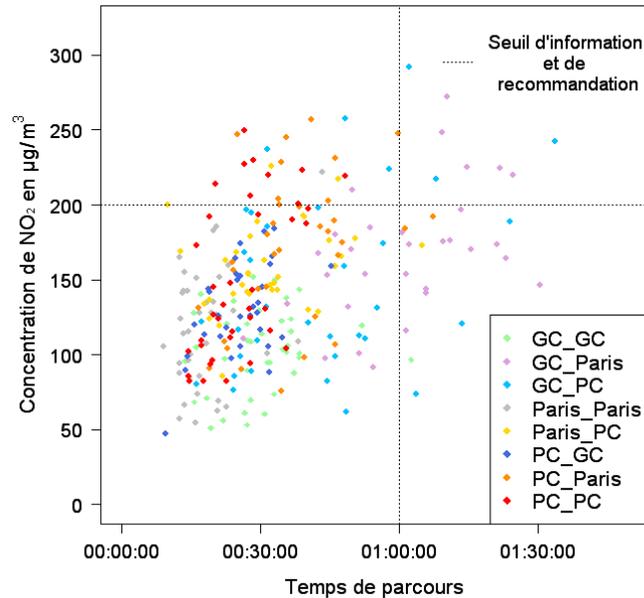
Des seuils réglementaires relatifs aux situations aiguës de pollution atmosphérique de courte durée sont fixés. Ainsi la procédure d'information et de recommandation du public est établie pour le dioxyde d'azote à 200 µg/m<sup>3</sup> en moyenne horaire<sup>29</sup>.

Il apparaît pour ces concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> enregistrées dans le véhicule ne sont pas supérieures au seuil d'information fixé à 200 µg/m<sup>3</sup> sur une échelle horaire. Néanmoins, neuf parcours sur l'ensemble des 282 trajets réalisés (correspondant à 3% des trajets), dont la durée était au minimum d'une heure, ont enregistré des teneurs de dioxyde d'azote dans l'habitacle supérieures à 200 µg/m<sup>3</sup> (Cf. Tableau 5 et Figure 43). Les teneurs moyennes de NO<sub>2</sub> sur ces trajets sont de 243 µg/m<sup>3</sup> (minimum : 217 µg/m<sup>3</sup> pour un trajet de 1h08 – maximum de 292 µg/m<sup>3</sup> pour un trajet de 1h02) pour un temps moyen d'exposition de près d'une heure et 15 minutes. La plupart de ces trajets « Domicile-Travail » sont effectués entre la Grande-Couronne et Paris ce qui s'explique avant tout par des temps de parcours importants pour ce type de trajets.

	GC_GC	GC_Paris	GC_PC	Paris_Paris	Paris_PC	PC_GC	PC_Paris	PC_PC	Total
Nombre de trajets > 1h avec des concentrations de NO <sub>2</sub> > 200 µg/m <sup>3</sup>	0	5	3	0	0	0	1	0	9
Nombre total de trajets	40	32	34	38	34	32	34	38	282
Pourcentage	0	16	9	0	0	0	3	0	3

**Tableau 5 : Nombre et pourcentage de trajets supérieurs à 1 heure avec une concentration moyenne supérieure à 200 µg/m<sup>3</sup> par rapport au nombre total de trajet et en fonction du type de parcours.**

<sup>29</sup> Le seuil d'information correspond à un niveau de concentration de polluants dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée (échelle horaire) a des effets limités et transitoires sur la santé des catégories de la population particulièrement sensibles (enfants, personnes âgées, asthmatiques et insuffisants respiratoires chroniques).



**Figure 43 : Exposition au dioxyde d'azote lors des trajets « Domicile-Travail » en fonction du temps moyen de parcours par type de parcours.**

L'exposition moyenne d'un automobiliste aux nombres de particules en fonction du temps moyen de parcours selon les types de trajets (a) et sur l'ensemble des trajets réalisés (b) est présentée en ANNEXE 10.

Tests statistiques sur la variabilité et les différences des teneurs mesurées dans l'habitable selon les différentes typologies géographiques :

Des tests statistiques afin de comparer les données moyennes obtenues par typologie durant la campagne de mesure permettent de nuancer les commentaires précédents quant à leur réelle différence.

Deux tests paramétriques sont utilisés, d'une part celui de Fischer, permettant de valider l'équivalence des variances, c'est-à-dire la variabilité des données, et d'autre part celui de Student qui permet de tester l'égalité des moyennes, lorsque l'égalité des variances n'est pas rejetée (i.e l'homoscédasticité est vérifiée). Un intervalle de confiance à 95 % de la différence entre les moyennes considérées peut alors être estimé.

Dans le cas où l'égalité des variances est rejetée, le test non paramétrique de Wilcoxon est utilisé pour l'égalité des moyennes.

Au préalable, l'hypothèse de Normalité (requis pour l'application des tests paramétriques) a été vérifiée pour l'ensemble des données. Des informations complémentaires concernant les différents tests statistiques utilisés sont présentées à l'ANNEXE 11.

La Figure 44 présente les résultats de tests d'égalité des moyennes ce qui permet de comparer statistiquement les niveaux moyens de NO<sub>2</sub> (a) et le nombre de particules (b) de chaque typologie entre eux.

Pour les concentrations de dioxyde d'azote, les données relevées lors des trajets « Domicile-Travail » pour la typologie « **Grande-Couronne → Grande-Couronne** » **s'avèrent significativement plus faibles** que celles enregistrées pour les autres typologies hormis celles des parcours « Paris → Paris » où aucune différence n'a pu être confirmée statistiquement. Les niveaux de NO<sub>2</sub> pour les trajets « Paris → Paris » ne peuvent également pas être différenciés

des groupes « Grande-Couronne → Petite-Couronne » et « Petite-Couronne → Grande-Couronne » mais s'avère significativement plus faible que toutes les autres (hormis « Grande-Couronne → Grande-Couronne »).

		y							
Moyennes		PC->Paris	GC->PC	Paris->PC	PC->GC	GC->Paris	PC->PC	GC->GC	Paris->Paris
x	PC->Paris				supérieur			supérieur	supérieur
	GC->PC							supérieur	
	Paris->PC				supérieur			supérieur	supérieur
	PC->GC					inférieur		supérieur	
	GC->Paris							supérieur	supérieur
	PC->PC							supérieur	supérieur
	GC->GC								
	Paris->Paris								

supérieur	x > y
inférieur	x < y
	Aucune différence significative

(a) Dioxyde d'azote

		y							
Moyennes		PC->Paris	GC->PC	Paris->PC	PC->GC	GC->Paris	PC->PC	GC->GC	Paris->Paris
x	PC->Paris		supérieur		supérieur			supérieur	supérieur
	GC->PC			inférieur		inférieur		supérieur	
	Paris->PC				supérieur			supérieur	supérieur
	PC->GC					inférieur	inférieur	supérieur	
	GC->Paris							supérieur	supérieur
	PC->PC							supérieur	supérieur
	GC->GC								
	Paris->Paris								

supérieur	x > y
inférieur	x < y
	Aucune différence significative

(b) Comptage de particules

**Figure 44 : Tableau des résultats de tests d'égalité des moyennes (test de Student si l'homoscédasticité est vérifiée sinon test de Wilcoxon).**

Les types de trajets concernant les entrées et sorties de Paris (« Petite-Couronne → Paris », « Grande-Couronne → Paris » et « Paris → Petite-Couronne ») sont aussi significativement supérieurs aux niveaux moyens de NO<sub>2</sub> mesurés lors des trajets « Petite-Couronne → Grande-Couronne ».

Aucune autre différence n'a pu être mise en évidence significativement à partir de ces données pour le dioxyde d'azote.

Concernant le nombre de particules, les résultats sont identiques à ceux du dioxyde d'azote avec quelques différences supplémentaires confirmées (Figure 44 - b).

Les trajets de la typologie « Grande-Couronne → Petite-Couronne » présentent un nombre moyen de particules significativement plus faible que ceux des trois typologies concernant les entrées ou sortie de Paris.

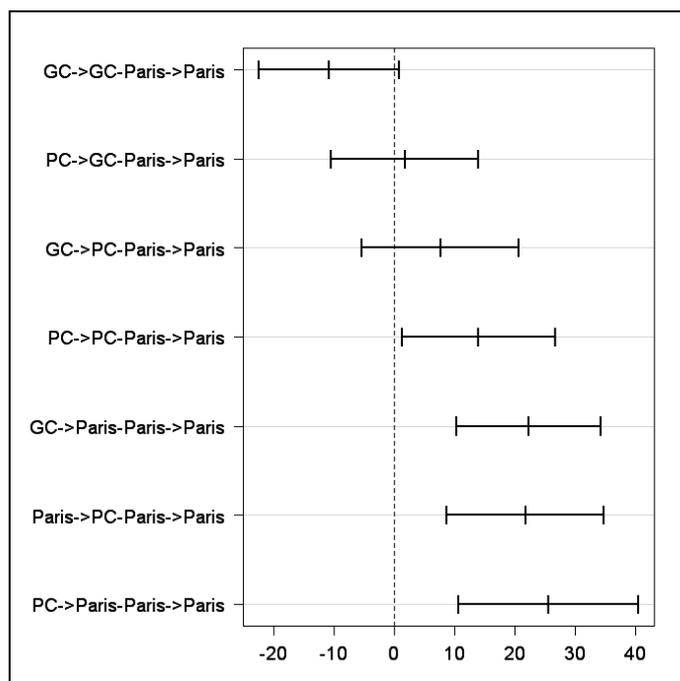
Les données du groupe « Petite-Couronne → Petite-Couronne » s'avèrent aussi significativement plus fortes que celles de « Petite-Couronne → Grande-Couronne » en plus des données des trajets internes à la « Grande-Couronne » et à « Paris ».

Afin d'illustrer ces différents commentaires, la Figure 45 présente les résultats de comparaison du nombre de particules pour les trajets « Paris → Paris » avec les autres typologies (utilisation de tests paramétriques dans ce cas puisque l'homoscédasticité est vérifiée). L'écart des niveaux moyens entre deux typologies est présenté avec son intervalle de confiance à 95 %. Si cet écart ne peut pas être considéré comme nul (i.e zéro n'appartient pas à l'intervalle de confiance), alors on peut conclure à une différence significative de ces moyennes. A l'inverse,

si cet écart peut être nul (zéro appartient à l'intervalle de confiance), aucune différence ne peut être mise en évidence.

Ainsi, les données enregistrées lors des trajets « Paris → Paris » sont en moyenne significativement plus faibles que celles des trajets concernant les typologies « Petite-Couronne → Petite-Couronne », « Grande-Couronne → Paris », « Paris → Petite-Couronne » et « Petite-Couronne → Paris ».

Aucune autre différence ne peut être mise en évidence même si pour la comparaison avec les trajets de « Grande-Couronne → Grande-Couronne » le zéro est très proche de la borne supérieure de l'intervalle de confiance. Des données supplémentaires pourraient permettre d'affiner cette comparaison et de hiérarchiser plus encore les différents trajets selon leur typologie.



*Les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité des données concernées par ce graphique ont été vérifiées au préalable.*

**Figure 45 : Intervalles de confiance à 95 % de la différence du nombre de particules dans l'habitacle entre les trajets « Paris → Paris » et les autres typologies.**

Le même travail graphique a été réalisé pour les typologies dont la normalité et l'homoscédasticité des données ont été vérifiées. Les comparaisons deux à deux du nombre de particules par typologies sont présentées en ANNEXE 12.

**La hiérarchie des niveaux de polluant entre les différentes typologies n'est pas entièrement confirmée par les tests statistiques en raison notamment de la variabilité importante des teneurs observée lors des trajets « Domicile-Travail » réalisés au sein de certaines typologies. Cependant, les données recueillies lors des trajets dont les tracés sont en direction de Paris ou sortent de la Capitale sont supérieures à celles des trajets internes à la « Grande-Couronne » et à « Paris ».**

**Pour les autres typologies, les teneurs mesurées dans l'habitacle ne peuvent statistiquement pas être différenciées des plus fortes (entrées ou sortie de Paris) ou des plus faibles (trajets internes « Grande-Couronne » et « Paris »).**

## 7.2. Variabilité des teneurs au sein d'une même zone

Les distributions des niveaux de l'ensemble des polluants sont différentes selon les ensembles de trajets types. La Figure 46 présente les histogrammes<sup>30</sup> des concentrations de dioxydes d'azote pour chacune des zones étudiées. L'ensemble des données de la typologie « Grande-Couronne → Grande-Couronne » se situe dans les concentrations les plus faibles sans exception (inférieur à 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Ceci correspond bien au premier constat effectué sur les données moyennes. Le groupe « Paris → Petite-Couronne » semble le plus stable avec une variabilité moins importante que celles des autres typologies. A l'inverse, les groupes « Petite-Couronne → Paris », « Grande-Couronne → Petite-Couronne » se distinguent par une variabilité importante. Concernant la typologie « Petite-Couronne → Petite-Couronne », une double modalité est mise en évidence et fera l'objet d'une étude plus approfondie dans le chapitre suivant (Chapitre 7.2.1).

La variabilité des données est également illustrée en ANNEXE 13 à l'aide des « boîtes à moustaches » établies pour chaque typologie de trajets pour le  $\text{NO}_2$  et le nombre de particules.

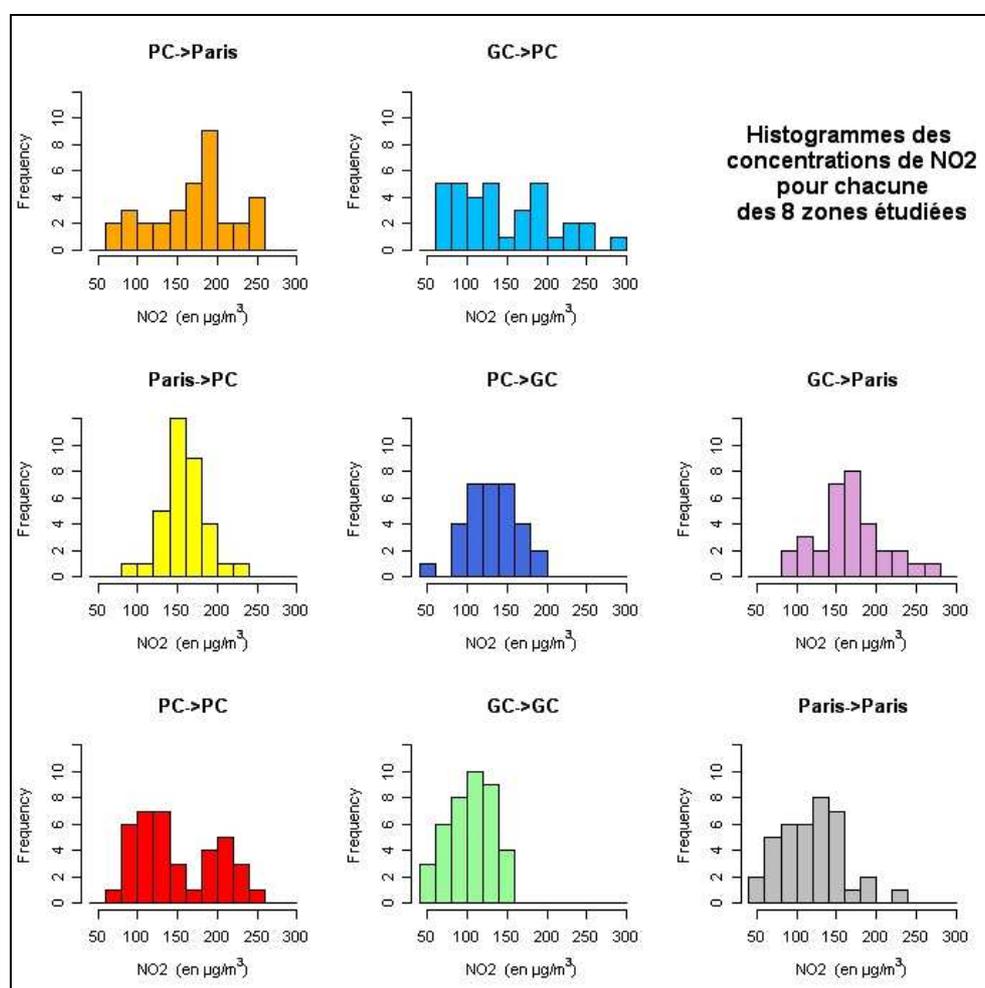
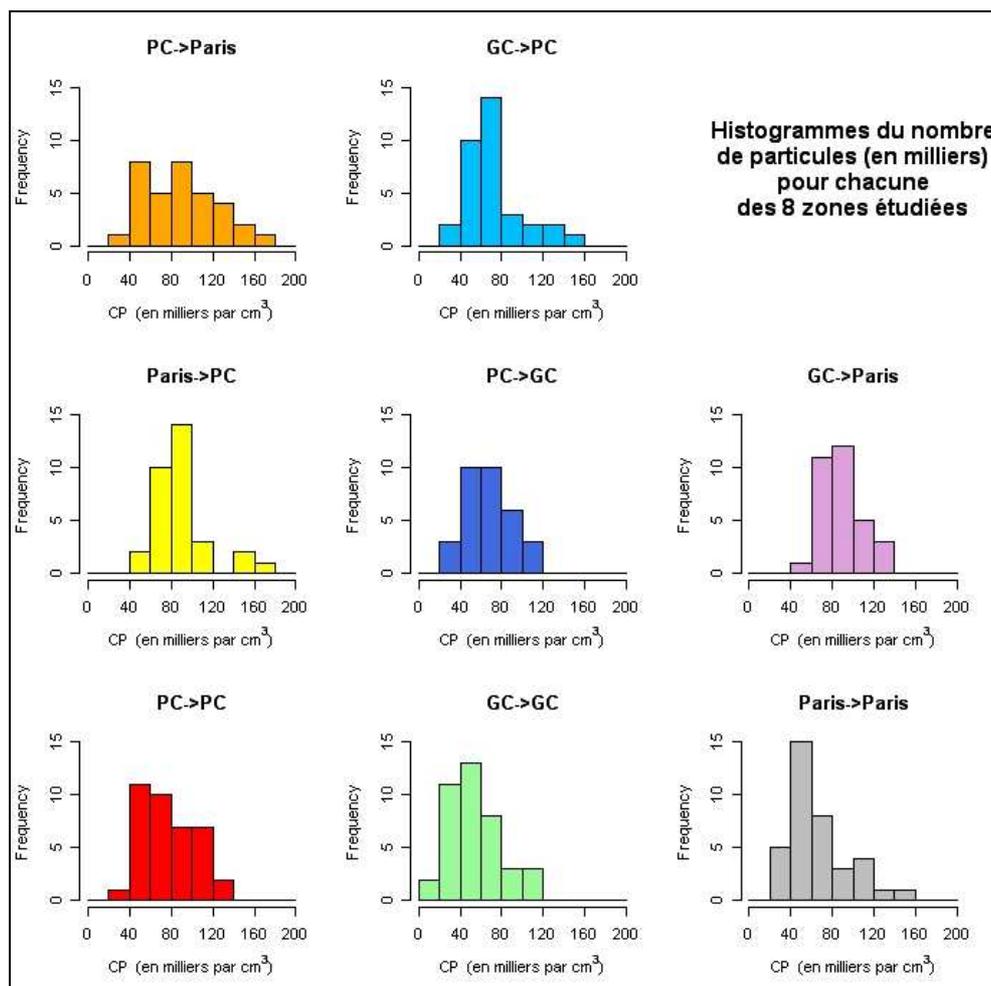


Figure 46 : Histogramme des concentrations moyennes de dioxyde d'azote mesurées dans l'habitacle pour chacune des zones étudiées.

<sup>30</sup> Un histogramme est un graphique permettant de représenter la répartition d'une variable (distribution, tendance centrale, dispersion). La fréquence des données (en nombre ou en pourcentage du total) est ainsi renseignée par intervalles (ou classes) de concentrations.

Le même graphique est présenté pour le comptage de particules à la Figure 47. Les données de comptage semblent également stables pour la typologie « Paris → Petite-Couronne » avec cependant quelques données plus éloignées de la moyenne (trois trajets dont les nombres moyens de particules dans l’habitacle ont été un peu plus forts : entre 140 000 et 180 000 particules par  $\text{cm}^3$ ). Les variabilités les plus importantes sont également relevées pour les groupes « Petite-Couronne → Paris » et « Grande-Couronne → Petite-Couronne » dans une moindre mesure.

En revanche les données « Grande-Couronne → Grande-Couronne » qui sont les plus faibles en moyenne, sont un peu moins isolées par rapport aux autres typologies et varient sur le même ensemble de données que celles de « Petite-Couronne → Grande-Couronne », à savoir jusqu’à 120 000 particules par  $\text{cm}^3$ .

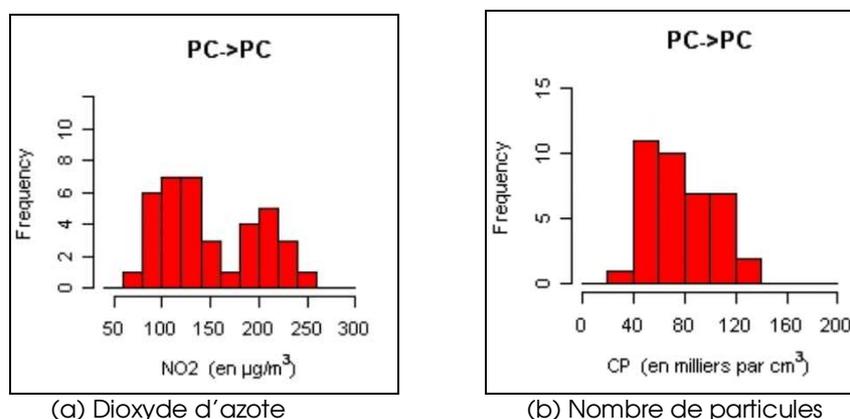


**Figure 47 : Histogramme du nombre moyen de particules mesuré dans l’habitacle pour chacune des zones étudiées.**

Les variabilités au sein d’une même typologie des teneurs de dioxyde d’azote et du nombre de particules sont plus ou moins importantes. Ces différences sont dues à plusieurs facteurs entraînant des niveaux différents de pollution dans l’habitacle ; parmi eux, les aléas intrinsèques à chaque conditions de circulation, aux véhicules suivis, à la typologie d’axes empruntés (autoroute, nationale,...), à la localisation des pôles d’emplois plus ou moins proche du cœur dense de l’agglomération parisienne et aux aménagements de voirie tels que les tunnels comme cela est étudié dans les chapitres suivants.

## 7.2.1 Impact des tunnels

La bi-modalité des données de dioxyde d'azote observée dans le cadre de la typologie « Petite-Couronne → Petite-Couronne » (Cf. Figure 48 - a) nous a amené à rechercher des facteurs d'explication. Le visionnage à la fois des vidéos embarquées et des cartographies des trajets empruntés nous a conduit à étudier spécifiquement le temps passé dans les tunnels. En effet, la circulation dans les tunnels entraîne des teneurs plus élevées dans l'habitacle compte tenu du confinement au sein de cet aménagement spécifique<sup>31</sup>.



**Figure 48 : Fréquence des teneurs moyennes relevées dans l'habitacle pour le dioxyde d'azote (a) et le nombre de particules (b) lors des trajets « Domicile-Travail » au sein de la Petite-Couronne.**

Cette bi-modalité s'explique par la présence significative ( $\geq 5\%$  du temps effectif du trajet) ou l'absence de tunnels (ou part négligeable) sur le trajet effectué. D'une part, les trajets dont la circulation a été réalisée en prenant un axe pourvu de tunnels présentent des niveaux moyens importants enregistrés dans l'habitacle. D'autre part les trajets où la durée de circulation dans un tunnel est nulle ou inférieure à 5 % du temps passé sur l'ensemble du trajet présentent les teneurs les plus faibles (Cf. Figure 49 - a).

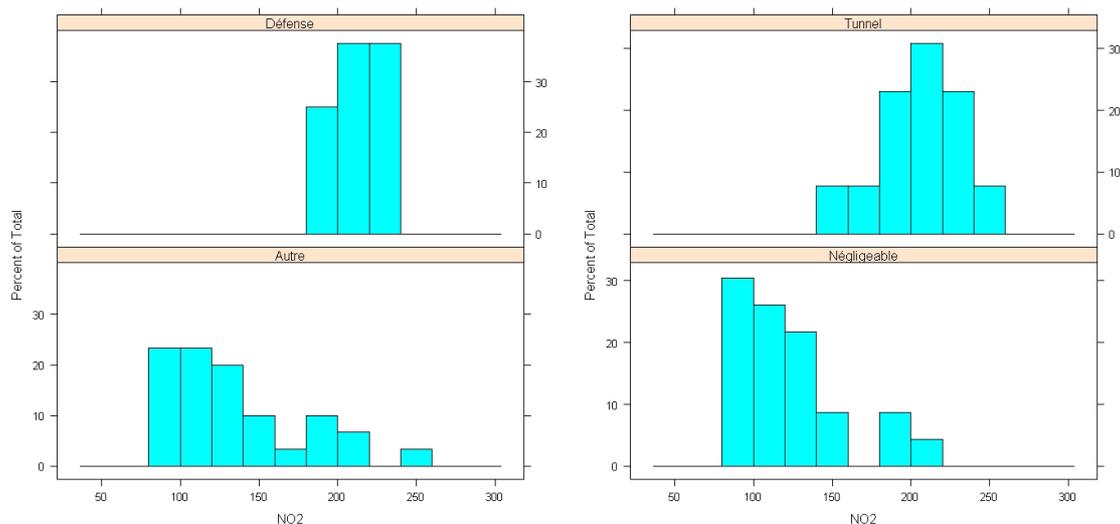
Sur certains trajets, la part de temps passé dans un tunnel peut atteindre plus de 20 % du temps de parcours. Les trajets « Domicile-Travail » en « Petite-Couronne » dont les parcours empruntent des tunnels sont principalement des trajets en direction du Pôle d'emplois de « La Défense » où de nombreux tunnels sont présents<sup>32</sup>.

La distinction des trajets ayant comme destination le pôle d'emplois de « la Défense » est également faite avec les autres trajets de cette typologie (Cf. Figure 49). Les trajets en « Petite-Couronne » en direction de ce pôle d'emplois ont été effectués à partir de Boulogne-Billancourt. Le tunnel de Neuilly (440 mètres) ainsi que les nombreuses couvertures présentent sur le Boulevard Périphérique Ouest ont été empruntés pour se rendre à « La Défense » engendrant ainsi des teneurs de dioxyde d'azote parmi les plus élevées dans l'habitacle.

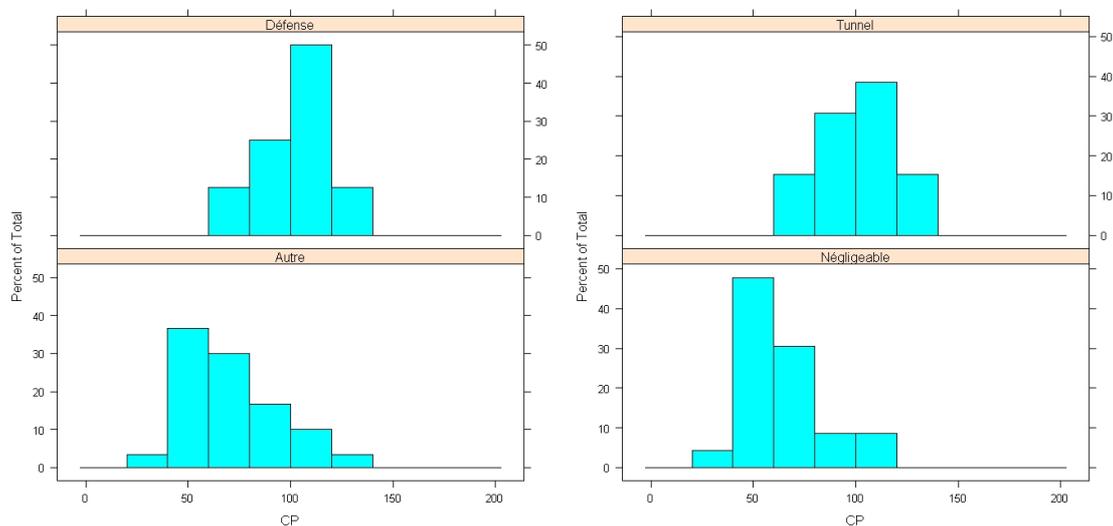
Cette bi-modalité s'avère également présente dans cette typologie pour le nombre de particules par cm<sup>3</sup> mesuré (Cf. Figure 49 - b) même si celle-ci n'était pas à première vue apparente sur l'histogramme des données par trajets.

<sup>31</sup> Exemple du trajet entre Marty-le-Roi et le pôle d'emplois de « La Défense » réalisé le 11/09/2008 au matin : les concentrations de dioxyde d'azote mesurées en moyenne dans les tunnels étaient environ 5 fois supérieures à celles mesurées en moyenne sur le reste du trajet.

<sup>32</sup> Les tunnels d'Île-de-France sont cartographiés en ANNEXE 14 où est renseigné également la longueur des ouvrages.



(a) Dioxyde d'azote



(b) Nombre de particules

**Figure 49 : Distribution (en %) des teneurs moyennes relevées dans l'habitacle pour le dioxyde d'azote (a) et le nombre de particules (b) sur les trajets « Petite-Couronne→Petite-Couronne » en différenciant les trajets en direction du pôle d'emploi de « La Défense » puis ceux présentant un temps de circulation dans un tunnel supérieur à 5 % du temps du trajet complet.**

En moyenne sur les trajets « Petite-Couronne → Petite-Couronne », les niveaux du groupe « Tunnel » (présence de tunnel pendant plus de 5 % de la durée du trajet considéré) pour les deux polluants sont significativement supérieurs à ceux du groupe « part négligeable » (absence ou présence de tunnel pendant moins de 5 % de la durée du trajet). Le groupe de « la Défense » présente également des niveaux significativement supérieurs à ceux des autres trajets dans cette typologie du fait d'une circulation essentiellement sur le Boulevard Périphérique Ouest (nombreuses couvertures) et dans le tunnel de Neuilly.

De manière générale :

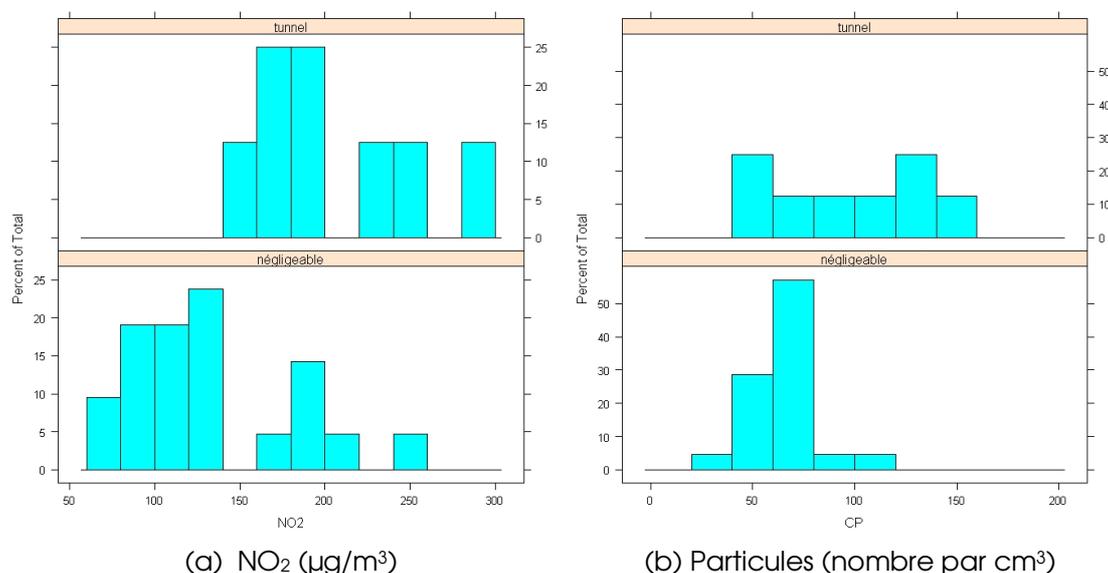
Outre les trajets de typologie « Petite-Couronne → Petite-Couronne » réalisés en voiture, l'influence d'une circulation empruntant des tunnels apparaît également au sein d'autres typologies.

Ainsi, on retrouve pour les deux trajets dont les niveaux de NO<sub>2</sub> sont les plus élevés de la campagne une circulation sur des axes majeurs d'Île-de-France avec quelques aménagements de couvertures empruntés.

- C'est le cas pour le trajet de typologie « Grande-Couronne → Petite-Couronne » effectué le 9 décembre 2008 entre « La Défense » et Franconville où le niveau moyen de NO<sub>2</sub> est de plus de 290 µg/m<sup>3</sup>. La circulation au sein de différents tunnels (Défense, Nanterre-centre et Rueil-Belle-Rive) entraîne également un nombre moyen de particules dans l'habitacle du véhicule parmi les plus élevés avec 133 000 particules par cm<sup>3</sup> en moyenne sur le trajet.

C'est ainsi près de 10 minutes de circulation qui ont été effectuées dans les différents tunnels, soit 15 % du temps de l'ensemble de ce trajet.

Plus généralement, pour la typologie « Grande-Couronne → Petite-Couronne », la distinction des niveaux moyens entre les trajets avec une part de temps passé dans un tunnel supérieure à 5 % du temps global et les autres (part négligeable) est présentée à la Figure 50. La différence entre ces deux groupes est également significative pour cette typologie.

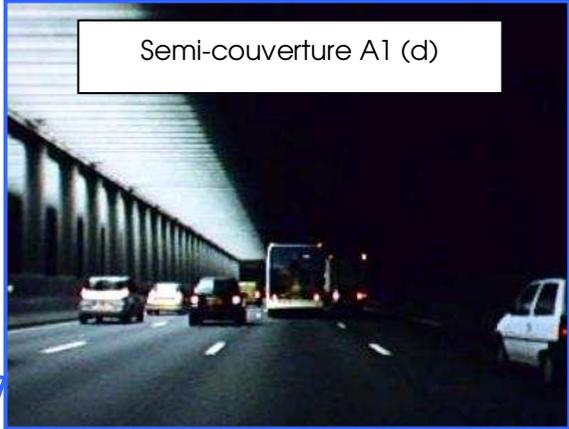
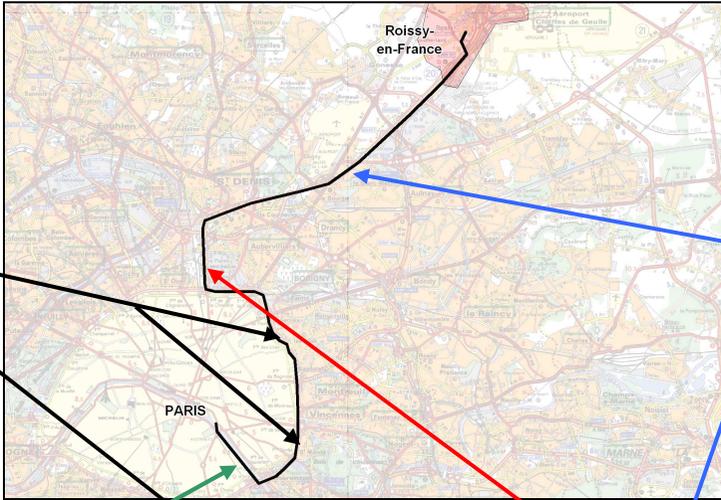


**Figure 50 : Distribution (en %) des teneurs moyennes relevées dans l'habitacle pour le dioxyde d'azote (a) et le nombre de particules (b) sur les trajets « Grande-Couronne→Petite-Couronne » en différenciant les trajets présentant un temps de circulation dans un tunnel supérieur à 5 % du temps du trajet complet (tunnel) et ceux ayant une part négligeable ou nulle de tunnel (négligeable).**

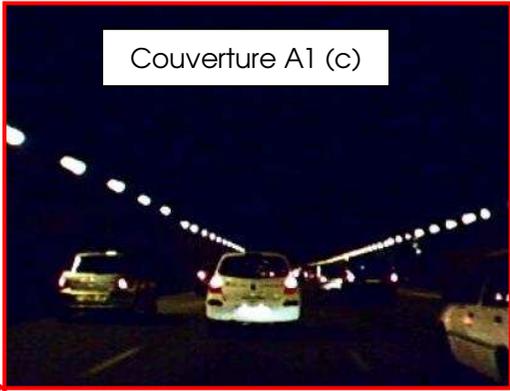
- Durant le trajet effectué le 24 octobre 2008 entre Paris et Roissy-en-France, caractérisant un trajet « Travail-Domicile » de typologie « Grande-Couronne → Paris », les teneurs les plus importantes de dioxyde d'azote et le nombre maximal de particules mesurées dans l'habitacle l'ont été en empruntant les couvertures émaillant les axes routiers les plus importants (Cf. Figure 51). On retrouve ainsi, les couvertures du Quai de Bercy (a), celles du Boulevard Périphérique<sup>33</sup> (b) et de l'autoroute A1 (c & d). De ce fait, ce trajet observe les niveaux moyens de NO<sub>2</sub> parmi les plus importants de la campagne avec 272 µg/m<sup>3</sup>. Il en est de même pour le nombre de particules avec un nombre moyen de 135 000 particules par cm<sup>3</sup>.

**Ces exemples mettent en relief l'impact des tunnels sur les niveaux de dioxyde d'azote et le nombre de particules mesurés dans l'habitacle de la voiture. Cela est principalement dû à une accumulation de la pollution dans le tunnel entraînée par le confinement (dispersion des polluants réduite par rapport à l'extérieur) dans de tels aménagements.**

<sup>33</sup> La portion du Boulevard Périphérique empruntée lors de ce trajet comporte cinq couvertures (Vincennes, Les Lilas, Bagnolet)



Semi-couverture A1 (d)



Couverture A1 (c)

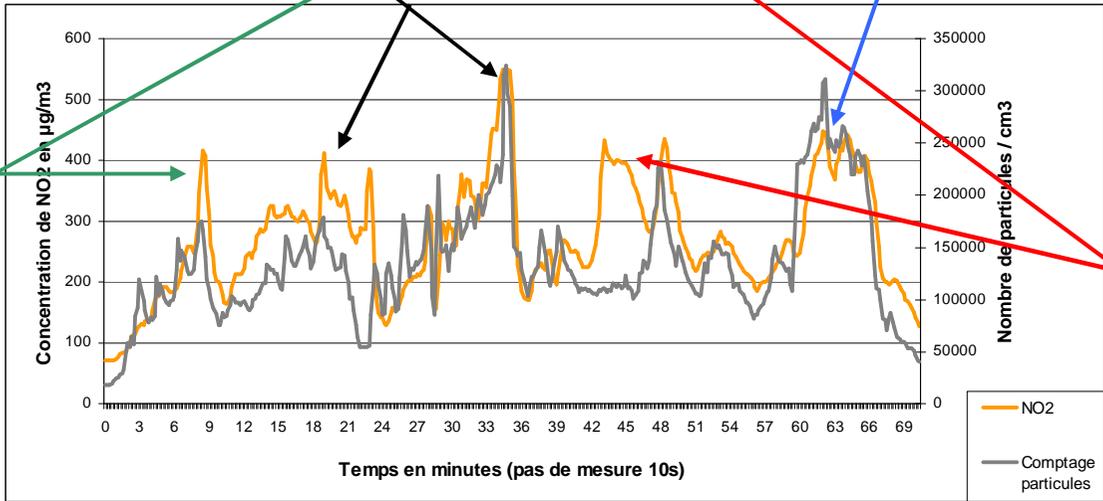


Figure 51 : Trajet « Q-Echo » effectué le 24 octobre 2008 entre Paris et Roissy-en-France (typologie Grande-Couronne → Paris).



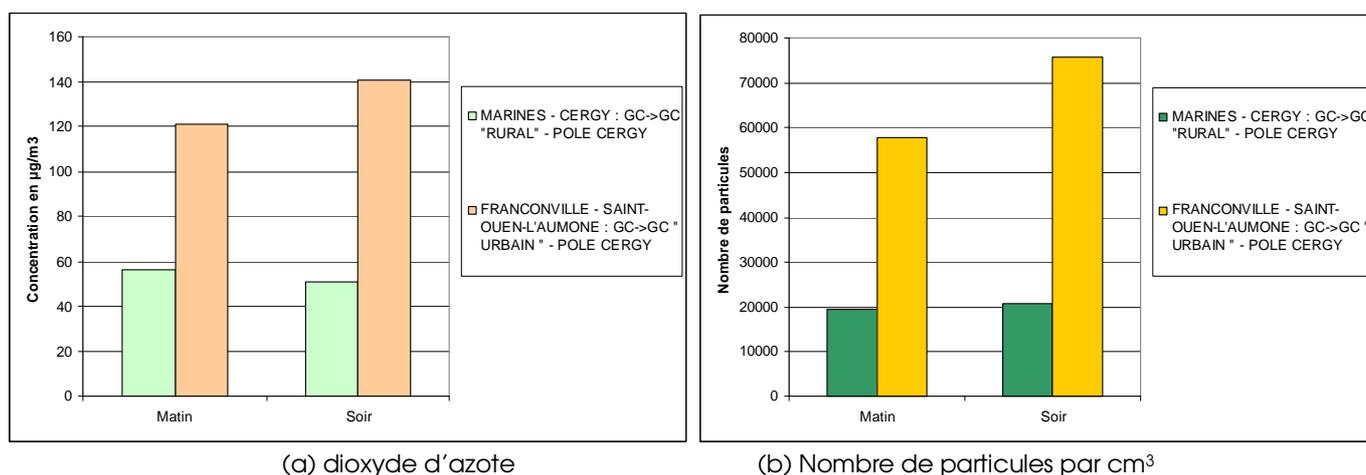
Couverture Quai Bercy (a)

## 7.2.2 Variabilité des teneurs en Grande-Couronne : impact de l'environnement

Le pôle d'emplois de « Cergy » situé au Nord-Ouest de la Grande-Couronne a fait l'objet de deux types de trajets « Domicile-Travail » au sein même de la typologie « Grande-Couronne → Grande-Couronne » compte tenu de son attractivité exercée à la fois sur des communes situées en milieu rural ou au contraire en milieu urbain dense de l'agglomération parisienne (Cf. chapitre 5.1.2).

Ces trajets effectués au sein de la Grande-Couronne en direction du pôle de « Cergy » concernent d'une part, la commune de Marines située au Nord-Ouest de Cergy, caractérisant un secteur rural, et d'autre part la commune de Franconville située dans l'agglomération parisienne, autrement dit en milieu urbain. Si le premier trajet emprunte en grande majorité une route départementale (RD.28) dont le trafic routier est très faible (inférieur à 5 000 véhicules<sup>34</sup> par jour) et une nationale (RN.14 : 30 000 véhicules<sup>34</sup> par jour) traversant un domaine géographique rural, le second emprunte la grande majorité du temps l'autoroute A15 caractérisée par une circulation dense (128 000 véhicules<sup>34</sup> par jour) après avoir parcouru des axes secondaires en milieu urbain (Cf. Figure 53).

La Figure 52 illustre pour le dioxyde d'azote (a) et le nombre de particules (b) les teneurs moyennes relevées dans l'habitable selon les trajets « Domicile-Travail » du pôle d'emplois de « Cergy ».

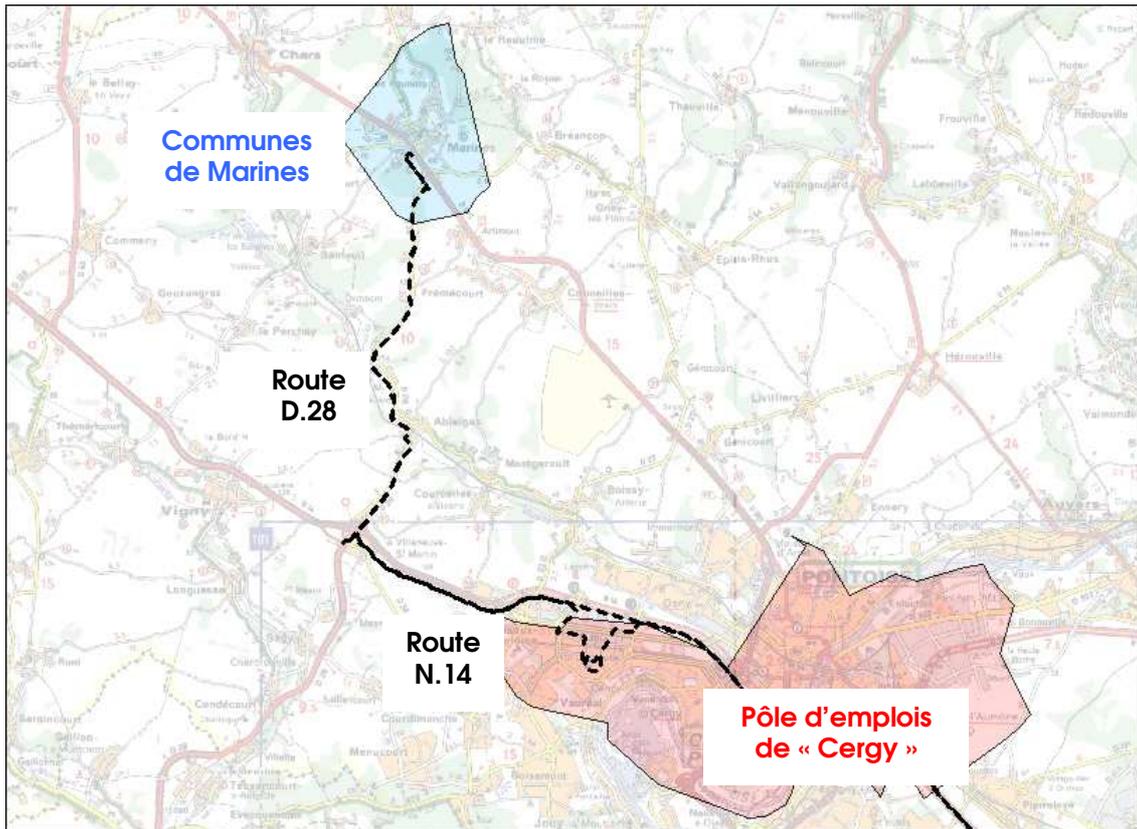


**Figure 52 : Concentrations moyennes en dioxyde d'azote et nombre moyen de particules relevés suivant les trajets « Domicile-Travail » en Grande-Couronne à destination du pôle d'emplois de « Cergy ».**

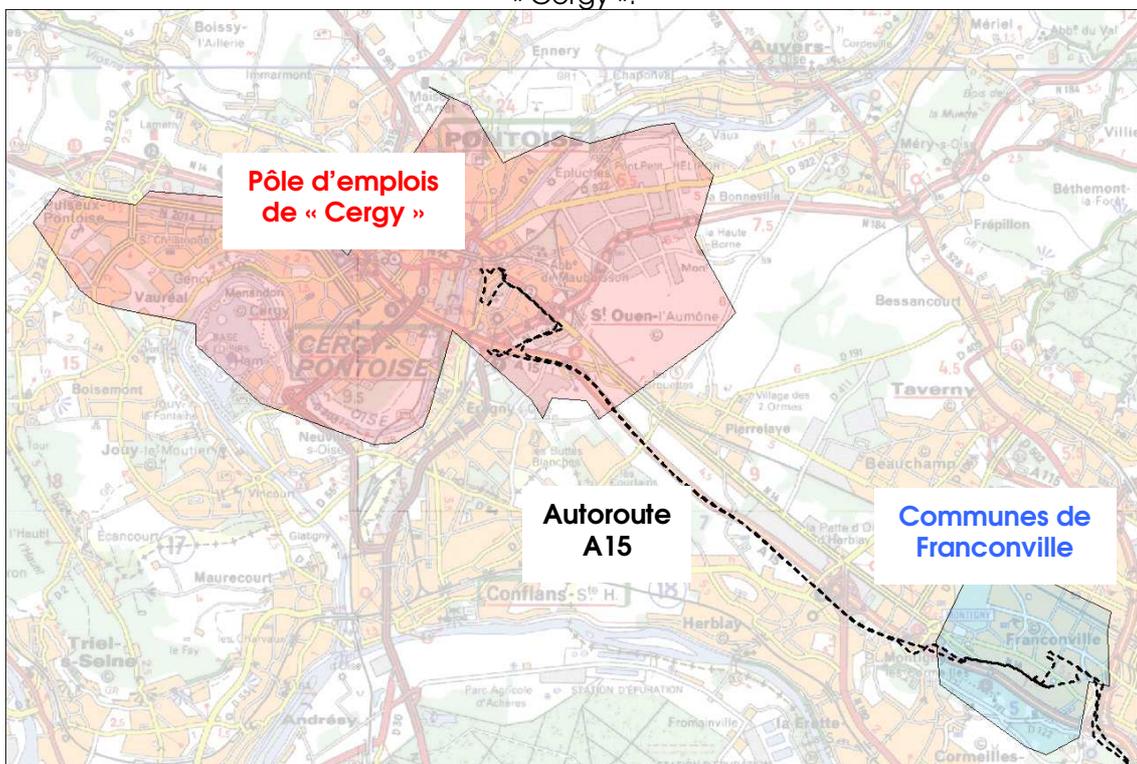
On observe ainsi en moyenne des teneurs de dioxyde d'azote dans l'habitable inférieures de 60 % sur les trajets de la commune de Marines vers le pôle d'emplois de « Cergy » par rapport à ce que l'on a pu enregistrer lors des trajets entre Franconville et ce même pôle d'emplois. La concentration moyenne de NO<sub>2</sub> dans l'habitable est ainsi de 54 µg/m<sup>3</sup> dans le premier cas et de 131 µg/m<sup>3</sup> dans le second. Cette différence est observée aussi bien lors du trajet « Domicile-Travail », réalisé le matin, que le soir dans le sens du retour, « Travail-Domicile ».

Le constat est identique pour le nombre de particules, puisque l'on enregistre en empruntant les axes les moins denses en venant de la commune de Marines une différence de 70 % du nombre de particules dans l'habitable de la voiture.

<sup>34</sup> Source : Direction départementale de l'équipement du Val-d'Oise, année 2005.



(a) trajet « Domicile-Travail » en Grande-Couronne Marines → pôle d'emplois de « Cergy ».



(b) trajet « Domicile-Travail » en Grande-Couronne Franconville → pôle d'emplois de « Cergy ».

**Figure 53 : Trajet « Domicile-Travail » de Franconville à Saint-Ouen-l'Aumône représentant le pôle d'emplois de « Cergy ».**

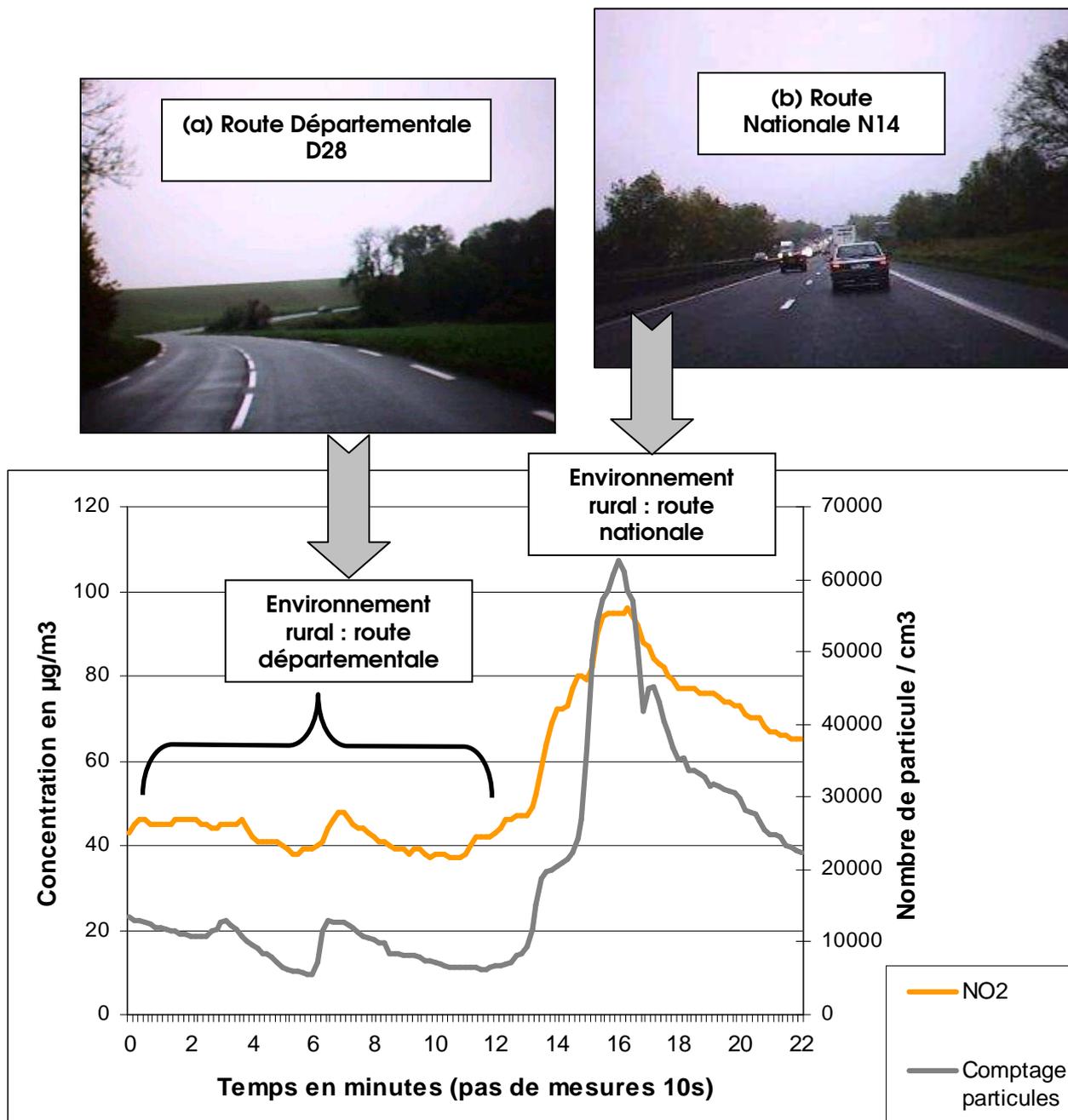


Figure 54 : Teneurs de NO<sub>2</sub> et nombre de particules mesurés dans l'habitacle lors du trajet « Domicile-Travail » entre Marines et le pôle d'emplois de « Cergy ».

La Figure 54 et la Figure 55 illustrent les teneurs de NO<sub>2</sub> (en orange) et le nombre de particules (en gris) enregistrés dans l'habitacle sur un pas de temps fin de 10 secondes sur les déplacements « Domicile-Travail » effectués le matin en direction du même pôle d'emplois de « Cergy ».

La première figure illustre le trajet à partir de la commune de Marines, localisée en milieu rural (Cf. Figure 54). Les teneurs de dioxyde d'azote et le nombre de particules sont relativement faibles (NO<sub>2</sub> : 43 µg/m<sup>3</sup> – nombre de particules : 9 300 par cm<sup>3</sup>) et stables sur la portion de la RD28 (a) où le trafic routier est très faible au sein d'un environnement rural. En empruntant un axe dont le trafic routier est plus dense (RN14 – b) la concentration de NO<sub>2</sub> et le nombre de particules augmentent sans dépasser 100 µg/m<sup>3</sup> en NO<sub>2</sub> et 62 000 particules sur 10 secondes. En moyenne sur cette portion de nationale, les teneurs dans l'habitacle augmentent pour atteindre sur les 4 minutes de parcours 85 µg/m<sup>3</sup> en NO<sub>2</sub> et un nombre de particules par cm<sup>3</sup> de 4 200. En sortant de la Route Nationale, les teneurs dans l'habitacle diminuent

progressivement pour atteindre à l'arrivée une concentration de 65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{NO}_2$  et 22 000 particules par  $\text{cm}^3$ .

De la même manière, la Figure 55 illustre les niveaux dans l'habitacle de la voiture toutes les 10 secondes pour le  $\text{NO}_2$  et le nombre de particules lors du trajet « Domicile-Travail » entre Franconville et le pôle d'emplois de « Cergy ».

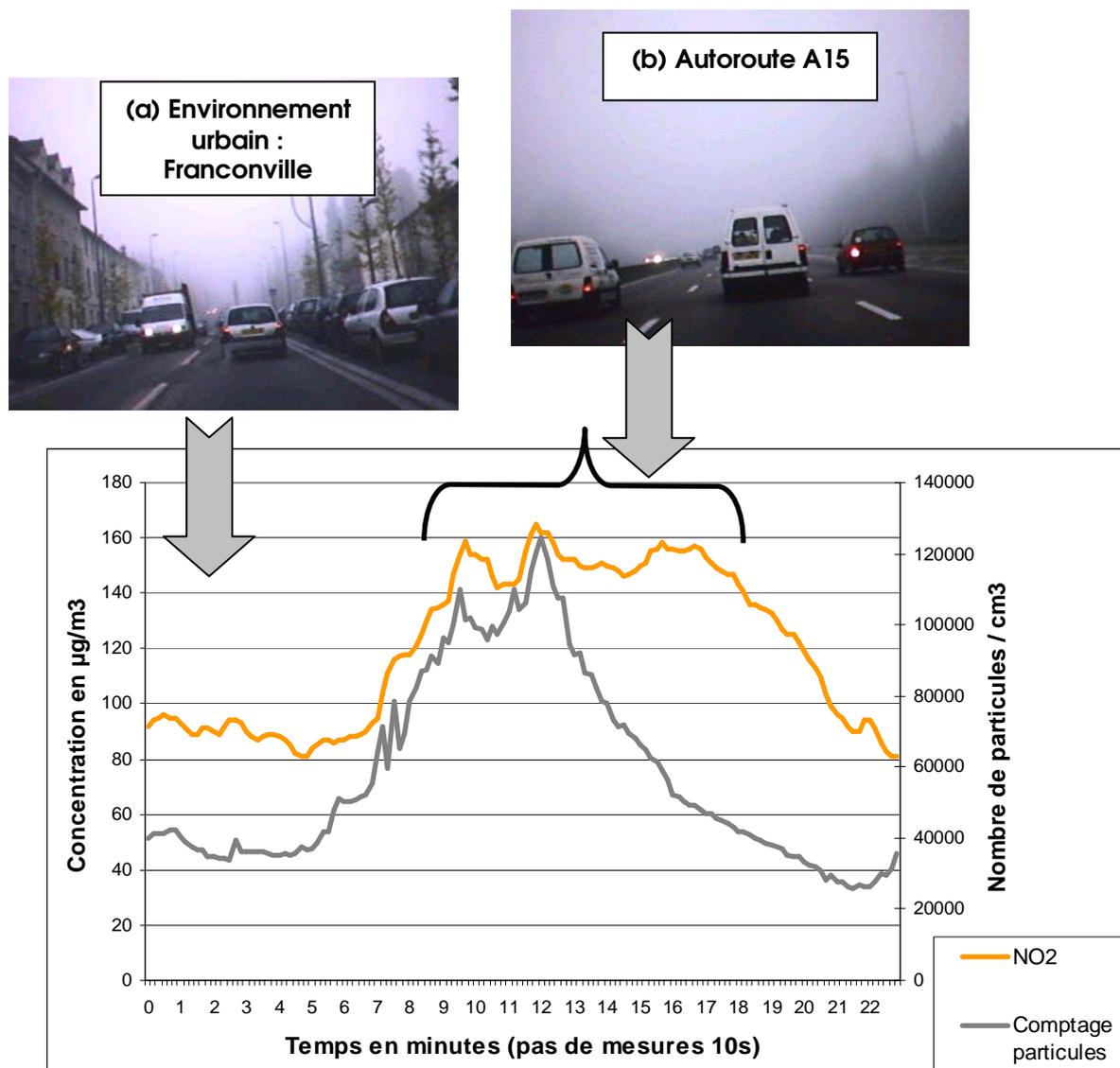


Figure 55 : Teneurs de  $\text{NO}_2$  et nombre de particules mesurés dans l'habitacle lors du trajet « Domicile-Travail » entre Franconville et le pôle d'emplois de « Cergy ».

En partant de Franconville, commune située dans l'agglomération parisienne, le niveau moyen dans l'habitacle est de 90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $\text{NO}_2$  et de 37 000 particules par  $\text{cm}^3$  en circulant sur les axes de la commune (a) avant d'atteindre l'autoroute A15. En arrivant sur l'autoroute A15, dont la densité du trafic routier est importante (b), les niveaux dans l'habitacle de  $\text{NO}_2$  et de particules augmentent pour atteindre au maximum sur 10 secondes 165  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{NO}_2$  et 125 000 particules par  $\text{cm}^3$ .

Le temps de parcours sur l'autoroute représente un peu moins de 30 % du temps global (soit un peu plus de 5 minutes) de ce trajet.

**Les niveaux de pollution rencontrés dans l'habitacle sont très différents selon les trajets effectués en « Grande-Couronne » compte tenu des environnements géographiques que l'on rencontre pour se rendre aux pôles d'emplois. Les niveaux les plus forts sont observés lorsque**

l'on circule en milieu urbain et que l'on emprunte les axes routiers majeurs comme c'est le cas entre Franconville et « Cergy » alors qu'en circulant en milieu rural sur des axes secondaires pour se rendre de Marine à ce même pôle d'emplois les teneurs sont beaucoup plus faibles. Contrairement à Paris et à la « Petite-Couronne », la « Grande-Couronne » ne présente pas d'unité géographique puisque que l'on retrouve une zone urbaine dense (périphérie de l'agglomération parisienne) et une large zone rurale.

Cela démontre le rôle à la fois de l'environnement géographique (urbain ou rural) et la densité de trafic routier de l'axe emprunté (route départementale, nationale, autoroute) sur la qualité de l'air que l'on retrouve dans l'habitacle de la voiture.

### 7.3. Impact du véhicule de devant

Outre la variabilité des niveaux de pollution dans l'habitacle selon la typologie des axes empruntés, les aménagements de voirie (tunnel) ou encore l'environnement géographique (urbain – rural), les teneurs de pollutions sont également liées au véhicule qui nous précède. Les exemples suivants illustrent l'influence directe du véhicule de devant sur les niveaux des oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>) et/ou le nombre de particules dans l'habitacle selon sa catégorie (camion...), sa motorisation et la présence ou non d'un filtre à particules.

Impact d'un Poids Lourd :

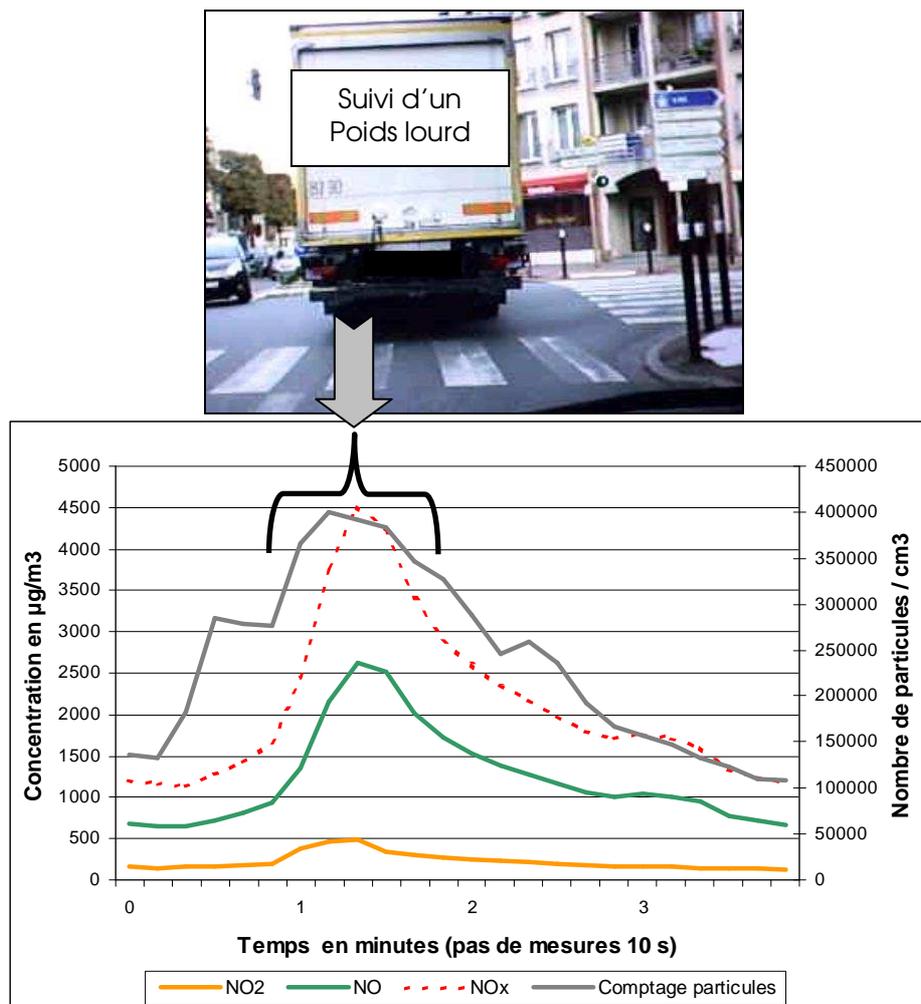


Figure 56 : Impact d'un poids lourd précédant le véhicule équipé de moyens de mesure sur les teneurs de NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub> et le nombre de particules mesurées dans l'habitacle lors du trajet du 04/09/08 entre Créteil et le pôle d'emplois de « Montreuil ».

La Figure 56 présente les teneurs des oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>) relevés dans l'habitacle lorsque qu'un camion nous précède, ainsi que le nombre de particules par cm<sup>3</sup> au pas de temps fin de 10 secondes lors du trajet du 4 septembre 2008 entre Créteil et Fontenay-sous-Bois (pôle d'emplois de « Montreuil »).

Derrière le camion, les niveaux des polluants mesurés dans l'habitacle augmentent de manière importante pour atteindre au maximum 400 000 particules par cm<sup>3</sup> et plus de 2 600 µg/m<sup>3</sup> de NO et près de 500 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub> sur 10 secondes (soit plus de 4 500 µg/m<sup>3</sup> en NOx équivalent NO<sub>2</sub>).

Les émissions de ce type de véhicule sont importantes par rapport à un véhicule particulier (VP) puisque qu'un camion émet en moyenne près de 12 fois<sup>35</sup> plus d'oxydes d'azote et 5 fois plus de particules.

Une fois que le camion n'est plus devant la voiture, les niveaux des polluants diminuent progressivement pour rejoindre un niveau de base que l'on observe une fois à destination (arrêt du véhicule en situation de fond).

La baisse des niveaux de pollution dans l'habitacle en ne circulant plus derrière le camion n'est pas immédiate en raison du délai d'évacuation (renouvellement de l'air), d'où une baisse progressive des teneurs.

#### Impact d'un véhicule équipé d'un filtre à particules (FAP) :

Les émissions de particules et de dioxyde d'azote à l'échappement dépendent notamment du type de véhicules et de leur équipement de dépollution. La plupart des systèmes récents de filtre à particules (FAP) réduisent d'environ 90 % les émissions de ce polluant<sup>36</sup> en nombre de particules<sup>37</sup> émises. Les émissions d'oxydes d'azote quant à elles sont constantes voire augmentent avec l'application d'un catalyseur associé au FAP. Ces systèmes catalysés peuvent produire une proportion plus importante de dioxyde d'azote du fait de l'oxydation des particules piégées (processus nécessaire à la régénération des FAP).

La Figure 57 illustre un exemple avec les concentrations des oxydes d'azote (NO, NO<sub>2</sub>, NOx équivalent NO<sub>2</sub>) ainsi que le nombre de particules enregistrés dans l'habitacle toutes les 10 secondes sur une partie du trajet du 20 novembre 2008 entre Marly-le-Roi et Courbevoie (pôle d'emplois de « La Défense »). Lorsque l'automobile équipée d'un filtre à particules<sup>38</sup> précède le véhicule réalisant les mesures, les teneurs de dioxyde d'azote augmentent de manière importante pour atteindre sur 10 secondes un maximum de 420 µg/m<sup>3</sup>. A l'inverse, derrière ce véhicule le nombre de particules dans l'habitacle baisse de manière importante jusqu'à 12 000 particules par cm<sup>3</sup>.

L'impact de ce véhicule suivi est important sur les deux polluants mesurés mais avec des conséquences différentes, à savoir une forte augmentation du dioxyde d'azote et une forte baisse du nombre de particules.

La dynamique des teneurs durant la période où ce véhicule nous précède est due à l'éloignement plus ou moins important selon la fluidité du trafic routier (feux tricolores...) et à l'insertion parfois d'autres véhicules entre la voiture équipée de FAP et celle réalisant les mesures.

---

<sup>35</sup> Calculs basés sur les sorties du système HEAVEN (DREIF/DVD/Airparif), les facteurs d'émission COPERT IV et le parc technologique de véhicules de 2005 du CITEPA.

<sup>36</sup> « Les particules de combustion automobile et leur dispositifs d'élimination » - Données et références – ADEME, 2005.

<sup>37</sup> Ceci concerne l'ensemble des particules et pas uniquement celles inférieures à 1µm comme c'est le cas dans cette étude.

<sup>38</sup> Recherche réalisée d'après les caractéristiques (marque de la voiture, carburant...) recueillies lors du trajet.

Il est à noter que le ratio entre le NO<sub>2</sub> et le NO est très différent en suivant ce véhicule puisque l'on enregistre près de 4 fois plus de NO<sub>2</sub> que de NO au moment où les teneurs de NO<sub>2</sub> dans l'habitacle sont parmi les plus fortes. Ce ratio NO<sub>2</sub>/NO est très différent de ce que l'on observe généralement derrière un véhicule non équipé d'un FAP, puisque l'on enregistre « normalement » beaucoup plus de NO que de NO<sub>2</sub> (jusqu'à 5 fois plus) comme c'est le cas dans l'exemple précédent en circulant derrière un camion.

Si les teneurs de NO et de NO<sub>2</sub> sont très différentes en suivant ce véhicule, les teneurs en NO<sub>x</sub> (ligne en pointillés rouges) sont quant à elles relativement similaires avec celles mesurées auparavant puisqu'on retrouve près de 700 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>x</sub> dans les deux cas.

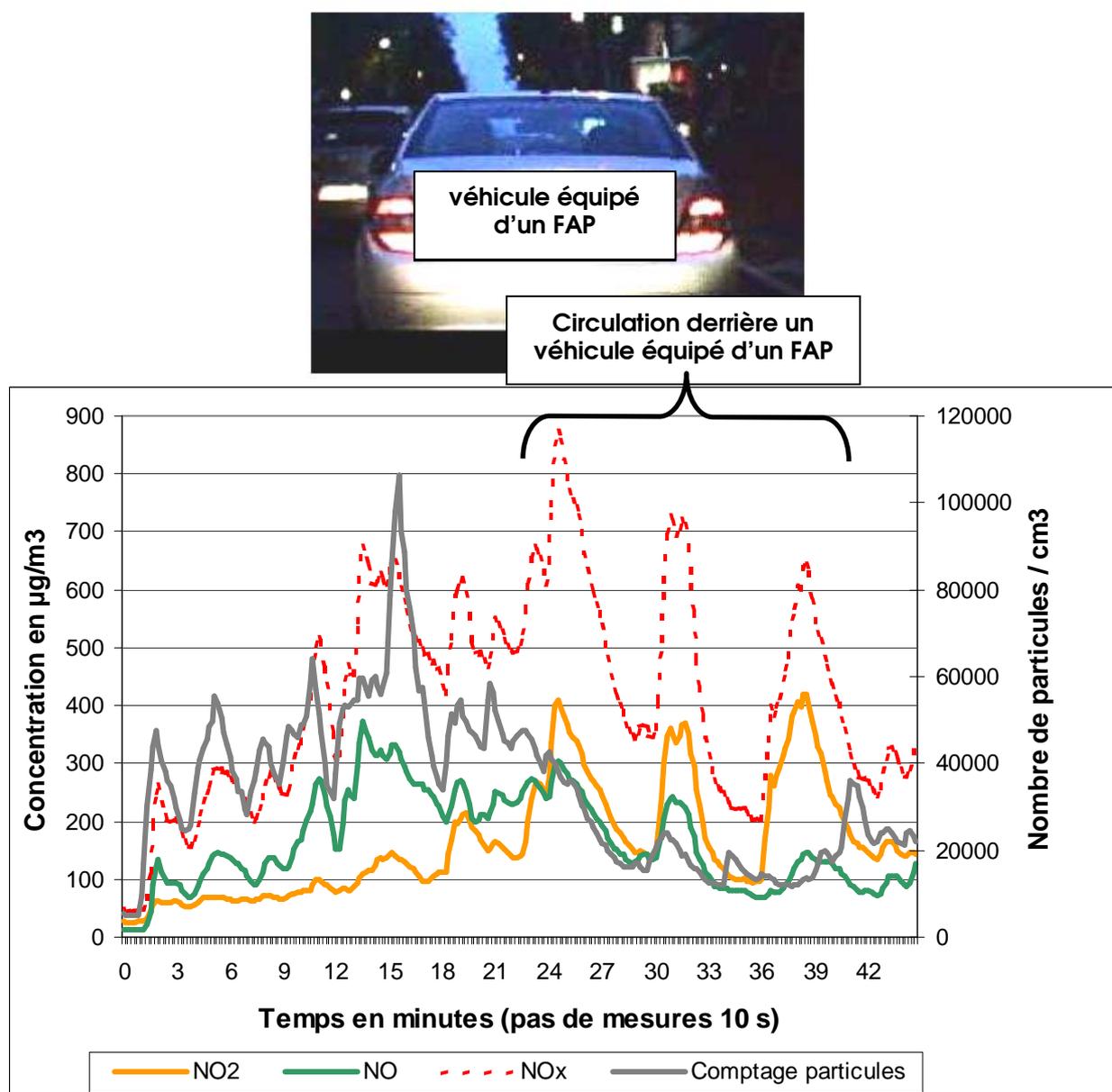


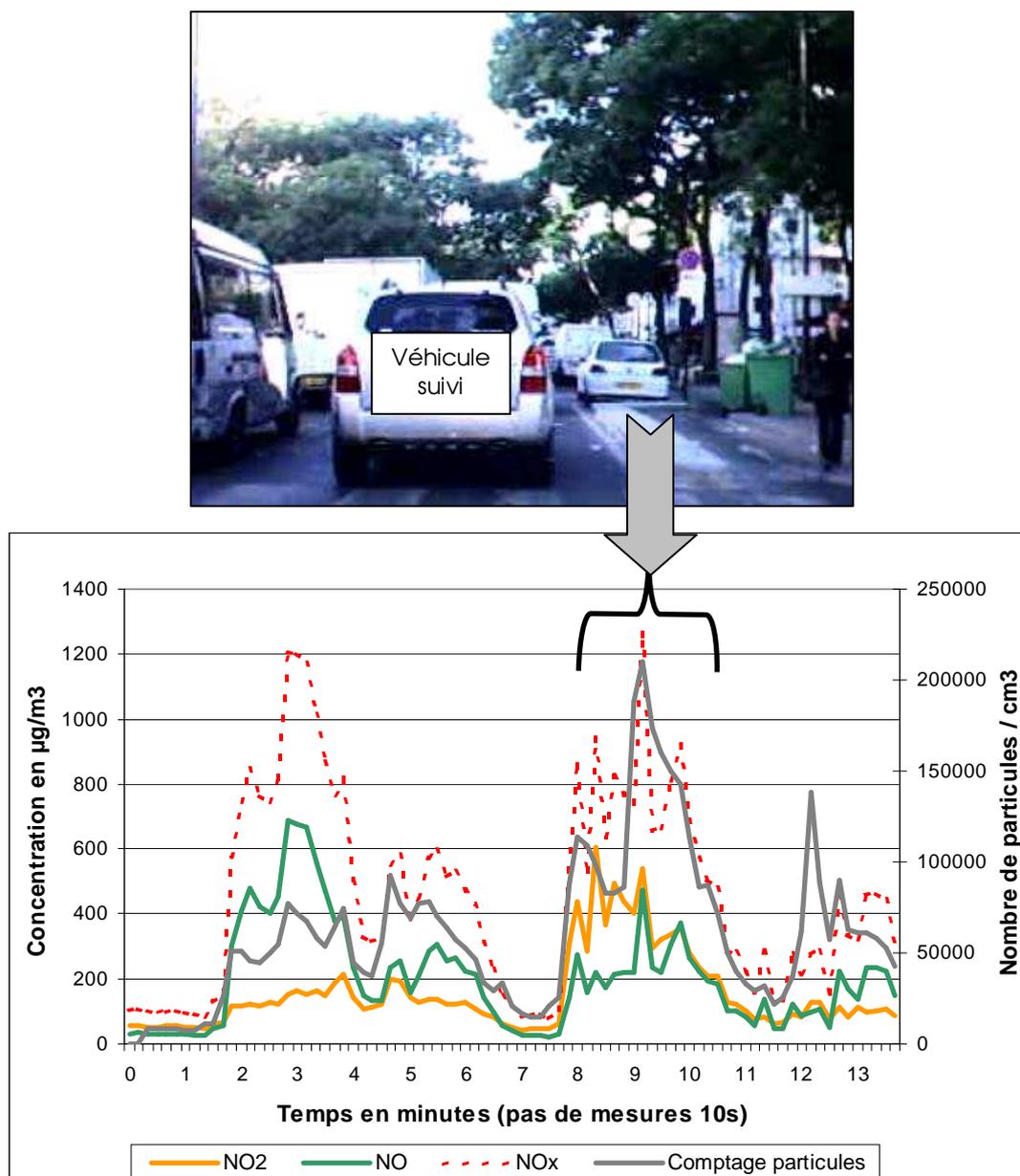
Figure 57 : Évolution des concentrations de NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub> et du comptage de particules dans l'habitacle en suivant un véhicule équipé d'un filtre à particules lors du trajet du 20/11/08 entre Marly-le-Roi et le pôle d'emplois de « La Défense ».

Autre exemple :

L'impact d'un véhicule particulier circulant devant le véhicule équipé d'analyseurs peut être important sur l'ensemble des polluants mesurés.

Cela est le cas sur cet exemple (Cf. Figure 58) où les niveaux de dioxyde d'azote mesurés dans l'habitacle peuvent ponctuellement atteindre sur 10 secondes 600  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En suivant ce véhicule durant un peu plus de 2 minutes, la teneur moyenne de  $\text{NO}_2$  dans l'habitacle est de 390  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , contre seulement 110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sur le reste du trajet une fois que le véhicule n'est plus suivi.

Il est à noter que le nombre de particules par  $\text{cm}^3$  augmente de manière importante en suivant ce véhicule. On enregistre ainsi dans l'habitacle plus du double de particules en suivant ce véhicule par rapport à ce qui est mesuré en moyenne sur le reste du trajet, à savoir 128 500 contre 58 500 particules par  $\text{cm}^3$ .



**Figure 58 : Impact d'un véhicule précédant le véhicule équipé de moyens de mesure sur les teneurs de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}$  et  $\text{NO}_2$  et le nombre de particules dans l'habitacle lors du trajet du 27/06/08 entre Paris 20<sup>ème</sup> et Paris 10<sup>ème</sup> arrondissement.**

De plus, concernant les oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>), le ratio entre ces deux polluants est très différent par rapport à ce que l'on peut enregistrer sur le reste du trajet. En effet, on obtient derrière ce véhicule jusqu'à près de trois fois plus de NO<sub>2</sub> que de NO, chose que l'on n'observe pas en suivant d'autres véhicules sur le reste du parcours, puisque les teneurs de NO dans l'habitacle sont généralement plus importantes que celles de NO<sub>2</sub> (jusqu'à près de 5 fois plus de NO que de NO<sub>2</sub>). Néanmoins, en NO<sub>x</sub> on retrouve au début du trajet des concentrations similaires à ce qui a été mesuré derrière ce véhicule avec des teneurs de 1 200 µg/m<sup>3</sup>.

**Ces différents exemples illustrent l'influence du véhicule précédent sur les teneurs mesurées dans l'habitacle. En effet, certains véhicules spécifiques, différents de la plupart des autres véhicules en terme de profil d'émission ont une influence non négligeable sur l'exposition de l'automobiliste. C'est le cas notamment des poids lourds, dont les émissions d'oxydes d'azote et de particules sont beaucoup plus importantes qu'un véhicule particulier, et de certains véhicules équipés de filtres à particules qui entraînent certes une baisse importante du nombre de particules mais qui émettent beaucoup plus de dioxyde d'azote qu'un véhicule « moyen ».**

#### 7.4. Perspectives : mesures d'autres polluants

La faisabilité de mesures dans l'habitacle et le développement technique des méthodes de mesures de benzène et de particules PM10 ont été testées par Airparif durant la campagne. Ainsi, le développement des mesures au cours de l'étude a permis, sur certains trajets, d'instrumenter le véhicule test afin d'obtenir des résultats pour ces deux polluants.

Les méthodologies employées pour les mesures de benzène (tube pompé) et de concentrations massiques de particules inférieures à 10 µm (PM10) sont présentées pour le benzène en ANNEXE 15 et pour les particules PM10 en ANNEXE 16.

Il est important de noter que pour ces deux polluants, **une seule donnée correspondant à une valeur moyenne sur l'ensemble d'un circuit est disponible**. Cela ne permet donc pas d'obtenir une donnée sur chaque typologie de trajet définie, comme c'était le cas pour les concentrations de dioxyde d'azote et le comptage de particules, mais seulement une donnée moyenne quelle que soit la typologie de trajets composant le circuit.

Le temps d'exposition comprend également les périodes de pose entre les trajets où le véhicule est garé (généralement en situation non influencée par le trafic routier), afin d'aérer l'habitacle en vue de réaliser le trajet suivant sans prendre en compte l'accumulation de la pollution du trajet précédent.

##### 7.4.1 Benzène

21 circuits<sup>39</sup> ont fait l'objet de mesures de benzène par tubes actifs avec une durée moyenne d'exposition de 3 h 30.

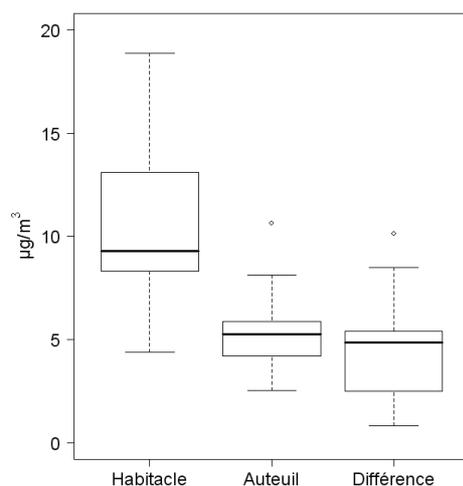
La station permanente d'Auteuil<sup>40</sup> dispose également de mesures de benzène<sup>41</sup> pouvant être comparées<sup>42</sup> à ces données. La Figure 59 présente, sur les mêmes périodes de mesure, les distributions des données de l'habitacle celles d'Auteuil et la différence entre les deux.

---

<sup>39</sup> Les circuits empruntés lors des mesures de benzène sont les circuits A (à deux reprises), B, C (à deux reprises), D, E, F, G, J, L, M, N, P, Q, R (à deux reprises), S (à deux reprises), U et V.

<sup>40</sup> Station située sur le périphérique extérieur au niveau de la porte d'Auteuil.

<sup>41</sup> NF EN 14662-3 (Décembre 2005) : Qualité de l'air ambiant - Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en benzène - Partie 3 : prélèvement par pompage automatique avec analyse chromatographique en phase gazeuse sur site.



**Figure 59 : Boîtes à moustaches des concentrations de benzène (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) observées durant la même période dans l'habitacle du véhicule et à la station « Auteuil » du réseau permanent. La différence entre les deux est également présentée.**

En moyenne, les concentrations de benzène mesurées sur les différents circuits étudiés sont de  $10,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et varient de  $4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $18,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Les trois quarts des données de l'étude sont supérieures à  $8,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  quand les données mesurées à Auteuil ne dépassent pas  $10,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . De manière générale, les données mesurées dans l'habitacle sont près de 2 fois supérieures à celles observées à la station « Auteuil ».

Ces résultats sont également du même ordre de grandeur que ceux observés lors d'une précédente étude d'Airparif sur l'air intérieur de l'habitacle de différentes voitures<sup>43</sup> qui variaient entre  $8,3$  et  $20,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Des mesures dans des voitures en stationnement avaient également été effectuées avec des niveaux compris entre  $1,4$  et  $11,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

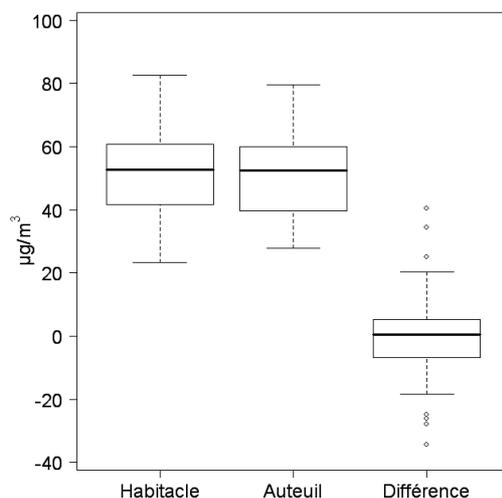
Ces premières mesures montrent la présence de concentrations de benzène souvent importantes dans l'habitacle du véhicule et illustrent l'importance de plus amples recherches sur le sujet. Ce type de mesure pourrait être intégré à l'avenir dans les différentes études d'exposition des automobilistes et dans les transports en général.

<sup>42</sup> Ces mesures de benzène ont été préalablement redressées afin d'être comparées aux mesures effectuées par tubes actifs.

<sup>43</sup> « Mesures et caractérisation de l'air à l'intérieur de l'habitacle de voitures » - Airparif, Octobre 2007. [http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/autoplus\\_rapport.pdf](http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/autoplus_rapport.pdf)

#### 7.4.2 Concentrations massiques de particules

Les mesures de concentrations de particules inférieures à 10 µm ont été effectuées lors de la réalisation de 63 circuits<sup>44</sup>. Les données ainsi obtenues sont très proches en moyenne de celles de la station permanente d'Auteuil comme le montre la Figure 60.



**Figure 60 : Boîtes à moustaches des concentrations de PM10 (en µg/m<sup>3</sup>) observées durant la même période dans l'habitacle du véhicule et à la station « Auteuil » du réseau permanent. La différence entre les deux est également présentée.**

La moyenne des concentrations observées dans l'habitacle sur l'ensemble des parcours est de 52 µg/m<sup>3</sup>. Les données prennent en compte les temps d'arrêt entre chaque trajet représentant environ 8 % du temps de la mesure. La méthode actuelle de mesures dans l'habitacle ne permet pas de mettre en évidence la variabilité des niveaux entre les différents environnements (types d'axe routier, densité de trafic, zones géographiques urbaines ou rurales,...). Les niveaux moyens étant équivalents à ceux d'Auteuil (52 µg/m<sup>3</sup> : calcul sur les mêmes périodes) il est clair que dans certaines situation (tunnels, axes principaux...) l'exposition aux particules est plus importante qu'en situation de proximité. Inversement en milieu rural, sur les axes secondaires et lors des périodes de pause entre chaque trajet les niveaux sont plus faibles.

<sup>44</sup> Chacun des 22 circuits a été étudié au moins une fois.

## 8. Conclusion

L'objectif de l'étude était de fournir des informations sur l'exposition des franciliens dans leur automobile lors des trajets « Domicile-Travail » selon leurs déplacements vers les principaux pôles d'emplois définis à Paris et en Petite et Grande-Couronne.

4 300 kilomètres en voiture ont été effectués pour réaliser les 282 trajets « Domicile – Travail » accomplis pour moitié le matin (« Domicile – Travail » de 7h – 10h) et le soir (« Travail – Domicile » de 17h – 20h). C'est ainsi plus de 108 000 données de qualité de l'air (NO<sub>2</sub> et comptage de particules) qui ont été recueillies au pas de temps 10 secondes sur les huit types de trajets définis entre Paris et la Petite et la Grande Couronne.

Les niveaux de dioxyde d'azote et le nombre de particules dans l'habitacle de la voiture, varient de façon similaire selon plusieurs facteurs d'influence.

### **Des niveaux plus importants pour les trajets radiaux « Banlieue-Paris » :**

Si la hiérarchie des niveaux de polluant mesurés dans l'habitacle entre les différentes typologies n'est pas toujours marquée, notamment en raison de la variabilité des teneurs observées lors des trajets « Domicile-Travail », les résultats permettent plusieurs enseignements. Les données recueillies lors des trajets dont les tracés sont en direction de Paris ou sortent de la Capitale sont supérieures à celles des typologies des trajets internes à la « Grande-Couronne » et à « Paris ». Les valeurs les plus importantes observées en direction de Paris sont dues à un trafic routier plus dense le matin en direction de la Capitale et le soir dans le sens des retours « Paris-Province ». Les niveaux d'exposition les plus faibles observés en « Grande-Couronne » sont liés à un trafic routier moins dense sur des axes de circulation moins importants et à un niveau de fond plus faible dans cette zone géographique. Malgré un niveau de fond qui est plus élevé à Paris, les trajets « Domicile-Travail » effectués dans la Capitale n'ont pas concerné les axes routiers les plus denses tels que le Boulevard Périphérique d'où des niveaux dans l'habitacle parmi les plus faibles.

Pour les autres typologies, les teneurs mesurées dans l'habitacle ne peuvent pas être statistiquement différenciées des plus fortes (entrées ou sortie de Paris) ou des plus faibles (trajets internes « Grande-Couronne » et « Paris »).

### **Impact des aménagements routiers, le cas des tunnels :**

La variabilité importante des teneurs relevées sur certaines typologies de trajets a conduit à la recherche d'autres facteurs d'explication que celui de la zone géographique (Paris, Petite-Couronne et Grande-Couronne). Différents exemples ont mis en relief l'impact des tunnels sur les niveaux de dioxyde d'azote et le nombre de particules mesurés dans l'habitacle de la voiture sur l'ensemble d'un trajet. Les niveaux mesurés sur les trajets « Tunnel » (circulation dans un tunnel pendant plus de 5 % de la durée totale du trajet) sont significativement supérieurs aux trajets n'empruntant pas ou très peu de tunnel (absence ou circulation dans un tunnel pendant moins de 5 % de la durée totale du trajet). Cela est principalement dû à une accumulation de la pollution dans le tunnel entraînée par le confinement (dispersion des polluants réduite par rapport à l'extérieur) dans ce type d'aménagement.

### **Variabilité des niveaux en « Grande-Couronne », hétérogénéité urbaine :**

Les niveaux de pollution rencontrés dans l'habitacle sont très différents selon les trajets effectués en « Grande-Couronne » compte tenu des environnements géographiques que l'on rencontre pour se rendre aux pôles d'emplois. Les niveaux les plus forts sont observés lorsque

l'on circule en milieu urbain et que l'on emprunte les axes routiers majeurs comme c'est le cas entre Franconville et « Cergy » alors qu'en circulant en milieu rural sur des axes secondaires (route Départementale) pour se rendre d'une commune rurale (Marine) à ce même pôle d'emplois les teneurs sont beaucoup plus faibles. Contrairement à Paris et à la « Petite-Couronne », la « Grande-Couronne » ne présente pas d'unité géographique puisque l'on y trouve une zone urbaine dense (périphérie de l'agglomération parisienne) et une large zone rurale.

Cela démontre le rôle à la fois de l'environnement géographique (urbain ou rural) et de la densité de trafic routier de l'axe emprunté (route départementale, nationale, autoroute) sur la qualité de l'air relevée dans l'habitacle de la voiture.

### **Influence du véhicule suivi parfois importante :**

L'influence du véhicule suivi sur les teneurs mesurées dans l'habitacle a également été mise en évidence par différents exemples. En effet les mesures derrière certains véhicules spécifiques, différents de la plupart des autres véhicules en terme de profil d'émission ont permis de vérifier l'influence non négligeable sur l'exposition de l'automobiliste. C'est le cas notamment des poids lourds, dont les émissions d'oxydes d'azote et de particules sont beaucoup plus importantes qu'un véhicule particulier, et de certains véhicules équipés de filtres à particules qui entraînent certes une baisse importante du nombre de particules mais qui émettent beaucoup plus de dioxyde d'azote qu'un véhicule « moyen ».

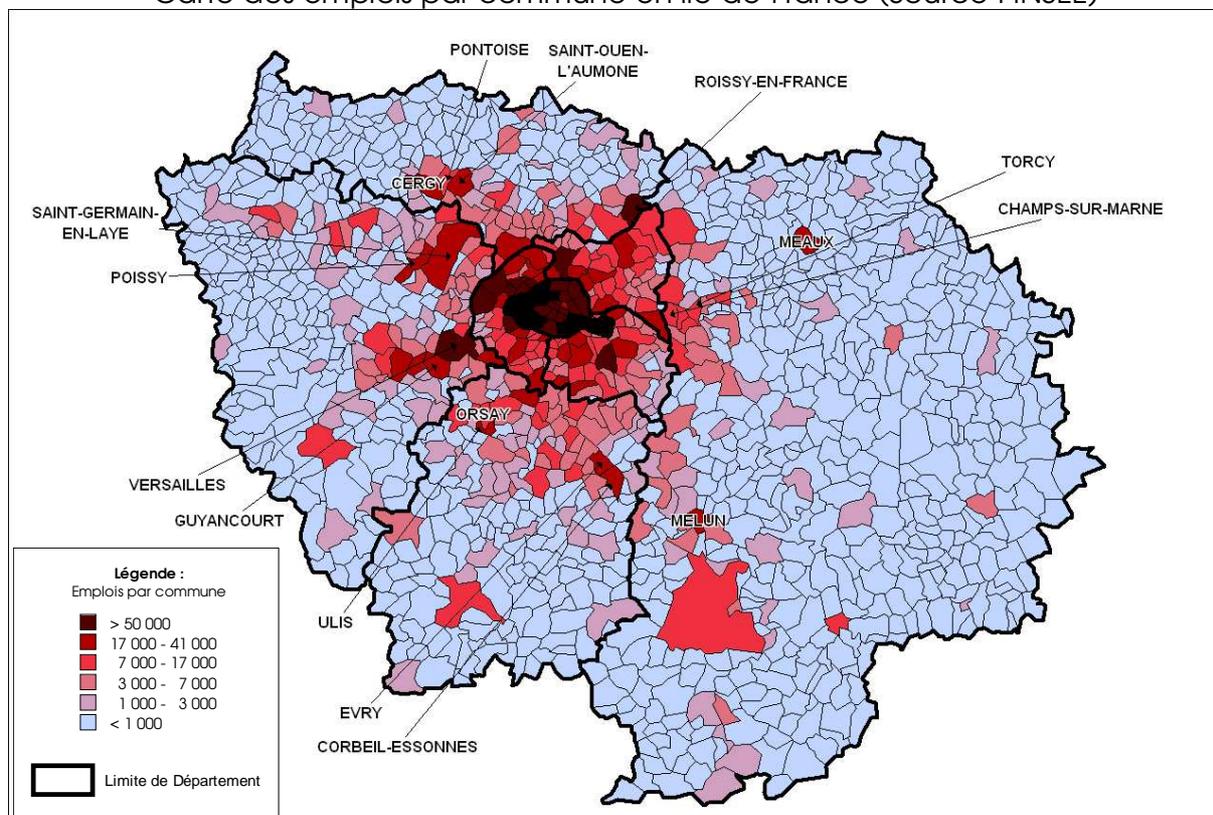
Les résultats de cette étude permettent de mieux connaître les niveaux de pollution atmosphérique rencontrés dans l'habitacle d'une voiture lors des parcours « Domicile – Travail » en période de pointe de trafic. Elle pourra être poursuivie par des exploitations complémentaires de la base de données ainsi constituée. Ce travail s'intègre dans les travaux d'estimation fine de l'exposition d'un francilien au cours de sa journée notamment suivant les modes de transports qu'il utilise.

# **ANNEXES**

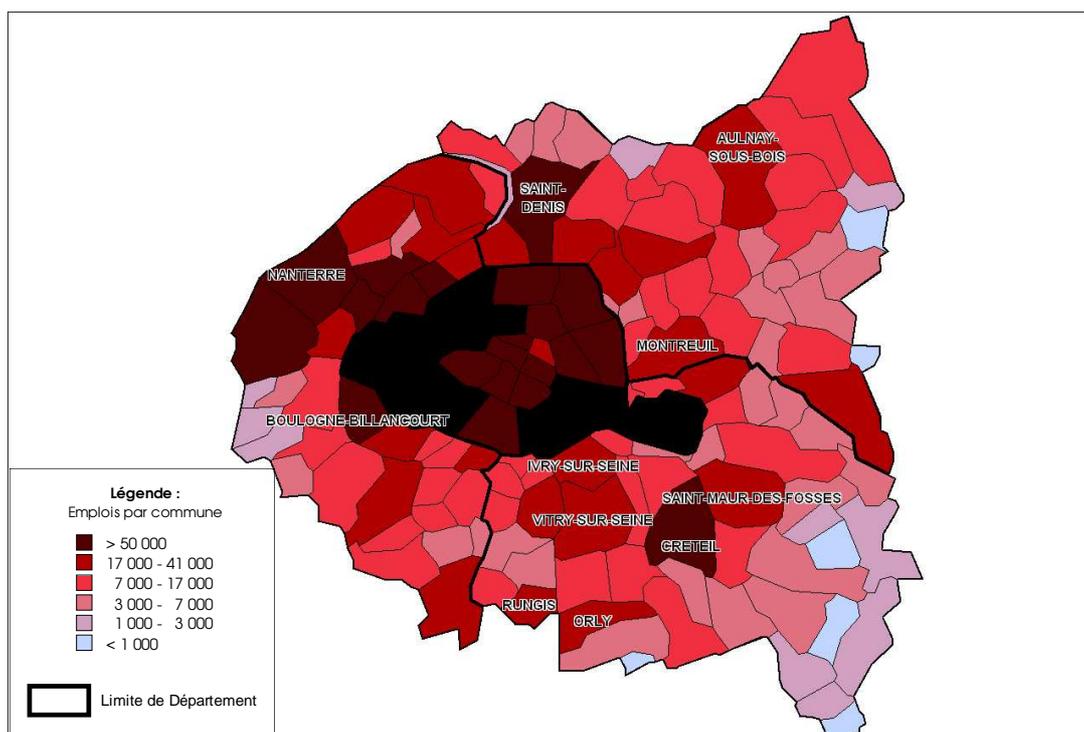
## **EXPOSITION DES FRANCILIENS A LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE LIEE AU TRAFIC ROUTIER : TRAJET « DOMICILE-TRAVAIL »**

# ANNEXE 1

Carte des emplois par commune en Île-de-France (Source : INSEE)



Zoom : Carte des emplois à Paris et Petite-Couronne (Source : INSEE).



## ANNEXE 2

**Part (en nombre et en %) des franciliens utilisant comme moyen de transport leur voiture pour aller travailler dans les pôles d'emplois définis en Grande-Couronne et en Petite-Couronne.**

Pole d'emplois	Nombre d'emplois	% d'emplois en Grande-Couronne	Nombre de salariés venant en voiture	% de salariés venant en voiture
Saint-Germain-en-Laye	39 564	2%	21 776	55%
Versailles	105 862	6%	92 757	56%
Cergy	63 061	4%	38 019	60%
Roissy-en-France	63 197	4%	38 227	60%
Meaux	22 235	1%	13 966	63%
Orsay	66 483	4%	42 711	64%
Marne-La-Vallée	35 286	2%	23 023	65%
Melun	25 997	2%	17 128	66%
Evry	58 035	4%	40 301	69%

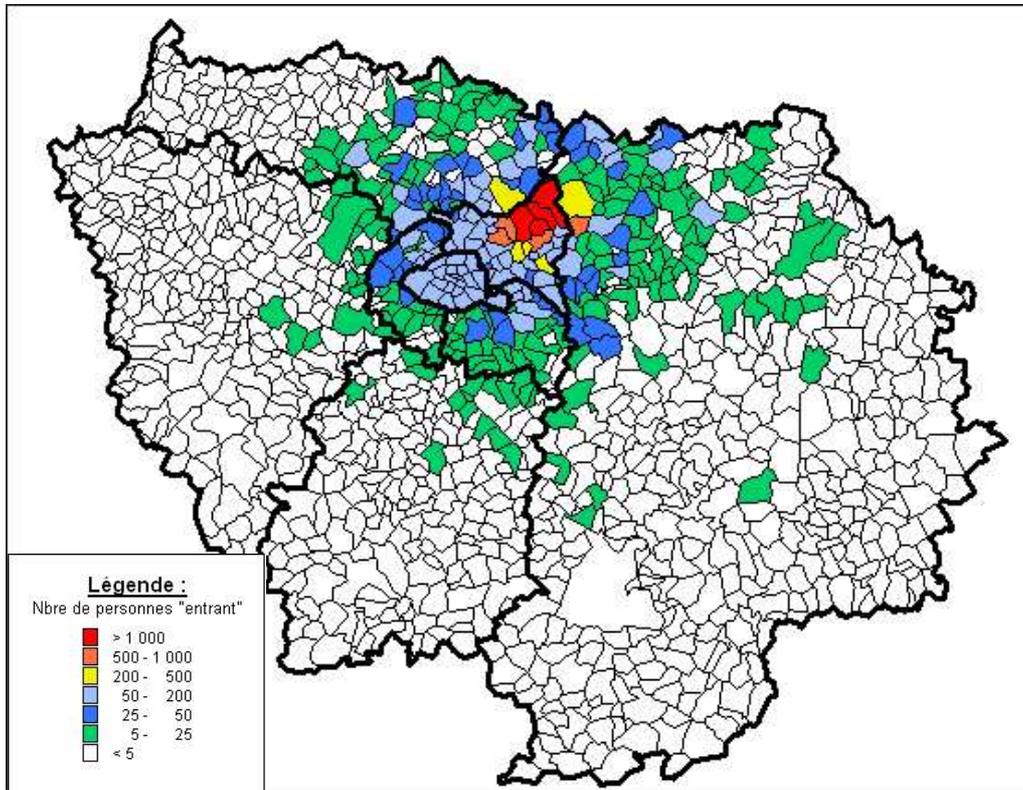
Pôles d'emplois de la Grande-Couronne

Pole d'emplois	Nombre d'emplois	% d'emplois en Petite-Couronne	Nombre de salariés venant en voiture	% de salariés venant en voiture
La Défense	219 015	13%	66 870	31%
Boulogne-Billancourt	106 859	6%	39 246	37%
Saint-Denis	101 858	6%	39 276	39%
Montreuil	72 272	4%	30 987	43%
Vitry	51 426	3%	27 794	54%
Aulnay-sous-Bois	42 637	2%	23 901	56%
Créteil	70 563	4%	41 485	59%
Orly	53 766	3%	42 124	78%

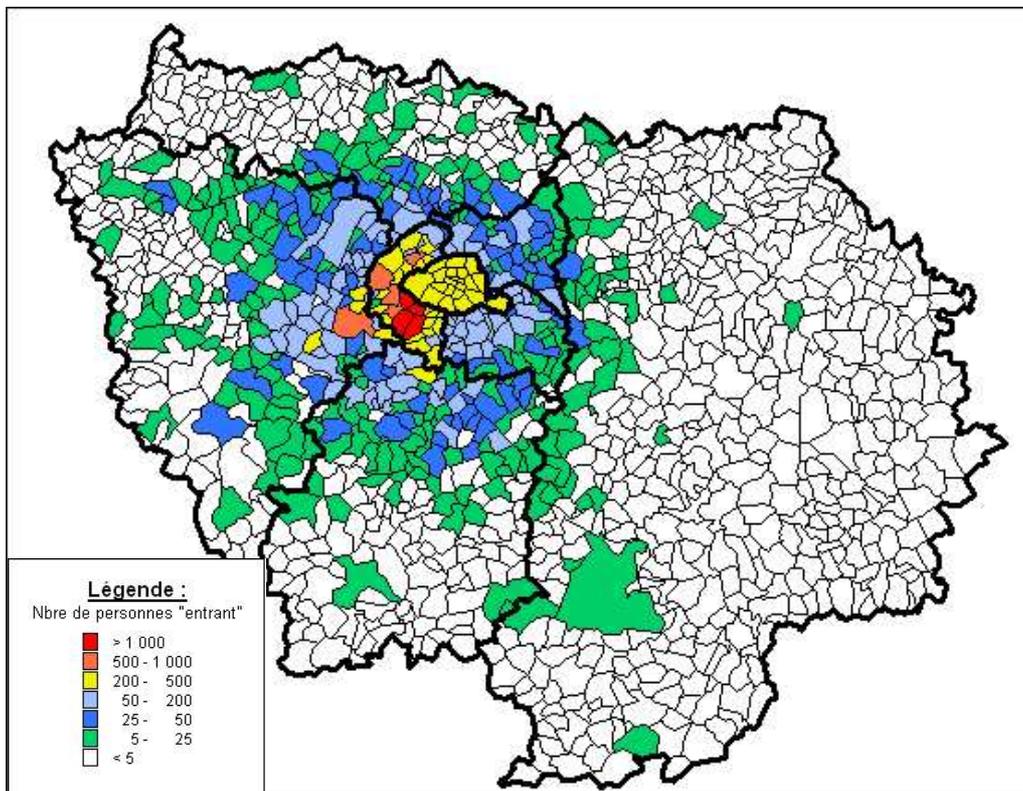
Pôles d'emplois de la Petite-Couronne

### ANNEXE 3

Cartographie du nombre d'actifs « entrant » dans le pôle d'emplois défini

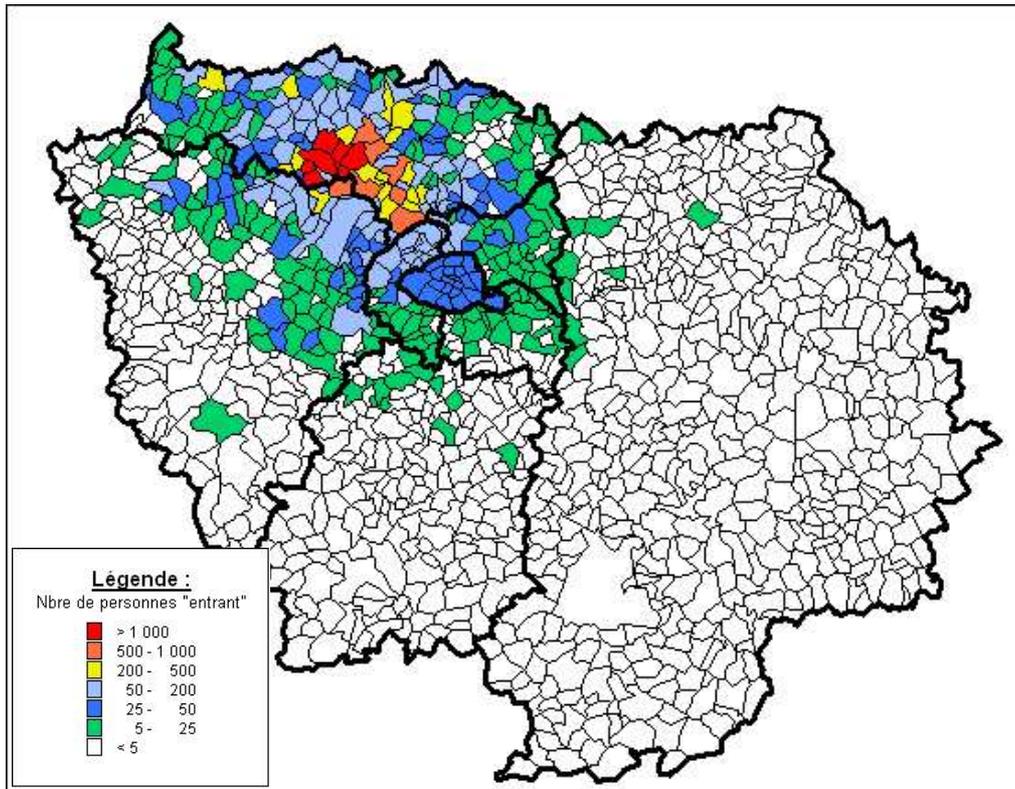


Pôle d'emplois « d'Aulnay-sous-Bois » : Zone Petite-Couronne

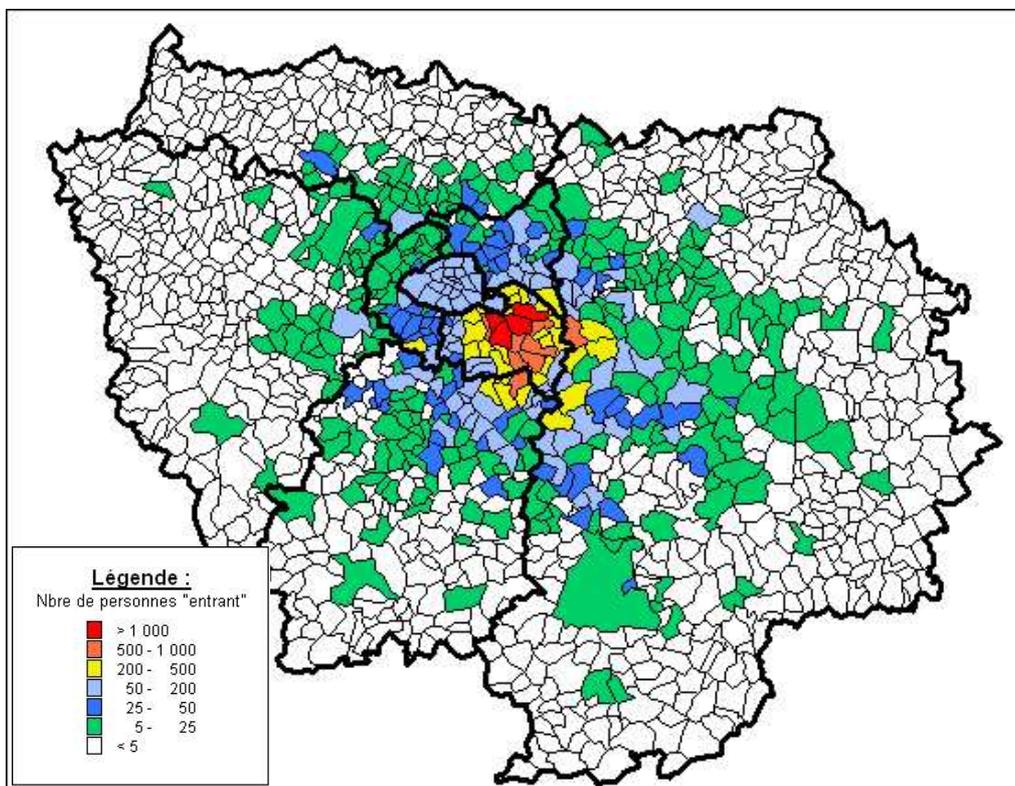


Pôle d'emplois de « Boulogne-Billancourt » : Zone Petite-Couronne

### ANNEXE 3 (Suite)

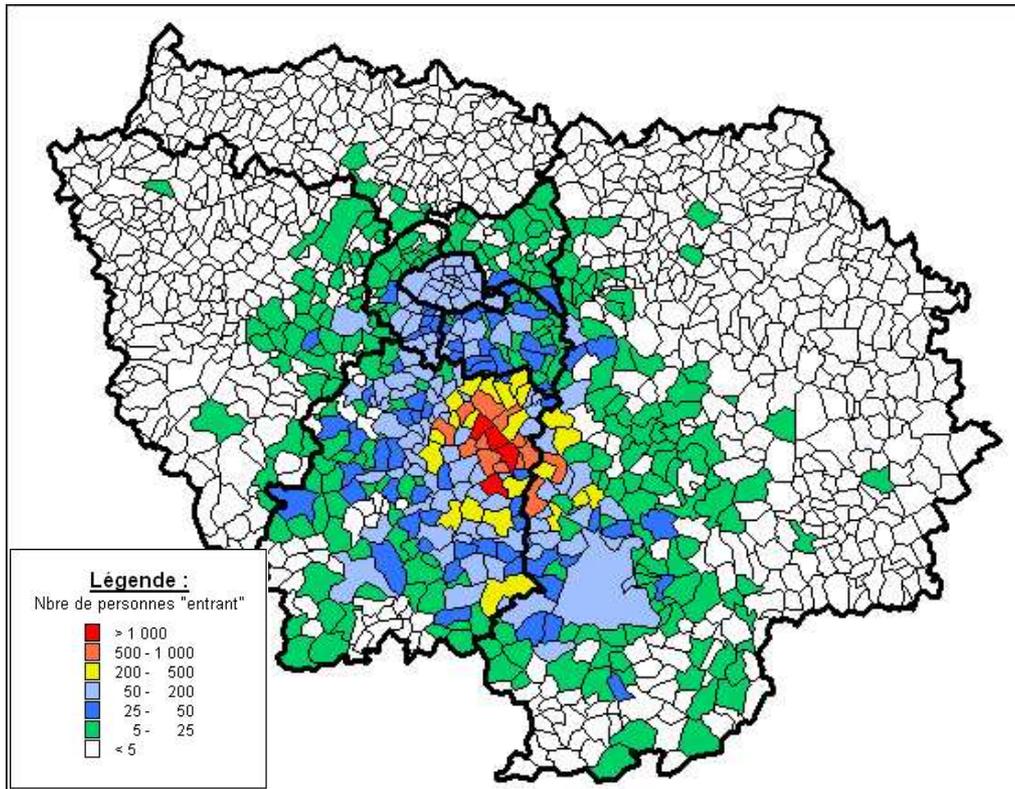


Pôle d'emplois de « Cergy » : Zone Grande Couronne

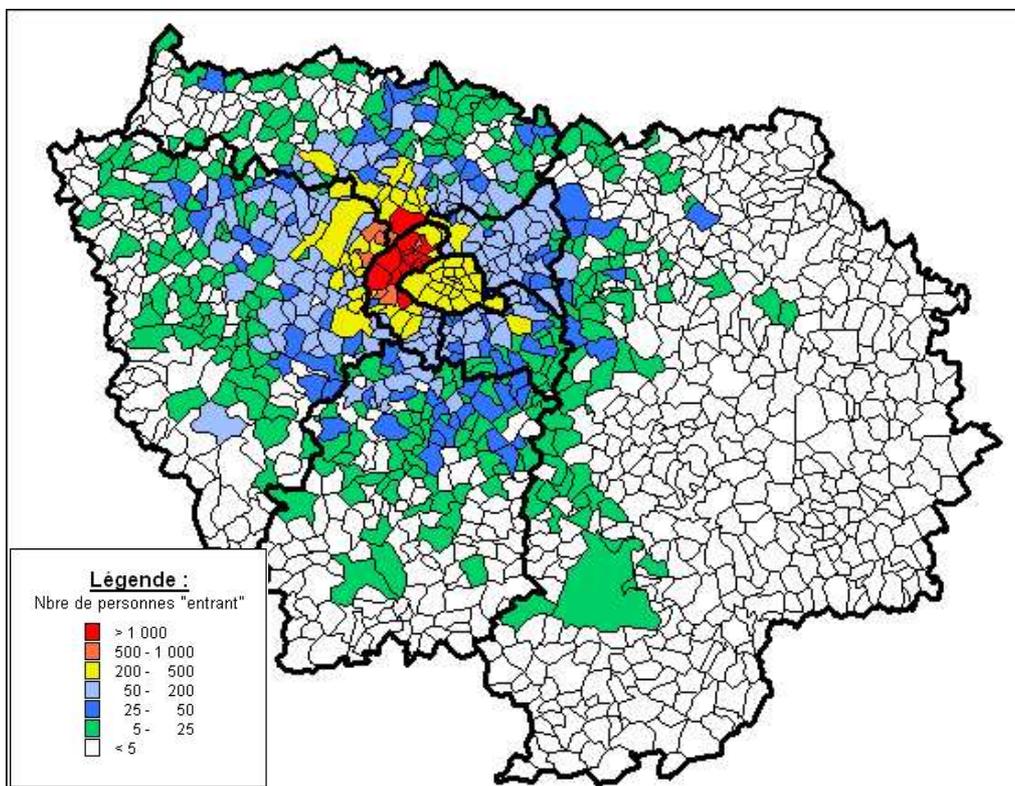


Pôle d'emplois de « Créteil » : Zone Petite-Couronne

### ANNEXE 3 (Suite)

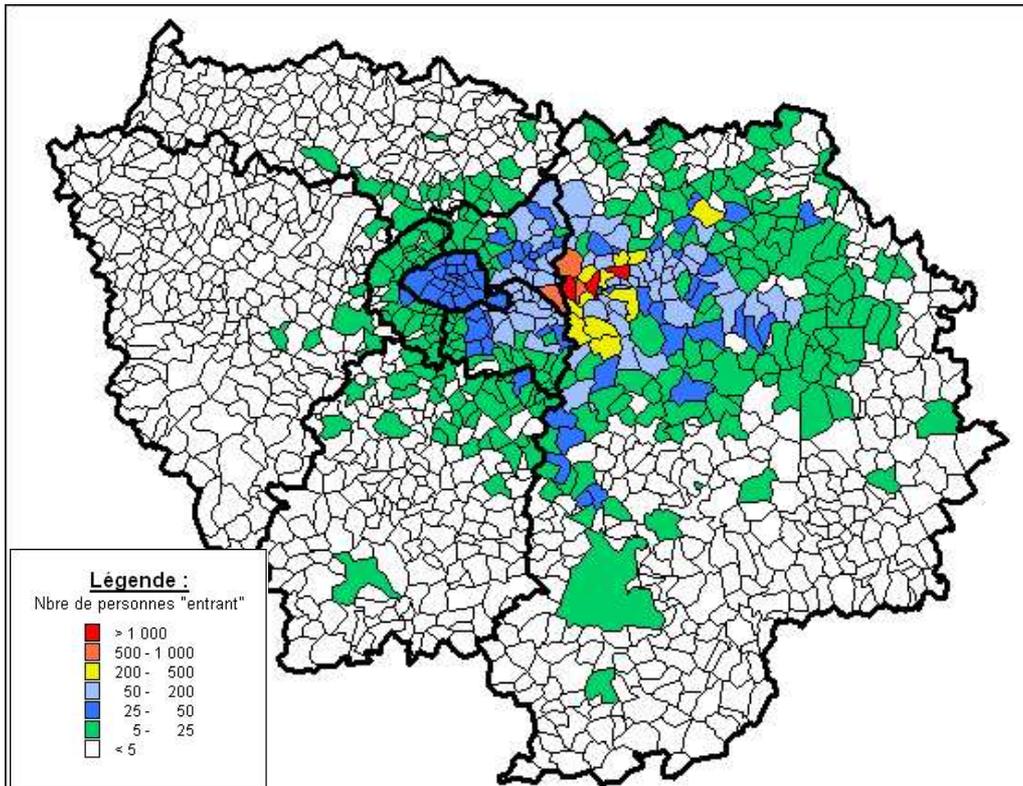


Pôle d'emplois de « Évry » : Zone Grande-Couronne

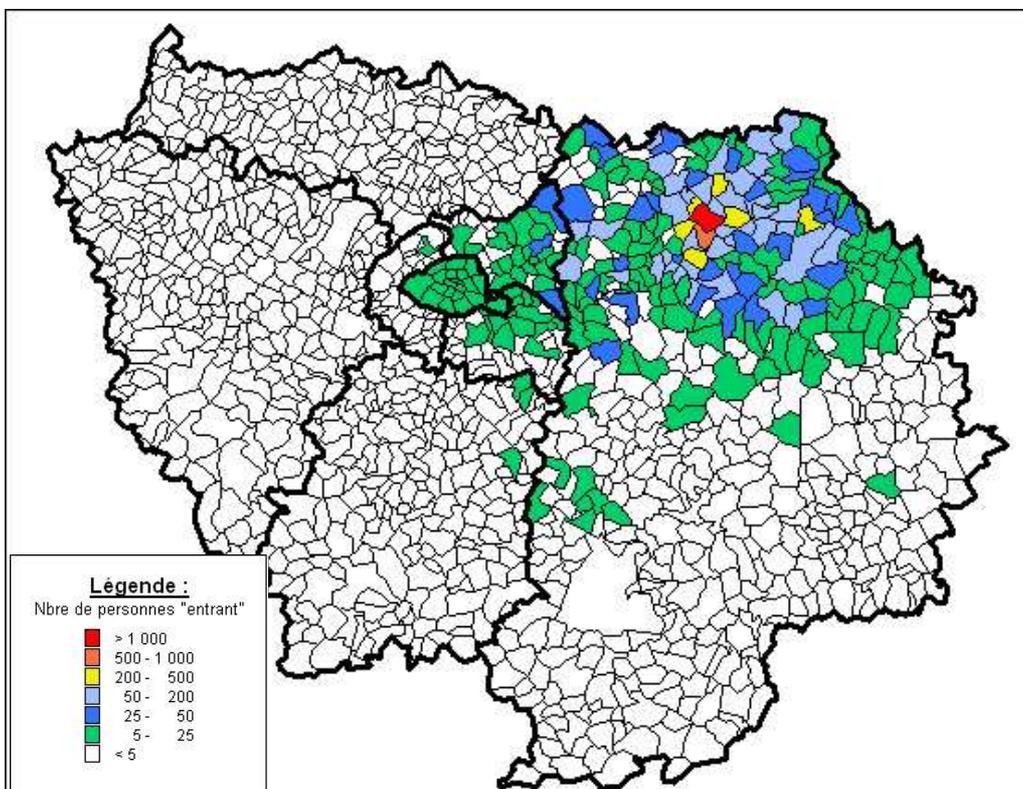


Pôle d'emplois de « La Défense » : Zone Petite-Couronne

## ANNEXE 3 (Suite)

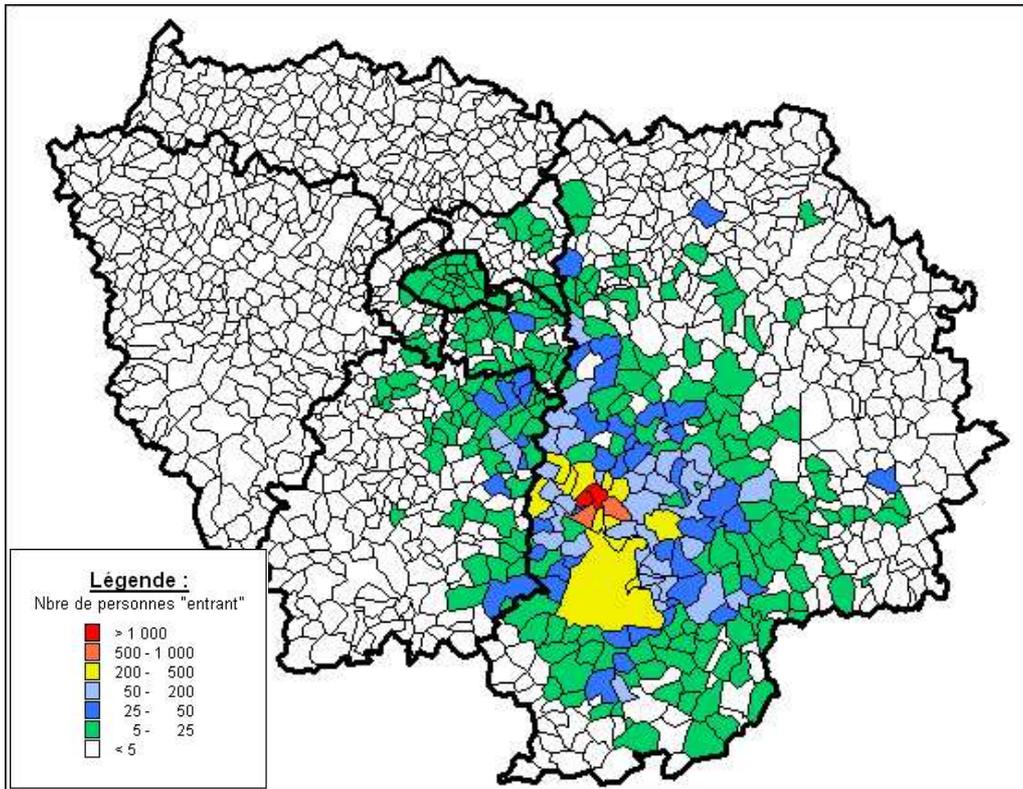


Pôle d'emplois de « Marne-la-Vallée » : Zone Grande-Couronne

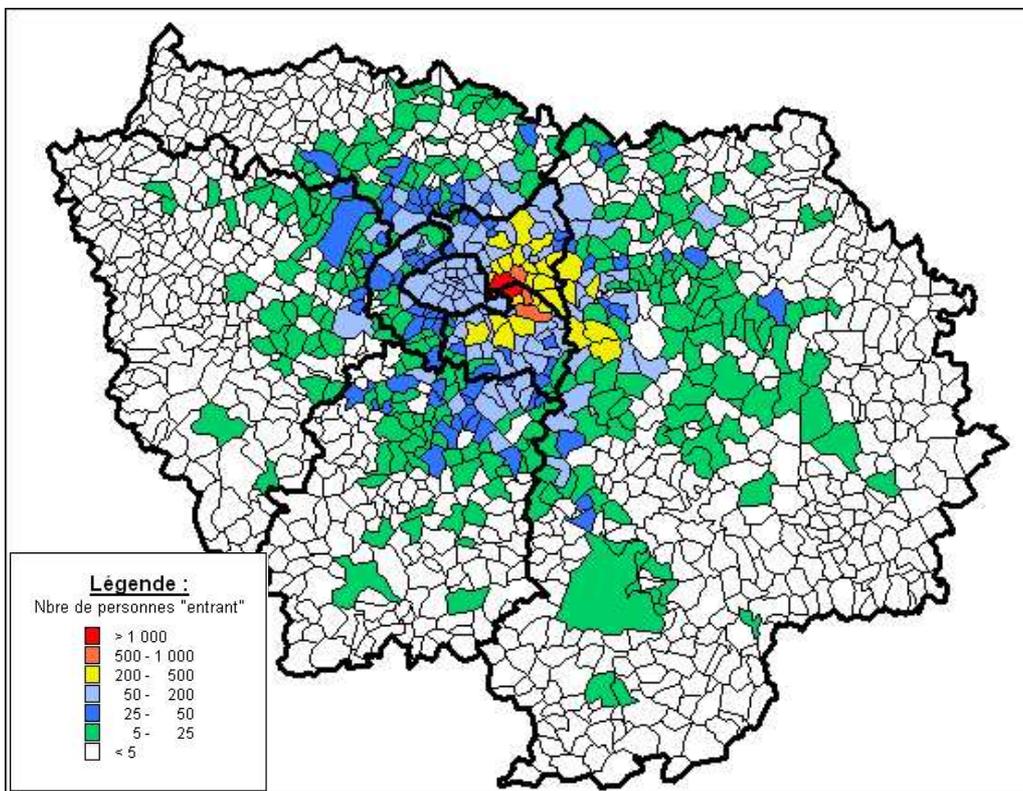


Pôle d'emplois de « Meaux » : Zone Grande-Couronne

### ANNEXE 3 (Suite)

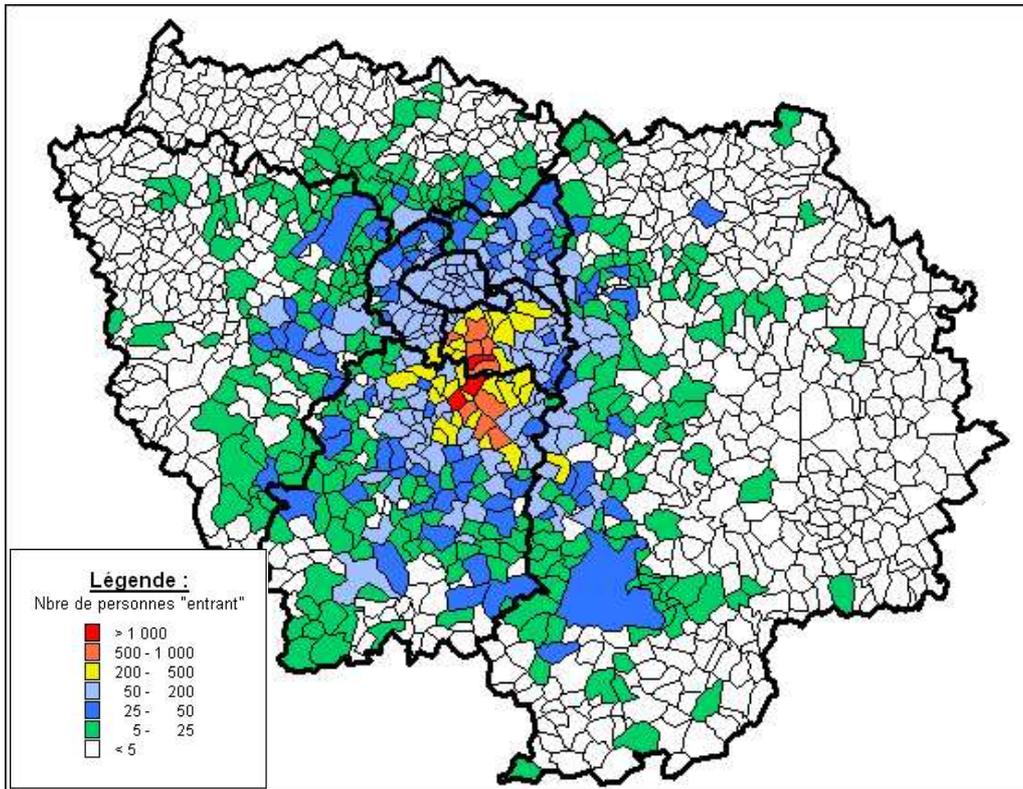


Pôle d'emplois de « Melun » : Zone Grande-Couronne

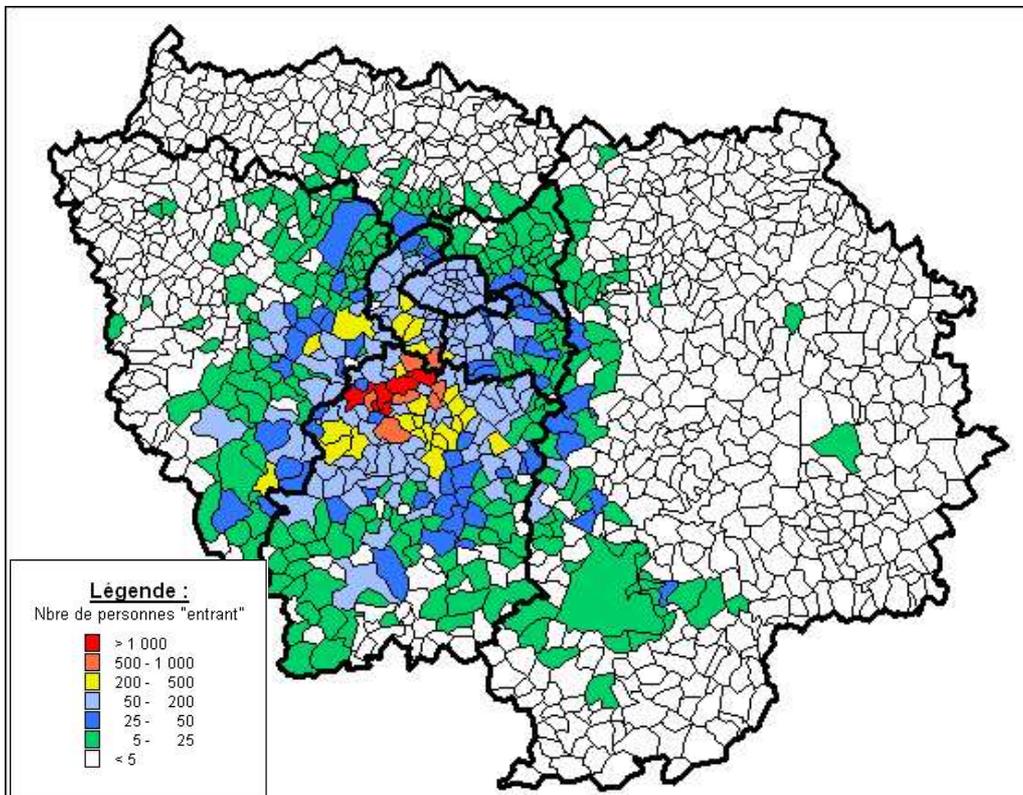


Pôle d'emplois de « Montreuil » : Zone Petite-Couronne

### ANNEXE 3 (Suite)

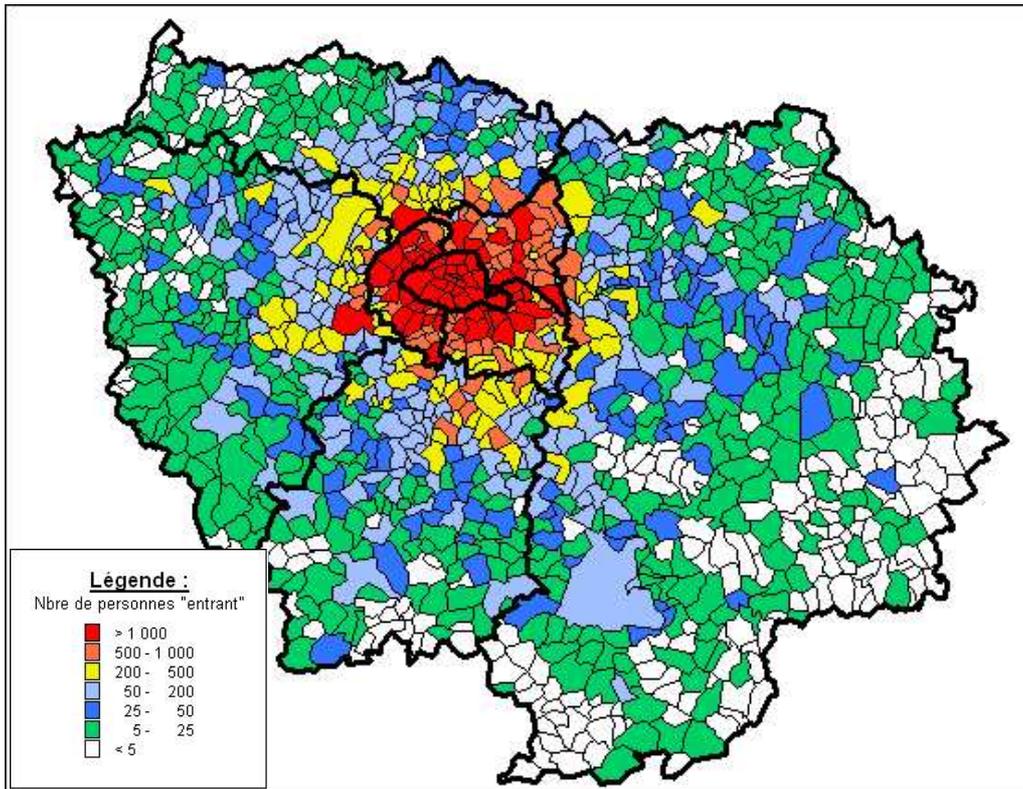


Pôle d'emplois de « Orly » : Zone Petite-Couronne

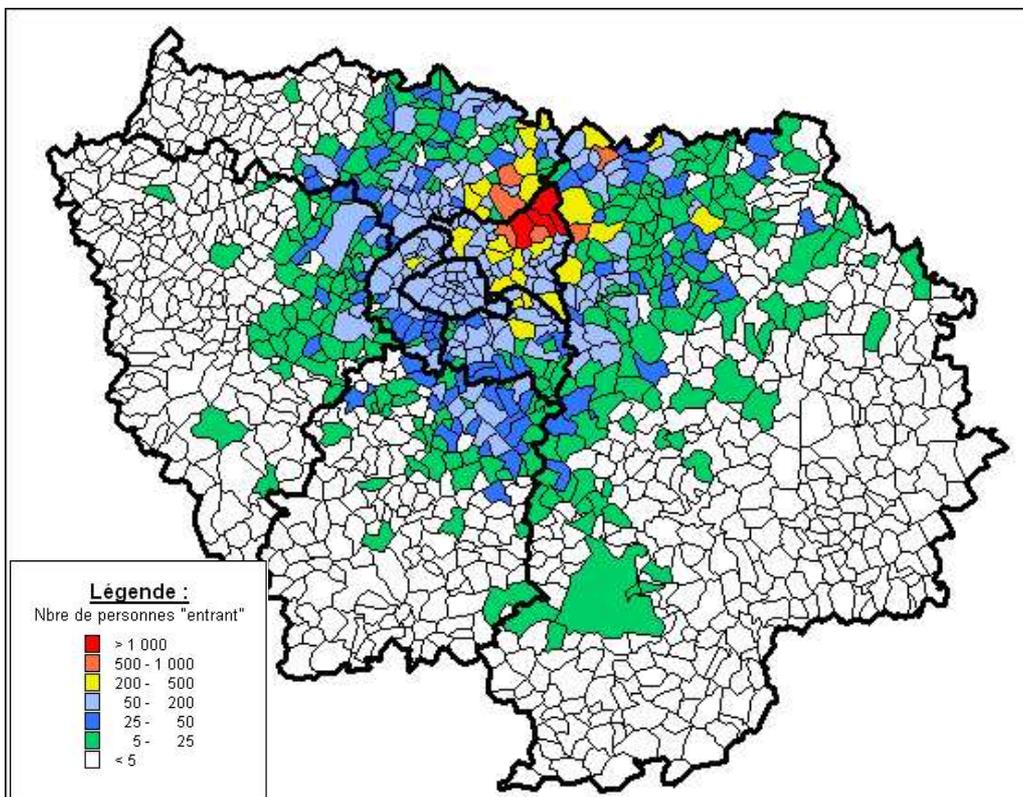


Pôle d'emplois de « Orsay » : Zone Grande-Couronne

### ANNEXE 3 (Suite)

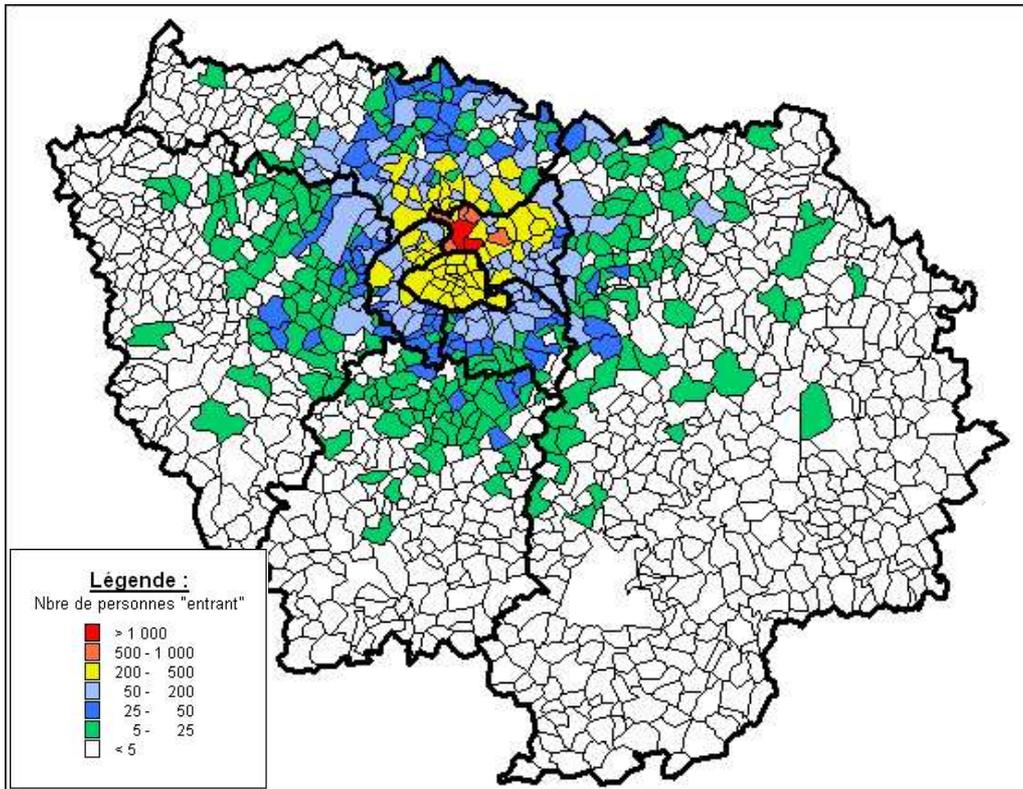


Pôle d'emplois de « Paris » : Zone Paris

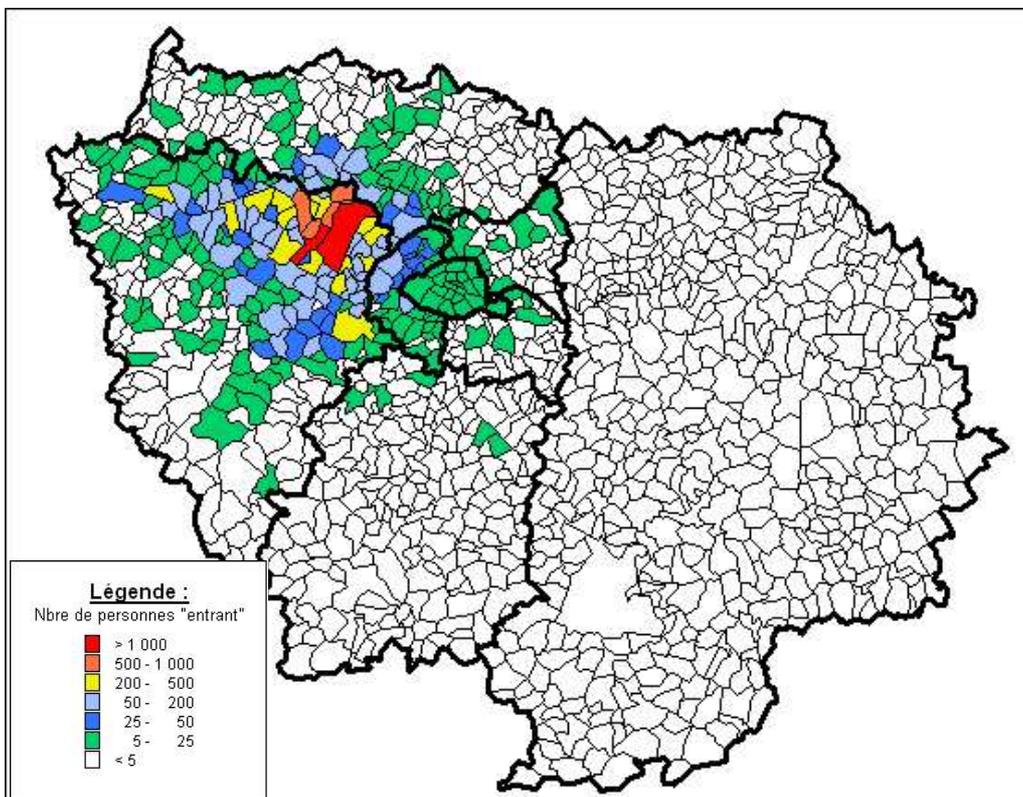


Pôle d'emplois de « Roissy-en-France » : Zone Grande-Couronne

### ANNEXE 3 (Suite)

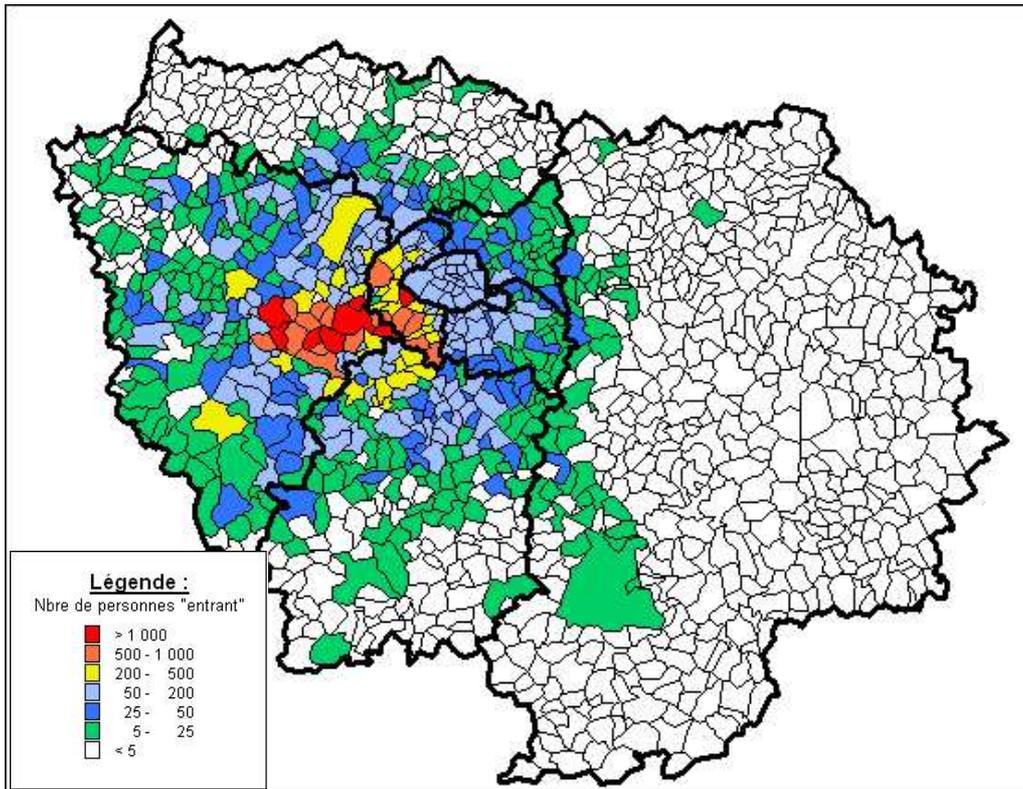


Pôle d'emplois de « Saint-Denis » : Zone Petite-Couronne

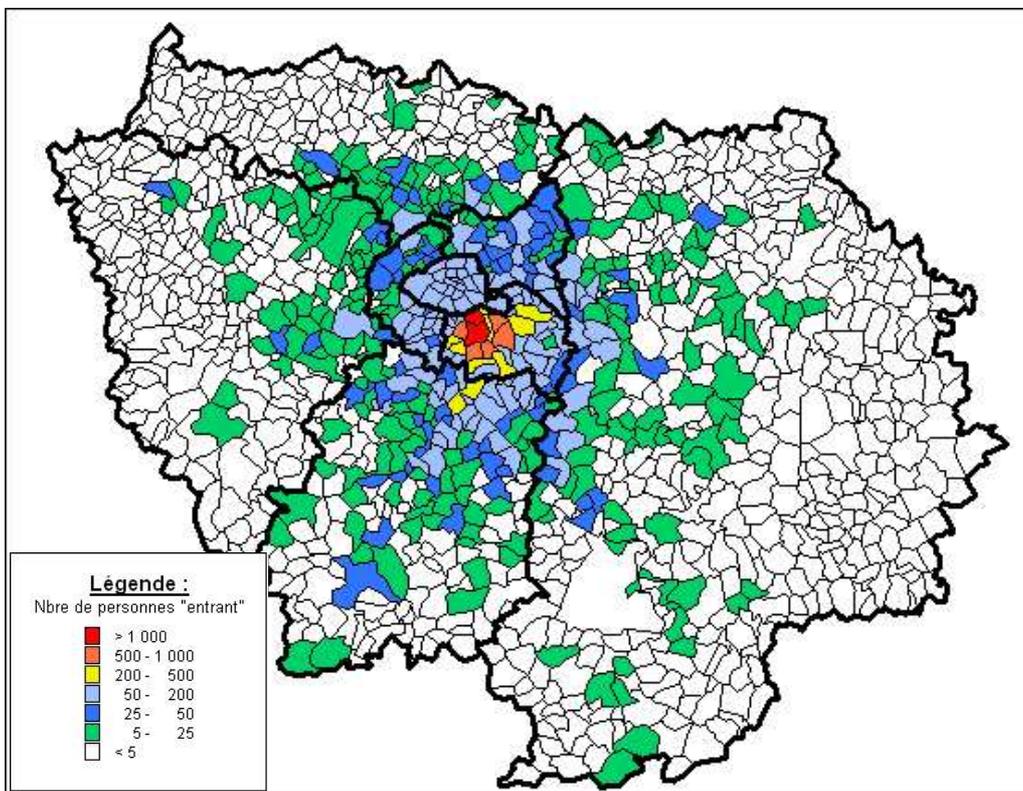


Pôle d'emplois de « Saint-Germain-en-Laye » : Zone Grande-Couronne

### ANNEXE 3 (Suite)



Pôle d'emplois de « Versailles » : Zone Grande-Couronne



Pôle d'emplois de « Vitry-sur-Seine » : Zone Petite-Couronne

## ANNEXE 4

Circuits définis afin de réaliser les trajets « Domicile-Travail »

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
Paris	Boulogne-Billancourt	Paris>PC	Boulogne-Billancourt
Boulogne-Billancourt	Courbevoie	PC>PC	La Défense
<i>Courbevoie</i>	<i>Courbevoie</i>	****	****
Courbevoie	Boulogne-Billancourt	PC>PC	Boulogne-Billancourt
Boulogne-Billancourt	Versailles	PC>GC	Versailles
Versailles	Boulogne-Billancourt	GC>PC	Boulogne-Billancourt
Boulogne-Billancourt	Paris	PC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
Paris	Vitry-sur-Seine	Paris>PC	Vitry-sur-Seine
Vitry-sur-Seine	Créteil	PC>PC	Créteil
Créteil	Orly	PC>PC	Orly
<i>Orly</i>	<i>Viry-Chatillon</i>	****	****
Viry-Chatillon	Palaiseau	GC>GC	Orsay
Palaiseau	Paris	GC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
<i>Paris</i>	<i>Savigny-le-Temple</i>	****	****
Savigny-le-Temple	Melun	GC>GC	Melun
Melun	Corbeil-Essonnes	GC>GC	Evry
Corbeil-Essonnes	Paris	GC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
Paris	Créteil	Paris>PC	Créteil
<i>Créteil</i>	<i>Athis-Mons</i>	****	****
Athis-Mons	Evry	GC>GC	Evry
Evry	Orly	GC>PC	Orly
Orly	Paris	PC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
<i>Paris</i>	<i>Clamart</i>	****	****
Clamart	Orsay	PC>GC	Orsay
Orsay	Guyancourt	GC>GC	Versailles
Guyancourt	Massy	GC>GC	Orsay
Massy	Paris	GC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

## ANNEXE 4 (suite)

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
<i>Paris</i>	<i>Montgeron</i>	****	****
Montgeron	Créteil	GC>PC	Créteil
Créteil	Fontenay-sous-Bois	PC>PC	Montreuil
Fontenay-sous-Bois	Ivry-sur-Seine	PC>PC	Vitry-sur-Seine
Ivry-sur-Seine	Paris	PC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
<i>Paris</i>	<i>Franconville</i>	****	****
Franconville	Saint-Ouen-l'Aumône	GC>GC	Cergy
<i>Saint-Ouen-l'Aumône</i>	<i>Franconville</i>	****	****
Franconville	Courbevoie	GC>PC	La Défense
<i>Courbevoie</i>	<i>Courbevoie</i>	****	****
Courbevoie	Paris	PC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
<i>Paris</i>	<i>Marines</i>	****	****
Marines	Cergy	GC>GC	Cergy
Cergy	Paris	GC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
<i>Paris</i>	<i>Aubergenville</i>	****	****
Aubergenville	Saint Germain en Laye	GC>GC	Saint Germain en Laye
Saint Germain en Laye	Versailles	GC>GC	Versailles
Versailles	Saint Germain en Laye	GC>GC	Saint Germain en Laye
Saint Germain en Laye	Paris	GC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
Paris	Saint Denis	Paris>PC	Saint Denis
Saint Denis	Roissy	PC>GC	Roissy
<i>Roissy</i>	<i>Goussainville</i>	****	****
<i>Goussainville</i>	Aulnay	GC>PC	Aulnay
Aulnay	Roissy	PC>GC	Roissy
Roissy	Aubervilliers	GC>PC	Saint Denis
Aubervilliers	Paris	PC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

## ANNEXE 4 (suite)

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
<i>Paris</i>	<i>Torcy</i>	****	****
Torcy	Meaux	GC>GC	Meaux
Meaux	Champs-sur-Marne	GC>GC	Torcy
Champs-sur-Marne	Paris	GC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
Paris	Saint Denis	Paris>PC	Saint Denis
<i>Saint Denis</i>	<i>Noisy-le-Grand</i>	****	****
Noisy-le-Grand	Torcy	PC>GC	Torcy
Torcy	Montreuil	GC>PC	Montreuil
Montreuil	Paris	PC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
Paris	Montreuil	Paris>PC	Montreuil
<i>Montreuil</i>	<i>Champigny</i>	****	****
Champigny	Torcy	PC>GC	Torcy
<i>Torcy</i>	<i>Champigny</i>	****	****
Champigny	Montreuil	PC>PC	Montreuil
Montreuil	Paris	PC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
Paris	Orly	Paris>PC	Orly
Orly	Vitry-sur-Seine	PC>PC	Vitry-sur-Seine
Vitry-sur-Seine	Rungis	PC>PC	Orly
Rungis	Evry	PC>GC	Evry
Evry	Paris	GC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
Paris	Aulnay	Paris>PC	Aulnay
Aulnay	Saint Denis	PC>PC	Saint Denis
Saint Denis	Aulnay	PC>PC	Aulnay
<i>Aulnay</i>	<i>Gonnesse</i>	****	****
Gonnesse	Paris	GC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

## ANNEXE 4 (suite)

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
Paris	Courbevoie	Paris>PC	La Défense
<i>Courbevoie</i>	<i>Nanterre</i>	****	****
Nanterre	Saint Germain en Laye	PC>GC	Saint Germain en Laye
Saint Germain en Laye	Paris	GC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
Paris	Montreuil	Paris>PC	Montreuil
Montreuil	Roissy	PC>GC	Roissy
<i>Roissy</i>	<i>Dammartin-en-Goele</i>	****	****
Dammartin-en-Goele	Roissy	GC>GC	Roissy
Roissy	Paris	GC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
<i>Paris</i>	<i>Antony</i>	****	****
Antony	Orsay	PC>GC	Orsay
<i>Orsay</i>	<i>Savigny-sur-Orge</i>	****	****
Savigny-sur-Orge	Vitry-sur-Seine	GC>PC	Vitry-sur-Seine
Vitry-sur-Seine	Paris	PC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
<i>Paris</i>	<i>Roissy-en-Brie</i>	****	****
Roissy-en-Brie	Saint-Maur-des-Fossés	GC>PC	Créteil
Saint-Maur-des-Fossés	Paris	PC>Paris	Paris

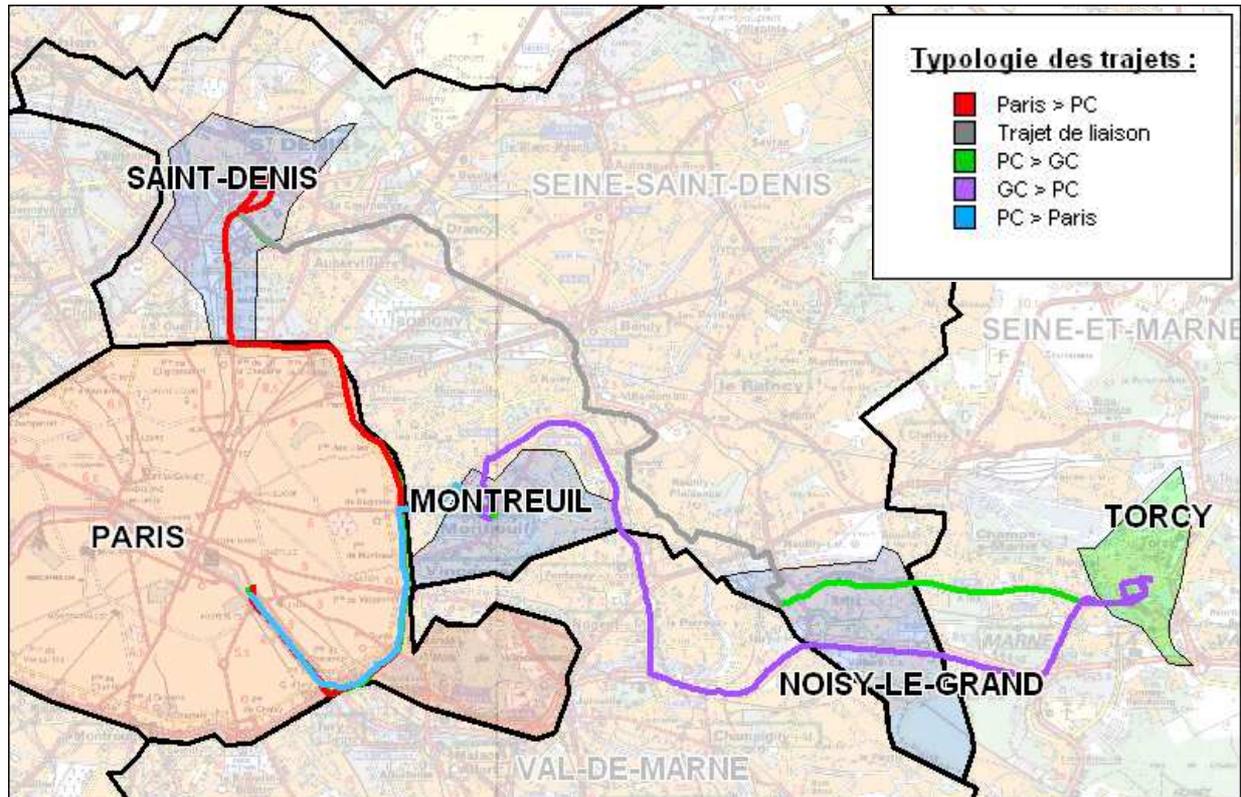
*En italique les trajets uniquement de liaison*

Commune de Départ	Commune d'arrivée	Typologie	Pôle concerné
<i>Paris</i>	<i>Marly-le-Roi</i>	****	****
Marly-le-Roi	Courbevoie	GC>PC	La Défense
<i>Courbevoie</i>	<i>Courbevoie</i>	****	****
Courbevoie	Paris	PC>Paris	Paris

*En italique les trajets uniquement de liaison*

## ANNEXE 5

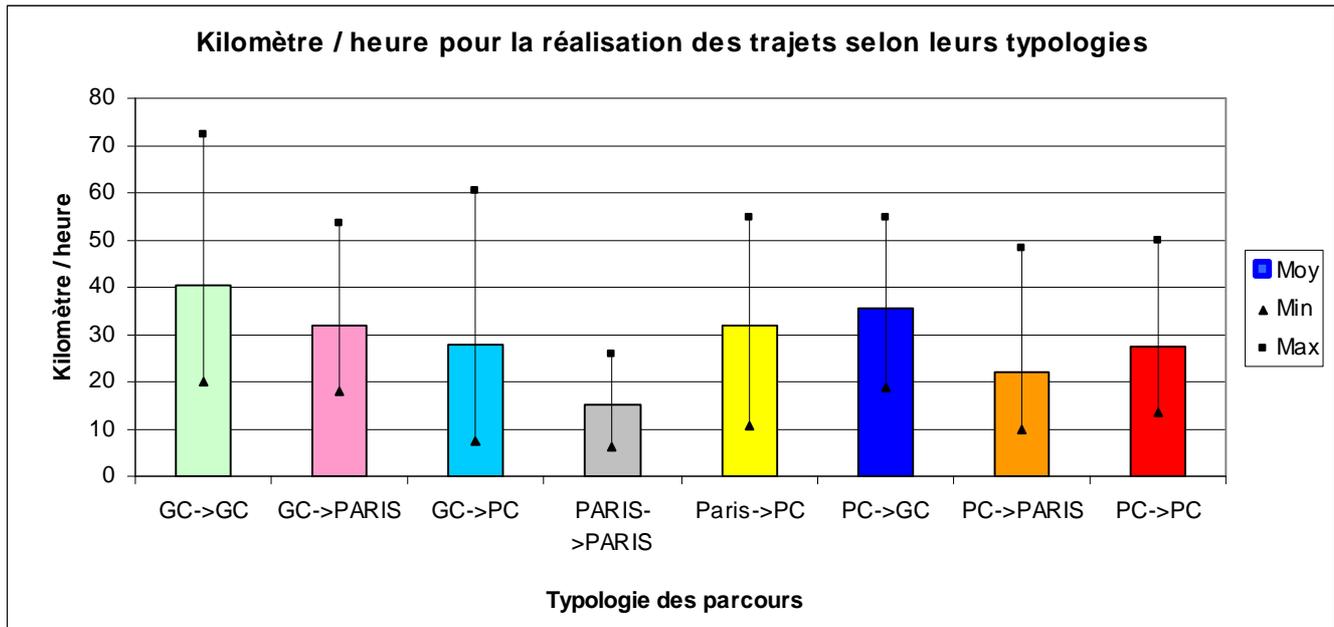
Réalisation en voiture du circuit « L » le 19 novembre 2008 afin de caractériser les niveaux de pollution dans l'habitacle lors des déplacements « Domicile-Travail » conformément au circuit élaboré.



## ANNEXE 6

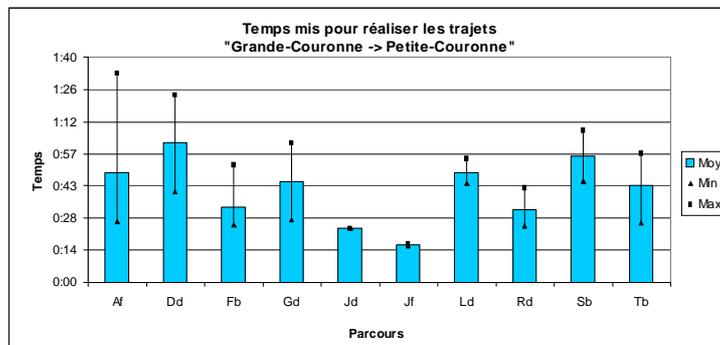
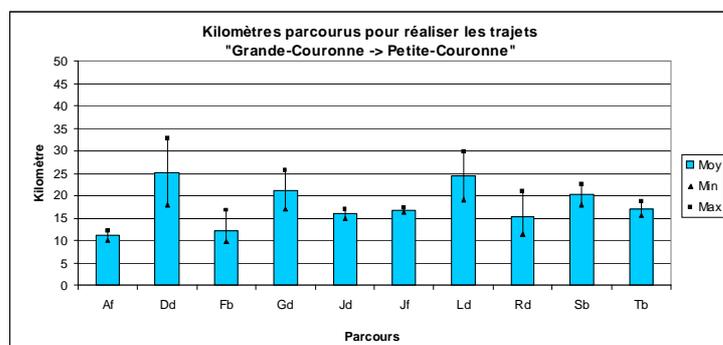
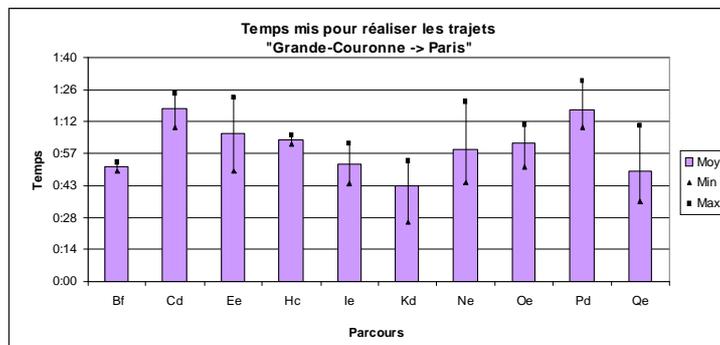
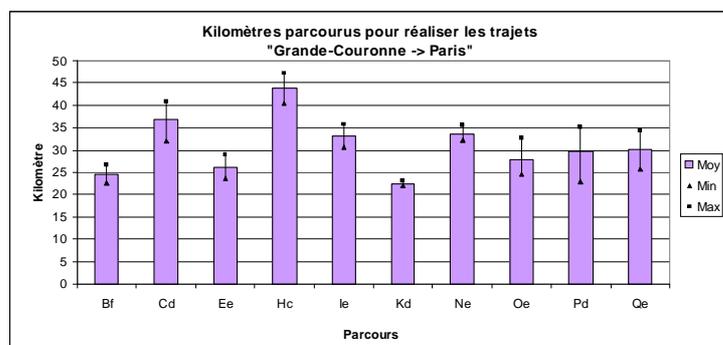
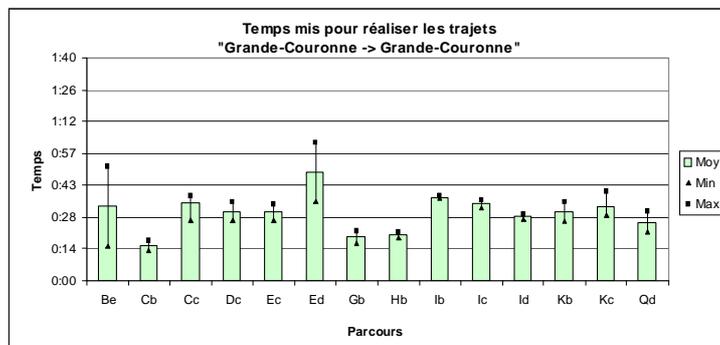
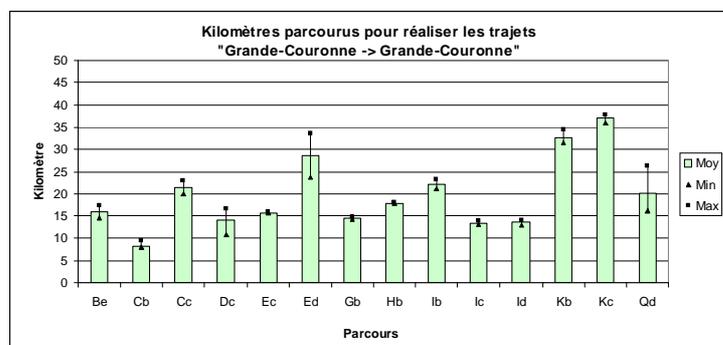
Vitesse moyenne pour réaliser les différents trajets « Domicile-Travail » en voiture selon les typologies géographiques.

Les minimums (triangle) et maximums (carré) sont également mentionnés.



## ANNEXE 7

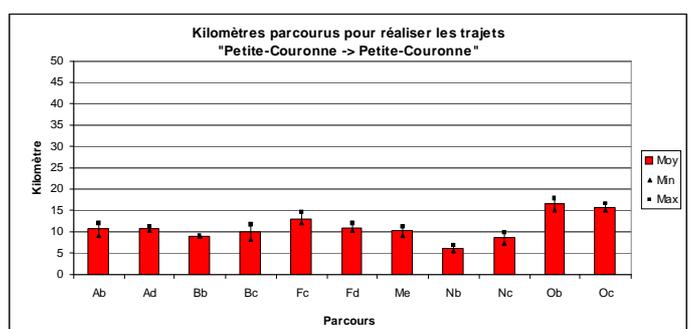
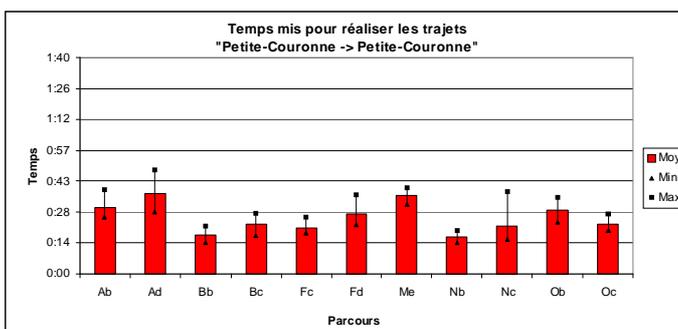
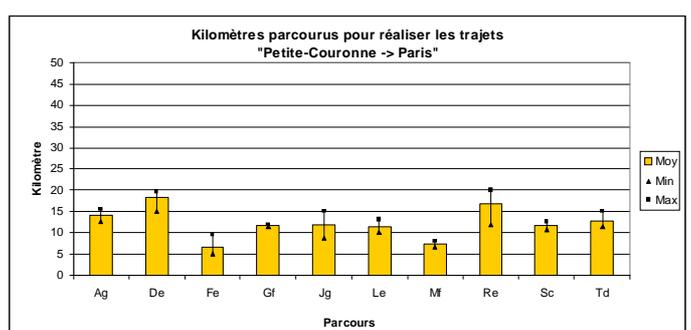
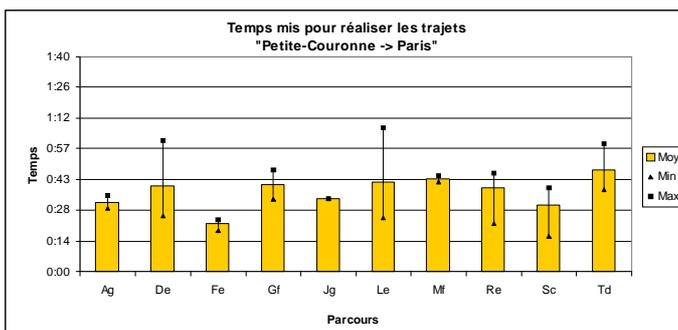
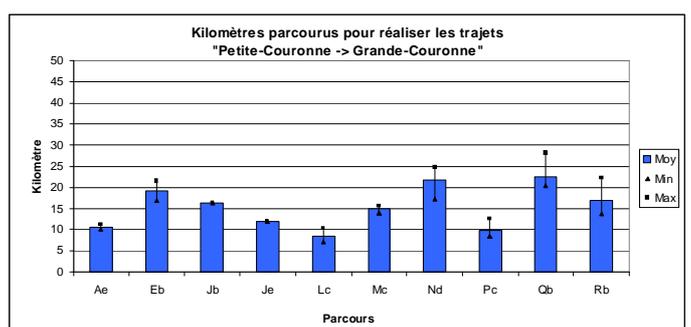
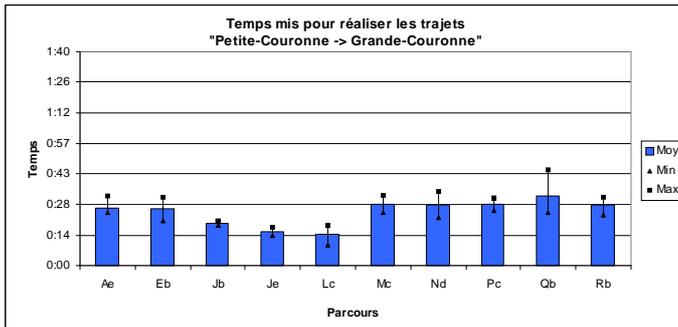
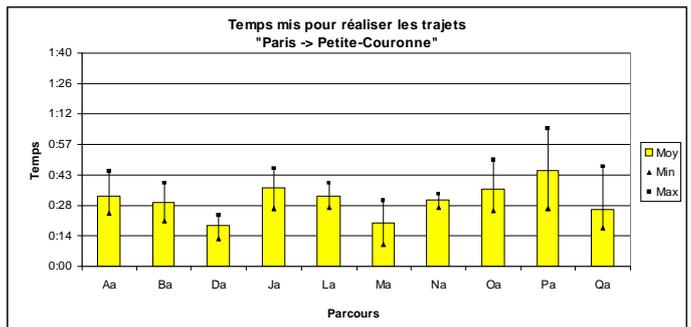
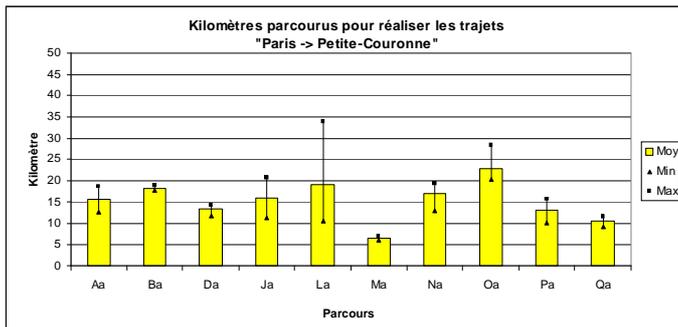
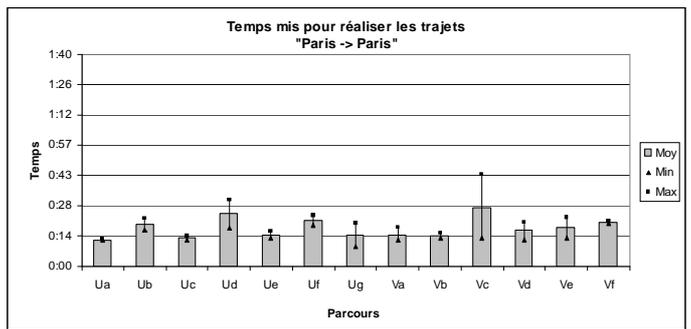
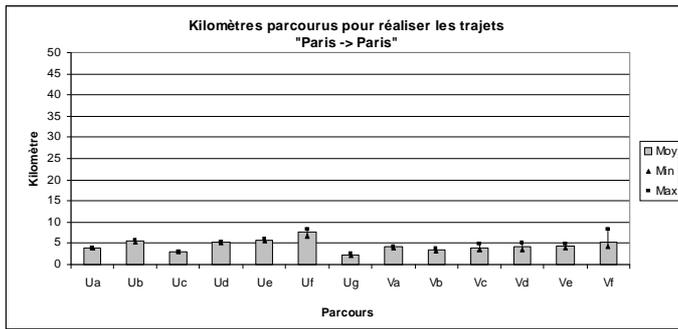
### Kilomètres et temps de parcours sur les trajets « Domicile-Travail » sur l'ensemble des typologies étudiées



(a) Kilomètre

(b) Temps de parcours

## ANNEXE 7 (suite)



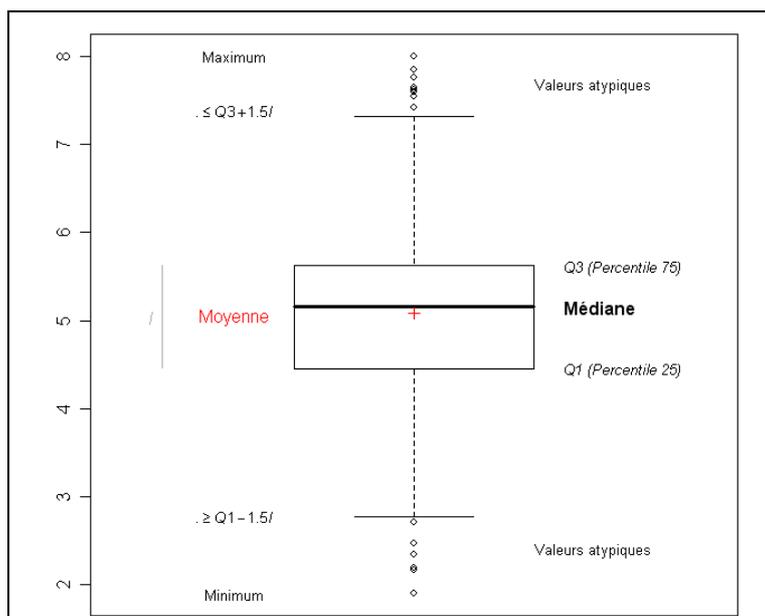
(a) Kilomètre

(b) Temps de parcours

## ANNEXE 8

### Définition statistique d'une « boîte à moustaches » (box plot)

Une boîte à moustache (ou box plot) est un graphique représentant la répartition d'une série statistique. Pour ce faire, l'échantillon est séparé en 4 parties de même effectif, appelées quartiles. Un quartile est donc constitué de 25 % des données de l'ensemble de l'échantillon. Le deuxième quartile (percentile 50) est appelé plus couramment la médiane.



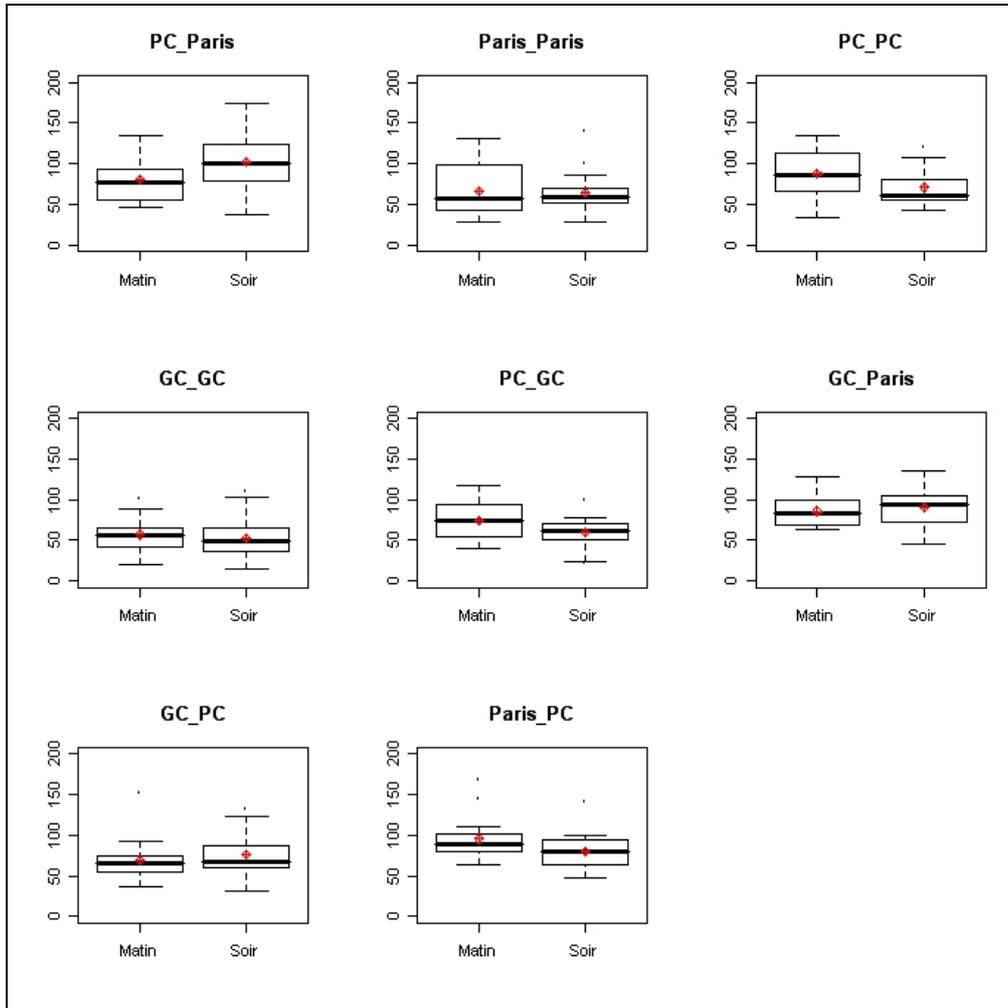
La partie centrale correspondant à une « boîte » représente 50 % des données. Elles se situent entre les 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartiles. La différence entre les deux est appelée l'écart inter-quartiles.

Les moustaches réparties de chaque côté de la boîte représentent généralement 25 % des données, mais n'excèdent pas en terme de longueur,  $1.5 * I$  ( $I$  étant l'écart interquartile, c'est-à-dire la longueur de la boîte), ce qui peut amener la présence de points atypiques en dehors des moustaches. La fin de la moustache supérieure correspond donc soit à la valeur  $3Q + 1.5I$  (3<sup>ème</sup> quartile + une fois et demi l'intervalle inter-quartile), soit au maximum de l'échantillon s'il est plus faible que cette valeur.

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

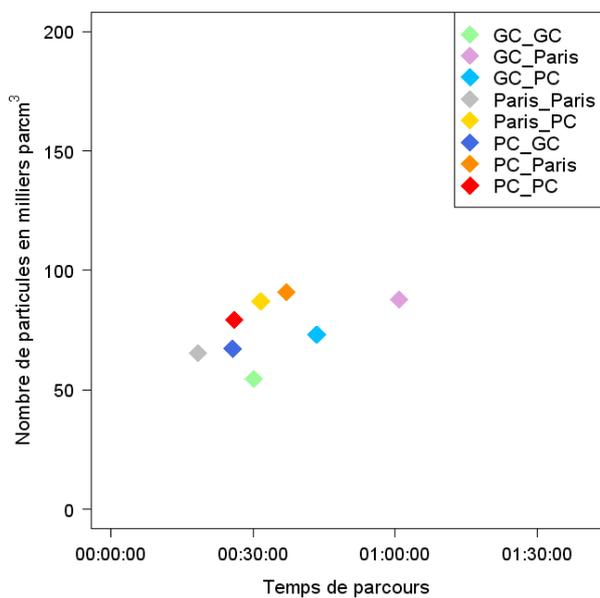
## ANNEXE 9

Distribution du nombre moyen de particules (en  $\text{cm}^3$ ) mesurées dans l'habitacle selon la typologie géographique des trajets et la période des déplacements « Domicile-Travail » effectuées le matin et le soir.

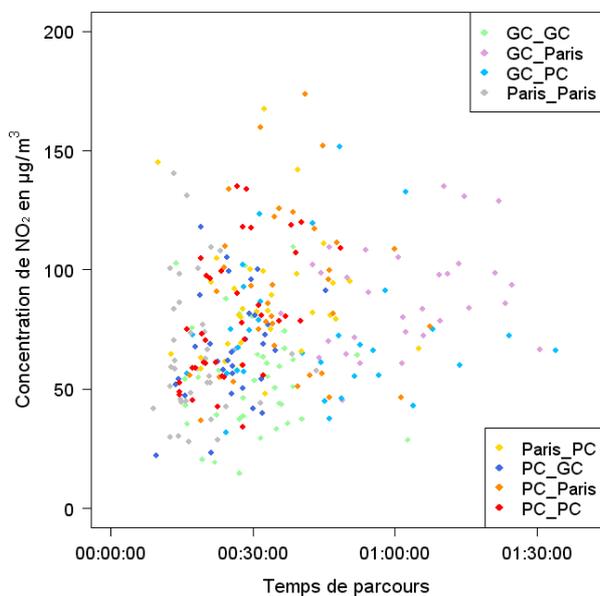


## ANNEXE 10

Exposition d'un automobiliste au nombre de particules par  $\text{cm}^3$  lors des trajets « Domicile-Travail » en fonction du temps moyen de parcours par type de parcours.



(a) Exposition moyenne par type de trajet « Domicile – Travail »



(b) Exposition pour l'ensemble des parcours selon le type de trajet

# ANNEXE 11

## TESTS STATISTIQUES

### Test de Normalité

La Normalité des données est une condition essentielle pour l'application de nombreux tests statistiques. C'est pour cela qu'il est intéressant dans un premier temps de vérifier le caractère gaussien des différentes distributions.

Le test de Kolmogorov-Smirnov est un test non paramétrique qui consiste à comparer la distribution de fréquences relatives cumulées d'une variable observée avec la distribution théorique que cette variable aurait si elle était distribuée normalement. On superpose les deux distributions, on cherche la classe où l'écart entre la distribution théorique et la distribution observée est le plus grand, et on vérifie (dans la table conçue à cet effet ou en calculant directement la valeur critique  $D_\alpha$ ) si cet écart est significativement grand, c'est-à-dire si l'hypothèse de normalité  $H_0$  : distribution normale peut être rejetée au seuil considéré.

Une variable aléatoire suit une loi normale d'espérance  $\mu$  et d'écart type  $\sigma$  (donc de variance  $\sigma^2$ ) si elle admet une densité de probabilité  $f$  telle que :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Autres tests : Shapiro-Wilk,...

Fonctions R : `ks.test()`, `Shapiro.test()`

### Test sur les variances (homoscédasticité)

Test de régularité de la variance sur la variable aléatoire.

Ce test est utilisé pour valider l'équivalence des variances des deux populations dont sont issus les échantillons, c'est à dire de la variabilité des données.

Test de Fischer : Ce test paramétrique s'applique uniquement lorsque les distributions sont Gaussiennes. Si la Normalité n'est pas vérifiée, il faut utiliser un test non paramétrique (voir ci après).

Soit un échantillon de  $n$  mesures :  $y_1, y_2, \dots, y_n$ .

La moyenne et l'écart type de cette série statistique se calcule à l'aide des formules :

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \quad \text{et} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$

l'écart-type est donné avec  $\nu = n - 1$  degré de liberté.

Le test de Fischer permet de comparer deux écarts-types.

Soit deux séries de mesures de taille  $n_1$  et  $n_2$ . Pour chacune d'elle, on calcule l'écart-type.

Le plus grand sera noté  $s_1$  et le plus petit  $s_2$ , on aura donc  $s_1 > s_2$ . L'écart-type  $s_1$  est connu avec  $nu_1 = n_1 - 1$  degré de liberté et l'écart-type  $s_2$  avec  $nu_2 = n_2 - 1$  degré de liberté.

Les hypothèses du test sont les suivantes :

$H_0$	Les écart-types observés $s_1$ et $s_2$ sont du même ordre de grandeur.
$H_1$	L'écart-type $s_1$ est significativement plus grand que l'écart-type $s_2$ .

On calcule alors :

$$F_{obs} = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

On montre que sous l'hypothèse  $H_0$ , le rapport des deux écarts-types suit une loi de Fischer dont on a dressé la table pour le risque souhaité (dans notre cas 5%).

On lit dans la table, qui est donnée pour un risque de 5 %, le nombre  $F_{crit}(nu_1, nu_2)$

Si  $F_{obs} < F_{crit}(nu_1, nu_2)$  on accepte  $H_0$

Si  $F_{obs} > F_{crit}(nu_1, nu_2)$  on accepte  $H_1$  par défaut au risque inférieur ou égal à 5 %

Test non paramétrique : Lorsque que les hypothèses d'application du test de Fischer ne sont pas vérifiées, des tests non paramétriques de comparaison de variances peuvent être utilisés. Le test de Fligner-Kileen permet de comparer les variances de plusieurs échantillons d'une variable continue. C'est un des tests les plus robustes à la non-normalité des données.

Autres tests : Test de Mood, test d'Ansari-Bradley,...

Fonctions R : `var.test()`, `fligner.test()`, `ansari.test()`, `mood.test()`

## Test d'égalité des moyennes

Ce test est utilisé pour étudier comparer les moyennes de deux populations dont sont issus les échantillons. L'objectif étant de savoir si les moyennes peuvent être considérées comme différentes.

Test de Student : Test paramétrique pour comparer la moyenne observée d'un échantillon statistique à une valeur fixée. Il permet aussi de comparer les moyennes de deux échantillons statistiques (on parle alors de test de conformité).

Les conditions d'applications de ce test sont la Normalité surtout pour les échantillons de taille  $< 30$ , l'égalité des variances (pour toute taille d'échantillon).

*Test de comparaison d'une moyenne à une valeur donnée*

Soit deux échantillons  $X_1$  et  $X_2$  de  $n_1$  et  $n_2$  valeurs observées, de moyennes  $m_1$  et  $m_2$  et de même variance.

On souhaite tester l'Hypothèse  $H_0$  : " $m_1=m_2$ " avec un risque d'erreur  $\alpha$ .

Sachant que  $X_1-X_2$  suit une loi Normale  $N\left(m_1 - m_2, \sqrt{\sigma^2\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}\right)$ , nous pouvons établir que la variable T suivante suit une loi de Student à  $(n_1+n_2-2)$  degrés de liberté.

$$T = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\sigma^2\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

Une estimation de la variance commune est :

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

On calcule donc t à partir des données de nos échantillons et on le compare à la valeur  $t_\alpha$  lue dans la table de Student pour un risque d'erreur  $\alpha$  fixé et  $(n_1+n_2-2)$  degré de liberté.

Si  $t < t_\alpha$ , on accepte l'hypothèse  $H_0$  par défaut, c'est à dire que les deux échantillons sont extraits de deux populations ayant même espérance  $m$ .

Si  $t > t_\alpha$ ,  $H_0$  est rejetée avec un risque d'erreur  $\alpha$  et les deux échantillons sont extraits de deux populations ayant des espérances respectivement  $m_1$  et  $m_2$ .

Test de Wilcoxon : Ce test est utilisé pour comparer les caractéristiques de deux distributions. Ce test représente une alternative non paramétrique au test de Student, reposant uniquement sur l'ordre des observations relatives aux deux échantillons.

Soit deux échantillons A et B comprenant  $n_A$  et  $n_B$  observations. L'objectif est de tester l'hypothèse nulle selon laquelle la distribution de probabilité  $\psi$  d'une variable X est identique dans les deux échantillons :  $H_0 : \psi_A = \psi_B$ .

Si cette hypothèse est rejetée, une des hypothèses alternatives suivantes sera acceptée :

H1 :  $\psi_A > \psi_B$ , si la distribution de A est déplacée vers la droite par rapport à celle de B ;

H2 :  $\psi_A < \psi_B$ , dans le cas contraire ;

Le test de Wilcoxon consiste dans un premier temps à classer dans l'ordre croissant l'ensemble  $n_A + n_B = n$  observations relatives aux deux échantillons réunis. Ensuite, à chaque observation, on attribue un rang  $r_i$  correspondant à son numéro d'ordre, compris entre 1 et n. Ainsi le rang 1 est assigné à la plus petite observation. La statistique z de Wilcoxon est calculée comme la somme des rangs assignés aux observations provenant de l'un des deux échantillons :  $Z_A$  est la somme des rangs observés et  $Z_A$  la variable aléatoire correspondante.

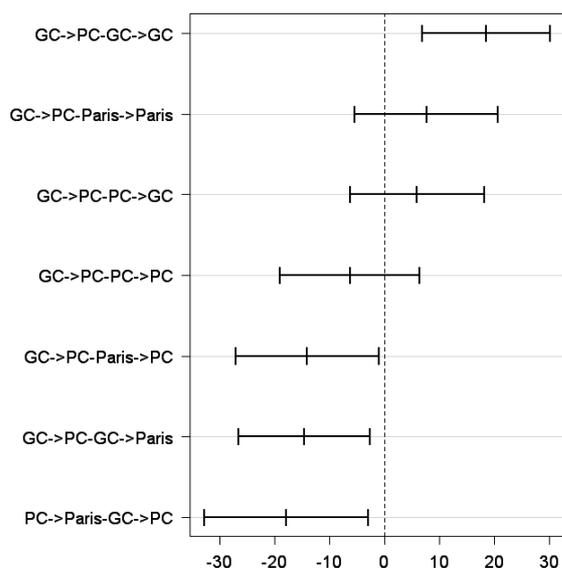
Si cette distribution est déplacée dans un sens, ses rangs seront significativement élevés ou faibles.

Fonctions R : `t.test()`, `wilcox.test()`

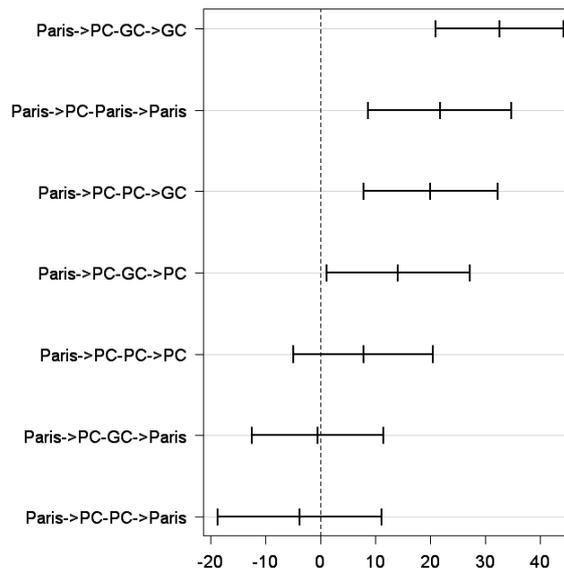
## ANNEXE 12

### Intervalle de confiance à 95 % de la différence du nombre de particules dans l'habitable selon certains trajets :

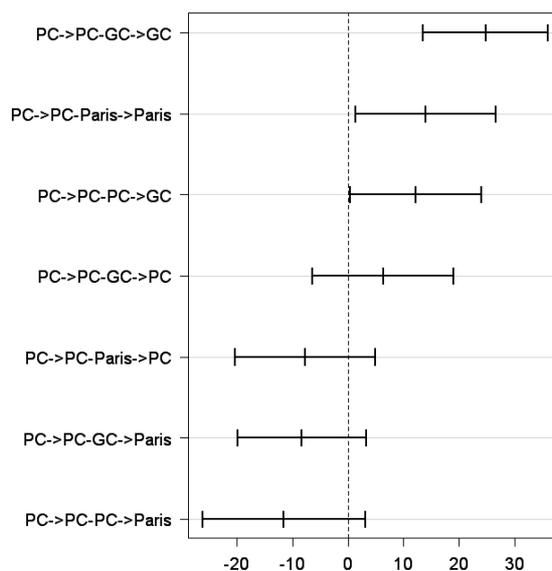
Ces graphiques ne peuvent être réalisés que lorsque l'homoscédasticité est vérifiée (utilisation du test de Student pour l'égalité des moyennes).



« Grande-Couronne → Petite-Couronne » par rapport aux autres



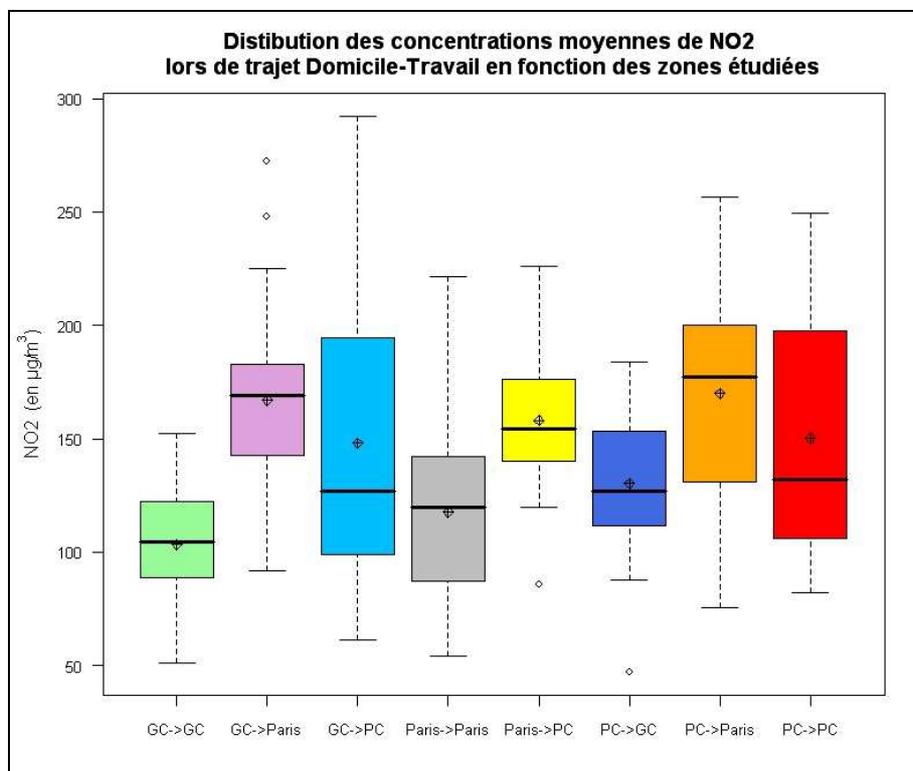
« Paris → Petite-Couronne » par rapport aux autres



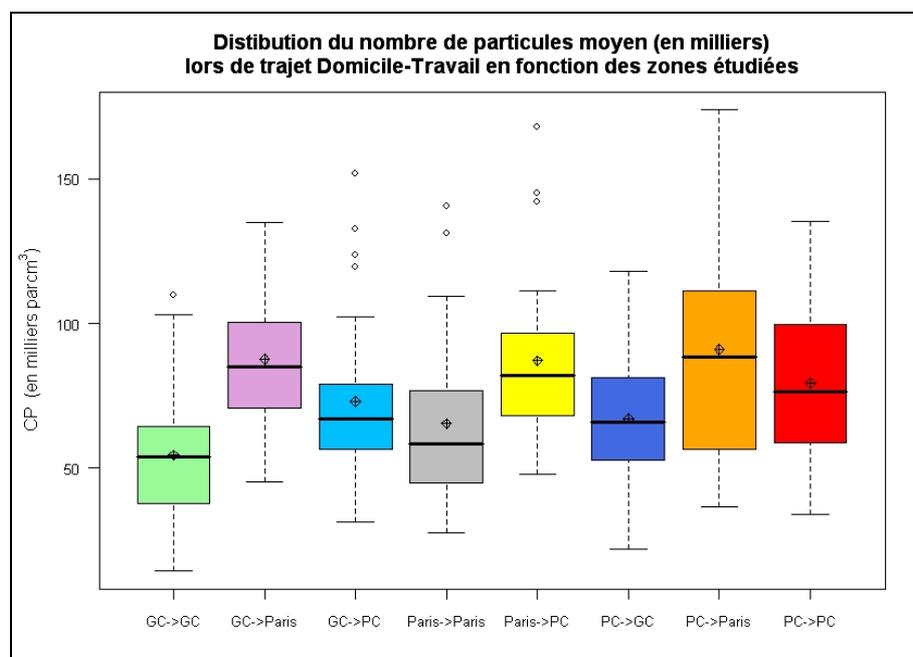
« Petite-Couronne → Petite-Couronne » par rapport aux autres

## ANNEXE 13

Distribution des données mesurées dans l'habitable pour chaque typologie définie pour le dioxyde d'azote (a) et le nombre de particules (b).



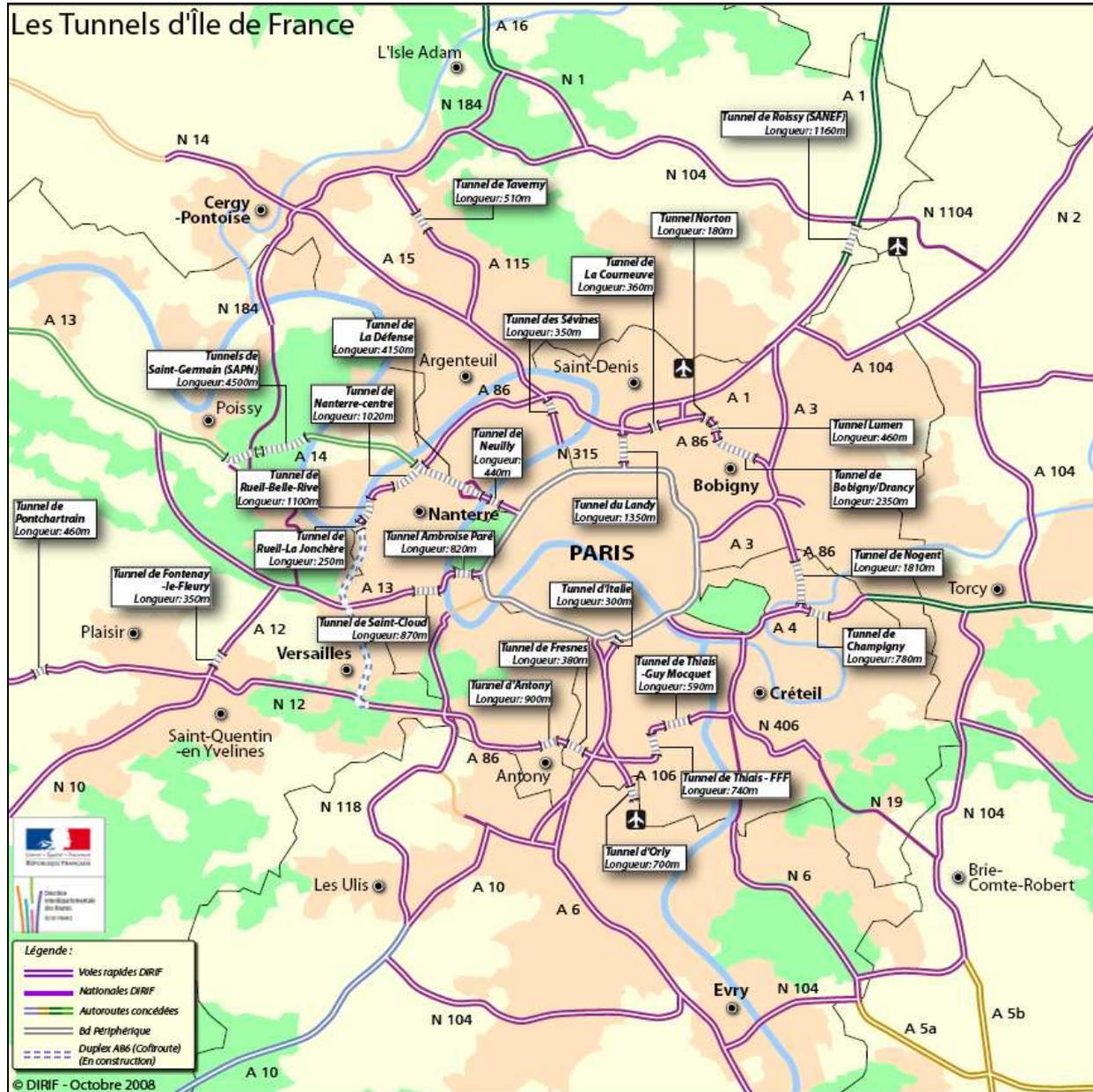
(a) Dioxyde d'azote (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



(b) Nombre de particules (en milliers par  $\text{cm}^3$ )

# ANNEXE 14

Localisation des tunnels en Île-de-France (Source : DIRIF – octobre 2008)



## ANNEXE 15

### Méthodologie de mesure de benzène dans l'habitacle lors de tests effectués sur certains circuits.

Des tubes en acier inoxydable remplis de 300 mg de carbopack X ( adsorbant capable de retenir les BTEX) ont été utilisés dans le cadre de ces tests. Le tube est alors connecté à une pompe individuelle SIDEPACK dont le débit de consigne est de 500ml/min. Cette pompe contient un enregistreur de volume permettant de connaître précisément le volume total d'air passé dans le tube durant la période de mesure.

La pompe et le tube sont installés dans l'habitacle du véhicule afin de déterminer l'exposition du conducteur lors de son circuit. En effet, un seul tube est installé par circuit ce qui ne permet pas d'obtenir une donnée sur chaque trajet mais seulement sur l'ensemble du circuit effectué. La donnée moyenne de benzène correspond de ce fait à une moyenne de tous les trajets quel que soit la typologie de trajets composant le circuit (trajet de liaison y compris). Les tubes ont été analysés au laboratoire de chimie d'AIRPARIF.

Les composés sont désorbés thermiquement du tube, puis sont séparés par chromatographie en phase gazeuse (CPG) et détectés par ionisation de flamme (FID). La désorption des tubes se fait dans le sens inverse du prélèvement.



Pompe individuelle SIDEPACK



Tube pour prélèvement actif

Les concentrations massiques en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  des BTEX sont déterminées comme suit :

$$C = \frac{m_{\text{éch}}}{V_{\text{éch}}}$$

$m_{\text{éch}}$  : masse de composé échantillonné sur la cartouche en ng déterminée par analyse

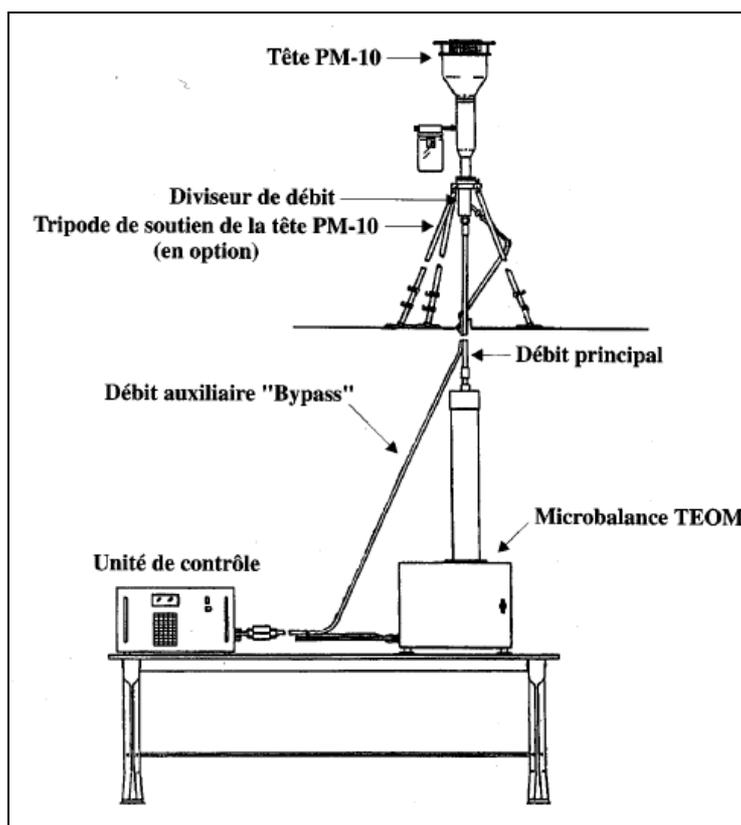
$V_{\text{éch}}$  : volume d'air échantillonné en L

Il est à noter que les concentrations de benzène ne sont pas standardisées à 20°C car la température moyenne lors de l'exposition n'est pas connue.

## ANNEXE 16

### Méthodologie de mesure de concentrations massiques de particules inférieures à 10 µm dans l'habitacle lors de tests effectués sur certains circuits.

Utilisation d'un TEOM 1400a (Tapered Element Oscillating Microbalance) de marque Rupprecht & Patashnick permettant la mesure de la concentration (en µg/m<sup>3</sup>) de particules PM10 dans l'air.



Installation classique d'un TEOM.

Le principe du TEOM consiste à mesurer la concentration particulaire dans l'air ambiant par pesée des particules échantillonnées, à l'aide d'une microbalance constituée d'un élément oscillant à sa fréquence naturelle.

L'air aspiré est filtré sur un filtre absolu situé au sommet du corps oscillant. La masse déposée sur le filtre engendre une diminution de la fréquence d'oscillation de la microbalance. Cette variation de fréquence est enregistrée en continu et convertie en variation de masse. Dans ce système de balance, la fréquence d'oscillation obéit à l'équation suivante :

$$f = \frac{K_0}{M}$$

où  $f$  est la fréquence exprimée en Hz  
 $K_0$  est une constante propre à l'élément oscillant  
 $M$  est la masse

Équation de la fréquence d'oscillation.

La variation de la masse correspondant au changement de fréquence peut s'exprimer par la relation ci-dessous :

$$\partial m = K_0 \times \frac{1}{(f - f_0)^2}$$

$\partial m$  : masse collectée

$f$  : fréquence d'oscillation après collection

$f_0$  : fréquence d'oscillation initiale.

#### **Variation de la masse correspondant au changement de fréquence.**

Le volume d'air prélevé étant connu et déterminé par les conditions de prélèvement, la concentration est obtenue en divisant la masse mesurée par le volume échantillonné.

L'appareil comprend les principaux éléments suivants :

- Une tête de prélèvement destinée à échantillonner les matières particulaires. Dans le cadre de ces essais une mousse permettant d'échantillonner les fractions particulaires PM10 a été utilisée (Cf. Chapitre 3.1).

- Un compartiment sonde comprenant un tube de prélèvement chauffé. La température d'échantillonnage a été fixée à 50°C pour toute la durée des mesures embarquées,

- Un filtre absolu en fibre de verre téflonée (efficacité de captation de 99,97 % pour les particules de diamètre aérodynamique moyen 0,3  $\mu\text{m}$ ) qui permet de recueillir les matières particulaires prélevées,

- Un dispositif de stabilisation de débit. L'appareil est équipé de deux régulateurs de débit massique permettant la régularisation du débit et la connaissance précise du volume échantillonné sur le filtre qui intervient dans le calcul de la concentration. Par ailleurs, la consigne appliquée aux régulateurs prend en compte la mesure de la pression atmosphérique et de la température ambiante

- Un dispositif électronique composé d'un micro processeur gérant l'ensemble des fonctions et la mesure des différents paramètres.



**Illustration de la Micro balance du TEOM.**

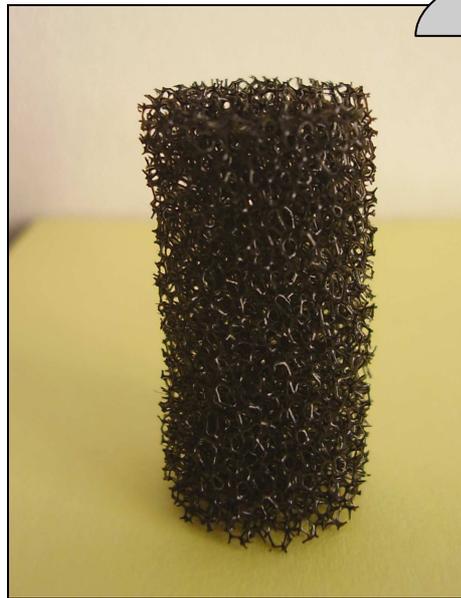
La fréquence d'oscillation est mesurée toutes les deux secondes et est utilisée pour calculer une moyenne sur une période de temps programmable. Dans le cadre de ces essais la constante de temps la plus faible a été programmée, soit 10 minutes.

### Validation de l'utilisation des mousses PM10

La structure traditionnelle permettant la coupure PM10, compte tenu de sa hauteur, ne pouvait être installée dans le véhicule. Des essais en mode TSP (poussières totales) ont été réalisés avant d'envisager une coupure à l'aide d'une mousse spécifique PM10. Cette mousse est revendue par la société ECOMESURE, elle équipe leur gamme de néphélobloc.



(a) TEOM avec tête



(b) Mousse utilisée pour la coupure PM10



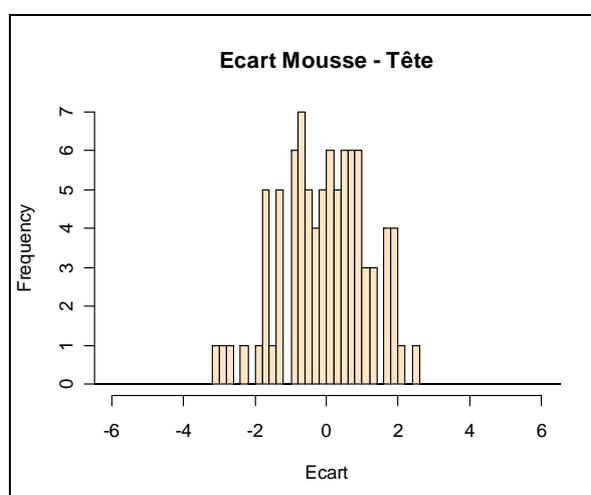
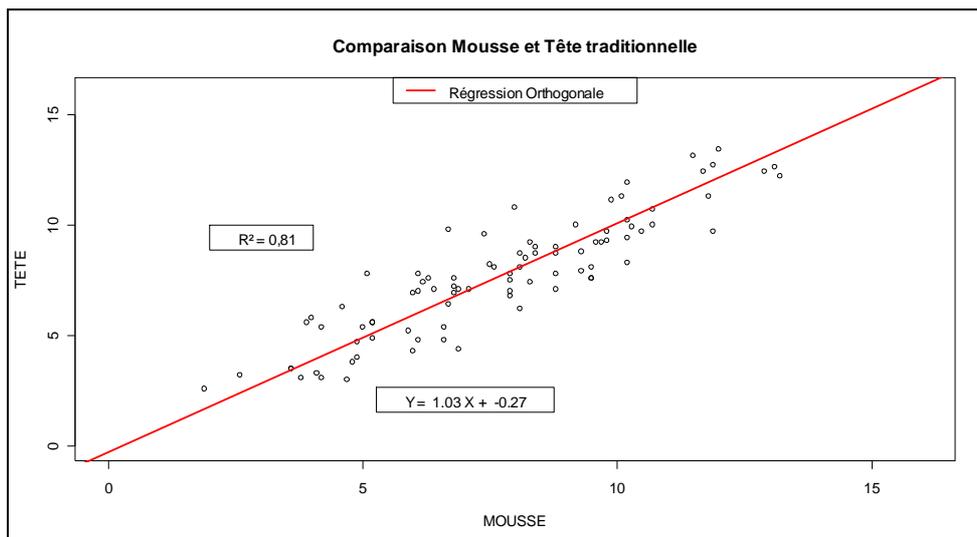
(c) Mise en place de la mousse

**Configuration d'un TEOM classique (a) et mise en œuvre d'un système de coupure PM10 avec une mousse (b & c).**

Des essais au laboratoire de métrologie d'AIRPARIF ont été réalisés en parallèle d'une tête traditionnelle PM10 afin de valider son utilisation sur la campagne embarquée. Ces essais sur deux TEOM 1400a ont été réalisés en air intérieur : Les concentrations même faibles restent comparables surtout pour une moyenne au cours d'un trajet<sup>45</sup>.

Ci-dessous un exemple de moyenne obtenue sur des valeurs très faibles : 7,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la mousse et 7,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la tête traditionnelle.

<sup>45</sup> Tests statistiques effectués : Comparaison des variances (test de Fisher - Snedecor) et comparaison des moyennes (test de Student)



**Comparaison entre les teneurs mesurée avec une mousse et une tête de prélèvement traditionnelle.**

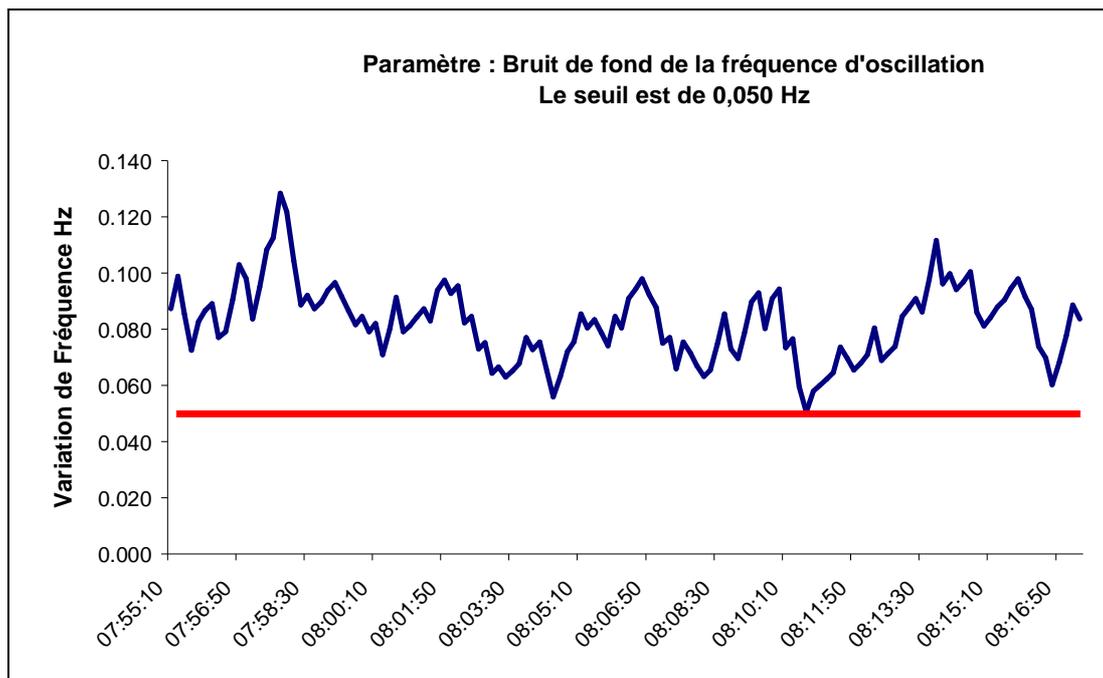
Les écarts entre les deux systèmes engendrent des variations de concentration de  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  environ et n'impactent pas la moyenne du trajet.

### **Atténuation des vibrations**

La mesure des particules PM10 par balance inertielle est réalisée grâce à un corps oscillant. La concentration dépend directement de cette fréquence d'oscillation.

Du fait des vibrations lors des premiers essais (Cf. figure suivante représentant un exemple du bruit de fond de la fréquence d'oscillation), l'atténuation des vibrations est nécessaire car elles parasitent la mesure de la fréquence d'oscillation ce qui engendre une concentration de particules PM10 « faussée ».

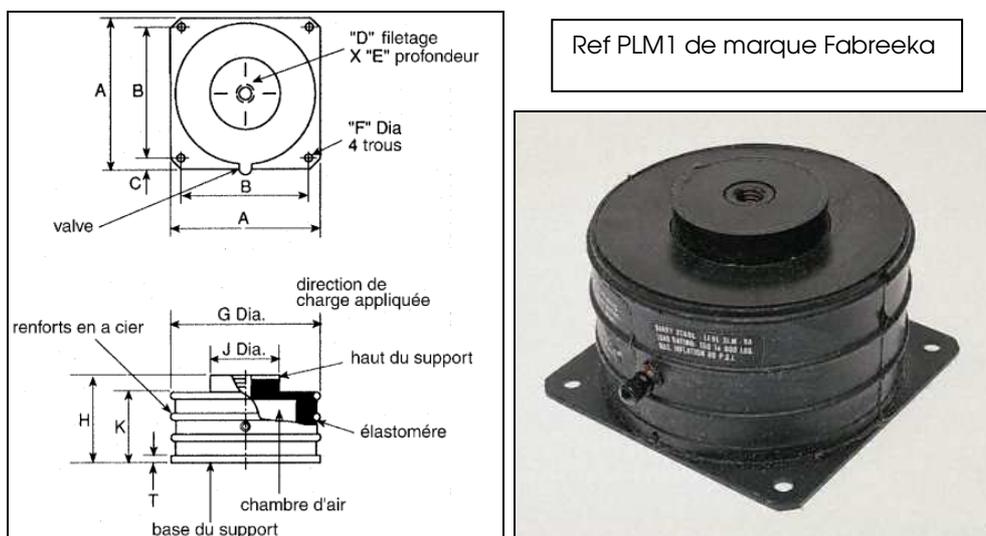
Ainsi, au dessus de 0,050 Hz, l'impact sur la fréquence est non négligeable et invalidante au delà de 0,150 Hz. Ce bruit de fond de la fréquence d'oscillation supérieur à 0.050 Hz a été mesuré lors des premiers tests.



**Bruit de fond de la fréquence d'oscillation sans installation spécifique.**

Afin de résoudre ce problème de vibrations, de nombreux essais par suspension de la balance ont été réalisés et ont améliorés fortement la mesure. Néanmoins, des problèmes persistent lors de trajets empruntant des routes abîmées (nid de poule, dos d'âne ... ) engendrant d'importantes vibrations dans le véhicule.

Une autre option a alors été envisagée grâce à une étude<sup>46</sup> à bord d'un véhicule réalisée par le MLU (Monitoring für Leben und Umwelt). Un système d'absorption des vibrations grâce à la mise en place de silentblocs a été testé. Ce système est illustré sur la figure suivante.

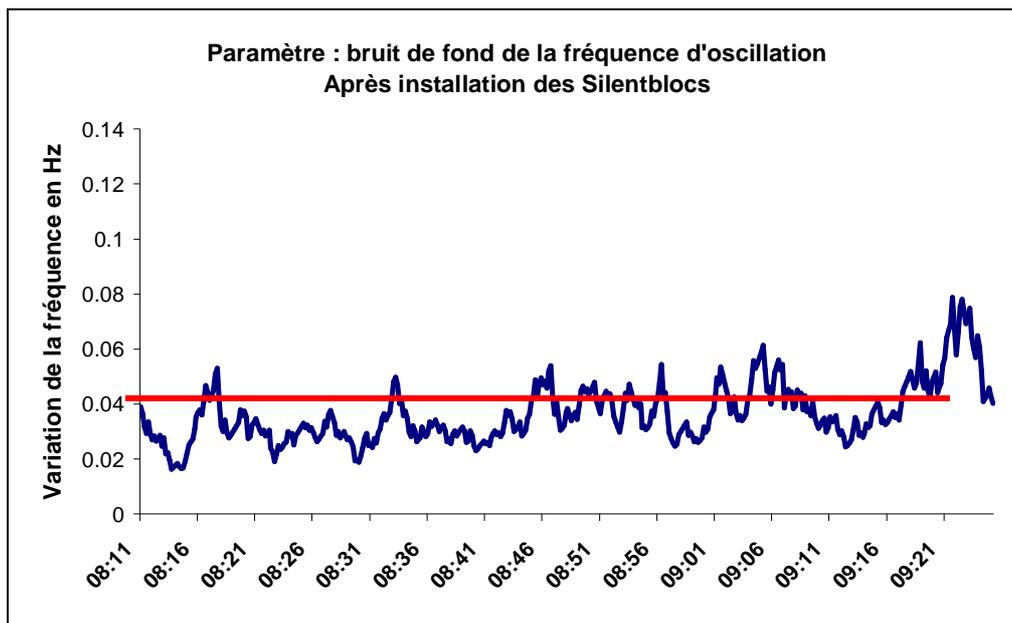


**Illustration d'un Silentbloc.**

Ces silentblocs ont été installés à la place des quatre pieds de la balance et ont permis après de nombreux essais, notamment à différentes pressions, de minimiser les vibrations parasites du véhicule sur le matériel.

Ci-dessous le bruit de fond de la fréquence d'oscillation après installation des silentblocs :

<sup>46</sup> FPM PM10 mobil Fast Particle Mobile – Monitoring für Leben und Umwelt : MLU.



**Fréquence d'oscillation avec la mise en place de Silentblocs.**

L'atténuation du bruit de fond de la fréquence d'oscillation après la mise en place des Silentblocs est nette comme cela est illustré sur la figure précédente. Cette atténuation des vibrations a été confirmée pour tous les essais de mesure de particules réalisés à bord du véhicule d'où l'adoption de ce matériel pour la mesure de ce polluant.

La figure suivante illustre la mise en place des Silentblocs sous l'appareil de mesure des PM10 installé dans le véhicule.



**Mise en place des Silentblocs dans le véhicule à chaque coin de l'analyseur de particules PM10.**