

RAPPORT D'ÉTUDE

03/12/2009

N° DRC-09-104243-11651A

INTER'MODAL

**Vers une meilleure maîtrise de
l'exposition individuelle par inhalation
des populations à la pollution
atmosphérique lors de leurs
déplacements urbains**

INTER'MODAL

Vers une meilleure maîtrise de l'exposition individuelle par inhalation des populations à la pollution atmosphérique lors de leurs déplacements urbains

Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de
la Mer (MEEDDM)

Bureau de l'Air & Bureau de la prospective et de l'évaluation des
données

Grande Arche de la Défense - Paris Nord

92055 PARIS LA DEFENSE CEDEX

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

S.Fable, I.Fraboulet, F.Godefroy, G.Jantolek, J.Queron, B.Triart.

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

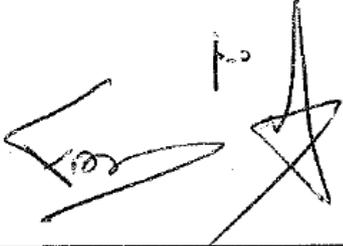
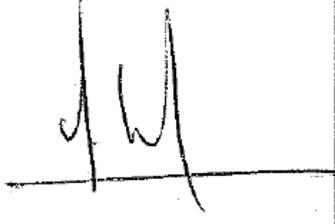
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Isaline FRABOULET Jessica QUERON	Marc DURIF	Nicolas ALSAC
Qualité	Ingénieurs dans l'unité Milieux	Responsable de l'unité Milieux	Responsable du Pôle Caractérisation de l'Environnement
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. RESUME.....	9
2. INTRODUCTION	11
3. SYNTHÈSE DES DONNÉES DE LA BIBLIOGRAPHIE.....	12
3.1 Répartition temporelle et géographique	12
3.2 Modes de transports – polluants	14
3.3 Méthodes de mesure.....	16
3.4 Niveaux des concentrations et méthodes de mesure relevés dans la littérature	18
3.4.1 Dioxyde d’azote	18
3.4.2 Monoxyde carbone	21
3.4.3 Benzène et toluène.....	24
3.4.3.1 Benzène	25
3.4.3.2 Toluène.....	27
3.4.4 Particules	29
3.4.4.1 Particules PM10	30
3.4.4.2 Particules PM2.5	32
3.4.5 Bilan de la synthèse bibliographique	34
4. CAMPAGNE DE MESURES	39
4.1 Principe et méthode	39
4.2 Choix des parcours	41
4.3 Détails des parcours.....	42
4.4 Protocole d’étude	53
4.5 Appareillage	56
4.5.1 Comparaison avec la méthode de référence	57
4.5.2 Facteurs de correction retenus pour la suite de l’étude	57
5. RESULTATS	59
6. SYNTHÈSE.....	95
6.1 Bilan par parcours	97
6.1.1 Tableau synthétique des résultats par parcours	97
6.1.2 Comparaison des concentrations en particules sur les différents parcours.....	100
6.1.2.1 Concentrations en particules PM10 par parcours :.....	100
6.1.2.2 Concentrations en particules PM2.5 par parcours :.....	101

6.1.3	Comparaison relative des quantités inhalées de particules sur les différents parcours ...	102
6.1.3.1	Quantité inhalée de particules PM10 par parcours :	102
6.1.3.2	Quantité inhalée des particules PM2.5 par parcours :	103
6.2	Bilan par mode de transport	104
6.2.1	Concentration en PM10	104
6.2.2	Concentrations en PM2.5	106
6.2.3	Répartition PM2.5/PM10 par mode de transport	108
7.	CONCLUSION	109
8.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	113
9.	LISTE DES ANNEXES	119

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des références par années de publication 13

Figure 2 : Répartition des références par zone géographique 13

Figure 3 : Répartition des références en Europe..... 14

Figure 4 : Répartition des références par modes de transport étudiés..... 15

Figure 5 : Répartition des références par polluants étudiés 15

Figure 5 : Méthodes utilisées pour l'analyse dioxyde d'azote (NO₂) relevées dans la littérature..... 18

Figure 6 : Concentrations en dioxyde d'azote (NO₂) relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude 19

Figure 7 : Classement des concentrations moyennes en NO₂ relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe 20

Figure 8 : Méthodes utilisées pour l'analyse du monoxyde de carbone (CO) relevées dans la littérature 21

Figure 9 : Concentrations en monoxyde carbone (CO) relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude 22

Figure 10 : Classement des concentrations moyennes en CO relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe 23

Figure 11 : Méthodes utilisées pour l'analyse du benzène et du toluène relevées dans la littérature..... 24

Figure 12 : Concentrations en benzène relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude 25

Figure 13 : Classement des concentrations moyennes en benzène relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe 26

Figure 14 : Concentrations massiques en Toluène relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude 27

Figure 15 : Classement des concentrations moyennes en Toluène relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe 28

Figure 16 : Méthodes utilisées pour l'analyse des particules PM_{2.5} et PM₁₀ relevées dans la littérature 29

Figure 17 : Concentrations massiques en particules PM₁₀ relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude..... 30

Figure 18 : Concentrations moyennes en PM₁₀ relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe 31

Figure 19 : Concentrations massiques en particules PM2.5 relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude 32

Figure 20 : Concentrations moyennes en PM2.5 relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe 33

Figure 22 : Etats du réseau le 30/09/08 à 8h et 10h..... 49

Quantité inhalée = Ci x ti x Ti 59

Figure 23 : Concentrations massiques corrigées en particules PM10 par parcours* 100

Figure 24 : Concentrations massiques corrigées en particules PM2.5 par parcours* 101

Figure 25 : Représentation des quantités inhalées corrigées en PM10 pour chaque parcours* 102

Figure 26 : Représentation des quantités inhalées corrigées en PM2.5 pour chaque parcours* 103

Figure 27 : Concentrations massiques corrigées en particules PM10 par mode de transport* 104

Figure 28 : Comparaison des résultats corrigés en PM10 avec ceux de la bibliographie 105

Figure 29 : Concentrations massiques corrigées en particules PM2.5 par mode de transport* 106

Figure 30 : Comparaison des résultats corrigés en PM2.5 avec ceux de la bibliographie* 107

Figure 31 : Répartition PM2.5/PM10 par mode de transport 108

Figure 32 : Les concentrations moyennes relevées dans la littérature en Europe ont été classées par ordre croissant (le rang 1 étant le plus faible et le rang 7 le plus fort) en fonction des différents modes de transports 110

Figure A1 : Suivi temporel des concentrations en PM10 et PM2.5 mesurées par les deux Grimm placés en parallèle dans l'air ambiant extérieur 123

Figure A2 : Comparaison des concentrations PM10 et PM2.5 mesurées par les deux Grimm placés en parallèle dans l'air ambiant extérieur 123

Figure B1 : Concentrations massiques non corrigées en particules PM10 par parcours..... 133

Figure B2 : Concentrations massiques non corrigées en particules PM2.5 par parcours..... 134

Figure B3 : Représentation des quantités inhalées non corrigées en PM10 pour chaque parcours..... 135

Figure B4 : Représentation des quantités inhalées non corrigées en PM2.5 pour chaque parcours..... 136

Figure B5 : Concentrations massiques non corrigées en particules PM10 par mode de transport 137

Figure B6 : Comparaison des résultats non corrigés obtenus en PM10 avec ceux de la bibliographie	138
Figure B7 : Concentrations massiques non corrigées en particules PM2.5 par mode de transport	139
Figure B8 : Comparaison des résultats non corrigés obtenus en PM2.5 avec ceux de la bibliographie	140

GLOSSAIRE

PM2.5 : Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 2.5 µm

PM10 : Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 µm

TSP : Poussières totales (*Total Suspended Particles*)

TEOM : Microbalance à élément conique oscillant (*Tapered element oscillating microbalance*)

TEOM-FDMS (FDMS) : Microbalance à élément conique oscillant (*Tapered element oscillating microbalance*) couplée à un module FDMS (*Filter Dynamic Measurement System*)

COV : Composés Organiques Volatils

NO₂ : Dioxyde d'azote

CO : Monoxyde de carbone

BTEX : Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes

PUF : Particules ultra fines

1. RESUME

Ce rapport présente tout d'abord une synthèse des publications faisant référence à la qualité de l'air dans les transports collectifs et individuels (§ 3). Les cinq continents ont été couverts pour la période allant de 2000 à 2009. L'étude s'est limitée aux campagnes de mesures utilisant des systèmes de mesures soit embarquée, soit en un point fixe mais dans ce cas uniquement dans les milieux souterrains (quais et rames du métro). Ce travail a permis de recenser les niveaux de concentrations indicatifs pour différents polluants (NO₂, CO, Benzène, Toluène, PM₁₀ et PM_{2.5}) et modes de transports (bus, marche à pied, quai et rame de métro, train, vélo, voiture). Il a également permis d'identifier les techniques de mesures et le mode d'exploitation des données dans ce type d'étude.

Il ressort de cette analyse bibliographique que les concentrations les plus importantes en NO₂, CO et toluène sont associées à l'habitacle de la voiture. Concernant le benzène, ce sont le train et la marche à pied dans la rue qui présentent les concentrations les plus élevées. Cependant, ce classement est à prendre avec précaution car une seule valeur était disponible pour le train.

Concernant les concentrations particulières, cette synthèse révèle que les concentrations en PM₁₀ les plus importantes sont associées au quai et à la rame du métro et au train (3 valeurs disponibles). Les concentrations en PM_{2.5} les plus importantes sont associées au quai et rame du métro.

Ces tendances ne sont néanmoins qu'indicatives. Elles sont à prendre avec précaution. En effet, des distorsions peuvent être introduites par des modes de transports et des polluants qui sont plus ou moins bien étudiés (en nombre et qualité des études disponibles), facteurs entraînant une hétérogénéité des populations de données.

Ce rapport présente ensuite les résultats obtenus lors d'une première phase de test d'un outil permettant d'évaluer les expositions aux particules par inhalation lors de neuf parcours (§ 4) associant divers modes de transport (habitacles d'automobiles, scooter, métro, RER, bus, marche à pied à l'extérieur et dans les couloirs souterrains du métro, vélo sur et hors piste cyclable) et réalisés en Ile-de-France (§ 5).

Cette étude de faisabilité ne prétend pas caractériser de manière exhaustive l'ensemble des expositions par inhalation aux particules lors de déplacements urbains. Elle n'a pas recherché la représentativité de tous les modes de transports et déplacements. Néanmoins, les parcours ont été choisis afin d'illustrer la méthode instrumentale proposée au travers de parcours choisis en Ile de France :

- permettant de tester différents modes de transport,
- pour lesquels les flux de déplacement des populations sont importants,
- cohérents avec les durées et les distances relevées dans les enquêtes de déplacement.

Les campagnes d'essais réalisées dans le cadre d'Inter'Modal ont ainsi permis :

- des comparaisons de niveaux de concentrations particulaires mesurés en simultané et en continu lors de l'utilisation d'une combinaison de mode de transport différents permettant de relier un même point de départ et d'arrivée,
- d'identifier les zones de fortes expositions par inhalation au PM10 et PM2.5 d'un parcours grâce notamment à un traitement géostatistique des mesures,
- d'exploiter les résultats de ces campagnes en utilisant des budgets espace-temps associés à chaque microenvironnement traversé et calculés directement à partir des données expérimentales propres à ces campagnes (durée et niveau des expositions par inhalation aux particules),
- de proposer un indicateur qualitatif permettant de hiérarchiser les expositions par inhalation aux particules grâce à une estimation de la quantité de particules inhalées propre à chaque mode de déplacement.

Compte tenu des méthodes de mesures utilisées, les résultats quantitatifs de cette étude sont à interpréter avec les précautions d'usage. La hiérarchisation des expositions par inhalation aux particules obtenue entre deux trajets est plus robuste.

L'exploitation des résultats montre que les concentrations moyennes dans l'air et les quantités inhalées de particules propres à chaque microenvironnement sont donc deux paramètres importants et complémentaires. Leur prise en compte permet de mieux appréhender l'exposition par inhalation aux particules lors de déplacements urbains.

Les futurs développements d'Inter'Modal vont permettre de réaliser en routine et rapidement une exploitation rapide de nombreuses données quantitatives et qualitatives.

2. INTRODUCTION

Malgré le temps réduit passé par les populations dans les différents modes de transports, ces microenvironnements peuvent contribuer de manière non négligeable à leur exposition par inhalation à de nombreux polluants (fortes expositions par inhalation sur de courtes durées mais répétées).

Des études ont montré que les concentrations en composés organiques volatils (COV) dans l'habitacle des véhicules et des bus sont souvent plus importantes que dans l'air ambiant ([Weisel, 1992], [Jo, 1996], [Batterman, 2002]).

D'autres ont caractérisé l'exposition par inhalation à la pollution particulaire dans différents modes de transport et montrent, également, des niveaux d'exposition par inhalation personnelle très variables en fonction des différents environnements ([Gulliver, 2003], [Adams, 2001], [Zagury, 2000]).

Ces résultats montrent l'importance de prendre en compte ces microenvironnements afin d'évaluer l'exposition par inhalation des populations urbaines lors de leurs déplacements.

Inter'Modal vise à développer un outil permettant de comparer et de hiérarchiser l'exposition par inhalation des populations à divers polluants lors de déplacements urbains intermodaux.

Cet outil doit permettre d'étudier différentes alternatives de transports sur des parcours reliant un même point de départ et d'arrivée. Les niveaux de concentrations rencontrés sur les deux trajets sont évalués simultanément grâce à des mesures en continu réalisées en parallèle.

L'exploitation des données doit permettre grâce notamment à un traitement géostatistique des informations : d'identifier les zones de fortes expositions par inhalation d'un parcours, représenter les concentrations au regard des budgets espace-temps associés à chaque microenvironnement traversé et proposer une hiérarchisation qualitative des expositions par inhalation pour chacun d'eux.

Inter'Modal est tout d'abord développé autour de la problématique des particules qui restent un enjeu fort notamment concernant les déplacements associant des parcours souterrains.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme d'appui de l'INERIS au MEEDDM (Prg 181 / DRC09¹ : « Hiérarchisation des niveaux d'exposition atmosphériques et localisation des sources »). Elle ne prétend pas caractériser de manière exhaustive l'ensemble des expositions par inhalation. Elle n'a pas recherché la représentativité de tous les modes de transports et déplacements. Néanmoins, les parcours ont été choisis afin d'illustrer la méthode instrumentale proposée au travers de parcours en Ile-de-France :

- permettant de tester différents modes de transport (habitacles d'automobiles, métro, RER, bus et marche à pied, scooter, vélo (sur et hors piste cyclable)),
- pour lesquels les flux de déplacement des populations sont importants,
- cohérents avec les durées et les distances relevées dans les enquêtes de déplacement.

¹ Macrothème 41 : Impact global des activités à risque sur le système (Homme - Environnement - Biens)

3. SYNTHÈSE DES DONNÉES DE LA BIBLIOGRAPHIE

Préalablement aux mesures de terrains une synthèse des publications faisant référence à la qualité de l'air dans les transports collectifs et individuels a été réalisée. Cette étude ne se prétend pas exhaustive.

L'analyse a porté d'une part sur un échantillon de 63 publications (revues à comité de lecture). La recherche de références a couvert l'ensemble des cinq continents pour la période allant de 1997 à nos jours, la période temporelle a été définie afin de ne tenir compte que de stratégies et de techniques de mesures relativement actuelles. Ces publications étaient initialement au nombre de 80, une sélection a été réalisée pour traiter en priorité celles :

- publiées à partir des années 2000 ;
- faisant référence aux polluants jugés prioritaires pour la problématique pollution dans les transports, c'est-à-dire les particules, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone ainsi que le benzène et ses isomères ;
- décrivant des campagnes de mesures utilisant des systèmes de mesure soit embarqués, soit en point fixe mais dans ce cas uniquement dans les milieux souterrains (quais et rames du métro).

Les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) ont également réalisé des études sur la qualité de l'air dans les infrastructures de transports collectifs et individuels, soit par des mesures en point fixe (dans les halls de gare, dans les parkings, à proximité d'axes routiers, sur les quais de métro...), soit par des mesures embarquées dans les transports en déplacement.

Ces études ont également intégrées à cette analyse bibliographique. Cependant, seules les études proposant des mesures embarquées ou des mesures en point fixe dans les souterrains sur les quais du métro ont été intégrées à cette synthèse bibliographique. Il est à noter qu'il existe par ailleurs une synthèse des travaux menés par les AASQA sur la qualité de l'air dans les infrastructures de transports².

Cette synthèse s'articule autour des items suivants :

- répartition temporelle et géographique des références bibliographiques;
- modes de transports et polluants étudiés;
- stratégies et techniques de mesure mises en œuvre;
- niveaux de concentration observés pour les polluants d'intérêts.

3.1 REPARTITION TEMPORELLE ET GEOGRAPHIQUE

La Figure 1 présente la répartition par année de publications, des références étudiées. Les années 2002 et 2005 présentent le plus grand nombre d'études publiées, depuis 2006 le nombre d'études publiées par année est plus faible.

² Air intérieur - Bilan/veille sur la qualité de l'air intérieur à un niveau national et international : travaux récents et nouveaux instruments disponibles. J.Larbre, C. Marchand. Décembre 2009. LCSQA. Réf. INERIS - DRC-09-103367-15670A

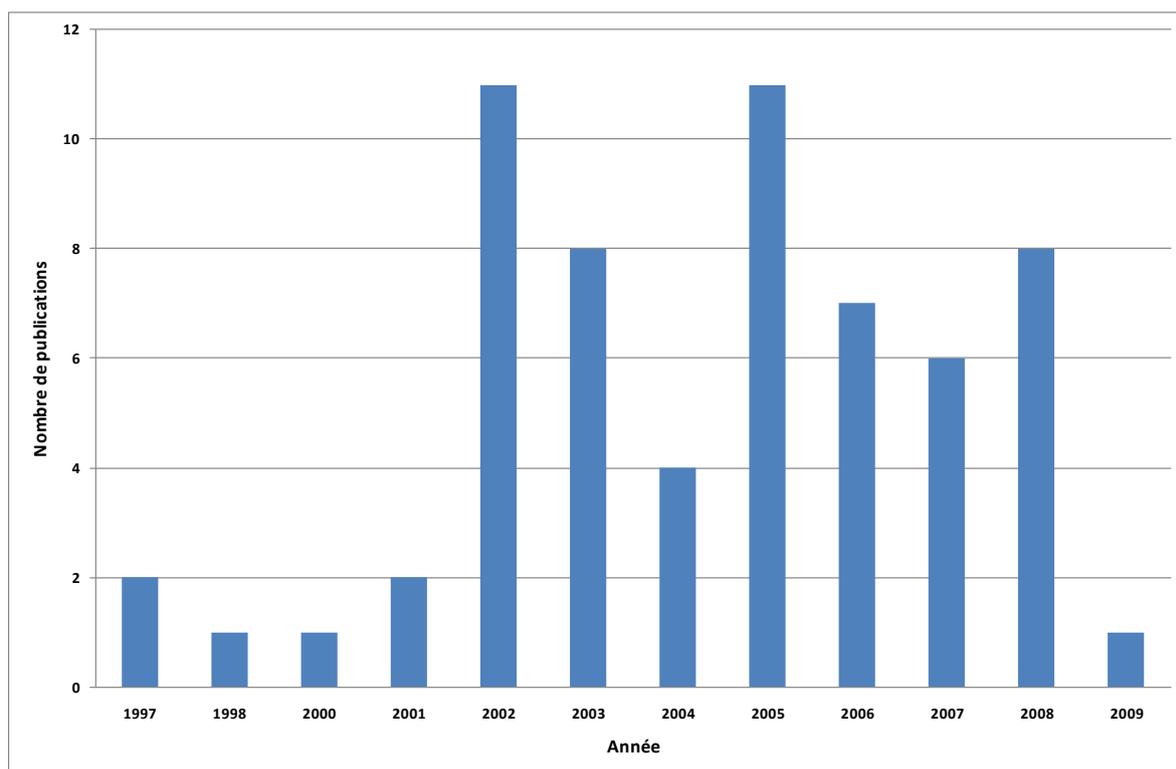


Figure 1 : Répartition des références par années de publication

D'après la Figure 2, l'Europe est la zone géographique où le nombre d'études publiées a été le plus important. La France a publié une dizaine de publications.

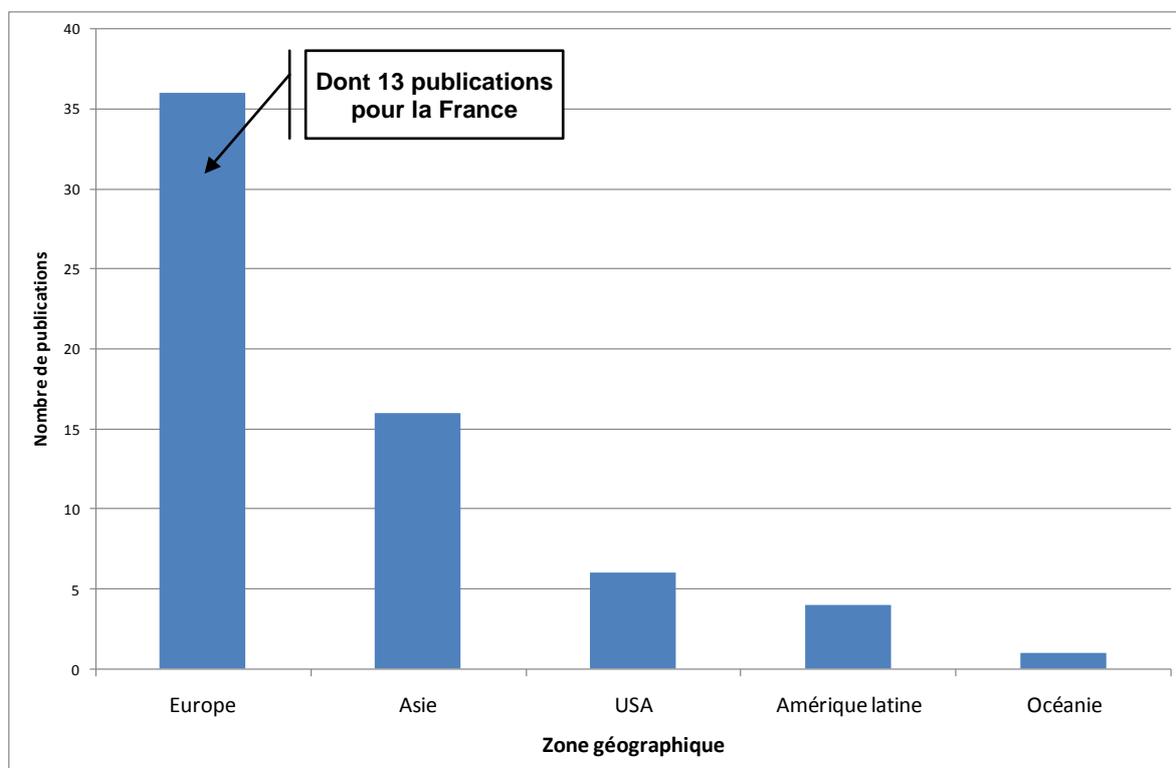


Figure 2 : Répartition des références par zone géographique

Parmi les 36 références sélectionnées pour l'Europe, la France compte 13 publications.

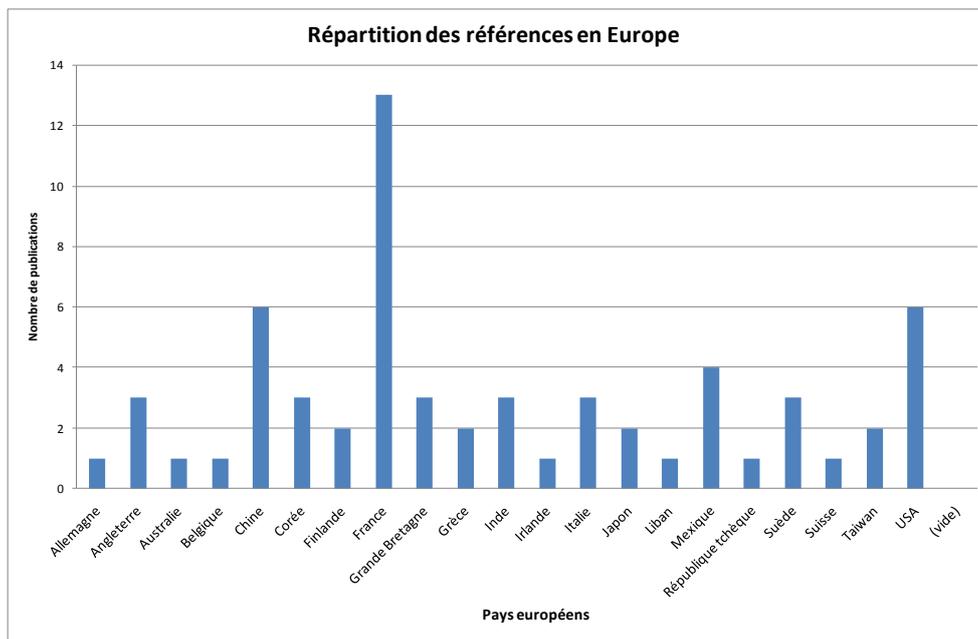


Figure 3 : Répartition des références en Europe

3.2 MODES DE TRANSPORTS – POLLUANTS

Un nombre important de modes de transport différents ont été étudiés (modes de transports simples et modes de transports combinés). Pour une meilleure lisibilité de l'information, les modes de transport ont été regroupés en 4 catégories :

- Collectif (Avion, Bus, Ferry, Métro, Train, Tramway)
- Voiture (Taxi, Voiture)
- Mode de déplacement doux (Marche à pied, cycles)
- Divers (Camion, Moto, Tunnels, Non connu)

La Figure 3 présente la répartition des modes de transports dans les 4 catégories. On remarque d'après la figure que les transports collectifs (39% des références) et la voiture (37% des références) ont été étudiés de manière importante et en proportions équivalentes, alors que les modes de transport dit « doux » ont été peu étudiés (16% des références).

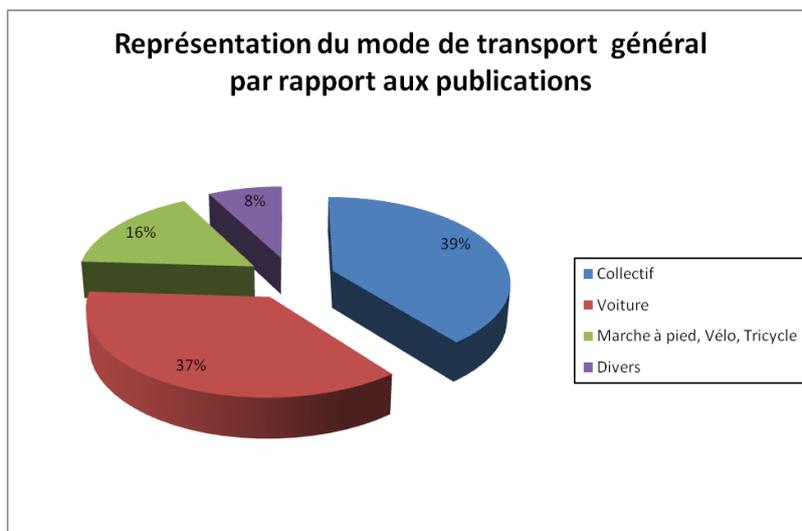


Figure 4 : Répartition des références par modes de transport étudiés

La Figure 5 présente un panel des polluants mentionnés dans les différentes études. La répartition par polluant indique la hiérarchisation suivante pour les polluants jugés prioritaires lors de la sélection des références :

- 29% des polluants étudiés : particules avec caractérisation de la concentration massique de particules totales (TSP) et des fractions granulométriques (PM10, PM2.5, PM1) et de la concentration en nombre pour les particules ultrafines (PUF)
- 19% des polluants étudiés : benzène, toluène, éthyl-benzène et xylènes (BTEX)
- 15% des polluants étudiés : monoxyde de carbone (CO)
- 13% des polluants étudiés : oxydes d’azote (NOx).

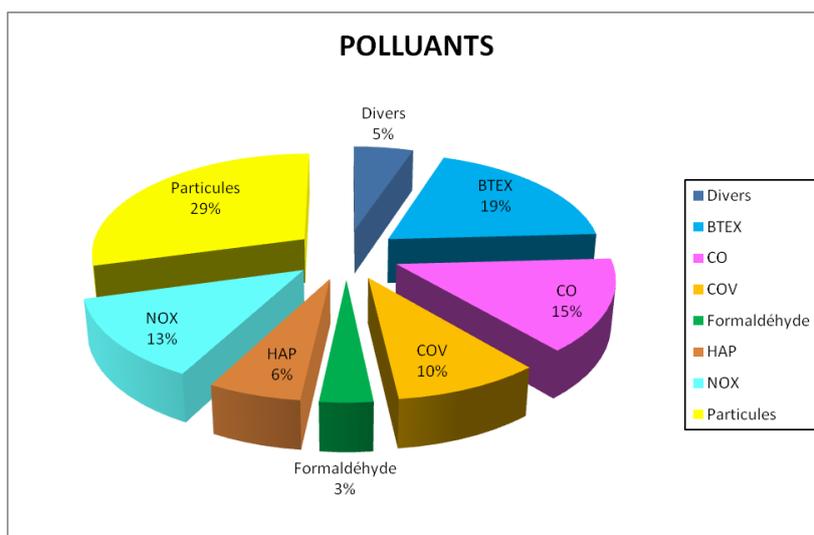


Figure 5 : Répartition des références par polluants étudiés

D’autres polluants représentent une part non négligeable des références sélectionnées, il s’agit des composés organiques volatils (COV) autres que les

BTEX (10% des références), des hydrocarbures aromatiques polycycliques (6%) et dans une moindre mesure du formaldéhyde (3%).

3.3 METHODES DE MESURE

Dans l'ensemble des publications, on distingue plusieurs approches métrologiques.

Certaines méthodes permettent des mesures en continu donnant des valeurs instantanées (via des analyseurs automatiques), d'autres des mesures dites intégratives donnant des valeurs moyennes (via des prélèvements sur support adapté suivi d'une analyse en laboratoire).

En fonction des polluants, ces deux approches ne sont pas systématiquement disponibles sur un plan technique ou elles nécessitent alors l'utilisation de matériels lourds.

Le tableau suivant présente les principaux moyens de mesures ayant été mis en œuvre dans ces études.

POLLUANTS	TYPE DE MESURE	METHODE DE REFERENCE	AUTRES METHODES	Avantages	Inconvénients
POUSSIERES	Intégrative	Gravimétrie (NF EN 12341) Prélèvement sur filtre + pesée		Méthode de référence	Mesures non dynamiques
	En continu		TEOM (Microbalance à Elément Conique Oscillant)	Méthode reconnue comme équivalente à la méthode de référence Mesures en temps réel	Matériel encombrant Sensibles aux vibrations
			Optique	Mesures en temps réel Matériel compact et transportable	Disparité avec la méthode de référence
NOx	Intégrative		Prélèvement sur tubes ou filtres (Actif ou passif)+ analyse au laboratoire	Matériel petit/léger/transportable	Mesures non dynamiques
	En continu	Chimiluminescence (NF EN 14211)		Mesures en temps réel	Matériel encombrant
CO	En continu		Electrochimique	Matériel petit/léger/transportable	Fiabilité
		Rayonnement infrarouge non dispersif (NF EN 14626)		Mesures en temps réel	Matériel encombrant
BTEX	Intégrative	NF EN 14662		Matériel petit/léger/transportable	Mesures non dynamiques
	En continu			Mesure en continu	Matériel encombrant

3.4 NIVEAUX DES CONCENTRATIONS ET METHODES DE MESURE RELEVES DANS LA LITTERATURE

Les concentrations en dioxyde d'azote, en monoxyde de carbone, en benzène, en toluène, en PM2.5 et en PM10 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ainsi que les méthodes de mesure de ces polluants ont été recensées dans les références étudiées.

Les valeurs des concentrations et les méthodes de mesure sont présentées graphiquement en fonction des différents modes de transports dans lesquels elles ont été mesurées et selon les zones géographiques d'étude (en abscisse).

Le nombre de valeurs utilisées pour la réalisation des graphiques suivants est indiqué en abscisse par mode de transport et par zone géographique. Pour une publication donnée ce nombre correspond :

- soit à une valeur lorsqu'un seul résultat était disponible, ce résultat pouvant être la moyenne de plusieurs mesures non détaillées dans la publication,
- soit la moyenne de plusieurs valeurs lorsque plusieurs résultats de mesures étaient donnés dans la publication.

3.4.1 DIOXYDE D'AZOTE

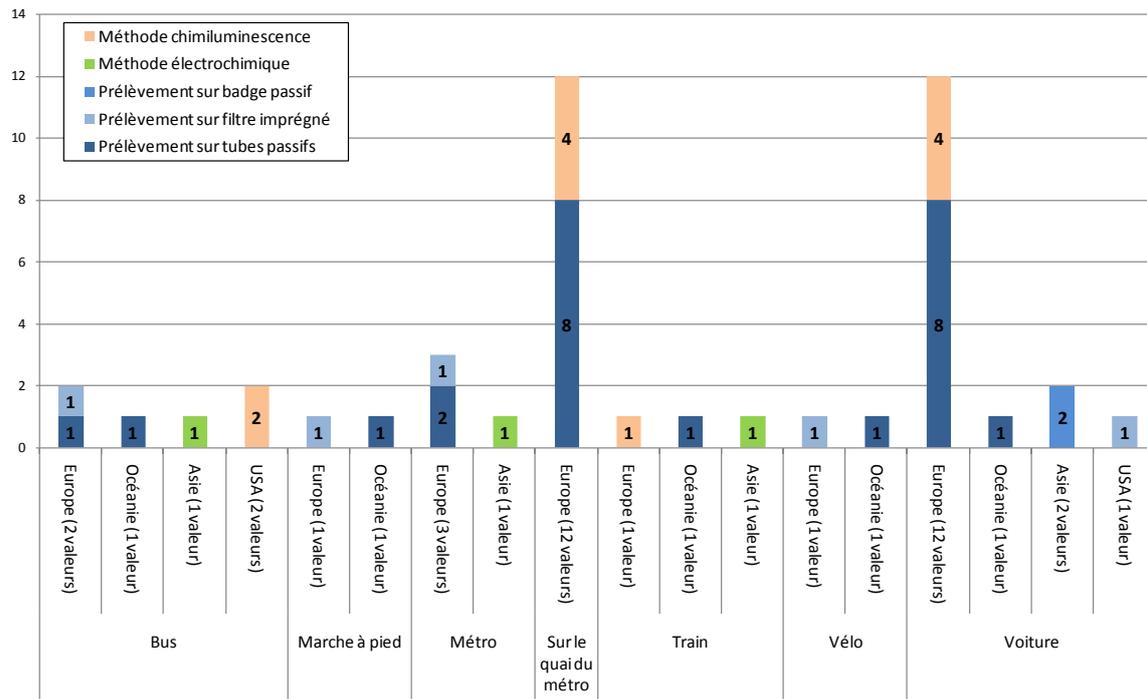


Figure 5 : Méthodes utilisées pour l'analyse dioxyde d'azote (NO_2) relevées dans la littérature

Les études de caractérisation des niveaux de concentration en NO_2 ont majoritairement mis en œuvre des méthodes par prélèvements passifs (sur tubes, sur badges ou sur filtres imprégnés) qui sont des systèmes facilement transportables. Ces méthodes sont une alternative à la méthode de référence de mesure en continu (la chimiluminescence) qui nécessite du matériel lourd et nécessitant une alimentation électrique.

L'échantillonnage passif peut être utilisé pour déterminer les concentrations moyennes d'exposition par inhalation, cependant il ne convient pas au suivi de variations instantanées ou de courtes durées de la concentration.

En Océanie, une étude [M. Chertok, 2004] a comparé plusieurs modes de transport (bus, marche à pied, train, vélo et voiture) en utilisant des prélèvements sur tubes passifs. En Asie [C.K. Chau, 2002] ces comparaisons (bus, métro et train) ont été réalisées en utilisant la méthode électrochimique.

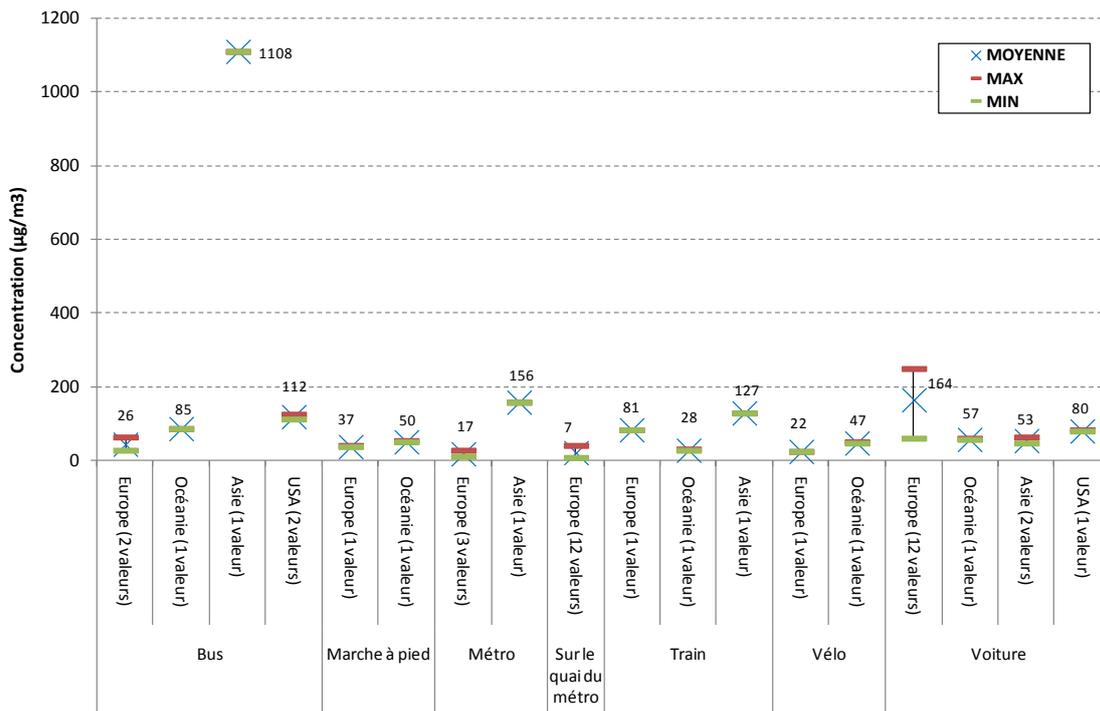


Figure 6 : Concentrations en dioxyde d'azote (NO₂) relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude

On constate une valeur très importante à 1108 µg/m³ en NO₂ dans le bus en Asie. La publication [C.K. Chau, 2002] concernée n'a pas mentionné d'hypothèse permettant d'expliquer cette valeur. Ce point mis à part, les concentrations moyennes en dioxyde d'azote sont globalement inférieures à 200 µg/m³ relativement peu dispersées. Pour un même mode de transport, l'écart le plus important est observé dans le métro avec une concentration minimale de 17 µg/m³ en Europe, et une concentration maximale de 156 µg/m³ en Asie.

Les concentrations moyennes en NO₂ relevées en Europe et associées aux différents modes de transports ont été classées par ordre croissant (le rang 1 étant le plus faible et le rang 7 le plus fort) (figure 7). C'est pour le vélo et le métro en Europe que les concentrations sont les plus faibles.

Ce classement est illustratif, il ne tient pas compte de biais éventuels liés à des méthodes et des stratégies de mesures différentes. Ces tendances ne sont donc qu'indicatives. Elles sont à prendre avec précaution. En effet, des distorsions peuvent être introduites par des modes de transports et des polluants qui sont plus ou moins bien étudiés (en nombre et qualité des études disponibles), facteurs entraînant une hétérogénéité des populations de données.

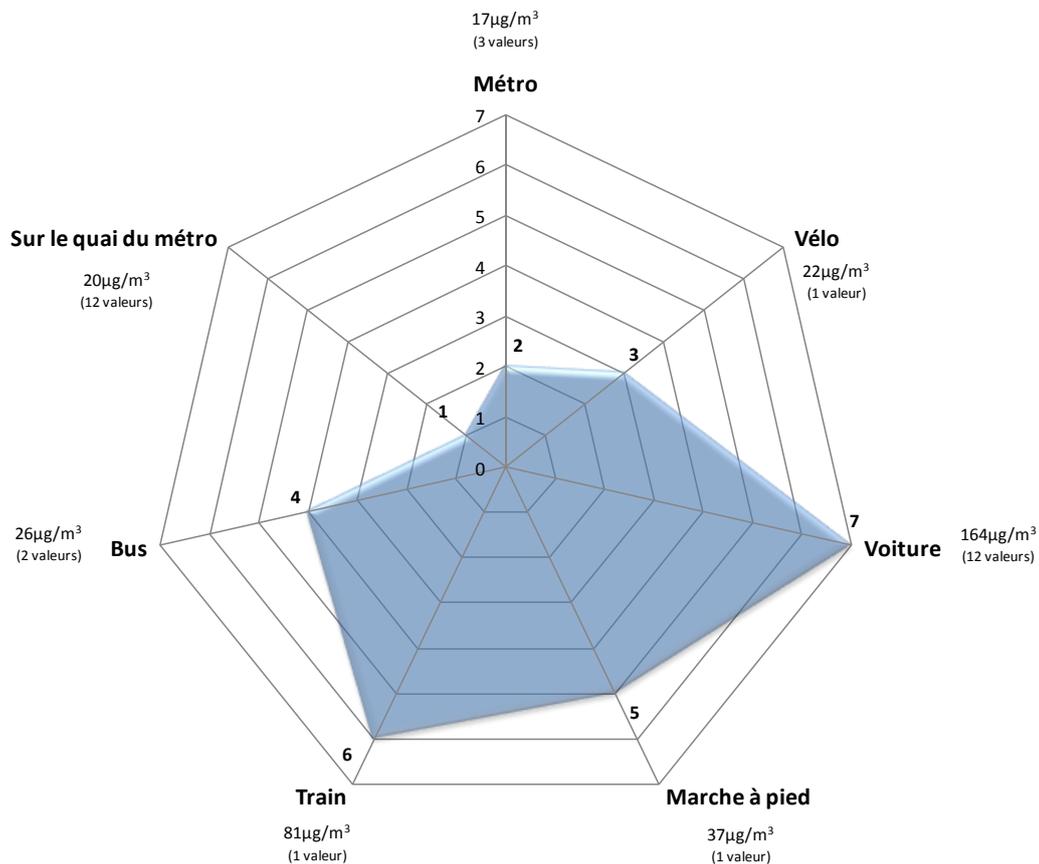


Figure 7 : Classement des concentrations moyennes en NO₂ relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe

3.4.2 MONOXYDE CARBONE

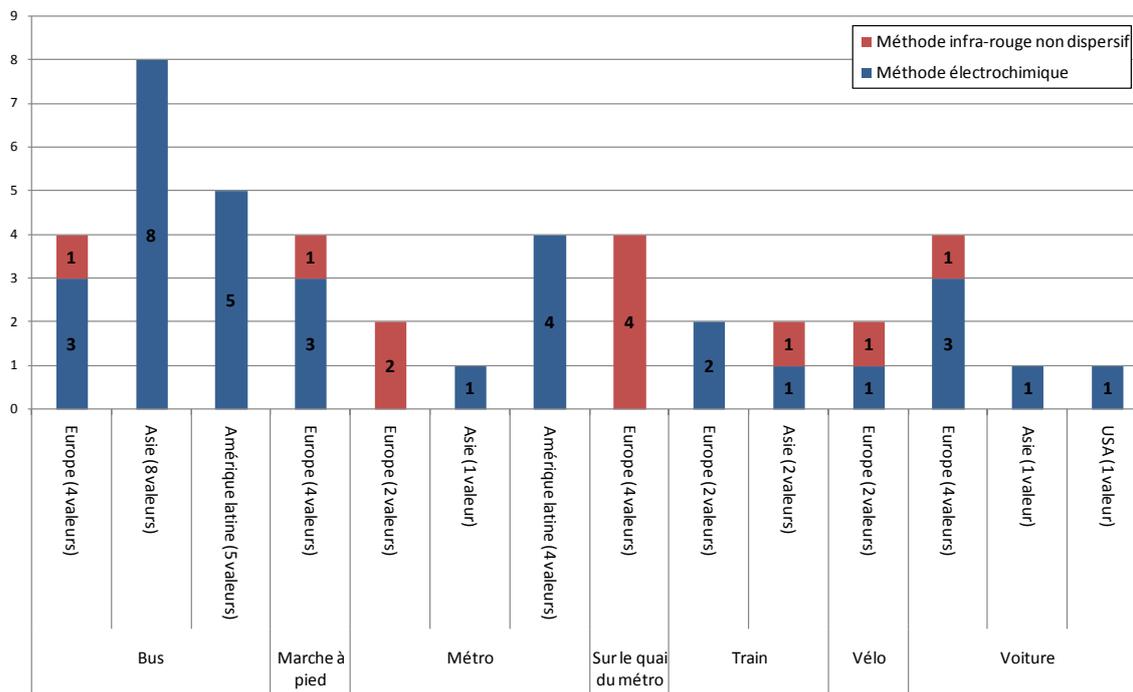


Figure 8 : Méthodes utilisées pour l'analyse du monoxyde de carbone (CO) relevées dans la littérature

La détermination des niveaux de concentrations en CO a été réalisée majoritairement par la méthode électrochimique qui est transportable. La méthode de référence de mesure en continu, le rayonnement infrarouge non dispersif, nécessite du matériel lourd et nécessitant une alimentation électrique.

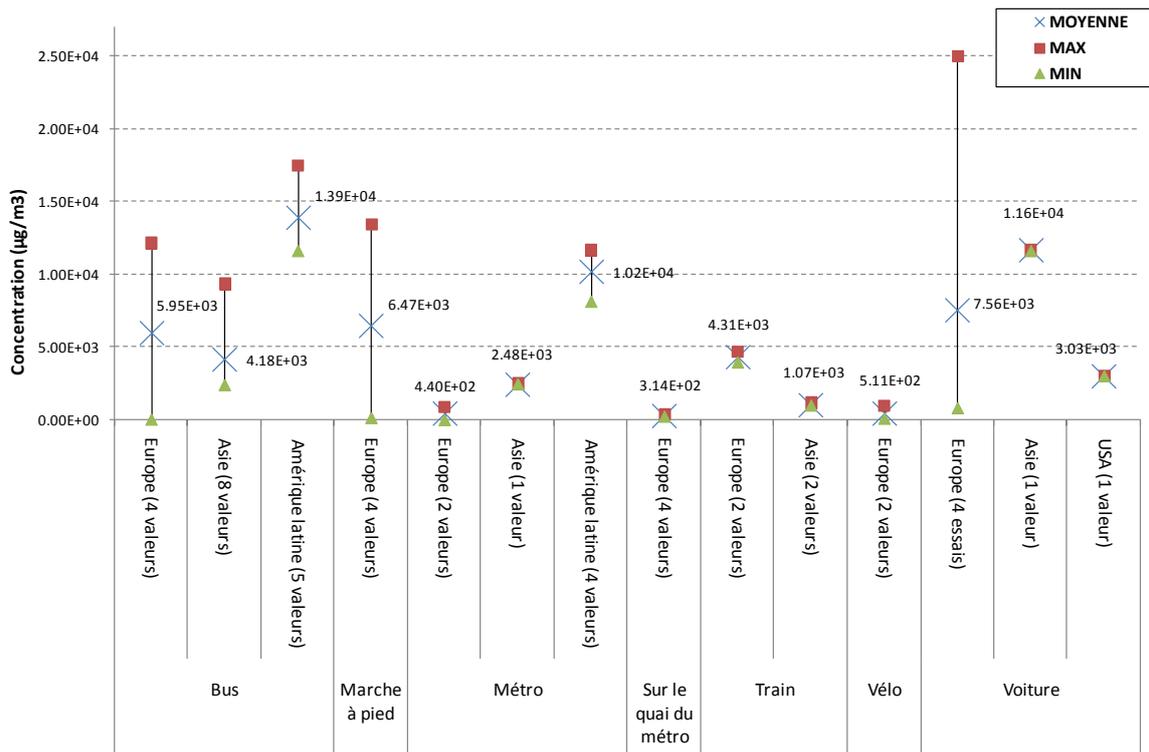


Figure 9 : Concentrations en monoxyde carbone (CO) relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude

Pour le monoxyde de carbone, on remarque une forte hétérogénéité des résultats de mesures selon les zones géographiques d'étude et selon les modes de transports étudiés. Les concentrations moyennes varient entre $3.14 \cdot 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $1.39 \cdot 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les résultats obtenus indiquent globalement des concentrations en CO plus faible sur le quai du métro que dans les autres modes de transports.

On constate que les concentrations en CO dans le métro et dans le train sont en général plus faibles que dans les autres modes de transports, excepté en Amérique Latine où les valeurs sont plus importantes dans le métro (entre $8 \cdot 10^3$ et $1,1 \cdot 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Les publications concernées ([J.E. Gomez-Perales, 2003], [Henry Wöhrnschimmel, 2008], et [J.E. Gomez-Perales, 2007]) ne fournissent pas d'explication à ces valeurs particulièrement élevées.

On constate une grande disparité pour les concentrations en CO dans la voiture en Europe. Elles varient entre $8 \cdot 10^2$ et $2,5 \cdot 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Une concentration maximale en CO s'élevant à $2,5 \cdot 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a été mesurée en Grèce [A. Duci, 2003] tandis que les autres concentrations mesurées varient de $8 \cdot 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $3 \cdot 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La publication [A. Duci, 2003] ne mentionne aucune hypothèse permettant d'expliquer cette valeur.

Les concentrations moyennes en CO relevées en Europe et associées aux différents modes de transports ont été classées par ordre croissant (le rang 1 étant le plus faible et le rang 7 le plus fort) (figure 10).

Ce classement est illustratif, il ne tient pas compte de biais éventuels liés à des méthodes et des stratégies de mesures différentes. Ces tendances ne sont donc qu'indicatives. Elles sont à prendre avec précaution. En effet, des distorsions peuvent être introduites par des modes de transports et des polluants qui sont plus ou moins bien étudiés (en nombre et qualité des études disponibles), facteurs entraînant une hétérogénéité des populations de données.

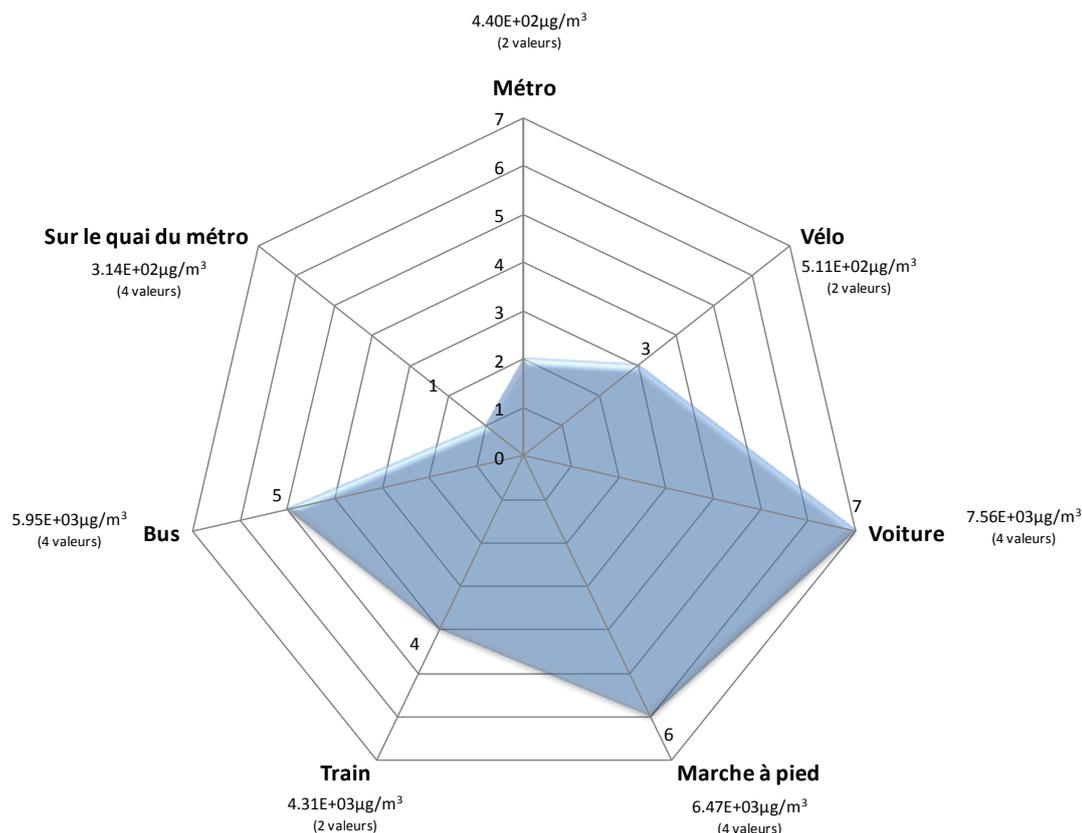


Figure 10 : Classement des concentrations moyennes en CO relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe

3.4.3 BENZENE ET TOLUENE

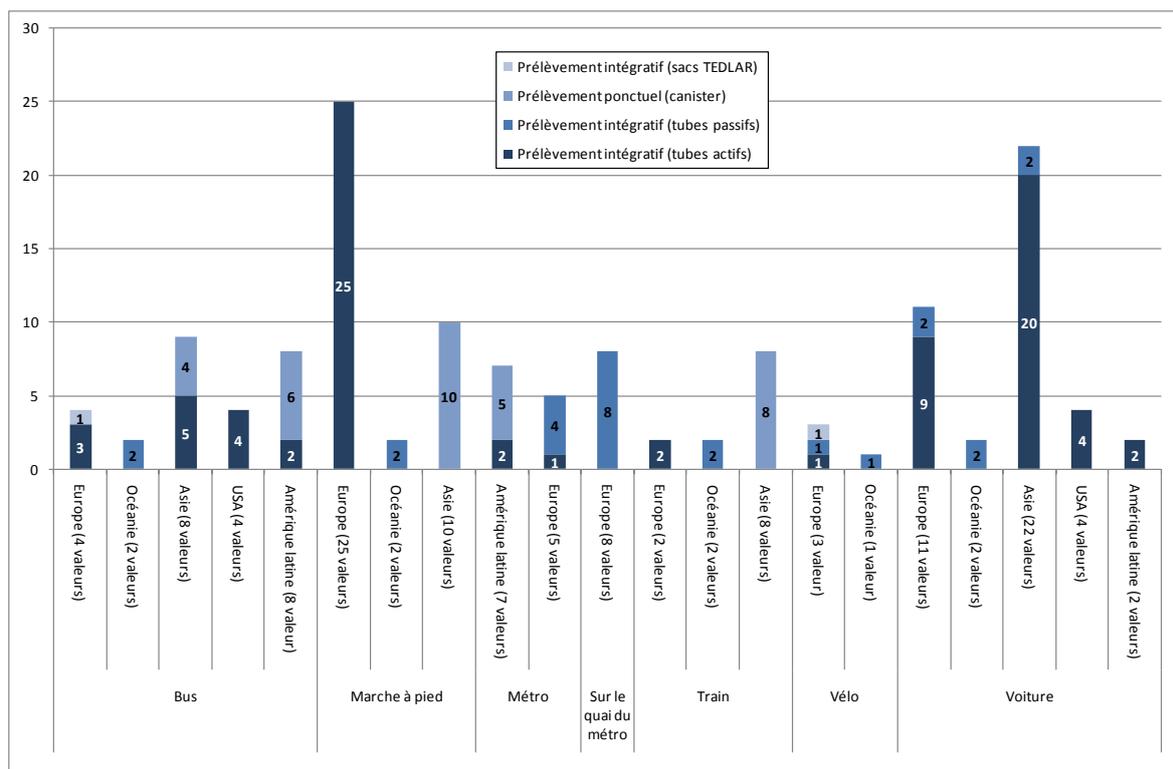


Figure 11 : Méthodes utilisées pour l'analyse du benzène et du toluène relevées dans la littérature

La détermination des niveaux de concentrations en benzène et toluène a été réalisée dans ces études **uniquement** par prélèvements ponctuels ou intégratifs :

- dans des sacs TEDLAR® ,
- sur canister (enceinte en acier traité intérieurement pour éviter l'adsorption des composés sur la paroi),
- sur support solide : par diffusion (tubes passifs) ou par pompage (tubes actifs).

Tous ces prélèvements sont associés à une analyse, en différé, au laboratoire après la phase de prélèvement.

En Océanie, une étude [M. Chertok, 2004] a comparé plusieurs modes de transport (bus, marche à pied, train, vélo et voiture) en utilisant des prélèvements sur tubes passifs.

3.4.3.1 BENZENE

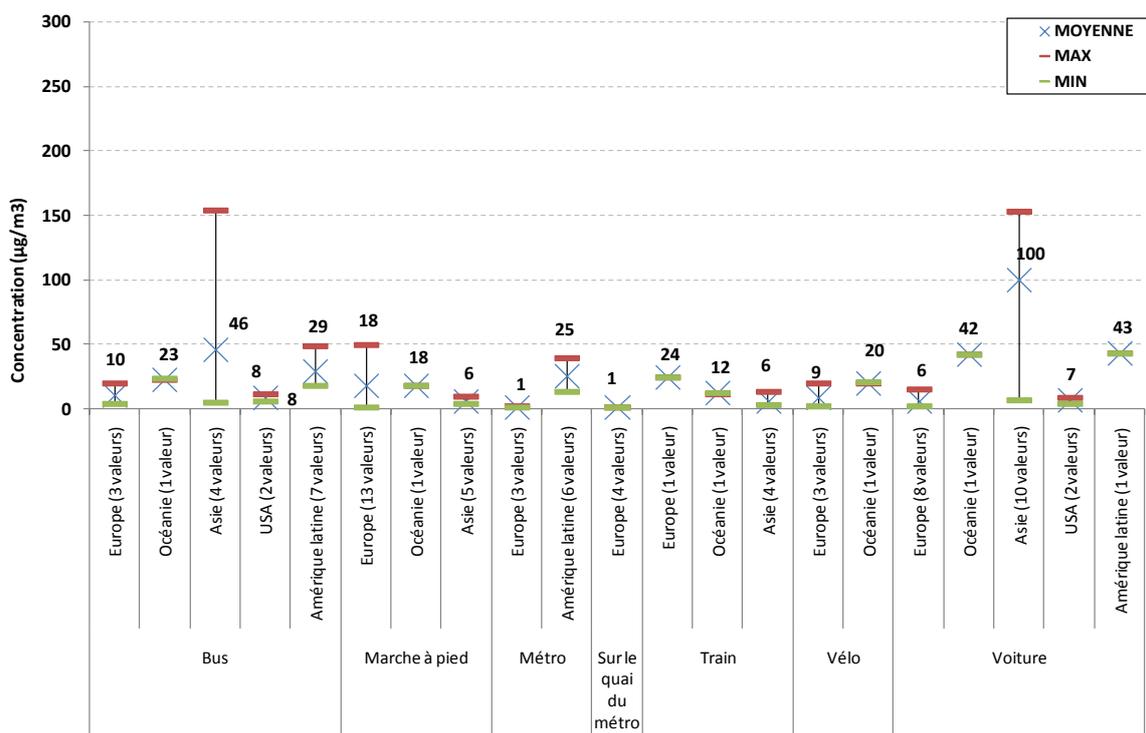


Figure 12 : Concentrations en benzène relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude

Les concentrations en benzène rapportées présentent globalement une faible étendue, la majorité des valeurs sont comprises entre 1 et 50 µg/m³. En Europe, le métro et la quai du métro présentent les concentrations les plus faibles, puis les modes de transport vélo, voiture, bus, train et marche à pied sont associés aux niveaux de concentrations les plus élevés.

Certaines concentrations très élevées en benzène n'ont pas été reportées sur la Figure 12 car, selon les publications concernées, ces teneurs proviendraient de fuites d'essence dans des bus et voitures (en Asie : [M. Branis, 2002] et [D. Som, 2006]) ou de la présence fumées dans les voitures lors des essais (en Europe : [Y. Min Kim, 2001]).

Les concentrations moyennes en benzène relevées en Europe et associées aux différents modes de transports ont été classées par ordre croissant (le rang 1 étant le plus faible et le rang 7 le plus fort) (figure 13).

Ce classement est illustratif, il ne tient pas compte de biais éventuels liés à des méthodes et des stratégies de mesures différentes. Ces tendances ne sont donc qu'indicatives. Elles sont à prendre avec précaution. En effet, des distorsions peuvent être introduites par des modes de transports et des polluants qui sont plus ou moins bien étudiés (en nombre et qualité des études disponibles), facteurs entraînant une hétérogénéité des populations de données.

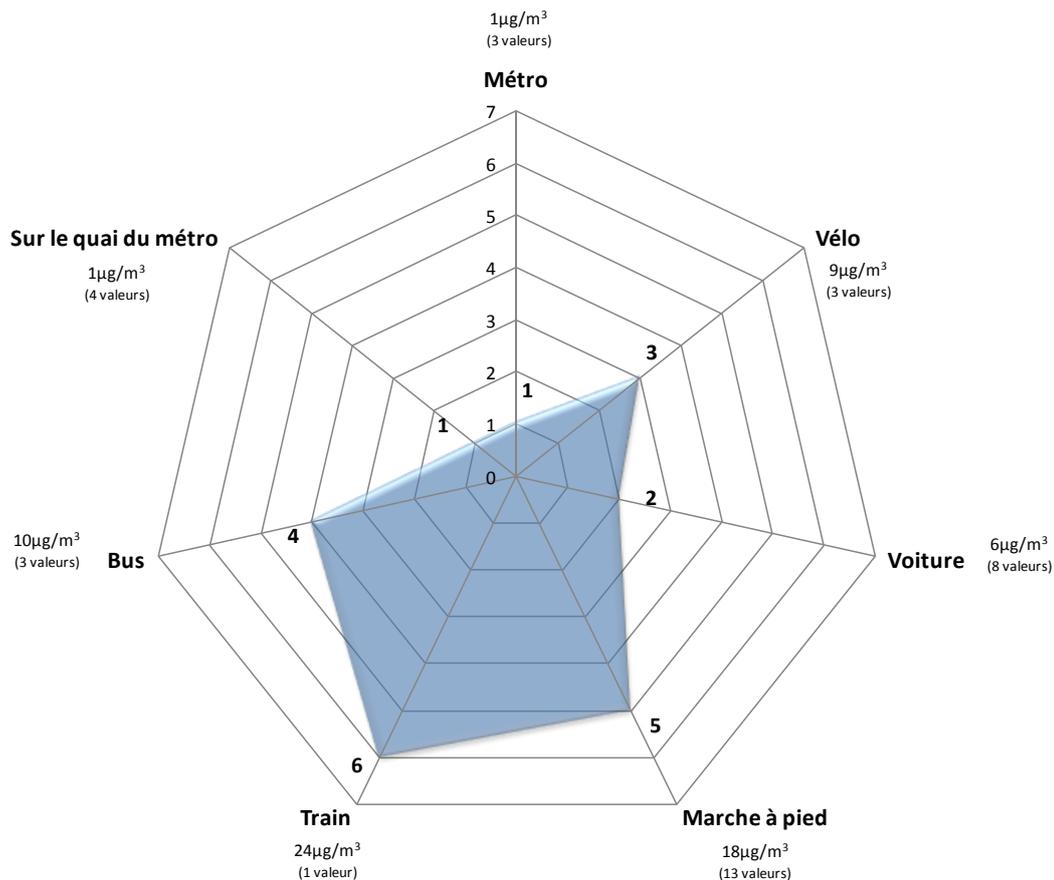


Figure 13 : Classement des concentrations moyennes en benzène relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe

3.4.3.2 TOLUENE

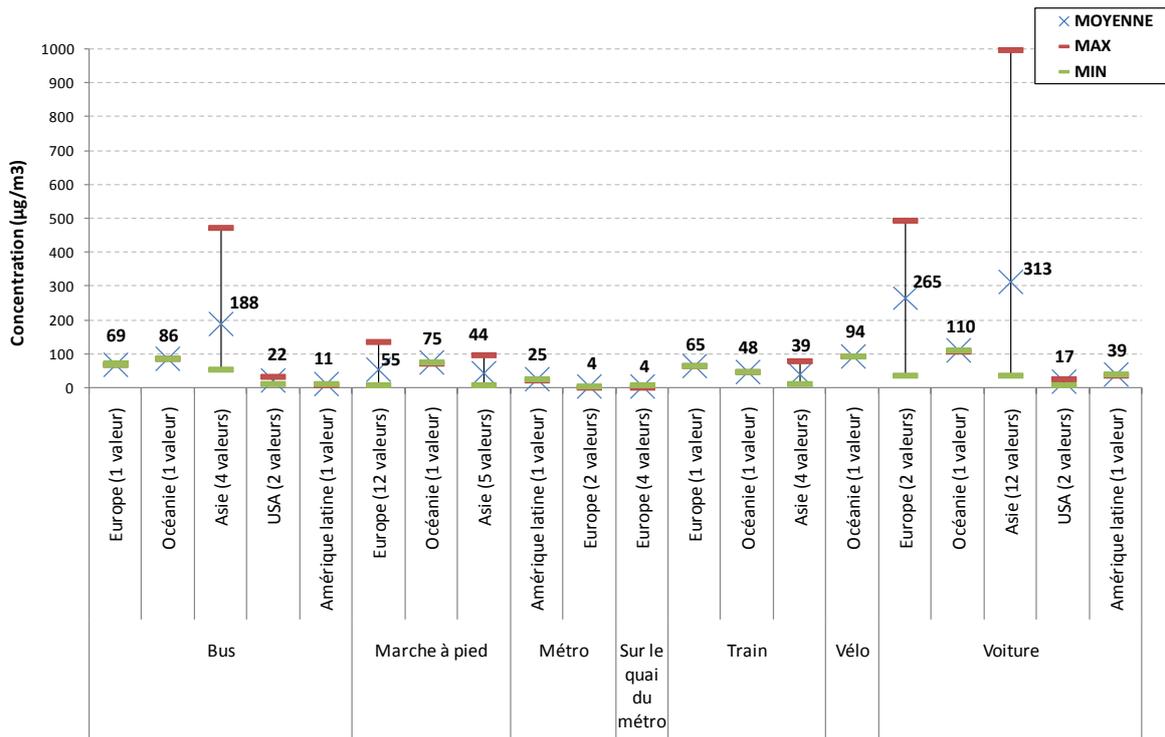


Figure 14 : Concentrations massiques en Toluène relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude

Les concentrations en toluène rapportées présentent globalement une faible étendue, la majorité des valeurs sont inférieures à 100 µg/m³.

Deux valeurs très importantes (2000 et 2700 µg/m³) n'ont pas été rapportées pour la voiture en Asie. La publication [Y-C Chien, 2007] ne mentionne aucune explication sur ces niveaux de concentrations si élevées.

Les niveaux de concentrations les plus élevés sont associés aux modes de transports voiture en Asie [D. Som, 2006] et en Europe [Y. Min Kim, 2001], et bus en Asie [M. Branis, 2002]. Concernant la voiture en Asie, la publication [D. Som, 2006] mentionne le fait que les quatre concentrations les plus élevées comprises entre 303 et 996 µg/m³ sont associées à la présence d'essence avec une teneur en benzène de 5%. Concernant la voiture en Europe et le bus en Asie, aucune explication n'a été mentionnée dans ces publications.

Deux valeurs très importantes (2000 et 2700 µg/m³) ont été supprimées pour la voiture en Asie (204 µg/m³). La publication [Y-C Chien, 2007] ne mentionne aucune explication sur ces niveaux de concentrations si élevées.

Les concentrations moyennes en toluène relevées en Europe et associées aux différents modes de transports ont été classées par ordre croissant (le rang 1 étant le plus faible et le rang 7 le plus fort) (figure 15).

Ce classement est illustratif, il ne tient pas compte de biais éventuels liés à des méthodes et des stratégies de mesures différentes. Ces tendances ne sont donc qu'indicatives. Elles sont à prendre avec précaution. En effet, des distorsions peuvent être introduites par des modes de transports et des polluants qui sont plus ou moins bien étudiés (en nombre et qualité des études disponibles), facteurs entraînant une hétérogénéité des populations de données.

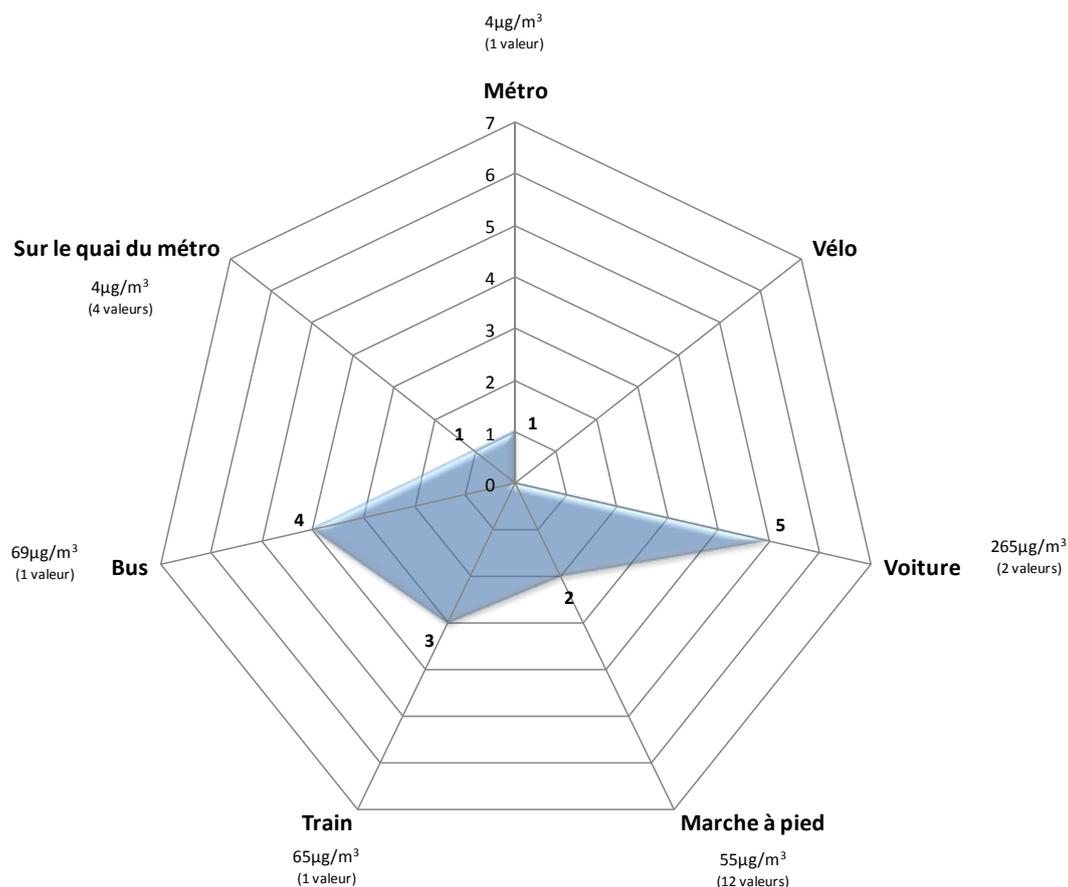


Figure 15 : Classement des concentrations moyennes en Toluène relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe

3.4.4 PARTICULES

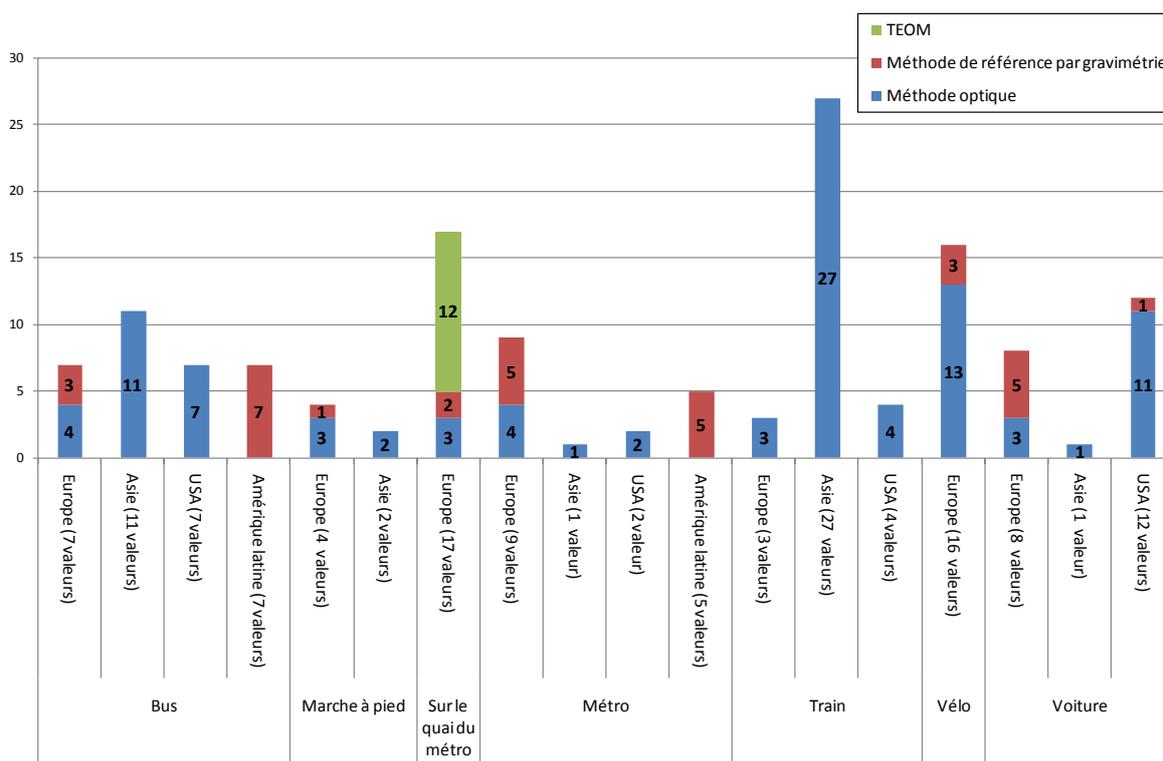


Figure 16 : Méthodes utilisées pour l'analyse des particules PM2.5 et PM10 relevées dans la littérature

La majorité des essais auxquels ces études font référence ont été réalisés avec des indicateurs optiques qui permettent une estimation des niveaux de concentration massique en temps réel. Ce type de matériel est transportable.

Les alternatives à cette méthode optique sont :

- la méthode de référence non dynamique et intégrative par gravimétrie,
- la méthode de mesure en continu, par microbalance à élément conique oscillant ou TEOM.

Ces deux méthodes impliquent l'utilisation de matériels lourds, nécessitant une alimentation électrique.

3.4.4.1 PARTICULES PM10

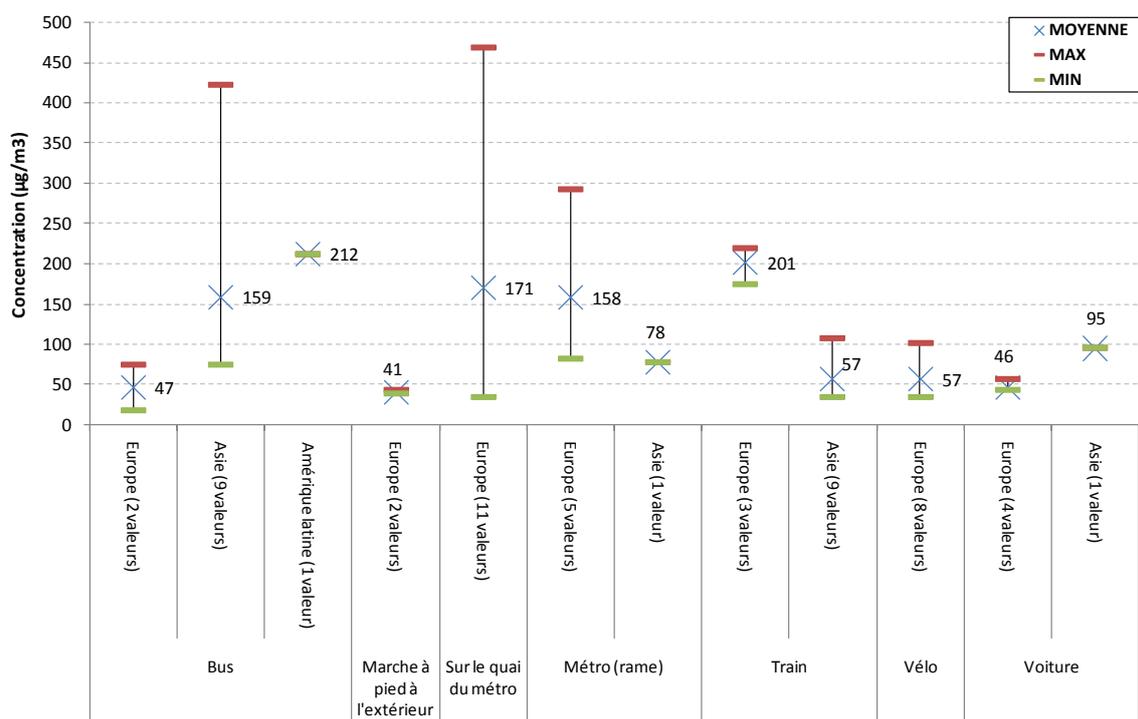


Figure 17 : Concentrations massiques en particules PM10 relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude

Les concentrations en PM10 sont relativement hétérogènes d'un mode de transport à l'autre et pour le même mode de transport. Elles varient entre 18 et 469 µg/m³. En Europe, les modes de transports voiture, bus, vélo et marche à pied à l'extérieur présentent les niveaux de concentrations moyens les plus faibles. Ils sont les plus importants sur les quais du métro, dans la rame du métro et dans le train. Pour ce mode de transport, il apparaît que les concentrations peuvent varier selon les stations, le type de ligne (type « fer » ou « pneumatique ») et les heures d'affluence.

La disparité des concentrations pour le bus en Asie est causée par une valeur très importante à 423 µg/m³ due à la mesure dans l'air l'intérieur d'un bus bloqué dans le trafic sous un tunnel non équipés d'air conditionné [Y-H Cheng, 2008]. Cette valeur mise à part, la moyenne des concentrations en PM10 dans les bus en Asie serait de 126 µg/m³ avec un minimum à 74 µg/m³ et un maximum à 181 µg/m³. La concentration en PM10 dans le bus en Amérique latine est importante (212 µg/m³). Aucune explication n'a été mentionnée dans la publication [H. Wöhrnschimmel, 2008].

On constate que les concentrations sur les quais du métro en Europe sont très disparates. Elles varient de 35 à 469 µg/m³. Sur les neuf concentrations, trois d'entre elles, ont été mesurées à Stockholm [C. Johansson, 2002] et varient entre 302 et 469 µg/m³ tandis que les autres concentrations varient de 35 à 171 µg/m³.

Concernant le train en Europe, deux valeurs très élevées (933 et 975 µg/m³) n'ont pas été rapportées pour cette figure car ces mesures ont été effectuées dans un compartiment fumeur [M. Leutwyler, 2002].

Les concentrations moyennes en PM10 relevées en Europe et associées aux différents modes de transports ont été classées par ordre croissant (le rang 1 étant le plus faible et le rang 7 le plus fort) (figure 18).

Ce classement est illustratif, il ne tient pas compte de biais éventuels liés à des méthodes et des stratégies de mesures différentes. Ces tendances ne sont donc qu'indicatives. Elles sont à prendre avec précaution. En effet, des distorsions peuvent être introduites par des modes de transports et des polluants qui sont plus ou moins bien étudiés (en nombre et qualité des études disponibles), facteurs entraînant une hétérogénéité des populations de données.

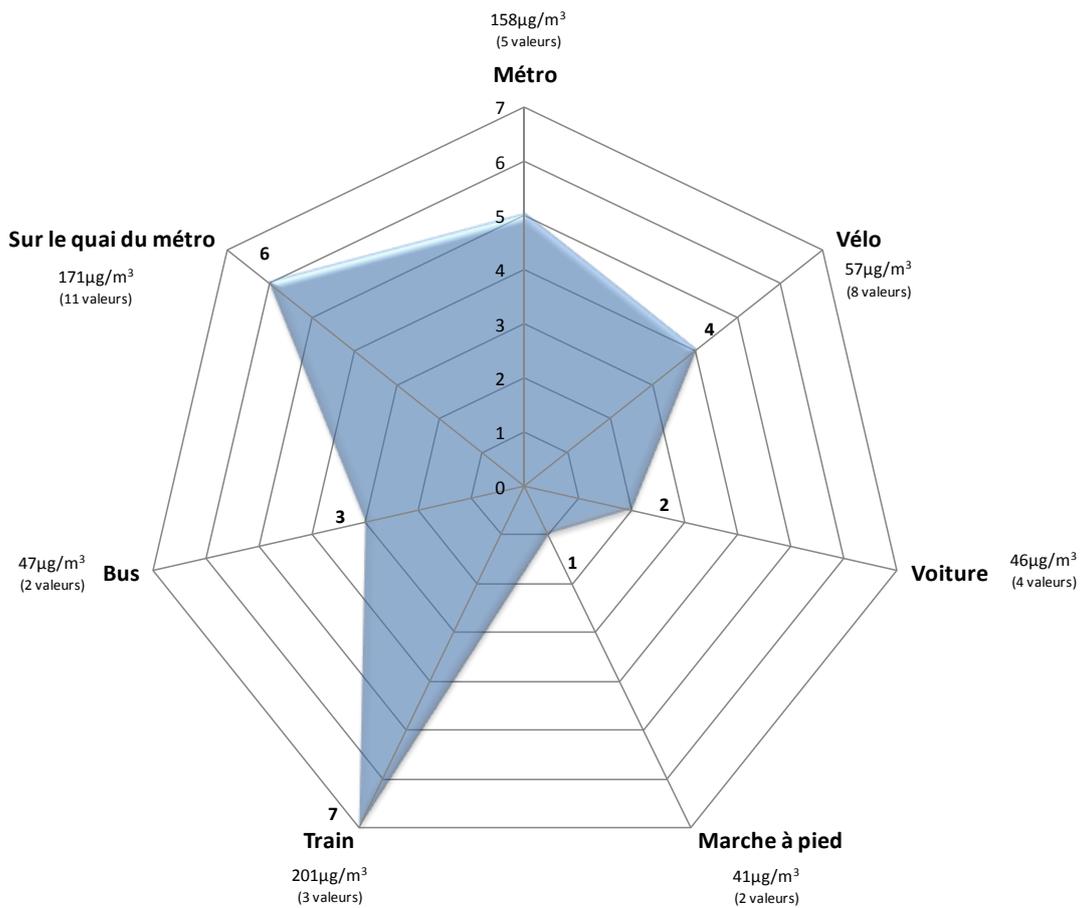


Figure 18 : Concentrations moyennes en PM10 relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe

3.4.4.2 PARTICULES PM2.5

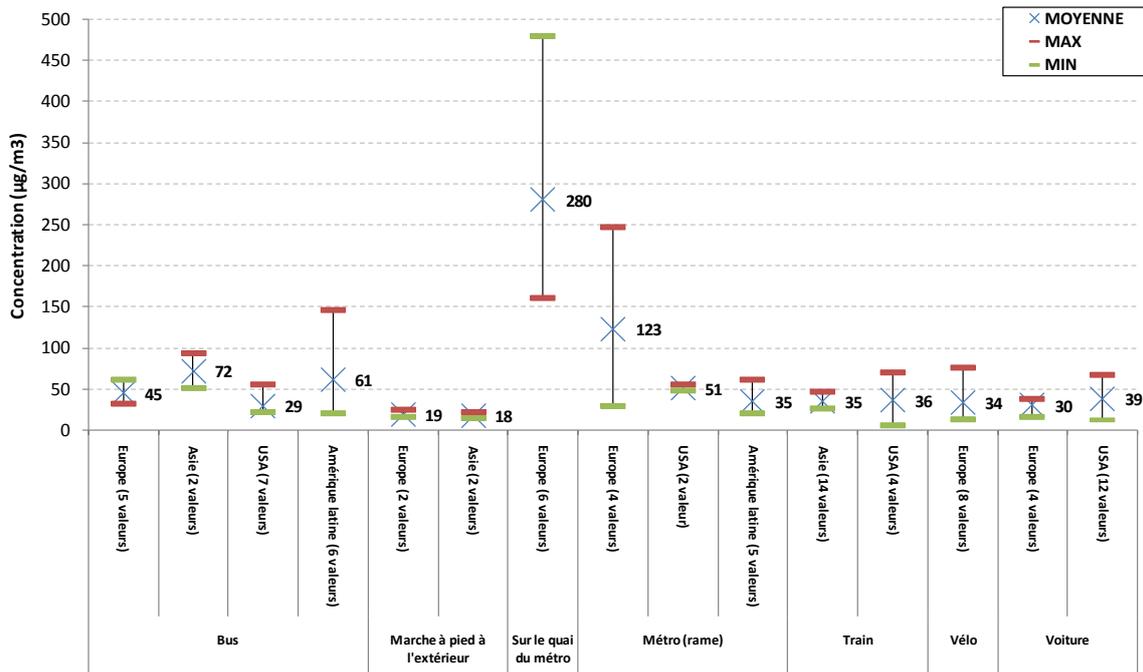


Figure 19 : Concentrations massiques en particules PM2.5 relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports et selon les zones géographiques d'étude

La majorité des essais auxquels ces études font référence ont été réalisés avec des techniques optiques d'estimation des niveaux de concentration massique en temps réel. La répartition des concentrations moyennes en PM2.5 est relativement plus homogène que pour les PM10. La majorité des concentrations est inférieures à 100 µg/m³, elles peuvent monter ponctuellement à 280 µg/m³.

Les modes de transports train, vélo, voiture et marche à pied à l'extérieur présentent les niveaux de concentrations les plus faibles.

On constate que les concentrations dans le métro et sur les quais du métro en Europe sont disparates. Elles varient de 29 à 247 µg/m³ pour la rame de métro, et de 160 à 480 µg/m³ pour le quai du métro. Pour la rame du métro en Europe, la disparité des concentrations en PM2.5 s'explique par une mesure effectuée sur une ligne de métro aérienne Londres égale à 29 µg/m³ [H.S. Adams, 2001] alors que les autres mesures ont été réalisées en milieu souterrain. Concernant les quais du métro en Europe, aucune explication n'a été mentionnée dans les publications [J.F. Hurley, 2003] et [C. Johansson, 2002].

De plus, on sait que les concentrations peuvent varier selon les stations de métro, le type de ligne (type « fer » ou « pneumatique ») et les heures d'affluence.

Les concentrations moyennes en PM2.5 relevées en Europe et associées aux différents modes de transports ont été classées par ordre croissant (le rang 1 étant le plus faible et le rang 7 le plus fort) (figure 20).

Ce classement est illustratif et non représentatif. Il ne tient pas compte de biais éventuels liés à des méthodes et des stratégies de mesures différentes. Ces tendances ne sont donc qu'indicatives. Elles sont à prendre avec précaution. En effet, des distorsions peuvent être introduites par des modes de transports et des polluants qui sont plus ou moins bien étudiés (en nombre et qualité des études disponibles), facteurs entraînant une hétérogénéité des populations de données.

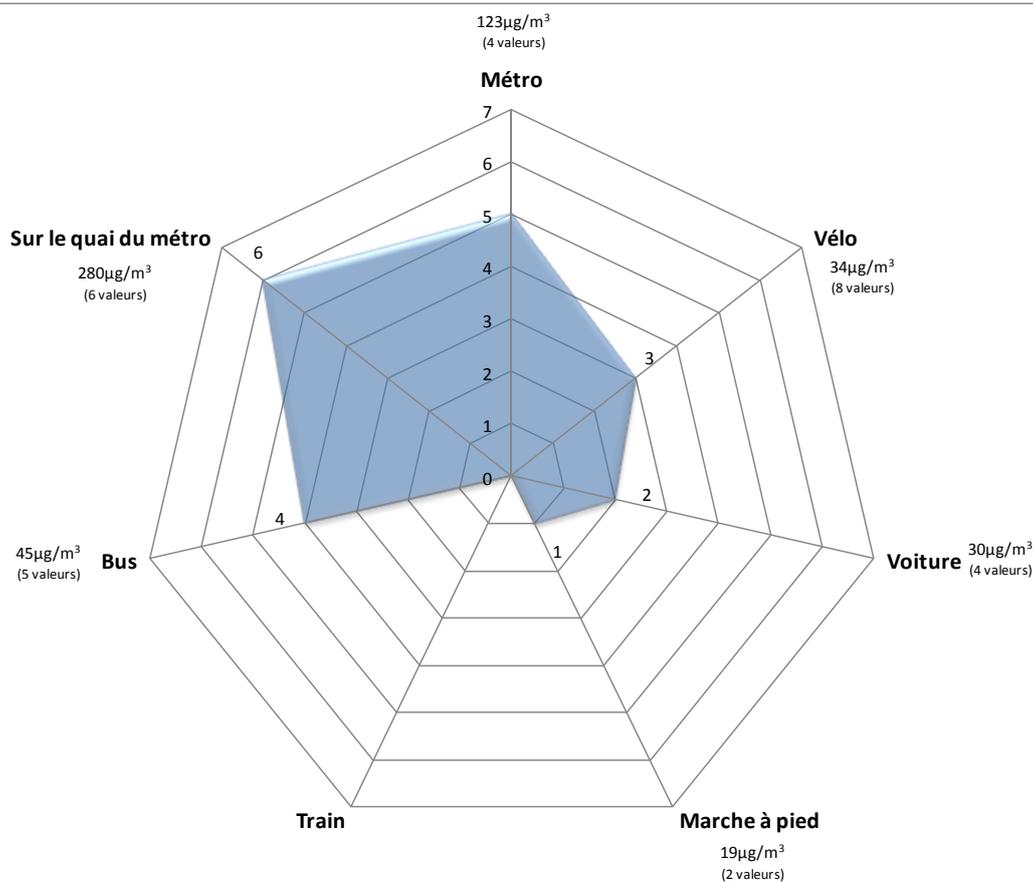


Figure 20 : Concentrations moyennes en PM2.5 relevées dans la littérature en fonction de différents modes de transports en Europe

3.4.5 BILAN DE LA SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Une synthèse, par mode de transports, des classements obtenus pour chaque polluant à partir des concentrations moyennes relevées en Europe dans la littérature est proposée. Les concentrations moyennes relevées et associées aux différents modes de transports ont été classées par ordre croissant (le rang 1 étant le plus faible et le rang 7 le plus fort) (figure 21).

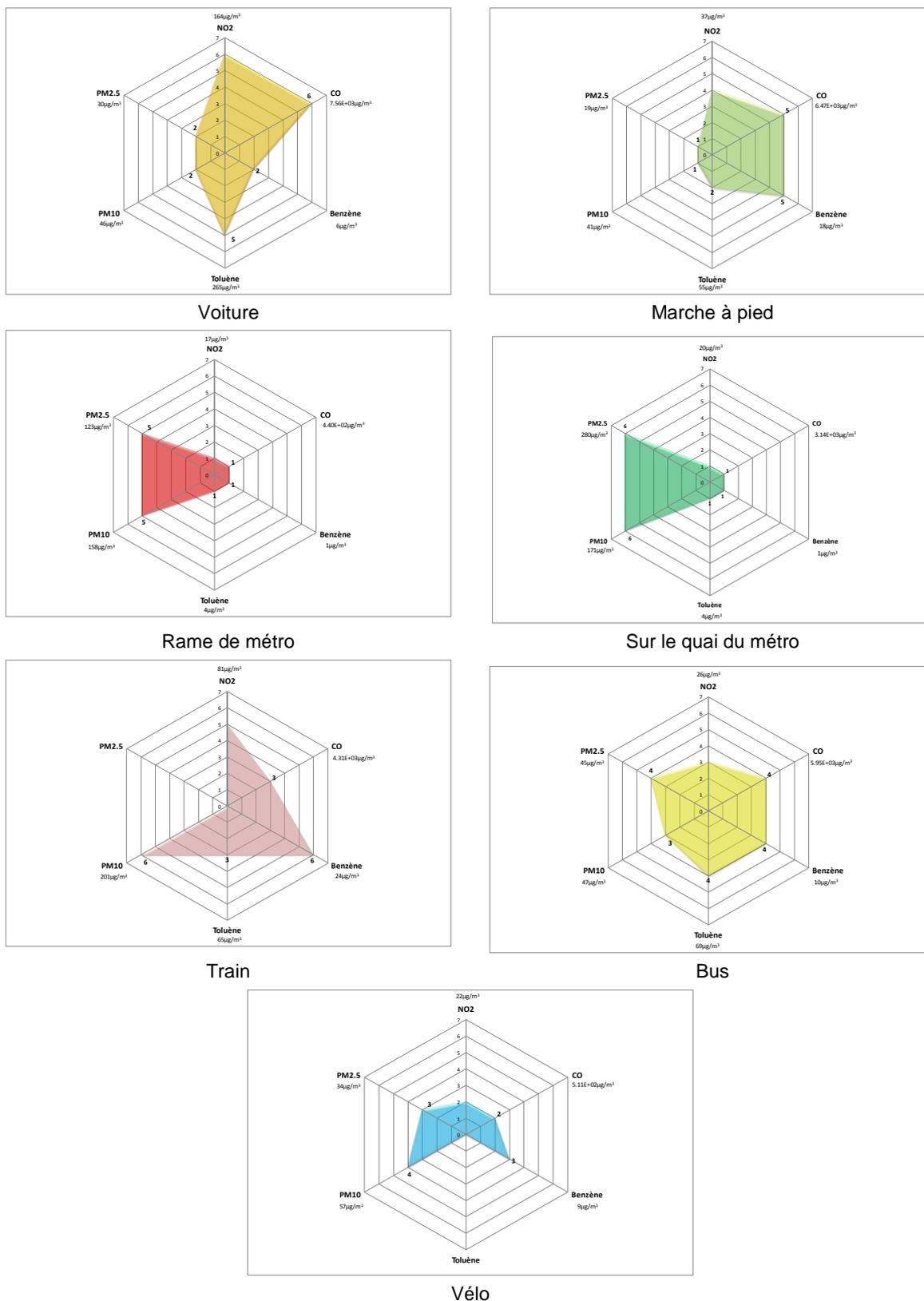


Figure 21 : Classements obtenus pour chaque polluant à partir des concentrations moyennes relevées dans la littérature en Europe

Ces différentes représentations graphiques révèlent certaines tendances.

Les concentrations les plus importantes en NO₂, CO et toluène sont associées à la voiture. Concernant le benzène, ce sont le train et la marche à pied qui présentent les concentrations les plus élevées. Cependant, ce classement est à prendre avec précaution car une seule valeur a été utilisée pour le train.

Concernant les concentrations particulières, cette synthèse révèle que les concentrations en particules PM10 les plus importantes sont associées au quai du métro, à la rame de métro et au train (3 valeurs disponibles). Les concentrations en particules PM2.5 les plus importantes sont associées au quai du métro et dans la rame de métro.

Ces tendances ne sont néanmoins qu'indicatives. Elles sont à prendre avec précaution. En effet, des distorsions peuvent être introduites par des modes de transports et des polluants qui sont plus ou moins bien étudiés (en nombre et qualité des études disponibles), facteurs entraînant une hétérogénéité des populations de données.

Dans les 63 publications sélectionnées, cinq études ont cherché à comparer les niveaux d'exposition par inhalation aux particules mesurés dans plusieurs modes transports utilisés pour relier le même point de départ et d'arrivée ([H.S. Adams, 2001], [L.Y. Chan, 2002], [J.E. Gomez, 2007], [J. Gulliver, 2003] et [ORAMIP, 2008]).

Trois études ([H.S. Adams, 2001], [L.Y. Chan, 2002] et [J.E. Gomez, 2007]) ont réalisé ces comparaisons à partir de mesures intégrées et cumulées sur différents parcours (sans suivi temporel).

Les références [ORAMIP, 2008] et [J. Gulliver, 2003] ont réalisé ces mesures de concentrations en particules en simultané et en continu sur des parcours reliant le même point de départ et d'arrivée. A chaque parcours était associé un unique mode de transport.

Ainsi, aucune de ces publications ne fait référence à la comparaison des niveaux d'exposition par inhalation aux particules pouvant être mesurés en simultané et en continu lors d'une combinaison de différentes modes de transport pour relier le même point de départ et d'arrivée.

La notion de budget espace-temps d'exposition par inhalation aux particules pour différents modes de transport a été étudiée dans une seule étude [Raj Kumar Prasad, 2003]. Les budgets espace-temps ont été reconstruits à partir de la combinaison de données sociologiques génériques décrivant les durées d'occupations moyennes des populations dans différents microenvironnements dont les transports et des résultats spécifiques de mesures effectuées dans les transports dans cadre de cette étude.

Aucune étude n'a réalisé des calculs de quantités inhalées d'exposition par inhalation à des fins de comparaison qualitative pour hiérarchiser les expositions par inhalation sur chaque parcours en faisant intervenir pour chaque mode de transport des temps d'exposition par inhalation, des niveaux de concentrations et des taux d'inhalation spécifiques.

Dans ce contexte, les campagnes d'essais réalisées dans le cadre d'Inter'Modal se proposent :

- D'initier une nouvelle approche globale en intégrant une combinaison de différents modes de transport sur chacun des parcours reliant le même point de départ et d'arrivée, par des mesures en simultané et en continu
- d'exploiter les résultats de ces campagnes en utilisant des budgets espace-temps calculés directement à partir des données expérimentales propres à ces campagnes (durée et niveau des expositions par inhalation aux particules)
- de proposer un nouvel indicateur qualitatif des expositions par inhalation grâce à une estimation de la quantité de particules inhalées spécifique à chaque parcours.

4. CAMPAGNE DE MESURES

4.1 PRINCIPE ET METHODE

Les mesures embarquées (PM10, PM2.5 et PM1) réalisées par l'INERIS en 2005 [O. Le Bihan, 2005] dans un habitacle de voiture ont montré que lors d'un déplacement urbain les niveaux de concentrations en particules varient rapidement en intensité. Ces changements se produisent à une vitesse équivalente à celle avec laquelle se succèdent les différents microenvironnements.

Si l'on souhaite identifier les zones de fortes expositions par inhalation d'un parcours, il faut représenter les concentrations au regard des budgets espace-temps associés à chaque microenvironnement traversé et proposer une hiérarchisation qualitative des quantités inhalées reçues pour chacun d'eux.

Compte tenu de la rapidité des transitions lors des déplacements urbains et de la nécessité de travailler avec des appareils portables et autonomes, le système de mesure doit avoir une résolution temporelle inférieure à la minute.

L'analyse des publications de 2000 à nos jours faisant références à la qualité de l'air dans les transports collectifs et individuels a montré que la grande majorité des études sur la caractérisation des expositions par inhalation aux particules lors de transitions ont été réalisées avec des indicateurs optiques. Ces outils sont en effet les seuls qui répondent aux spécifications nécessaires à ce type d'étude. Néanmoins, leurs résultats sont à utiliser avec précaution car ils donnent une valeur indicative des concentrations de particules. Cependant dans une optique de hiérarchisation des expositions par inhalation ils restent un bon outil. Leur importante utilisation dans d'autres études permet également de comparer les ordres de grandeurs des résultats obtenus à ceux d'études réalisées avec le même type d'outil.

Dans le cadre de cette étude nous avons réalisé les mesures à l'aide d'indicateurs optiques Grimm. Afin d'évaluer les écarts avec la méthode de référence (cf §4.5.1), nous avons réalisé des mesures comparatives avec une méthode de référence pendant deux journées dans deux environnements distincts (quai RER et trafic). Des facteurs de correction ont été respectivement appliqués au milieu souterrain et de surface.

Des mesures en continu des concentrations de PM10 et PM2.5 (pas de temps <10s) sont réalisées en parallèle par deux systèmes individuels embarqués par deux opérateurs dans des sacs à dos réalisant simultanément des parcours reliant un même point de départ et d'arrivée mais empruntant différents modes de transport. Cette stratégie permet d'atténuer les biais éventuels (bruit de fond) introduits par le choix de journées de mesures, de parcours ou de méthode de mesure différents.

Neuf parcours ont été étudiés. Chaque parcours a été réalisé sur une journée d'essais, comportant environ cinq allers-retours pour chaque trajet.

Les comparaisons suivantes ont été étudiées:

- Dans Paris intra muros :
 - o Vélo sur piste cyclable / Métro ;
 - o Vélo sur piste cyclable / hors piste cyclable ;
 - o Marche à pied à l'extérieur / par les couloirs souterrains du métro.
- Au niveau du boulevard périphérique :
 - o Deux roues motorisées (Scooter), les résultats sont à utiliser avec prudence car la tête de prélèvement de l'analyseur de particules était située à l'extérieure, confronté à des fortes turbulences; Aucune validation n'a, à ce jour, été réalisée pour ce type d'application.
 - o Voiture.
- En banlieue parisienne :
 - o Voiture/ RER ;
 - o Voiture /Bus.

Lors de la réalisation de ces mesures, ont également été distinguées les différentes phases de transfert :

- o Couloirs souterrains et quais;
- o Extérieur à pied.

Pour faciliter l'exploitation et pour une meilleure visibilité des résultats obtenus lors de notre campagne de mesure, un code couleur a été mis en place par mode de transport.

 A pied à l'extérieur	 RER	 Voiture
 A pied dans les couloirs souterrains	 Vélo sur piste cyclable	 Bus
 Métro	 Vélo hors piste cyclable	 Scooter

4.2 CHOIX DES PARCOURS

Dans le cadre du développement d'Inter'Modal nous avons choisi de nous placer dans des conditions réelles de mesure afin de prendre en compte les contraintes associées à ce type de campagne. Pour ce faire, nous avons tenté d'identifier des parcours permettant d'utiliser différentes alternatives de transport.

Ce choix expérimental ne se veut pas exhaustif, il n'est donc pas représentatif de tous les modes de transports et déplacements en Ile-de-France. Il s'appuie néanmoins sur l'exploitation de données statistiques disponibles concernant les déplacements dans cette région afin de rester cohérent avec différents critères les caractérisant :

- Représentativité de certains grands axes de déplacements des populations en termes de flux,
- Durées et distances cohérentes avec les « enquêtes »
- Prise en compte de différents niveaux d'équipement, en termes de matériel roulant ou d'aménagement routier.

Ainsi, les enquêtes sur les déplacements en Ile-de-France ainsi que les enquêtes statistiques INSEE [2005, INSEE Ile-de-France] ont permis de cibler les parcours, la distance et la durée des parcours ainsi que la combinaison de transports les plus représentatifs des déplacements en Ile-de-France.

	Modes de déplacement majeur					Distance moyenne approximative				Durée moyenne approximative		
	Paris ↔ Petite Couronne	Paris ↔ Grande Couronne	Petite Couronne ↔ Grande Couronne	Grande Couronne ↔ Grande Couronne	Paris ↔ Paris	Paris ↔ Petite Couronne	Paris ↔ Grande Couronne	Petite Couronne ↔ Grande Couronne	Paris ↔ Paris	Paris ↔ Petite Couronne	Petite Couronne ↔ Grande Couronne	Paris ↔ Paris
[Enquête Globale de Transport, 2002]	Transport en commun	Transport en commun	Voiture	Voiture	Marche à pied	8km	25km	15km	<5km	45min	45min	15min

Ces enquêtes révèlent aussi des informations spécifiques à certains modes de transport :

	Transport en commun		Vélo (trajets d'ordre professionnel)		Marche à pied	
	Distance moyenne approximative	Durée moyenne approximative	Distance moyenne approximative	Durée moyenne approximative	Distance moyenne approximative	Durée moyenne approximative
[Enquête Globale de Transport, 2002]	8km	45min Petite Couronne ↔ Grande Couronne Paris ↔ Petite Couronne			1km Paris ↔ Paris	
[Observatoire des déplacements à Paris, 2006]		32 min Paris ↔ Paris				13.5min Paris ↔ Paris
[Mairie de Paris, 2009]			5km	25-30min		

4.3 DETAILS DES PARCOURS

La phase expérimentale a été conduite en septembre 2008 sur 9 parcours choisis en Ile-de-France.

Un parcours est défini par son point de départ et son point d'arrivée. Chaque parcours a été décomposé en deux trajets associant des modes de transports différents et des itinéraires qui lui sont propres. Sur chacun des trajets, cette association est identique à l'aller et au retour. Pour chaque trajet, plusieurs déplacements ont été réalisés. Un aller-retour comptant pour deux déplacements. Au total, 120 déplacements ont été réalisés.

Parcours	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total
Nombre de trajets	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18
Nombre d'aller-retour par trajet	4	5	5	3	3	3	1	3	3	30
Nombre de déplacements par trajet	8	10	10	6	6	6	2	6	6	60
Nombre total de déplacements par parcours	16	20	20	12	12	12	4	12	12	120

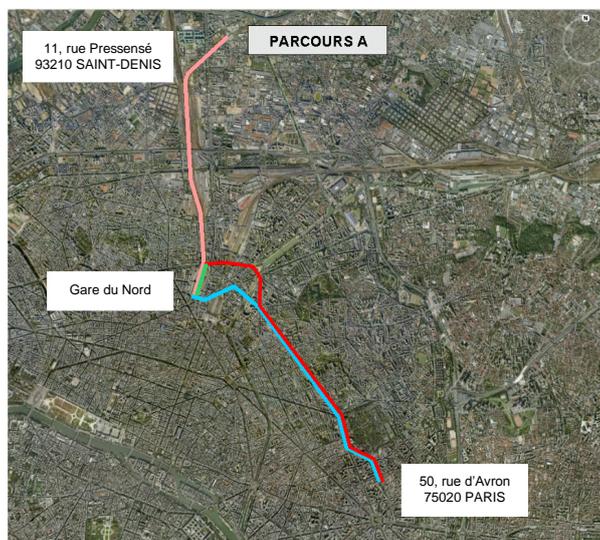
Les essais ont été conduits durant la journée sur des tranches horaires intégrant des heures de pointes et de plus faible fréquentation.

Parcours	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Tranches horaires	8h-13h 17h-20h	7h30-12h 16h45-19h	7h45- 12h 17h-19h	7h-10h 15h-20h	7h30-12h 16h-17h30	7h-12h 16h45-19h	7h – 11h	8h45-11h30	13h45-15h

Le détail de chaque parcours est présenté sur les pages suivantes.

Parcours A :

Le parcours A relie la rue d'Avron (75020 PARIS) à la rue de Pressensé (93210 SAINT-DENIS).



D'après les statistiques de l'INSEE de 2005, l'axe Paris – Saint-Denis est très fréquenté. Le principal flux sortant des résidents de Saint-Denis, lors de déplacements domicile – travail, est celui qui se dirige vers Paris ; le flux de déplacement de Paris vers Saint-Denis est l'un des principaux flux entrants à Saint-Denis.

La Gare du Nord est la gare la plus fréquentée de Paris avec 180 millions de voyageurs par an ; c'est la première gare d'Europe et la troisième gare du monde pour le trafic, après les gares de Shinjuku et d'Ikebukuro à Tokyo.

Pour rejoindre la Gare du Nord depuis la rue d'Avron (Paris XX^{ème}, proche Nation), deux alternatives de transport sont envisagées : le vélo sur piste cyclable ou le métro ligne 2.

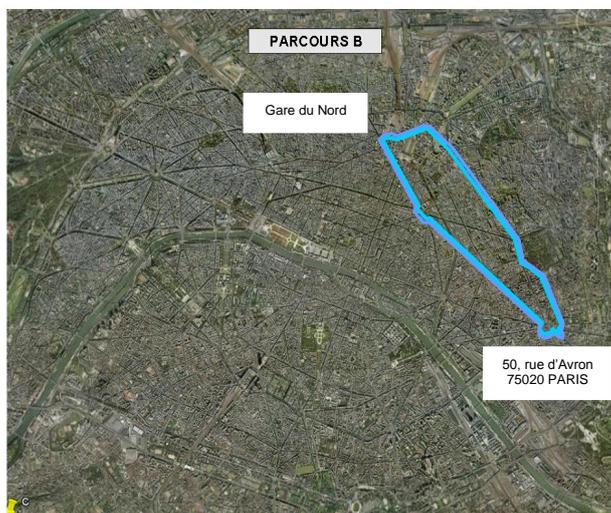
La distance du parcours A de 10 km et la durée moyenne d'un trajet de 33min sont cohérentes avec [Enquête Globale de Transport, 2002].

Informations divers (aménagement, matériels...) :

	Vélo	Métro	RER
Infrastructure	Piste cyclable	Ligne 2	RER B
Matériel roulant	Vélib (Vélo en location sur Paris)	MF67 (1967) (Matériel sur Fer)	MI 79 (1980) (Matériel d'Interconnexion)
Divers	-	Le MF67 est remplacé peu à peu par le MF 01 sur la ligne.	-

Parcours B :

Le parcours B relie la rue d'Avron (75020 PARIS) à la Gare du Nord (75019 PARIS).



L'utilisation du vélo à Paris s'impose dorénavant comme mode de transport urbain à part entière. La création d'aménagements cyclables (bandes cyclables, contresens, couloirs de bus ouverts aux vélos, pistes en sites propres...) a favorisé l'augmentation de l'utilisation de ce mode de transport.

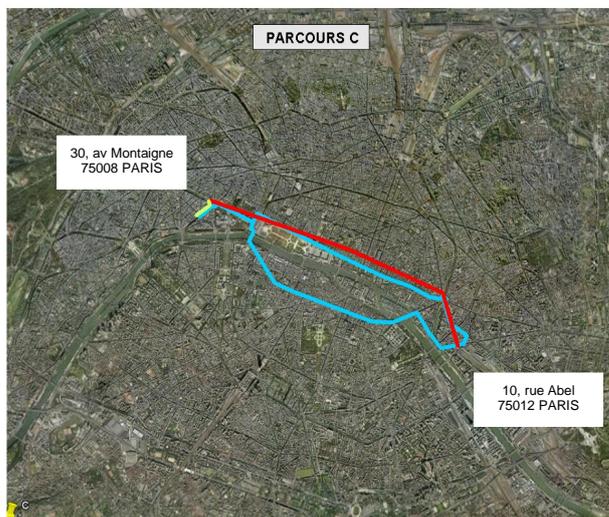
La distance et la durée moyenne du parcours B sont respectivement de 5 km et de 33min ce qui est cohérent avec les données de la ville de Paris.

Informations divers (aménagements, matériels...) :

Vélo	
Infrastructure	Piste cyclable / dans le flux de circulation
Matériel roulant	Vélib (Vélo en location sur Paris)

Parcours C :

Le parcours C relie la rue Abel (75012 PARIS) à l'Avenue Montaigne (75008 PARIS).



La ligne 1 du métro est la ligne la plus fréquentée du réseau avec 162 millions de voyageurs en 2006. Elle est par ailleurs équipée d'un matériel roulant des plus récents. D'après l'enquête [Observatoire des déplacements à Paris, 2007], la gare de Lyon est la 3^{ème} station de métro la plus fréquentée en France avec 33 millions de voyageurs en 2007.

La durée moyenne d'un trajet du parcours C est de 27min en vélo et 28min en métro, ce qui est cohérent avec les données des enquêtes.

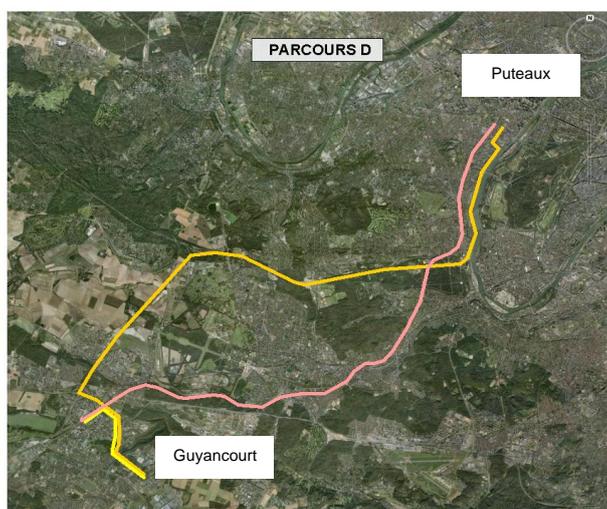
La distance du parcours C est de 6 km ce qui est cohérent avec les données de la ville de Paris pour un déplacement à vélo.

Informations diverses (infrastructures, matériels...) :

	Vélo	Métro
Infrastructure	Piste cyclable	Ligne 1
Matériel roulant	Vélib (Vélo en location sur Paris)	MP 89 (1997) (Matériel sur Pneumatique)
Divers	-	MP 05, version dérivée du MP 89 possédant la même esthétique extérieure, mais techniquement modernisée vont remplacer peu à peu les MP 89 (à partir de fin 2009)

Parcours D :

Le parcours D relie Puteaux à Guyancourt.



D’après les statistiques de l’INSEE de 2005, un des principaux flux entrant dans la zone de Versailles, lors de déplacements « domicile – travail », vient de la zone de Nanterre ; le flux de déplacement Versailles – Nanterre est également l’un des principaux flux sortants de Versailles.

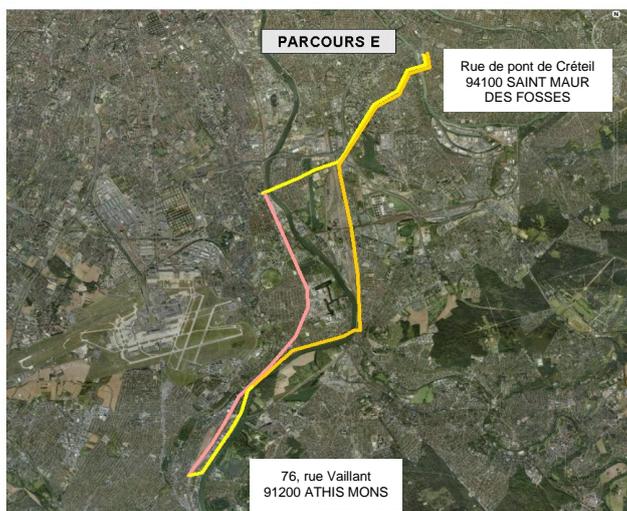
La distance du parcours D est de 26 km et la durée moyenne d’un trajet de 49min en voiture et de 37min en transport en commun, ce qui est cohérent avec les enquêtes [Enquête Globale de Transport, 2002] et [Observatoire des déplacements à Paris, 2006].

Informations diverses (infrastructures, matériels...) :

	Voiture	Train	Bus
Infrastructure	A13, A12, N12	Transilien U	465
Matériel roulant	Scénic	Rames Z 8800 (1988)	Bus appartenant au réseau Sqybus
Divers	Climatisation automatique à 21.5°C	-	-

Parcours E :

Le parcours E relie Saint Maur des Fosses à Athis Mons.



D’après les statistiques de l’INSEE de 2005, un des principaux flux entrants dans la zone d’Orly, lors de déplacements domicile – travail, vient de la zone de Créteil.

La distance du parcours E est de 16 km, il est d’une durée moyenne de 49 min en voiture et de 53 min en transport en commun ce qui est cohérent avec les informations mentionnées dans les enquêtes [Enquête Globale de Transport, 2002] et [Observatoire des déplacements à Paris, 2006].

La ligne C du RER, ouverte par étapes de 1979 à 2000, est une ligne tentaculaire de 187 kilomètres. Elle est la seconde plus longue ligne du réseau qui traverse sept départements et dessert 84 gares avec 15 origines / terminus différents. Le RER C enregistre 479 600 voyages un jour ouvrable [STIF, 2009].

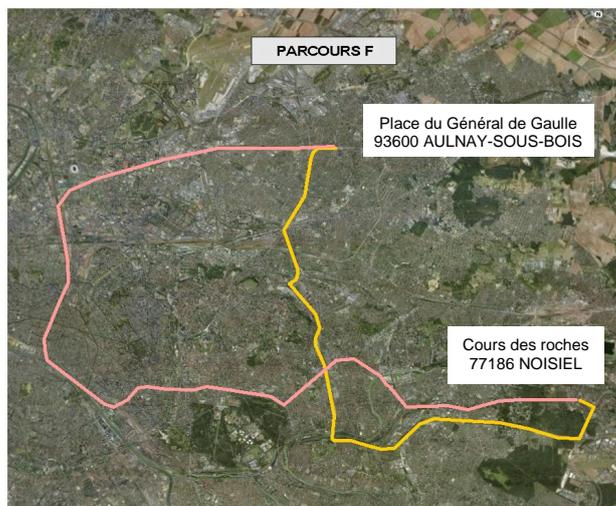
Le Bus TVM (Trans-Val-de-Marne) a eu une fréquentation importante avec 18,4 millions de voyageurs en 2008 ; il figure parmi les plus fréquentés du réseau bus.

Informations diverses (infrastructures, matériels...) :

	Voiture	RER	Bus
Infrastructure	N186	RER C	TVM (Trans-Val-de-Marne)
Matériel roulant	Renault Scénic	Z 5600 (1984), Z 8800 (1988), Z 20500 (1990) ou Z 20900 (2003)	Irisbus Agora L euro 3 (2003 ou 2007)
Divers	Climatisation automatique à 21.5°C	-	Site propre, efficace, rapide et régulier (inauguré en 1993) Ces bus roulent au « gazole désulfuré avec filtres à particules »

Parcours F :

Le parcours F relie Aulnay-Sous-Bois à Noisiel.



D’après les statistiques de l’INSEE de 2005, un des principaux flux entrant dans la zone Montreuil, lors de déplacements domicile – travail, vient de la zone de Saint-Denis ; le flux de déplacement de Montreuil vers Saint-Denis est le 2^{ème} principal flux sortant de Montreuil après le flux Montreuil - Paris.

Le RER A est de loin la ligne la plus fréquentée du réseau avec un million de voyageurs par jour ouvrable et régulièrement proche de la saturation, ce qui en fait également une des lignes au trafic les plus denses du monde. Elle assure à elle seule plus d’un quart du trafic ferroviaire de la banlieue parisienne.

La station Châtelet-les-Halles forme avec les stations de métro Châtelet et Les Halles un important réseau souterrain. Elle est ainsi la plus grande gare souterraine du monde. Chaque jour, 750 000 voyageurs y passent. Aux heures de pointe, la gare peut accueillir jusqu’à plus de 120 trains par heure.

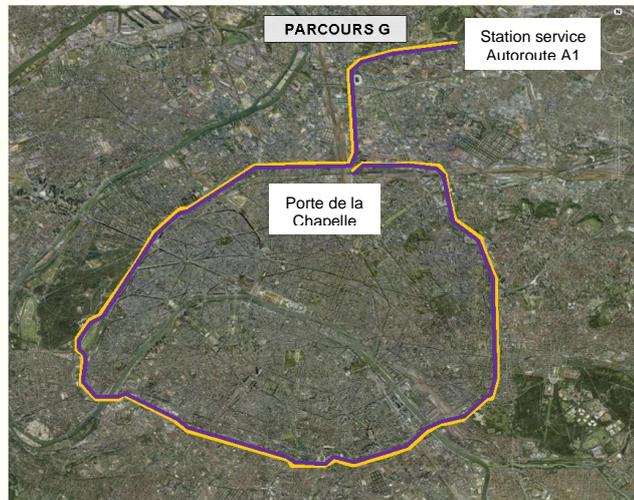
La distance du parcours F est de 27 km, et la durée moyenne d’un trajet du parcours F est de 44min en voiture et de 64min en transport en commun, ce qui est cohérent avec les enquêtes [Enquête Globale de Transport, 2002] et [Observatoire des déplacements à Paris, 2006].

Informations diverses (infrastructures, matériels...) :

	Voiture	RER B	RER A
Infrastructure	A3, A86, A4, N104	RER B	RER A
Matériel roulant	Renault Scénic	MI 84 (1998) MI 79 (1979)	MS 61 (pneumatique), MI 84, MI 2N (ventilation réfrigérée)
Divers	Climatisation automatique à 21.5°C	MI 84 proviennent de la ligne A du RER, et MI 79 sont les 1ères rames d’interconnexion.	-

Parcours G :

Le parcours G relie l'Autoroute A1 à la Porte de la chapelle (après avoir fait le tour du Boulevard périphérique de Paris).



Le Boulevard périphérique de Paris est l'axe routier le plus fréquenté de France. L'autoroute A1 (appelée également Autoroute du Nord) est l'autoroute française la plus fréquentée.

La durée moyenne d'un trajet du parcours G est de 83min en voiture et 48min en scooter. La distance du parcours G est de 42 km.

Deux déplacements ont été réalisés par trajet : le premier sur une tranche horaire ayant une forte fréquentation (entre 7h et 9h) et le second sur une tranche horaire de plus faible affluence (entre 10h et 11h).

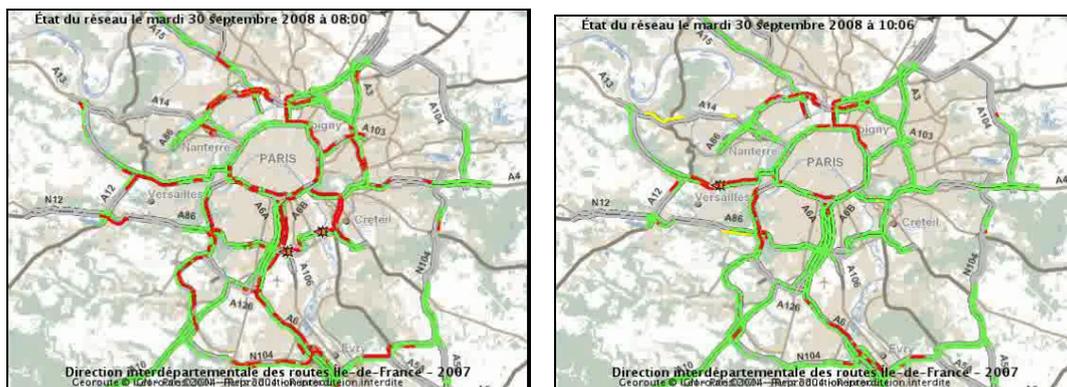


Figure 22 : Etats du réseau le 30/09/08 à 8h et 10h

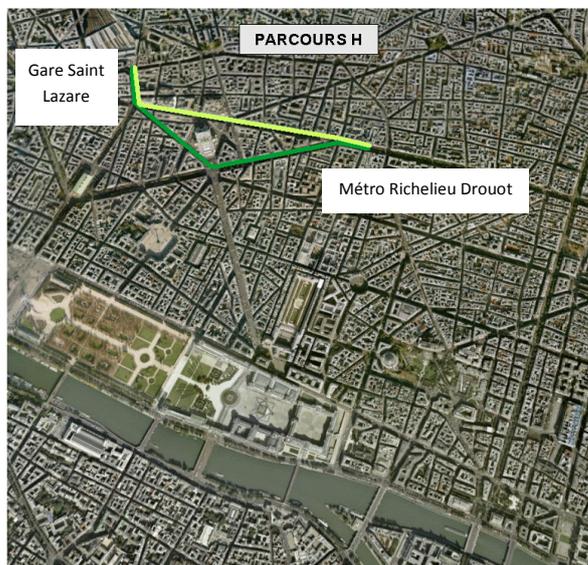
Concernant les mesures obtenues en scooter, les résultats sont à utiliser avec prudence car les prélèvements ont été réalisés à grande vitesse avec une tête de prélèvement située à l'extérieur et confrontée à des fortes turbulences; Aucune validation n'a, à ce jour, été réalisée pour ce type d'application.

Informations diverses (infrastructures, matériels...) :

	Voiture	Scooter
Infrastructure	A1, Boulevard périphérique parisien	A1, boulevard périphérique parisien
Matériel roulant	Renault Scénic	125cm ³
Divers	Climatisation automatique à 21.5°C	-

Parcours H :

Le parcours H relie le Métro Richelieu DROUOT au parvis de la Gare Saint-Lazare.



La gare Saint-Lazare est la deuxième gare de Paris par son trafic, environ 100 millions de voyageurs par an.

Avec 89 millions de voyageurs en 2004, la ligne 8 est la huitième ligne du réseau pour son trafic.

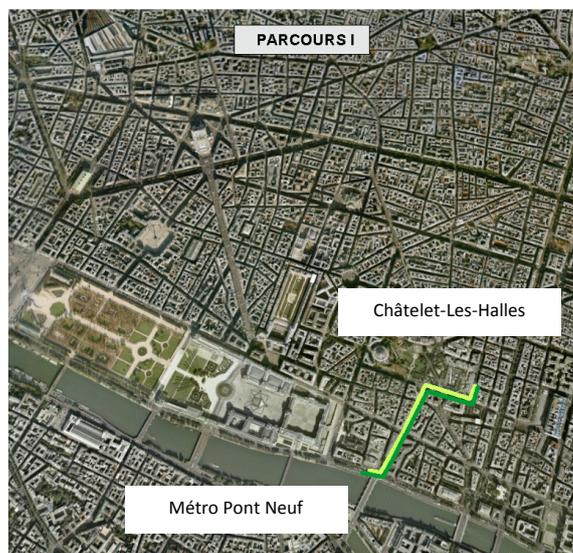
La distance du parcours H est de 1.2km et la durée moyenne d'un trajet du parcours H est de 16min à pied à l'extérieur et de 20min à pied dans les couloirs souterrains, ce qui est cohérent avec les données des enquêtes mentionnées en 5.1.

Informations diverses (infrastructures, matériels...)

Métro	
Infrastructure	Ligne 8
Matériel roulant	MF 77 (1980) (Matériel sur Fer)

Parcours I :

Le parcours I relie le Métro Pont Neuf à Châtelet-Les-Halles.



La station Châtelet-les-Halles est la plus grande gare souterraine du monde. Chaque jour, 750 000 voyageurs y transitent.

La ligne 7 est la troisième plus fréquentée du réseau avec 120 millions de voyageurs en 2004.

La distance du parcours I est de 800m et la durée moyenne d'un trajet du parcours I est de 10min à pied à l'extérieur et de 13 min à pied dans les couloirs souterrains, ce qui est cohérent avec les données des enquêtes mentionnées en 5.1.

Informations diverses (infrastructures, matériels...) :

Métro	
Infrastructure	Ligne 7
Matériel roulant	MF 77 (1979) (Matériel sur Fer)
Divers	La ligne 7 est également une des plus longues avec dix-huit kilomètres, celle comptant le plus grand nombre de stations.

4.4 PROTOCOLE D'ETUDE



Parcours	Date	Trajets	Transports comparés	Durée moyenne d'un déplacement	Nombre de d'aller-retour par trajet	Nombre de déplacements par trajet	Détails
A	16.09.2008	A1	Vélo -RER	33 min	4	8	
		A2	Métro - RER	32 min	4	8	
B	18.09.2008	B1	Vélo sur piste cyclable	33min	5	10	
		B2	Vélo hors piste cyclable	33 min	5	10	
C	17.09.2008	C1	Vélo sur piste cyclable	27 min	5	10	
		C2	Métro	28 min	5	10	
D	23.09.2008	D1	Voiture	49 min	3	6	
		D2	Train - Bus	37 min	3	6	



Parcours	Date	Trajets	Transports comparés	Durée moyenne d'un déplacement	Nombre de d'aller-retour par trajet	Nombre de déplacements par trajet	Détails
E	24.09.2008	E1	Bus – RER	53 min	3	6	
		E2	Voiture	41 min	3	6	
F	25.09.2008	F1	Voiture	44 min	3	6	
		F2	RER	64 min	3	6	
G	30.09.2008	G1	Voiture	83 min	1	2	
		G2	Scooter	48 min	1	2	
H	29.09.2008	H1	A pied dans les couloirs souterrains	20 min	3	6	
		H2	A pied à l'extérieur	16 min	3	6	
I	29.09.2008	I1	A pied dans les couloirs souterrains	13 min	3	6	
		I2	A pied à l'extérieur	10 min	3	6	

4.5 APPAREILLAGE

Compte tenu de la rapidité des transitions lors des déplacements urbains, les contraintes résultantes en termes de matériel de mesure sont les suivantes :

- technique permettant un suivi temporel en continu des niveaux de concentration ;
- technique facilement transportable ;
- technique permettant de réaliser une acquisition à un pas de temps de quelques secondes.

Dans ce contexte, il n'est pas possible de réaliser la mesure des particules en suspension dans l'air ambiant (PM₁₀, PM_{2,5}) par les méthodes classiques (TEOM, jauge β , préleveur).

Un nombre important d'appareils d'utilisation souple répondant à ces contraintes sont présents sur le marché. Ils fournissent non pas une mesure réelle de la concentration massique mais une détermination des concentrations en nombre basée sur les propriétés optiques des particules. Bien que ces techniques fournissent une estimation de la concentration massique en particules, qui dépend de la masse volumique de l'aérosol, elles apparaissent comme étant le meilleur compromis à la réalisation d'une étude de comparaison et de hiérarchisation des expositions par inhalation sur différents parcours caractérisés par des rapides transitions.

Comme nous avons pu le voir dans la littérature, la grande majorité des valeurs de concentrations massiques de PM reportée dans la littérature sont obtenues à l'aide de ces indicateurs. Les résultats des mesures obtenus dans le cadre de cette étude pourront leurs êtres comparés.

Un recensement des appareils présents sur le marché a été réalisé en 2006 par l'INERIS dans le cadre de ses missions au sein du Laboratoire central de surveillance la qualité de l'air (LCSQA, 2006, Mesure Indicative des particules)

Parmi ces appareils, le compteur optique Grimm 1.108 dont la mesure est basée sur la dispersion de la lumière par une seule particule, permet d'analyser simultanément plusieurs tranches granulométriques et de réaliser une mesure en masse ou en nombre. Le recensement des appareils présents sur le marché réalisé en 2006 par l'INERIS a indiqué que du fait de ses caractéristiques, le compteur optique Grimm 1.108 était particulièrement bien adapté à l'étude de l'exposition par inhalation des personnes y compris dans les milieux confinés.

Lors d'une seconde étude réalisée en 2008 (LCSQA, 2008, Mesure Indicative des particules), l'INERIS a testé les performances métrologiques de 5 compteurs optiques parmi lesquels le Grimm 1.108 avec le TEOM/FDMS, méthode équivalente à la méthode de référence par gravimétrie, dans différents environnements (chambre d'exposition au laboratoire, bureau et cuisine d'habitation). Cette comparaison a montré que le Grimm 1.108 offrait la meilleure adéquation avec le TEOM/FDMS.

Il a donc été décidé d'utiliser le GRIMM 1.108. L'ensemble des systèmes de mesures et d'acquisition ont été rassemblés dans deux sacs à dos portés par deux opérateurs en parallèle. Chaque opérateur réalise simultanément un des trajets reliant un même point de départ et d'arrivée mais empruntant différents modes de transport.

Lors des essais Inter'Modal, les mesures ont été réalisées en concentrations massiques ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Des essais de comparaison ont été menés dans l'air ambiant avec un TEOM/FDMS et dans l'air intérieur des milieux souterrains avec un TEOM afin d'approcher le biais introduit sur la concentration massique par ce type d'appareil au cours des essais.

4.5.1 COMPARAISON AVEC LA METHODE DE REFERENCE

Lors des essais, deux Grimm 1.108 ont été utilisés en simultanée dans les différents microenvironnements étudiés en parallèle afin de comparer les quantités inhalées des personnes lors de leurs déplacements. Les essais ont été réalisés en maintenant la valeur de densité de 1 prise en compte par défaut par le Grimm pour déterminer la concentration massique. Des tests de comparaison ont été réalisés afin de valider les données, et d'évaluer ainsi l'impact du facteur densité de l'aérosol sur les résultats obtenus par les Grimm :

- entre les deux Grimm 1.108 exposés au même aérosol,
- entre les Grimm et un TEOM/FDMS dans l'air ambiant extérieur
- entre les Grimm et un TEOM dans l'air intérieur sur le quai de la station Auber.

Concernant la comparaison des deux GRIMM 1.108, les résultats des concentrations en PM_{2.5} et PM₁₀ sont dans l'ensemble cohérents dans les deux environnements testés, mises à part quelques valeurs extrêmes.

Dans l'air ambiant, une sous-estimation d'environ 20% a été observée entre le GRIMM 1.108 et un TEOM/FDMS. Compte tenu de ces observations, il ne semble pas nécessaire d'apporter une correction aux concentrations mesurées par les Grimm dans l'air ambiant extérieur.

Dans l'air intérieur sur le quai de la station Auber, les résultats de comparaison sont présentés en annexe I.

Le détail des résultats de ces essais sont présentés en Annexe I.

4.5.2 FACTEURS DE CORRECTION RETENUS POUR LA SUITE DE L'ETUDE

Les deux coefficients de corrections déterminés à la suite de ces essais sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature (Cf Annexe I).

La valeur de densité utilisée pour convertir les données de nombre en masse a été maintenue à 1 pour les essais réalisés dans l'air ambiant extérieur. Pour les essais réalisés dans l'air intérieur des milieux souterrains, les données ont été corrigées

d'un facteur de 3.4 déterminé suite à la comparaison avec les données TEOM propres à ce milieu.

Les résultats présentés dans ce rapport tiennent compte de ces corrections. A titre d'information, les données non corrigées sont reportées en Annexe III.

Compte tenu des méthodes de mesures utilisées, ces résultats sont dans l'absolu à interpréter avec les précautions d'usage. La hiérarchisation des expositions par inhalation obtenue est elle plus robuste.

5. RESULTATS

Pour chaque parcours, les données collectées ont permis de réaliser différentes exploitations :

- **un exemple de suivi temporel pour un trajet** permettant de visualiser en parallèle l'évolution de la concentration en particules en fonction du temps pour les deux alternatives de transport testées.
- **une représentation spatio-temporelle** qui permet (hors milieux souterrains), grâce aux acquisitions GPS, de proposer une cartographie comparée des concentrations en particules sur chacun des trajets associé à un mode de transport.
- **des budgets espace-temps** qui représentent pour chaque trajet et mode de transport associé la concentration moyenne, minimum et maximum mesurée dans chaque microenvironnement traversé et le pourcentage du temps d'exposition par inhalation qu'il représente sur l'ensemble du trajet.
- **des calculs de quantités inhalées** ont été réalisés à titre exploratoire afin de comparer et hiérarchiser les expositions par inhalation sur chaque parcours. Ces quantités inhalées ont été calculées en prenant en compte pour chaque mode de transport des temps d'exposition et des taux d'inhalation propres selon l'équation ci-dessous.

$$\text{Quantité inhalée} = C_i \times t_i \times T_i$$

Avec: C_i la concentration moyenne pour un mode de transport i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
 t_i la durée moyenne d'un déplacement pour un mode de transport i (h)
 T_i le taux d'inhalation propre au mode de transport i (m^3/h).

Le taux d'inhalation correspond au volume d'air inspiré par unité de temps. Il est propre à chaque activités physiques [« Exposure Factors Handbook », 1997]. Par exemple le taux d'inhalation en vélo est équivalent à 3 fois le taux d'inhalation en transport en commun (cf Annexe II).

Le but étant de comparer qualitativement les trajets les uns par rapport aux autres, toutes les quantités inhalées ont donc été normalisées par rapport à celle du trajet présentant la quantité inhalée la plus importante en PM10. Il est de même pour les PM2.5. Cette fraction de particules étant par définition comprises dans les particules PM10, les quantités inhalées calculées selon cette méthode en PM2.5 sont nécessairement inférieures à celles en PM10.

Pour faciliter l'exploitation et pour une meilleure visibilité des résultats obtenus lors de la campagne de mesure, un code couleur a été mis en place par mode de transport.



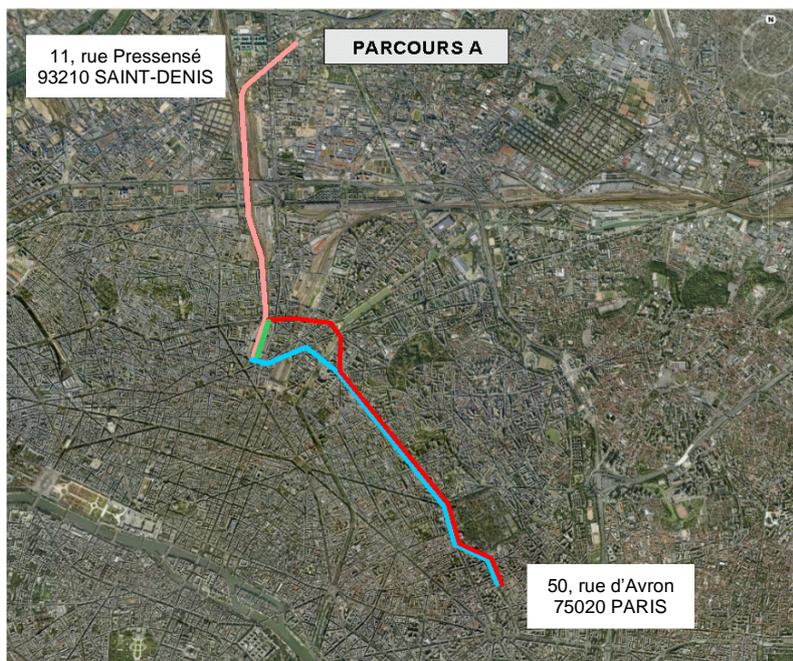
Parcours A

1. Description du parcours

Détails des trajets réalisés

Parcours	Date	Trajets	Transports comparés	Durée moyenne d'un déplacement	Nombre de d'aller-retour par trajet	Nombre de déplacements par trajet	Détails
A	16.09.2008	A1	Vélo - RER	33 min	4	8	
		A2	Méto - RER	32 min	4	8	

Représentation cartographique des trajets réalisés



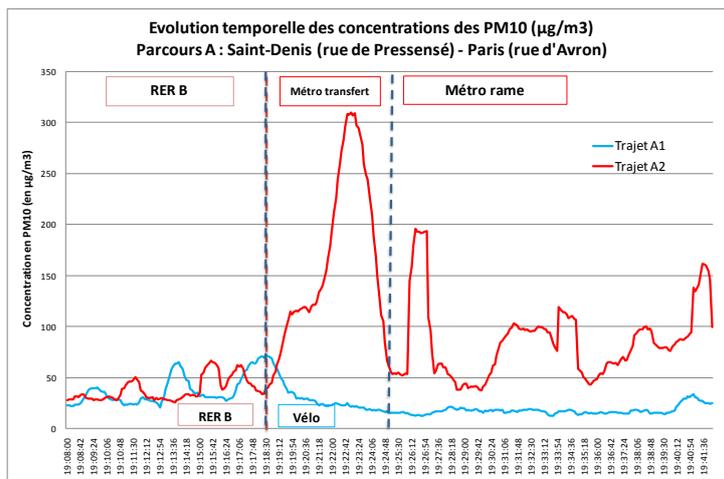
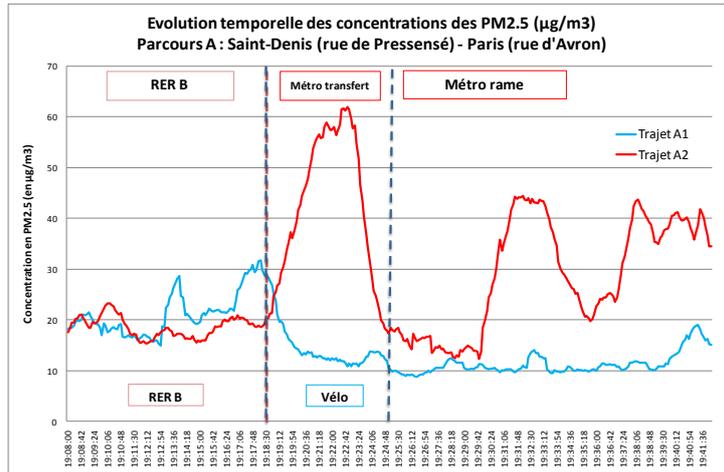
Informations divers (aménagement, matériels...)

	Vélo	Méto	RER
Infrastructure	Piste cyclable	Ligne 2	RER B
Matériel roulant	Vélib (Vélo en location sur Paris)	MF67 (1967) (Matériel sur Fer)	MI 79 (1980) (Matériel d'Interconnexion)
Divers	-	Le MF67 est remplacé peu à peu par le MF 01 sur la ligne.	-

Parcours A

2. Evolution spatio-temporelle

Exemple de suivi temporel d'un trajet



Représentation spatio-temporelle de l'exposition par inhalation aux PM10

Absence de représentation spatio-temporelle en raison d'un problème avec le GPS

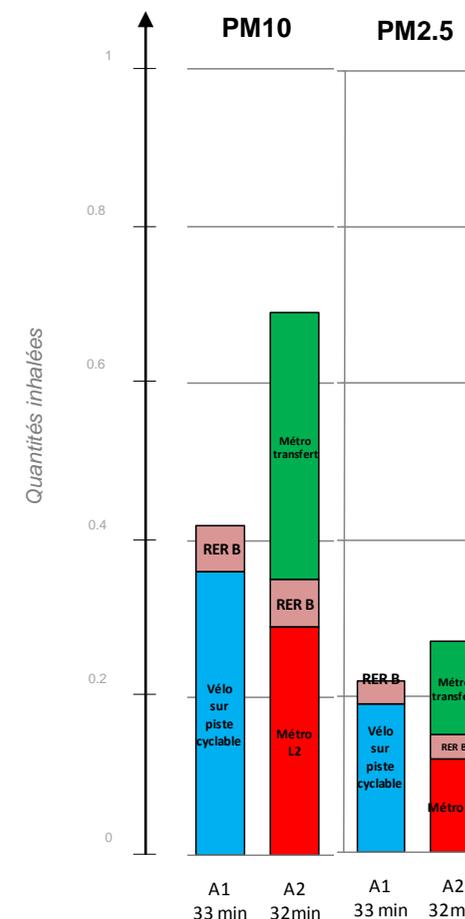
Parcours A

3. Quantités inhalées et budgets espace-temps

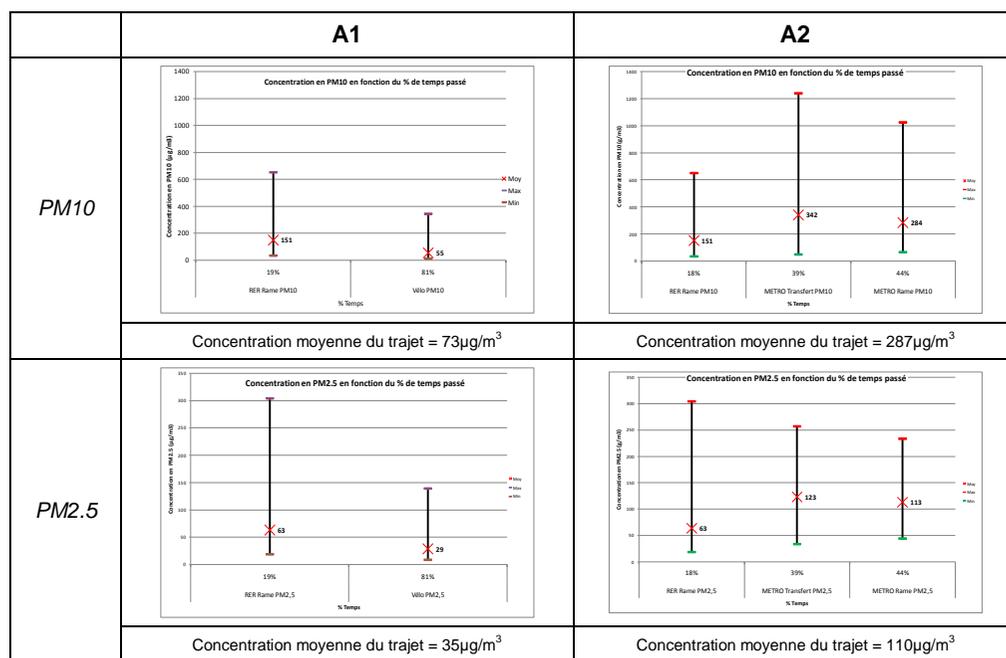
Concentrations moyennes en particules par modes de transport et par trajet

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails des parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement (en min)	Concentration d'exposition aux particules PM10 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)	Concentration d'exposition aux particules PM2.5 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)
A	4	A1		Vélo sur piste cyclable	27	55 (12, 344)	29 (9, 139)
				RER B	5	150 (34, 652)*	63 (18, 304)*
		A2		Métro (ligne 2)	13	284 (65, 1026)*	113 (44, 233)*
				Métro transfert	9.5	342 (48, 2141)*	213 (24, 257)*
				RER B	5	150 (34, 652)*	63 (18, 304)*

Représentation des quantités inhalées en PM2.5 et en PM10



Représentation des concentrations en PM2.5 et en PM10 mesurées dans les microenvironnements en fonction du temps passé



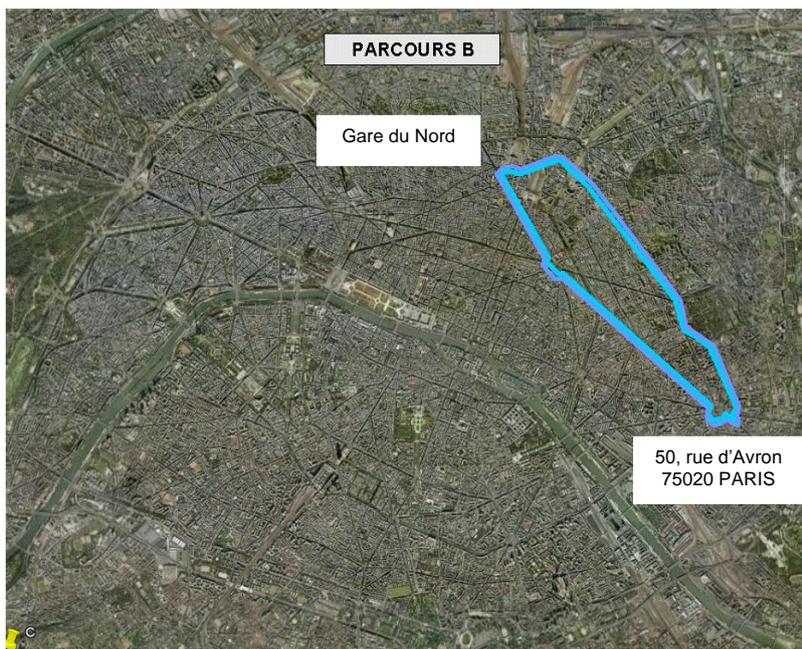
Parcours B

1. Description du parcours

Détails des trajets réalisés

Parcours	Date	Trajets	Transports comparés	Durée moyenne d'un déplacement	Nombre de d'aller-retour par trajet	Nombre de déplacements par trajet	Détails
B	18.09.2008	B1	Vélo sur piste cyclable	33min	5	10	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px dashed gray; padding: 2px;">50, rue d'Avron 75020 PARIS</div> <div style="flex-grow: 1; text-align: center;"> </div> <div style="border: 1px dashed gray; padding: 2px;">Gare du Nord</div> </div>
		B2	Vélo hors piste cyclable	33 min	5	10	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px dashed gray; padding: 2px;">50, rue d'Avron 75020 PARIS</div> <div style="flex-grow: 1; text-align: center;"> </div> <div style="border: 1px dashed gray; padding: 2px;">Gare du Nord</div> </div>

Représentation cartographique des parcours réalisés



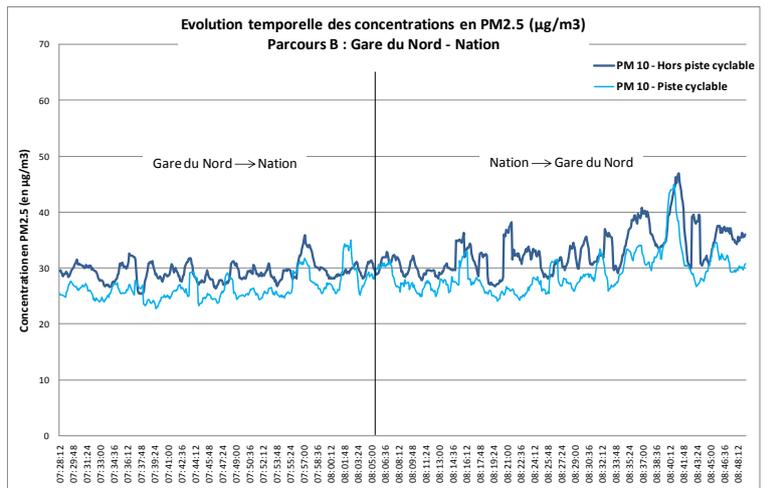
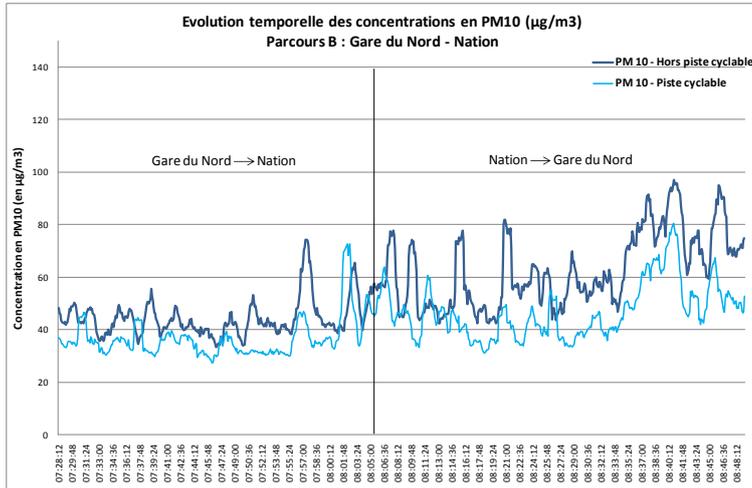
Informations divers (aménagement, matériels...)

Vélo	
Infrastructure	Piste cyclable / dans le flux de circulation
Matériel roulant	Vélib (Vélo en location sur Paris)

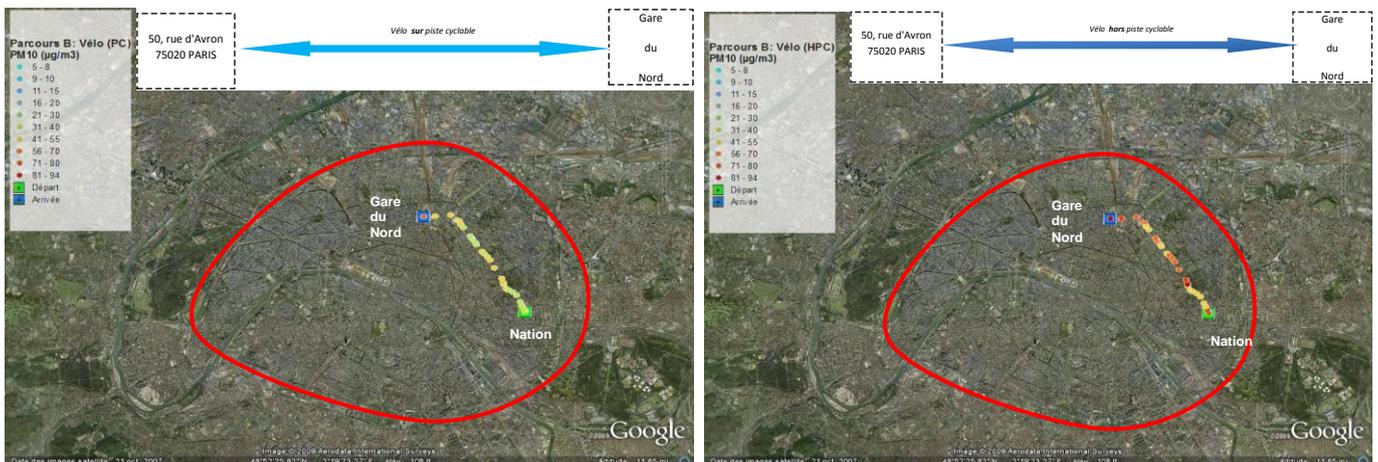
Parcours B

2. Evolution spatio-temporelle

Exemple de suivi temporel d'un trajet



Représentation spatio-temporelle de l'exposition par inhalation aux PM10



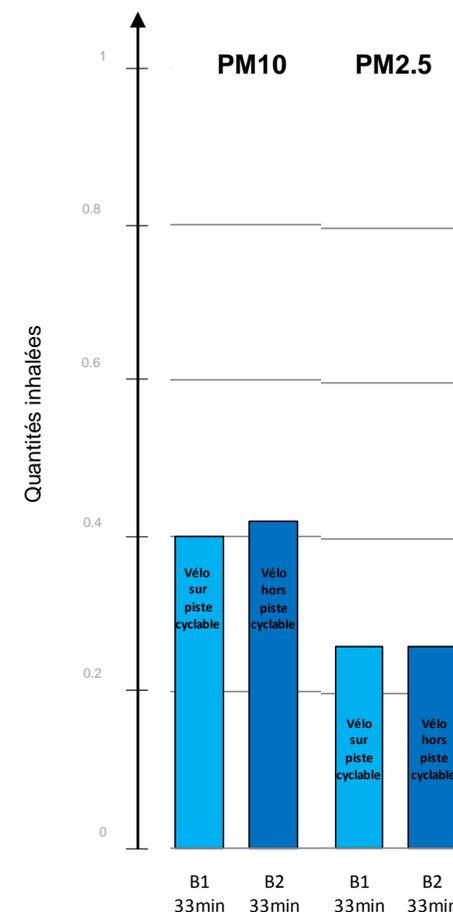
Parcours B

3. Quantités inhalées et budgets espace-temps

Concentrations moyennes en particules par modes de transport et par trajet

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails du parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement (en min)	Concentration d'exposition aux particules PM10 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)	Concentration d'exposition aux particules PM2.5 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)
B	5	B1		Vélo sur piste cyclable	33	50 (31, 89)	32 (24, 45)
		B2		Vélo hors piste cyclable	33	52 (30, 97)	33 (25, 47)

Représentation des quantités inhalées en PM2.5 et en PM10



Représentation des concentrations en PM2.5 et en PM10 mesurées dans les microenvironnements en fonction du temps passé

	B1	B2
PM10	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.
	Concentration moyenne du trajet = 50µg/m ³	Concentration moyenne du trajet = 52µg/m ³
PM2.5	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.
	Concentration moyenne du trajet = 32µg/m ³	Concentration moyenne du trajet = 33µg/m ³

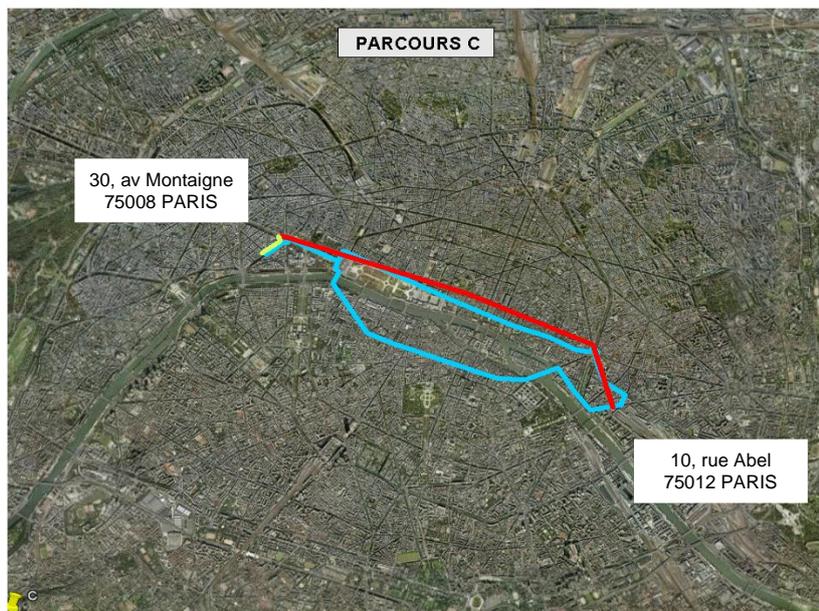
Parcours C

1. Description du parcours

Détails des trajets réalisés

Parcours	Date	Trajets	Transports comparés	Durée moyenne d'un déplacement	Nombre de d'aller-retour par trajet	Nombre de déplacements par trajet	Détails
C	17.09.2008	C1	Vélo sur piste cyclable	27 min	5	10	
		C2	Métro	28 min	5	10	

Représentation cartographique des parcours réalisés



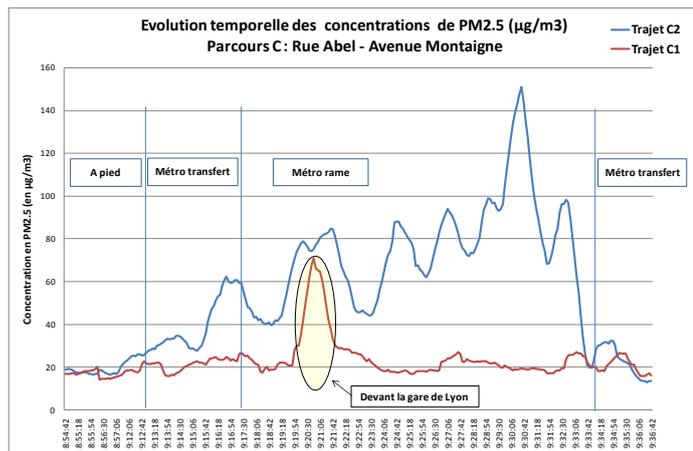
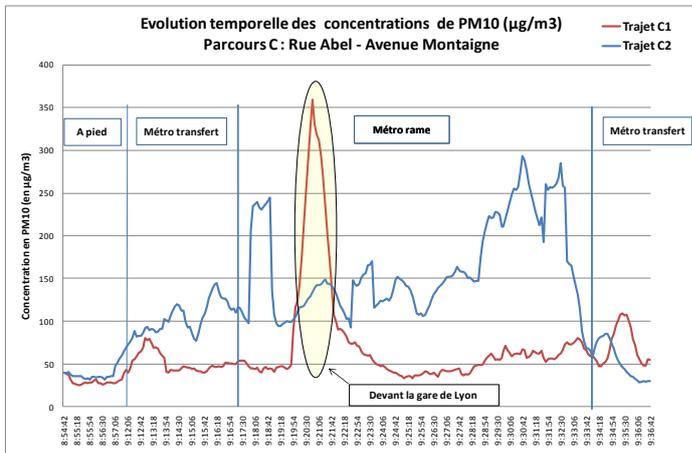
Informations divers (aménagement, matériels...)

	Vélo	Métro
Infrastructure	Piste cyclable	Ligne 1
Matériel roulant	Vélib (Vélo en location sur Paris)	MP 89 (1997) (Matériel sur Pneumatique)
Divers	-	MP 05, version dérivée du MP 89 possédant la même esthétique extérieure, mais techniquement modernisée vont remplacer peu à peu les MP 89 (à partir de fin 2009)

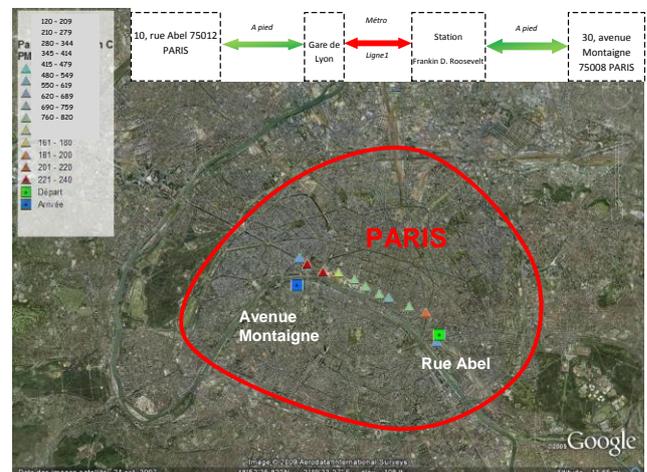
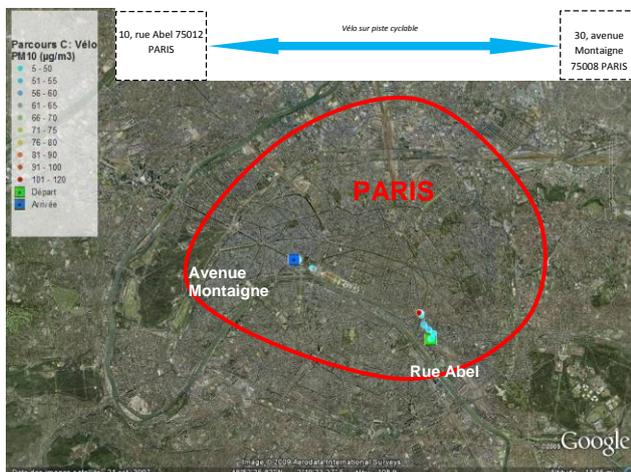
Parcours C

2. Evolution spatio-temporelle

Exemple de suivi temporel d'un trajet



Représentation spatio-temporelle de l'exposition par inhalation aux PM10



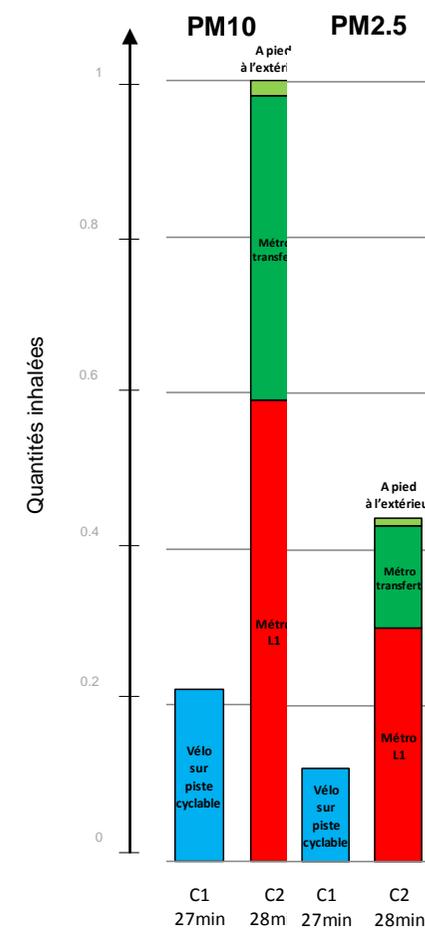
Parcours C

3. Quantités inhalées et budgets espace-temps

Concentrations moyennes en particules par modes de transport et par trajet

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails du parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement (en min)	Concentration d'exposition aux particules PM10 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)	Concentration d'exposition aux particules PM2.5 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)
C	5	C1		Vélo sur piste cyclable	27	33 (14, 360)	18 (9, 71)
		C2		A pied à l'extérieur	3.5	52 (19, 187)	18 (8, 75)
				Métro (ligne 1)	16	465 (164, 1235)*	236 (32, 257)*
				Métro transfert	10	376 (79, 1536)*	123 (38, 335)*

Représentation des quantités inhalées en PM2.5 et en PM10



Représentation des concentrations en PM2.5 et en PM10 mesurées dans les microenvironnements en fonction du temps passé

	C1	C2
PM10	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.	<p>Concentration moyenne du trajet = 33µg/m³</p>
PM2.5	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.	<p>Concentration moyenne du trajet = 174µg/m³</p>

* Les concentrations ont été corrigées par un facteur pondéré en fonction du temps passé dans les souterrains (voir annexe I).

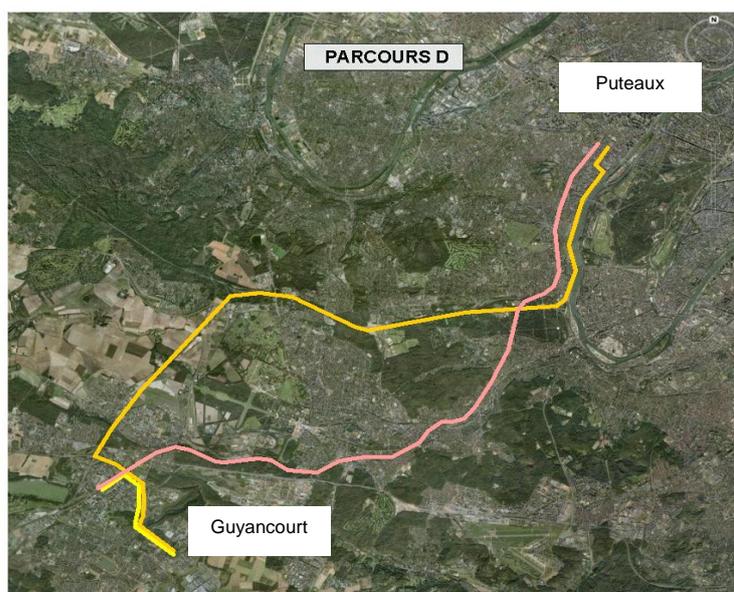
Parcours D

1. Description du parcours

Détails des trajets réalisés

Parcours	Date	Trajets	Transports comparés	Durée moyenne d'un déplacement	Nombre de d'aller-retour par trajet	Nombre de déplacements par trajet	Détails
D	23.09.2008	D1	Voiture	49 min	3	6	
		D2	Train - Bus	37 min	3	6	

Représentation cartographique des parcours réalisés



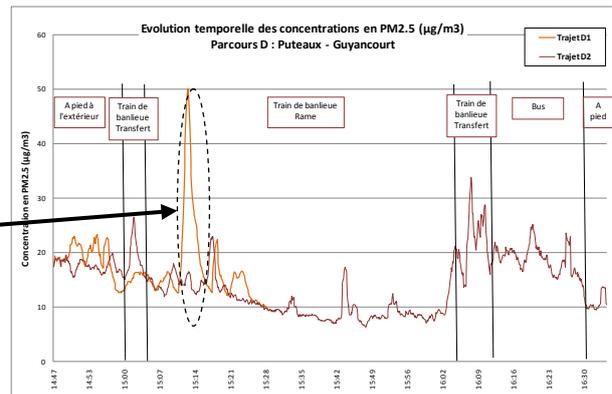
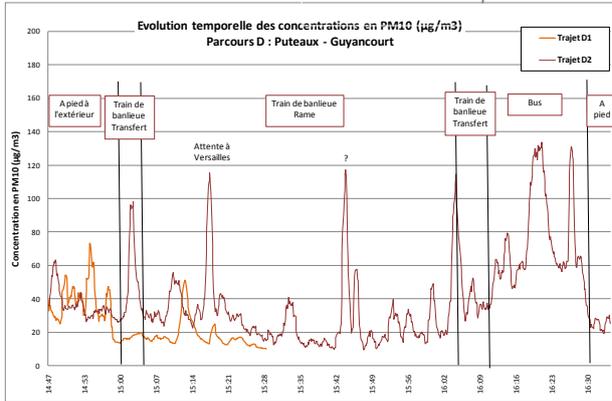
Informations divers (aménagement, matériels...)

	Voiture	Train	Bus
Infrastructure	A13, A12, N12	Transilien U	465
Matériel roulant	Scénic	Rames Z 8800 (1988)	Bus appartenant au réseau Sqybus
Divers	Climatisation automatique à 21.5°C	-	-

Parcours D

2. Evolution spatio-temporelle

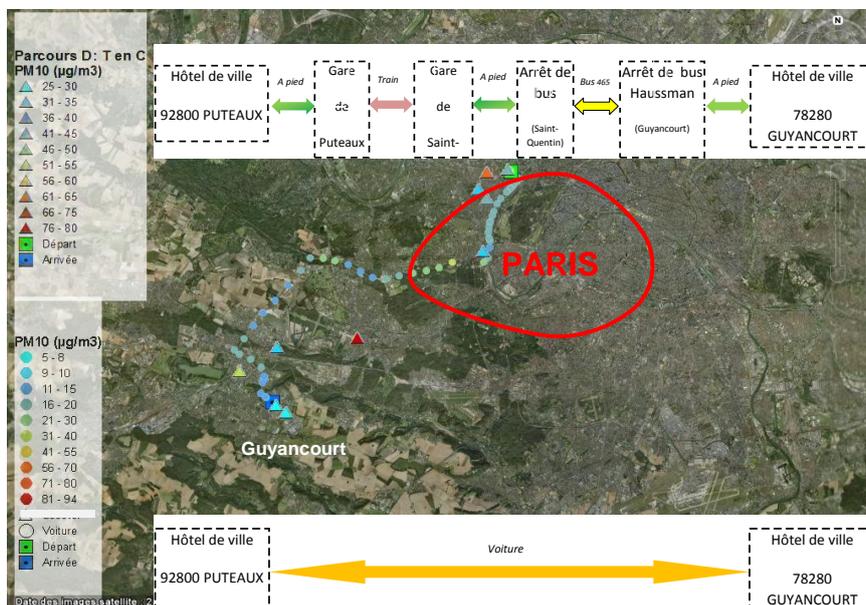
Exemple de suivi temporel d'un trajet



Passage dans un tunnel



Représentation spatio-temporelle de l'exposition par inhalation aux PM10



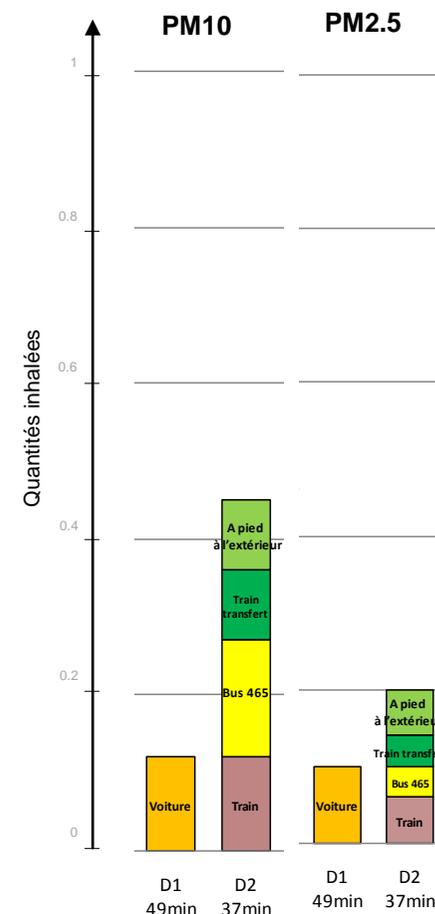
Parcours D

3. Quantités inhalées et budgets espace-temps

Concentrations moyennes en particules par modes de transport et par trajet

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails du parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement (en min)	Concentration d'exposition aux particules PM10 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)	Concentration d'exposition aux particules PM2.5 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)
D	3	D1	Hôtel de ville 92800 PUTEAUX ↔ Hôtel de ville 78280 GUYANCOURT (Voiture)	Voiture	49	28 (10, 78)	24 (10, 50)
		D2		Train rame	32	49 (9, 337)	23 (6, 253)
				Bus 465	19	100 (26, 255)	28 (8, 52)
				Train transfert	13	69 (26, 227)	33 (12, 181)
				A pied à l'extérieur	17	53 (19, 119)	32 (9, 63)

Représentation des quantités inhalées en PM2.5 et en PM10



Représentation des concentrations en PM2.5 et en PM10 mesurées dans les microenvironnements en fonction du temps passé

	D1	D2
PM10	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.	<p>Concentration moyenne du trajet = 28µg/m³</p>
PM2.5	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.	<p>Concentration moyenne du trajet = 28µg/m³</p>

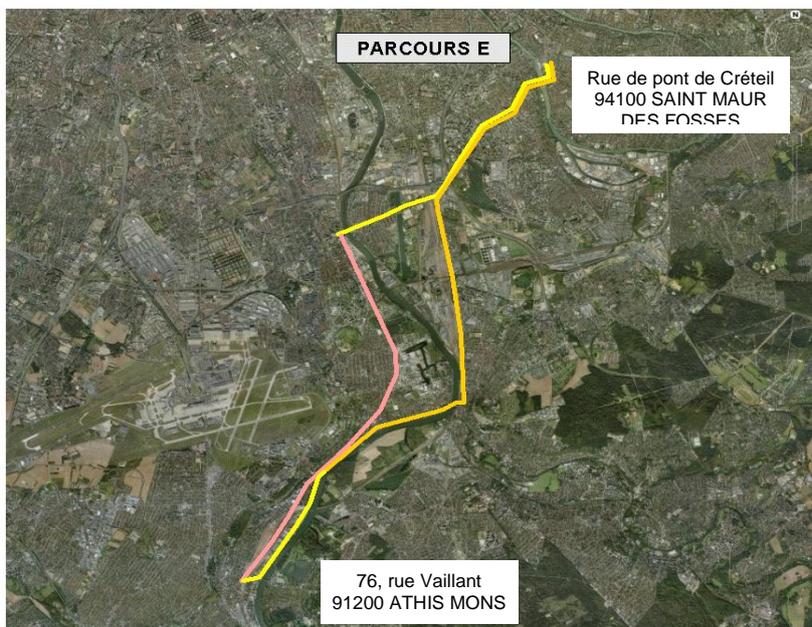
Parcours E

1. Description du parcours

Détails des trajets réalisés

Parcours	Date	Trajets	Transports comparés	Durée moyenne d'un déplacement	Nombre de d'aller-retour par trajet	Nombre de déplacements par trajet	Détails
E	24.09.2008	E1	Bus – RER	53 min	3	6	
		E2	Voiture	41 min	3	6	

Représentation cartographique des parcours réalisés



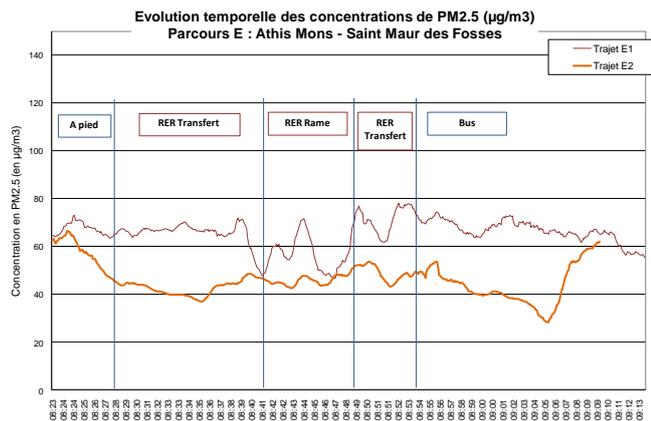
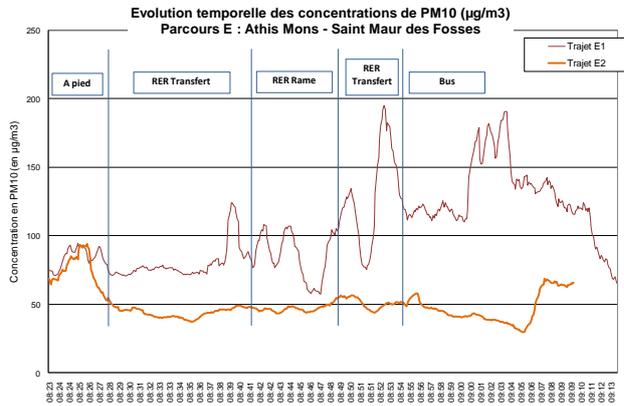
Informations divers (aménagement, matériels...)

	Voiture	RER	Bus
Infrastructure	N186	RER C	TVM (Trans-Val-de-Marne)
Matériel roulant	Renault Scénic	Z 5600 (1984), Z 8800 (1988), Z 20500 (1990) ou Z 20900 (2003)	Irisbus Agora L euro 3 (2003 ou 2007)
Divers	Climatisation automatique à 21.5°C	-	Transport urbain en site propre, efficace, rapide et régulier (inauguré en 1993) Ces bus roulent au « gazole désulfuré avec filtres à particules »

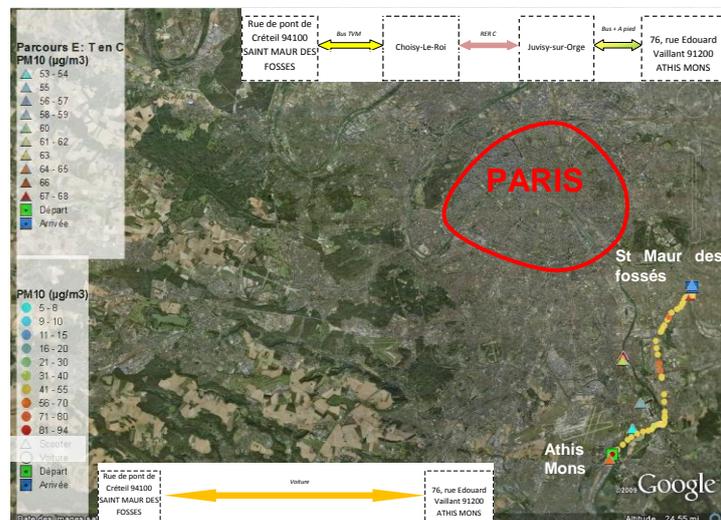
Parcours E

2. Evolution spatio-temporelle

Exemple de suivi temporel d'un trajet



Représentation spatio-temporelle de l'exposition par inhalation aux PM10



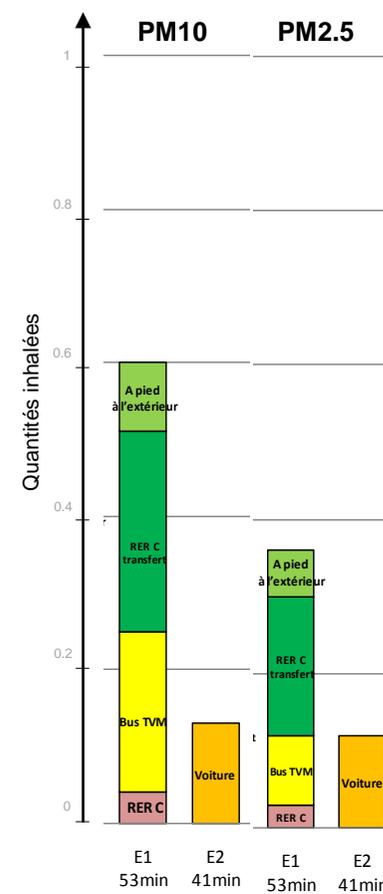
Parcours E

3. Quantités inhalées et budgets espace-temps

Concentrations moyennes en particules par modes de transport et par trajet

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails du parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement (en min)	Concentration d'exposition aux particules PM10 (en µg/m3) Moy (Min, Max)	Concentration d'exposition aux particules PM2.5 (en µg/m3) Moy (Min, Max)
E	3	E1		RER C	8.5	61 (27, 127)	38 (15, 72)
				Bus TVM	23	113 (26, 437)	48 (15, 108)
				RER C transfert	11	226 (65, 482)*	154 (48, 287)*
				A pied à l'extérieur	11	79 (20, 337)	52 (12, 113)
		E2	Voiture	41	36 (12, 107)	33 (11, 76)	

Représentation des quantités inhalées en PM2.5 et en PM10



Représentation des concentrations en PM2.5 et en PM10 mesurées dans les microenvironnements en fonction du temps passé

	E1	E2
PM10	<p style="text-align: center;">Concentration moyenne du trajet = 119µg/m³</p>	Pas de représentation car le trajet E2 a utilisé un seul microenvironnement.
PM2.5	<p style="text-align: center;">Concentration moyenne du trajet = 68µg/m³</p>	Pas de représentation car le trajet E2 a utilisé un seul microenvironnement.
	Concentration moyenne du trajet = 119µg/m ³	Concentration moyenne du trajet = 36µg/m ³
	Concentration moyenne du trajet = 68µg/m ³	Concentration moyenne du trajet = 33µg/m ³

* Les concentrations ont été corrigées par un facteur pondéré en fonction du temps passé dans les souterrains (voir annexe I).

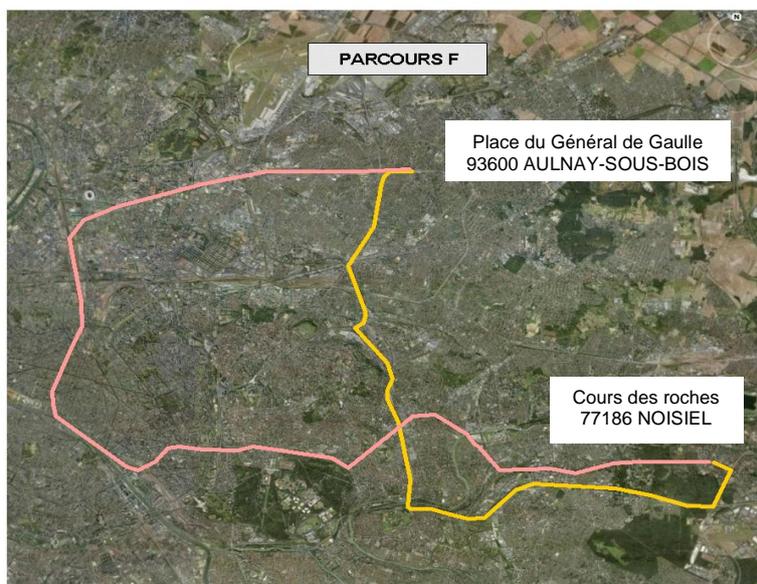
Parcours F

1. Description du parcours

Détails des trajets réalisés

Parcours	Date	Trajets	Transports comparés	Durée moyenne d'un déplacement	Nombre de d'aller-retour par trajet	Nombre de déplacements par trajet	Détails
F	25.09.2008	F1	Voiture	44 min	3	6	
		F2	RER	64 min	3	6	

Représentation cartographique des parcours réalisés



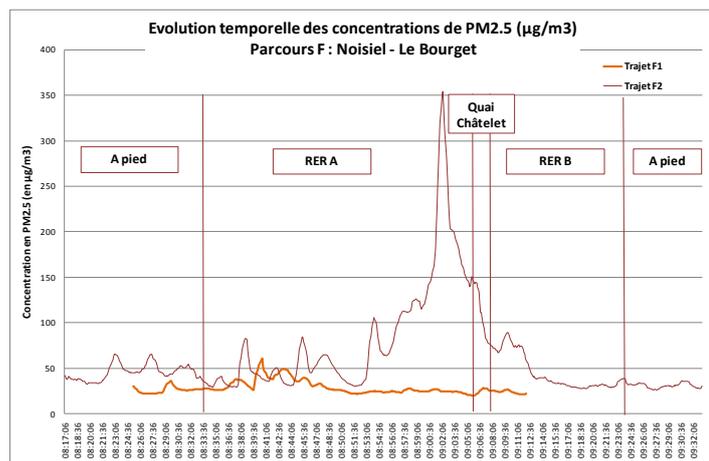
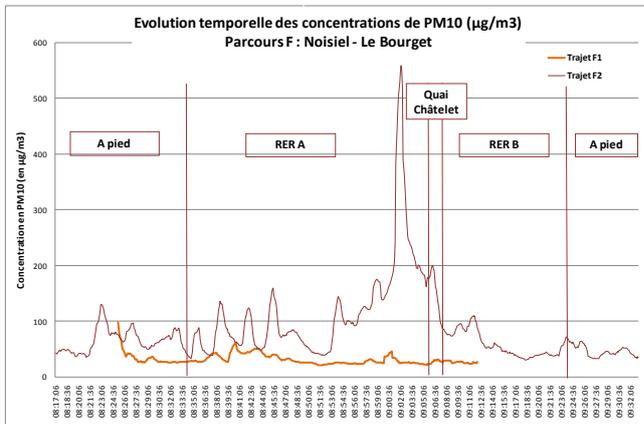
Informations divers (aménagement, matériels...)

	Voiture	RER B	RER A
Infrastructure	A3, A86, A4, N104	RER B	RER A
Matériel roulant	Renault Scénic	MI 84 (1998) MI 79 (1979)	MS 61 (pneumatique), MI 84, MI 2N (ventilation réfrigérée)
Divers	Climatisation automatique à 21.5°C	MI 84 proviennent de la ligne A du RER, et MI 79 sont les 1ères rames d'interconnexion.	-

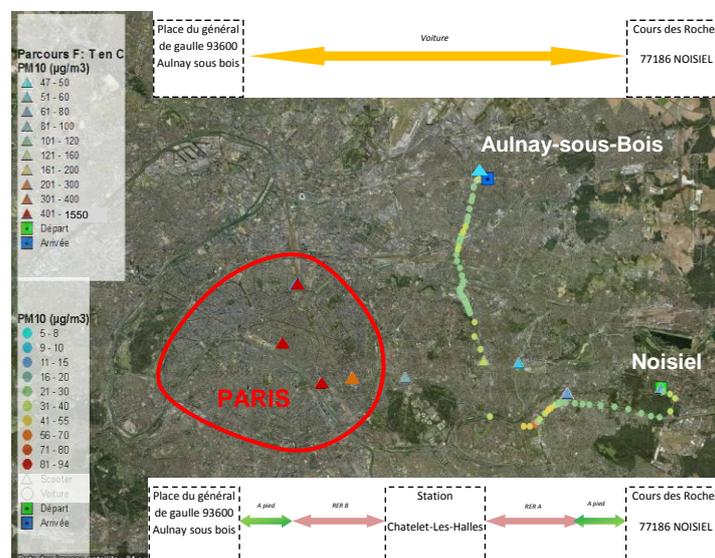
Parcours F

2. Evolution spatio-temporelle

Exemple de suivi temporel d'un trajet



Représentation spatio-temporelle de l'exposition par inhalation aux PM10



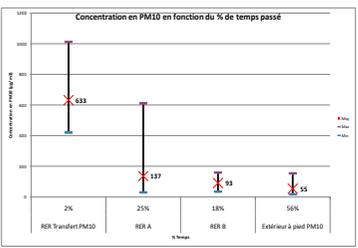
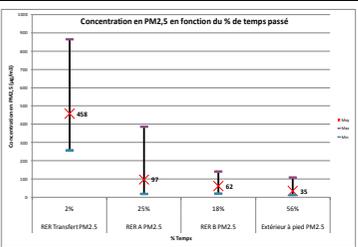
Parcours F

3. Quantités inhalées et budgets espace-temps

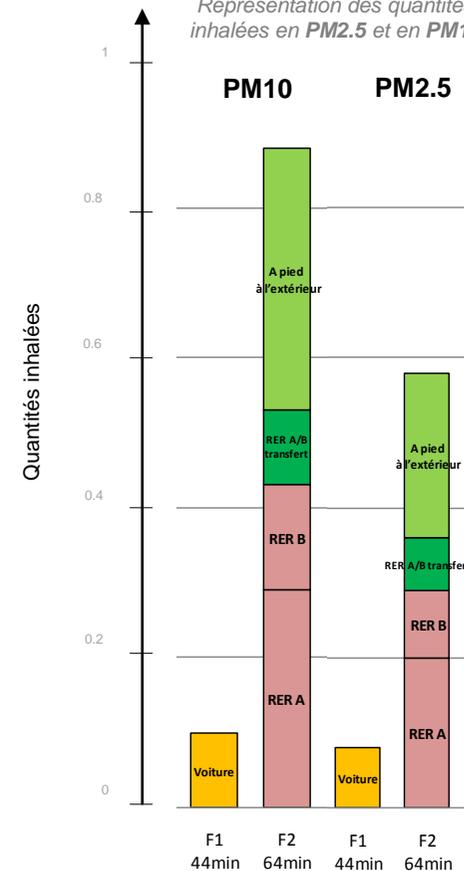
Concentrations moyennes en particules par modes de transport et par trajet

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails du parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement (en min)	Concentration d'exposition aux particules PM10 (en µg/m3) Moy (Min, Max)	Concentration d'exposition aux particules PM2.5 (en µg/m3) Moy (Min, Max)
F	3	F1	Place du général de Gaulle 93600 Aulnay sous bois → Cour des Roches 77186 NOISEL	Voiture	44	26 (9, 109)	22 (9, 61)
		F2	Place du général de Gaulle 93600 Aulnay sous bois → Station Chatelet-Les-Halles → Cour des Roches 77186 NOISEL	RER A	26.5	137 (30, 611)*	97 (20, 387)*
				RER B	19	93 (33, 159)*	62 (22, 140)*
				RER A/B transfert	1.5	633 (421, 1012)*	458 (257, 865)*
				A pied à l'extérieur	60	55 (17, 154)	35 (13, 108)

Représentation des concentrations en PM2.5 et en PM10 mesurées dans les microenvironnements en fonction du temps passé

	F1	F2
PM10	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement. Concentration moyenne du trajet = 26µg/m ³	 Concentration moyenne du trajet = 94µg/m ³
PM2.5	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement. Concentration moyenne du trajet = 22µg/m ³	 Concentration moyenne du trajet = 64µg/m ³

Représentation des quantités inhalées en PM2.5 et en PM10



* Les concentrations ont été corrigées par un facteur pondéré en fonction du temps passé dans les souterrains (voir annexe I).

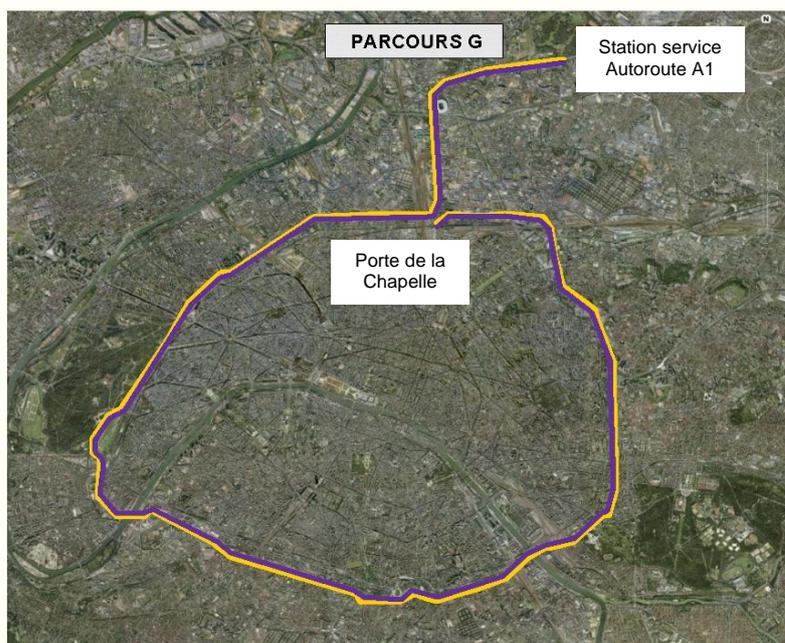
Parcours G

1. Description du parcours

Détails des trajets réalisés

Parcours	Date	Trajets	Transports comparés	Durée moyenne d'un déplacement	Nombre de d'aller-retour par trajet	Nombre de déplacements par trajet	Détails
G	30.09.2008	G1	Voiture	83 min	1	2	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px dashed gray; padding: 2px; font-size: 8px;">Station service CARREFOUR Autoroute A1</div> <div style="flex-grow: 1; text-align: center;"> <p style="font-size: 8px; margin: 0;">Voiture</p> </div> <div style="border: 1px dashed gray; padding: 2px; font-size: 8px;">Porte de la CHAPELLE</div> </div>
		G2	Scooter	48 min	1	2	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px dashed gray; padding: 2px; font-size: 8px;">Station service CARREFOUR Autoroute A1</div> <div style="flex-grow: 1; text-align: center;"> <p style="font-size: 8px; margin: 0;">Scooter</p> </div> <div style="border: 1px dashed gray; padding: 2px; font-size: 8px;">Porte de la CHAPELLE</div> </div>

Représentation cartographique des parcours réalisés



Informations divers (aménagement, matériels...)

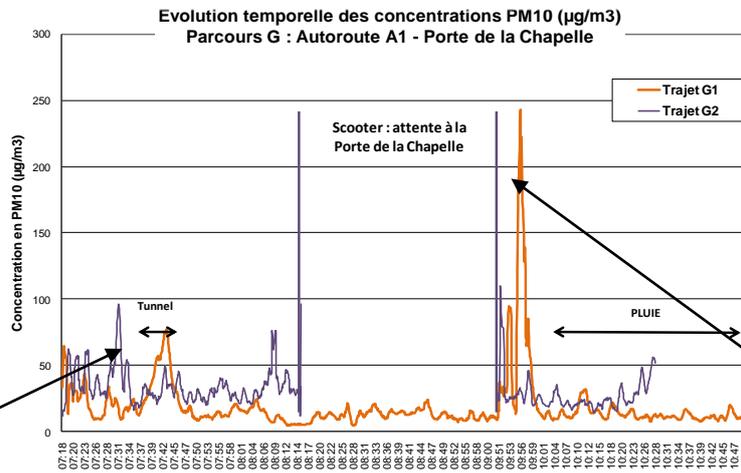
	Voiture	Scooter
Infrastructure	A1, Boulevard périphérique parisien	A1, boulevard périphérique parisien
Matériel roulant	Renault Scénic	125cm ³
Divers	Climatisation automatique à 21.5°C	-

Parcours G

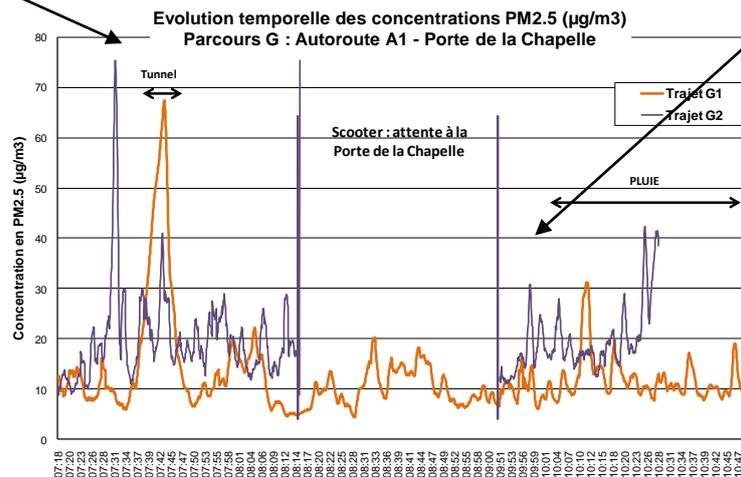
2. Evolution spatio-temporelle

Exemple de suivi temporel d'un trajet

Passage dans un tunnel

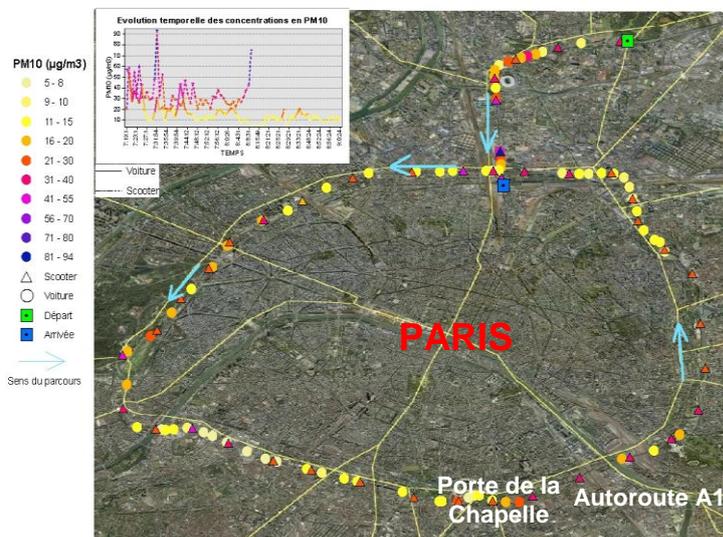


Entrée sur le périphérique
(Bouchons sur l'autre voie)



Absence d'une augmentation de la concentration en PM2.5 (à l'inverse de la concentration en PM10) à l'entrée du périphérique due à la pluie

Représentation spatio-temporelle de l'exposition par inhalation aux PM10



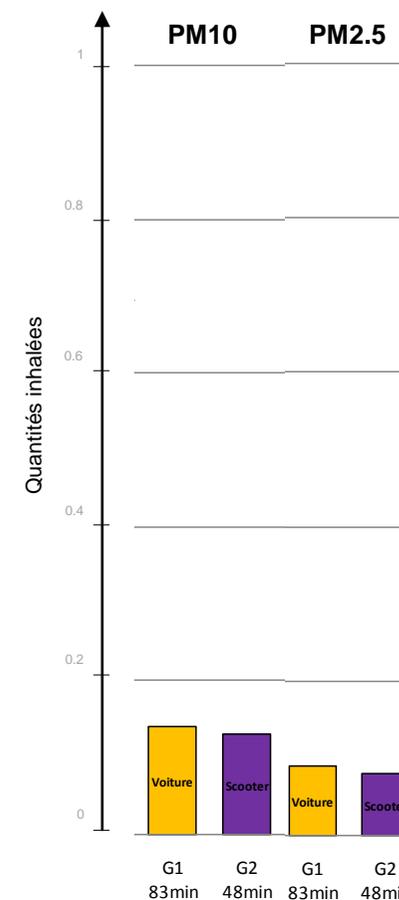
Parcours G

3. Quantités inhalées et budgets espace-temps

Concentrations moyennes en particules par modes de transport et par trajet

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails du parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement (en min)	Concentration d'exposition aux particules PM10 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)	Concentration d'exposition aux particules PM2.5 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)
G	1	G1	Station service CARREFOUR Autoroute A1  Porte de la CHAPELLE	Voiture	83	20 (5, 243)	13 (4, 67)
		G2	Station service CARREFOUR Autoroute A1  Porte de la CHAPELLE	Scooter	48	31 (11, 110)	20 (9, 75)

Représentation des quantités inhalées en PM2.5 et en PM10



Représentation des concentrations en PM2.5 et en PM10 mesurées dans les microenvironnements en fonction du temps passé

	G1	G2
PM10	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.
	Concentration moyenne du trajet = 20µg/m ³	Concentration moyenne du trajet = 31µg/m ³
PM2.5	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.	Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.
	Concentration moyenne du trajet = 13µg/m ³	Concentration moyenne du trajet = 20µg/m ³

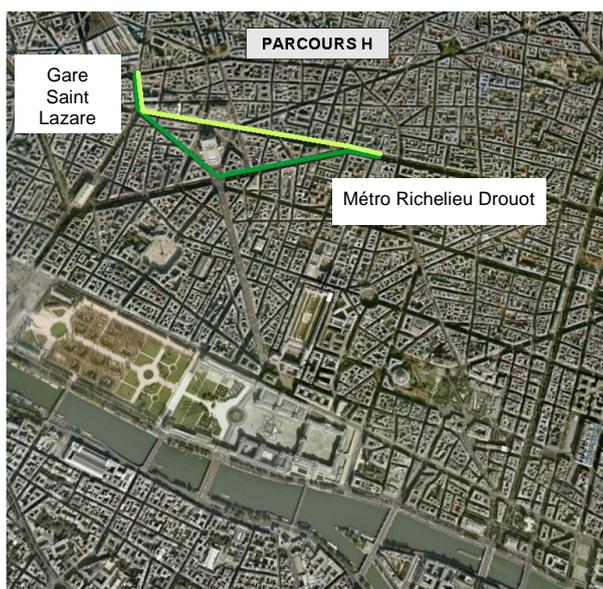
Parcours H

1. Description du parcours

Détails des trajets réalisés

Parcours	Date	Trajets	Transports comparés	Durée moyenne d'un déplacement	Nombre de d'aller-retour par trajet	Nombre de déplacements par trajet	Détails
H	29.09.2008	H1	A pied dans les couloirs souterrains	20 min	3	6	
		H2	A pied à l'extérieur	16 min	3	6	

Représentation cartographique des parcours réalisés



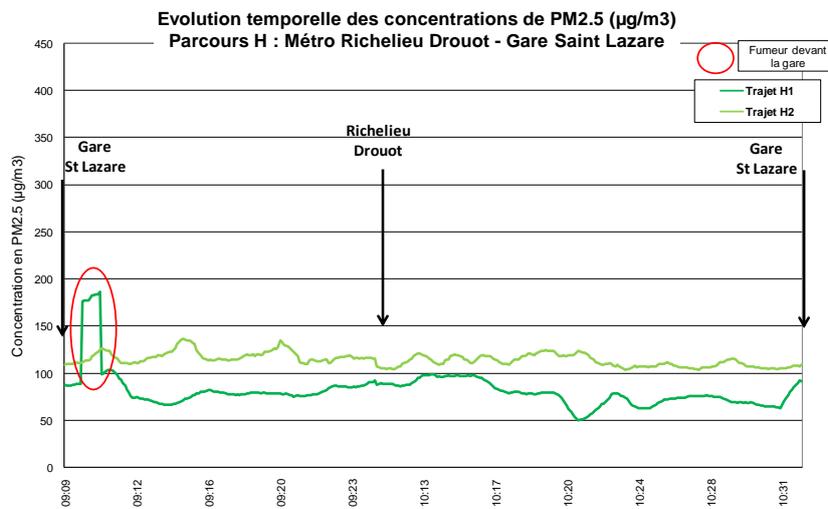
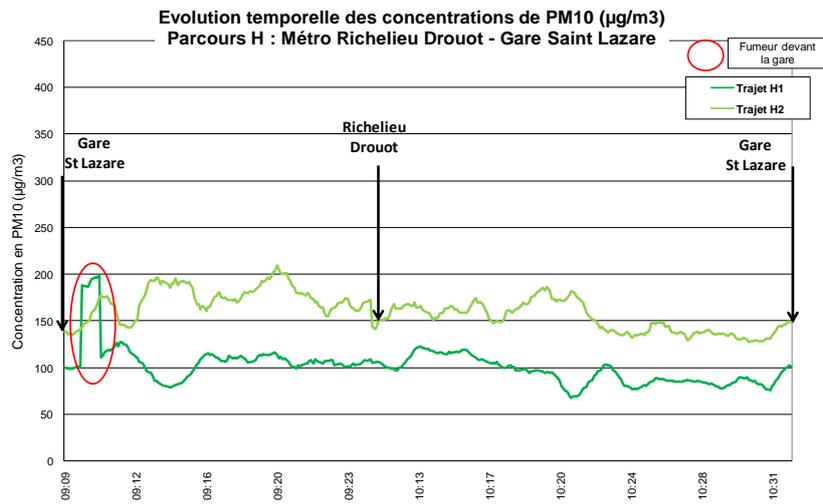
Informations divers (aménagement, matériels...)

Métro	
Infrastructure	Ligne 8
Matériel roulant	MF 77 (1980) (Matériel sur Fer)

Parcours H

2. Evolution spatio-temporelle

Exemple de suivi temporel d'un trajet



Représentation spatio-temporelle de l'exposition par inhalation aux PM10

Absence de représentation spatio-temporelle en raison d'un problème avec le GPS

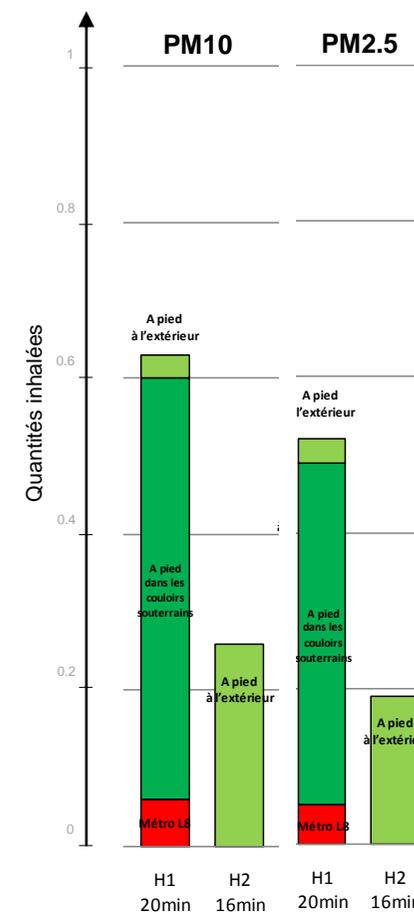
Parcours H

3. Quantités inhalées et budgets espace-temps

Concentrations moyennes en particules par modes de transport et par trajet

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails des parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement (en min)	Concentration d'exposition aux particules PM10 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)	Concentration d'exposition aux particules PM2.5 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)
H	3	H1		A pied dans les couloirs souterrains	16	325 (222, 681)*	263 (171, 636)*
				Métro (ligne 8)	2	363 (294, 451)*	294 (243, 366)*
		H2		A pied à l'extérieur	3	103 (65, 188)	85 (58, 177)
				A pied à l'extérieur	16	157 (106, 416)	112 (83, 168)

Représentation des quantités inhalées en PM2.5 et en PM10



Représentation des concentrations en PM2.5 et en PM10 mesurées dans les microenvironnements en fonction du temps passé

	H1	H2
PM10	<p>Concentration moyenne du trajet = 300µg/m³</p>	<p>Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.</p> <p>Concentration moyenne du trajet = 157µg/m³</p>
PM2.5	<p>Concentration moyenne du trajet = 243µg/m³</p>	<p>Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.</p> <p>Concentration moyenne du trajet = 112µg/m³</p>

* Les concentrations ont été corrigées par un facteur pondéré en fonction du temps passé dans les souterrains (voir annexe I).

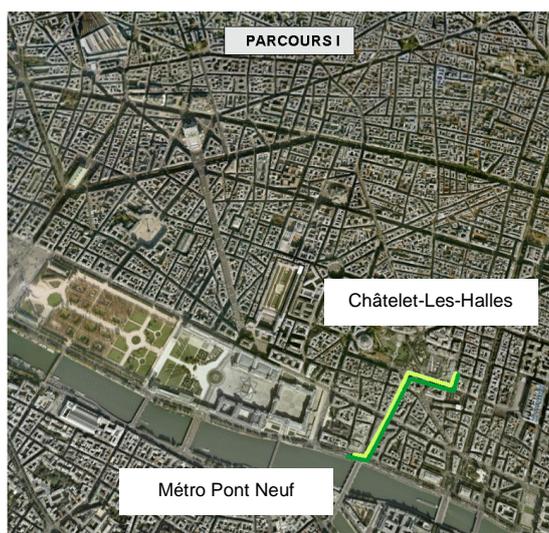
Parcours I

1. Description du parcours

Détails des trajets réalisés

Parcours	Date	Trajets	Transports comparés	Durée moyenne d'un déplacement	Nombre de d'aller-retour par trajet	Nombre de déplacements par trajet	Détails
I	29.09.2008	I1	A pied dans les couloirs souterrains	13 min	3	6	
		I2	A pied à l'extérieur	10 min	3	6	

Représentation cartographique des parcours réalisés



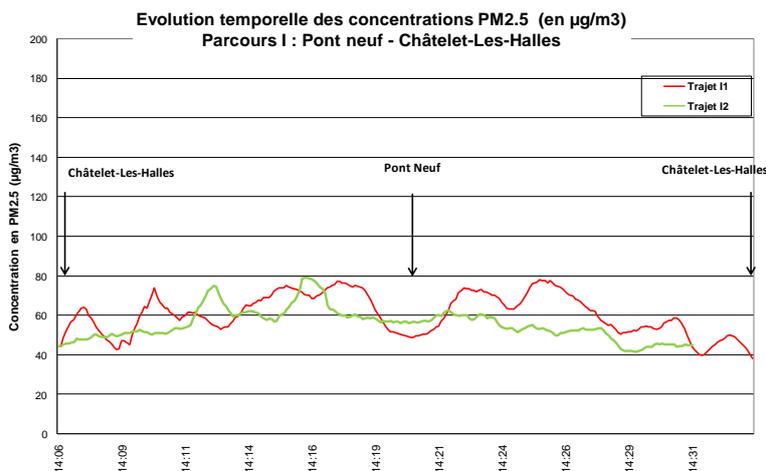
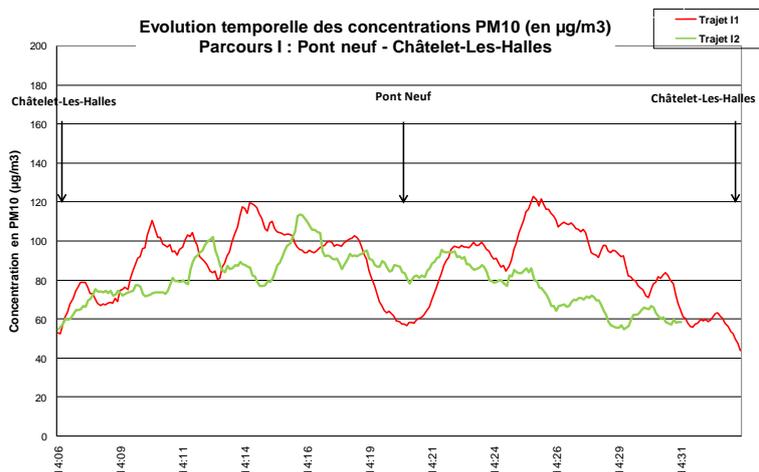
Informations divers (aménagement, matériels...)

Métro	
Infrastructure	Ligne 7
Matériel roulant	MF 77 (1979) (Matériel sur Fer)
Divers	La ligne 7 est également une des plus longues avec dix-huit kilomètres, celle comptant le plus grand nombre de stations.

Parcours I

2. Evolution spatio-temporelle

Exemple de suivi temporel d'un trajet



Représentation spatio-temporelle de l'exposition par inhalation aux PM10

Absence de représentation spatio-temporelle en raison d'un problème avec le GPS

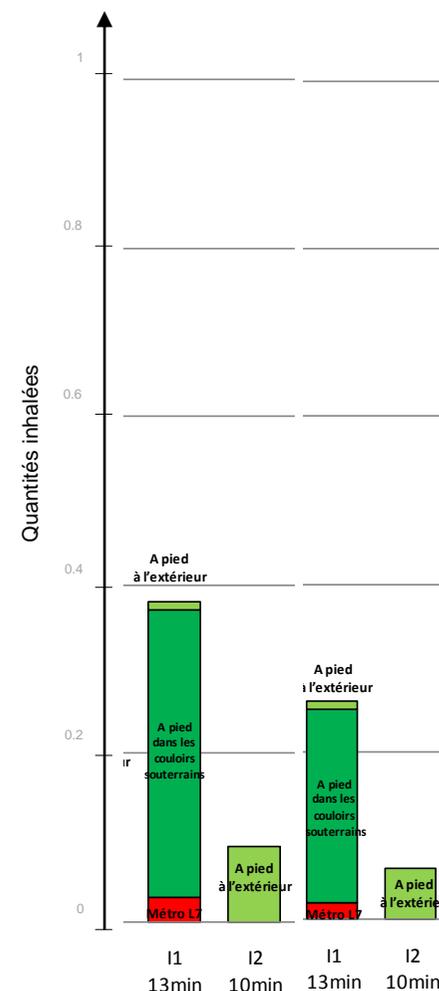
Parcours I

3. Quantités inhalées et budgets espace-temps

Concentrations moyennes en particules par modes de transport et par trajet

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails du parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement (en min)	Concentration d'exposition aux particules PM10 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)*	Concentration d'exposition aux particules PM2.5 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)
I	3	I1		A pied dans les couloirs souterrains	10	325 (168, 581)*	219 (137, 369)*
				Métro (ligne 7)	1	349 (233, 465)*	260 (178, 339)*
		I2		A pied à l'extérieur	2	67 (42, 114)	52 (34, 88)
				A pied à l'extérieur	10	82 (48, 133)	55 (38, 79)

Représentation des quantités inhalées en PM2.5 et en PM10



Représentation des concentrations en PM2.5 et en PM10 mesurées dans les microenvironnements en fonction du temps passé

	I1	I2
PM10	<p>Concentration moyenne du trajet = 288µg/m³</p>	<p>Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.</p> <p>Concentration moyenne du trajet = 82µg/m³</p>
PM2.5	<p>Concentration moyenne du trajet = 198µg/m³</p>	<p>Pas de représentation car le trajet C1 a utilisé un seul microenvironnement.</p> <p>Concentration moyenne du trajet = 55µg/m³</p>

* Les concentrations ont été corrigées par un facteur pondéré en fonction du temps passé dans les souterrains (voir annexe I).

6. SYNTHESE

A titre d'information, les données non corrigées sont reportées en Annexe III.

6.1 BILAN PAR PARCOURS



6.1.1 TABLEAU SYNTHETIQUE DES RESULTATS PAR PARCOURS

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails du parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement	Concentration d'exposition par inhalation aux particules PM10 (en µg/m ³)	Concentration d'exposition par inhalation aux particules PM2.5 (en µg/m ³)
					(en min)	Moy (Min, Max)	Moy (Min, Max)
A	4	A1		Vélo sur piste cyclable	27	55 (12, 344)	29 (9, 139)
				RER B	5	150 (34, 652)*	63 (18, 304)*
		A2		Métro (ligne 2)	13	284 (65, 1026)*	113 (44, 233)*
				Métro transfert	9.5	342 (48, 2141)*	213 (24, 257)*
B	5	B1		Vélo sur piste cyclable	33	50 (31, 89)	32 (24, 45)
		B2		Vélo hors piste cyclable	33	52 (30, 97)	33 (25, 47)
C	5	C1		Vélo sur piste cyclable	27	33 (14, 360)	18 (9, 71)
		C2		A pied à l'extérieur	3.5	52 (19, 187)	18 (8, 75)
				Métro (ligne 1)	16	465 (164, 1235)*	236 (32, 257)*
Métro transfert	10	376 (79, 1536)*	123 (38, 335)*				

Nota : Les valeurs Min et Max sont des valeurs brutes observées (pas de 6 secondes).

* Les concentrations ont été corrigées par un facteur pondéré en fonction du temps passé dans les souterrains (voir Annexe I).

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails du parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement (en min)	Concentration d'exposition par inhalation aux particules PM10 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)	Concentration d'exposition par inhalation aux particules PM2.5 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)
D	3	D1		Voiture	49	28 (10, 78)	24 (10, 50)
		D2		Train rame	32	49 (9, 337)	23 (6, 253)
			Bus 465	19	100 (26, 255)	28 (8, 52)	
			Train transfert	13	69 (26, 227)	33 (12, 181)	
			A pied à l'extérieur	17	53 (19, 119)	32 (9, 63)	
E	3	E1		RER C	8.5	61 (27, 127)	38 (15, 72)
			Bus TVM	23	113 (26, 437)	48 (15, 108)	
			RER C transfert	11	226 (65, 482)*	154 (48, 287)*	
			A pied à l'extérieur	11	79 (20, 337)	52 (12, 113)	
		E2		Voiture	41	36 (12, 107)	33 (11, 76)
F	3	F1		Voiture	44	26 (9, 109)	22 (9, 61)
		F2		RER A	26.5	137 (30, 611)*	97 (20, 387)*
			RER B	19	93 (33, 159)*	62 (22, 140)*	
			RER A/B transfert	1.5	633 (421, 1012)*	458 (257, 865)*	
			A pied à l'extérieur	60	55 (17, 154)	35 (13, 108)	

Nota : Les valeurs Min et Max sont des valeurs brutes observées (pas de 6 secondes).

* Les concentrations ont été corrigées par un facteur pondéré en fonction du temps passé dans les souterrains (voir annexe I).

Parcours	Nombre d'aller-retour	Trajets	Détails du parcours	Transports comparés	Durée moyenne pour un déplacement (en min)	Concentration d'exposition par inhalation aux particules PM10 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)	Concentration d'exposition par inhalation aux particules PM2.5 (en µg/m ³) Moy (Min, Max)
G	1	G1		Voiture	83	20 (5, 243)	13 (4, 67)
		G2		Scooter	48	31 (11, 110)	20 (9, 75)
H	3	H1		A pied dans les couloirs souterrains	16	325 (222, 681)*	263 (171, 636)*
				Métro (ligne 8)	2	363 (294, 451)*	294 (243, 366)*
		H2		A pied à l'extérieur	3	103 (65, 188)	85 (58, 177)
I	3	I1		A pied dans les couloirs souterrains	10	325 (168, 581)*	219 (137, 369)*
				Métro (ligne 7)	1	349 (233, 465)*	260 (178, 339)*
		I2		A pied à l'extérieur	2	67 (42, 114)	52 (34, 88)
				A pied à l'extérieur	10	82 (48, 133)	55 (38, 79)

Nota : Les valeurs Min et Max sont des valeurs brutes observées (pas de 6 secondes).

* Les concentrations ont été corrigées par un facteur pondéré en fonction du temps passé dans les souterrains (voir annexe I).

6.1.2 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS EN PARTICULES SUR LES DIFFERENTS PARCOURS

6.1.2.1 CONCENTRATIONS EN PARTICULES PM10 PAR PARCOURS :

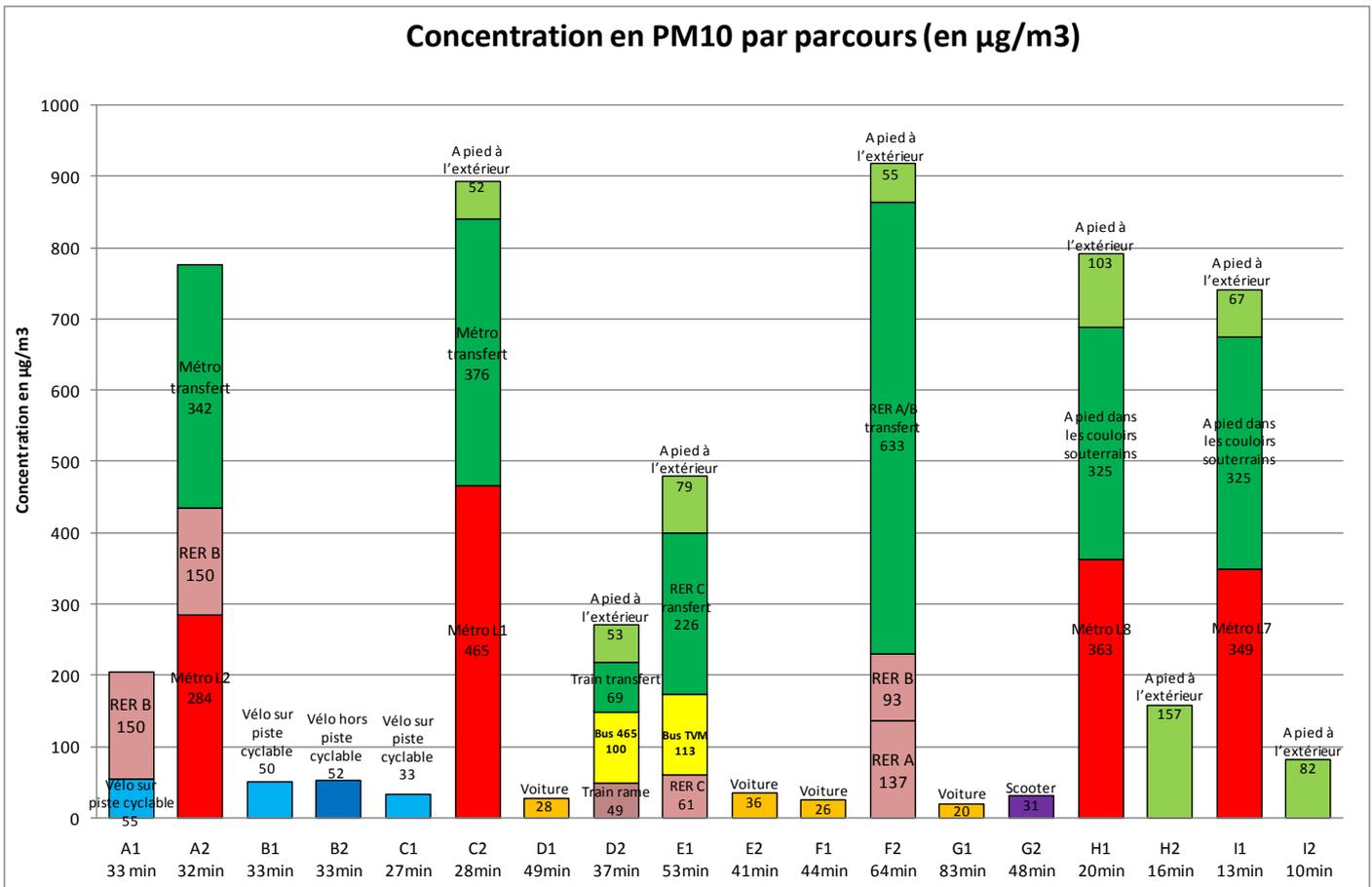


Figure 23 : Concentrations massiques corrigées en particules PM10 par parcours*

Le trajet présentant une concentration massique cumulée en particules PM10 maximale est le trajet F2 (Aulnay-sous-Bois → Noisiel en RER), suivi du trajet C2 (Rue Abel, Paris → Avenue Montaigne, Paris en Métro).

*Compte tenu des méthodes de mesures utilisées, ces résultats sont à utiliser avec les précautions d'usage. (Cf §4.5.1)

6.1.2.2 CONCENTRATIONS EN PARTICULES PM2.5 PAR PARCOURS :

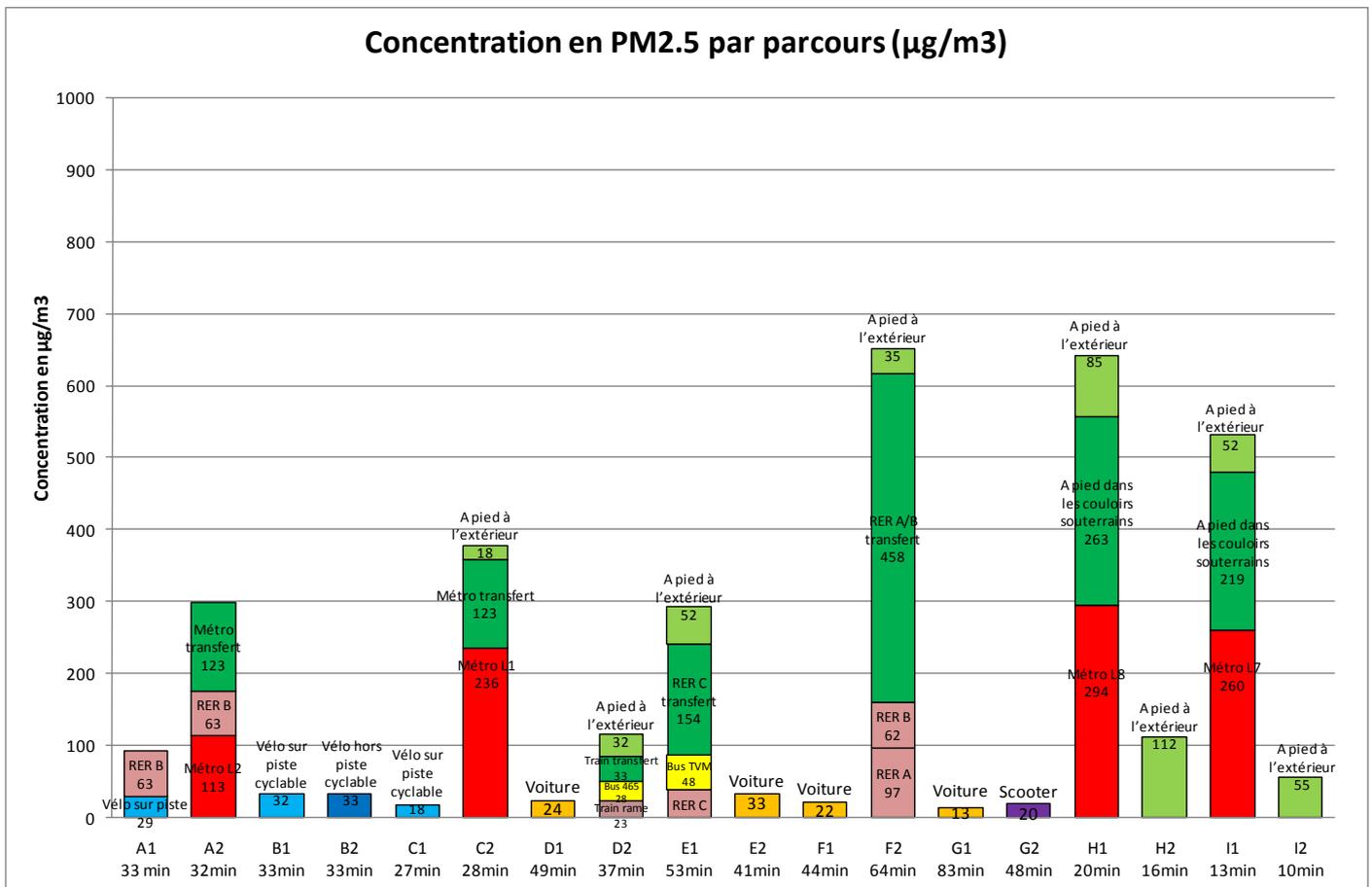


Figure 24 : Concentrations massiques corrigées en particules PM2.5 par parcours*

Le trajet présentant la concentration massique cumulée en particules PM2.5 maximale est le trajet F2 (Aulnay-sous-Bois → Noisiel en RER), suivi de près du trajet H1 (Métro DROUOT, Paris → Gare Saint-Lazare, Paris en Métro).

*Compte tenu des méthodes de mesures utilisées, ces résultats sont à utiliser avec les précautions d'usage. (Cf §4.5.1)

6.1.3 COMPARAISON RELATIVE DES QUANTITES INHALEES DE PARTICULES SUR LES DIFFERENTS PARCOURS

A titre exploratoire (cf §5.4.3.1), afin de comparer et hiérarchiser les expositions par inhalation sur chaque parcours, des quantités inhalées ont été calculé en prenant en compte pour chaque mode de transport le temps d'exposition par inhalation et des taux d'inhalation propres [US-EPA, 1997]. Le but étant de comparer qualitativement les trajets les uns par rapport aux autres, toutes les quantités inhalées ont donc été normalisées par rapport à celle du trajet présentant la quantité inhalée la plus importante en PM10.

6.1.3.1 QUANTITE INHALEE DE PARTICULES PM10 PAR PARCOURS :

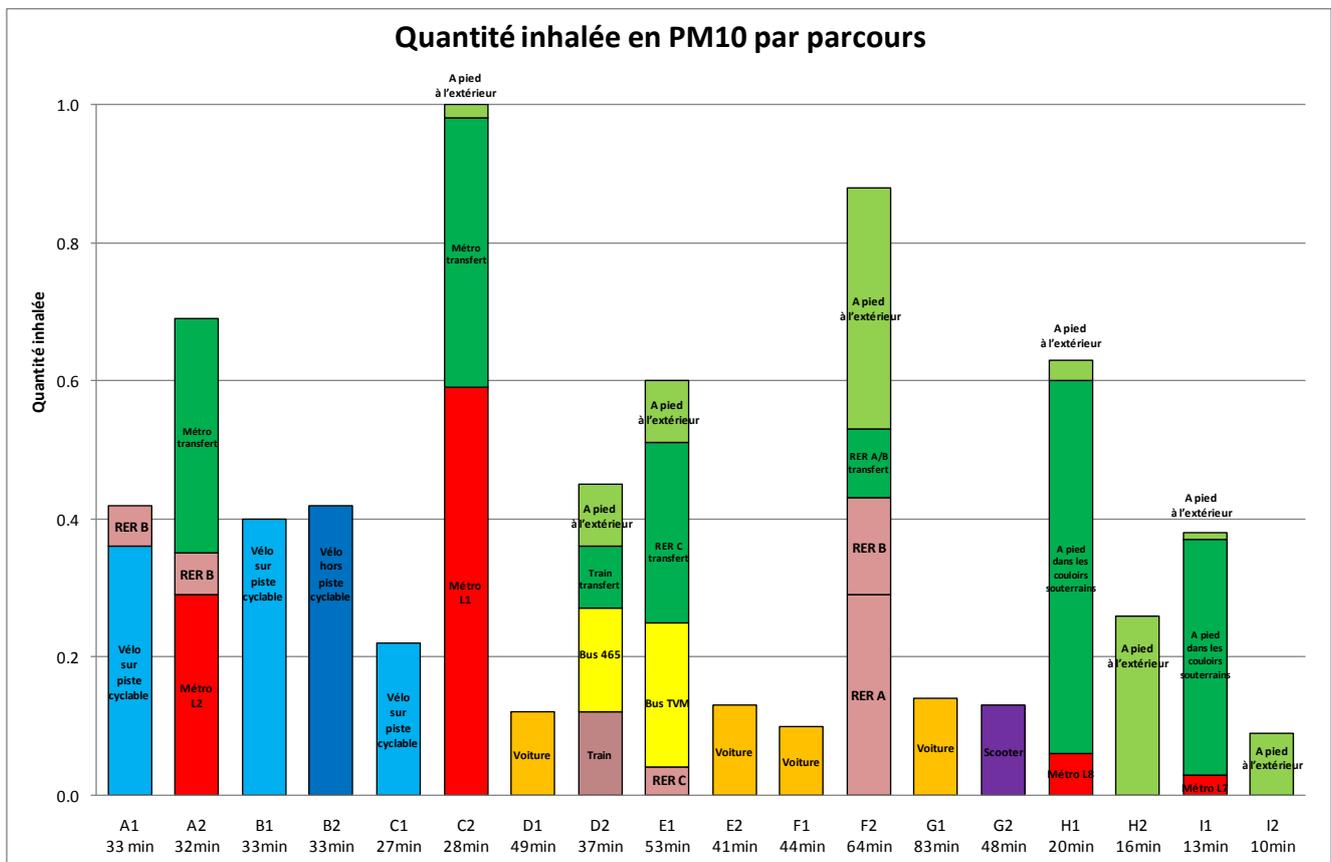


Figure 25 : Représentation des quantités inhalées corrigées en PM10 pour chaque parcours*

Le trajet présentant la quantité inhalée de particules PM10 maximale est le trajet C2 (Rue Abel, Paris → Avenue Montaigne, Paris en Métro), suivi du trajet F2 (Aulnay-sous-Bois → Noisiel en RER).

Le calcul des quantités inhalées ne modifie pas la hiérarchisation des expositions par inhalation aux particules sur deux trajets comparés en parallèle utilisant des modes de transport différents (X_i / X_{i+1}).

Cependant, pour un même trajet, la prise en compte de la quantité inhalée peut modifier la part des différents modes de transport dans la quantité inhalée totale (exemple du trajet F2).

La prise en compte de la quantité inhalée a pour conséquence de placer la part attribuée au « Vélo » au même niveau que celle attribuée au « Métro ».

*Compte tenu des méthodes de mesures utilisées, ces résultats sont à utiliser avec les précautions d'usage. (Cf §4.5.1)
DRC-09-104243-11651A - 102 / 117 -

6.1.3.2 QUANTITE INHALEE DES PARTICULES PM2.5 PAR PARCOURS :

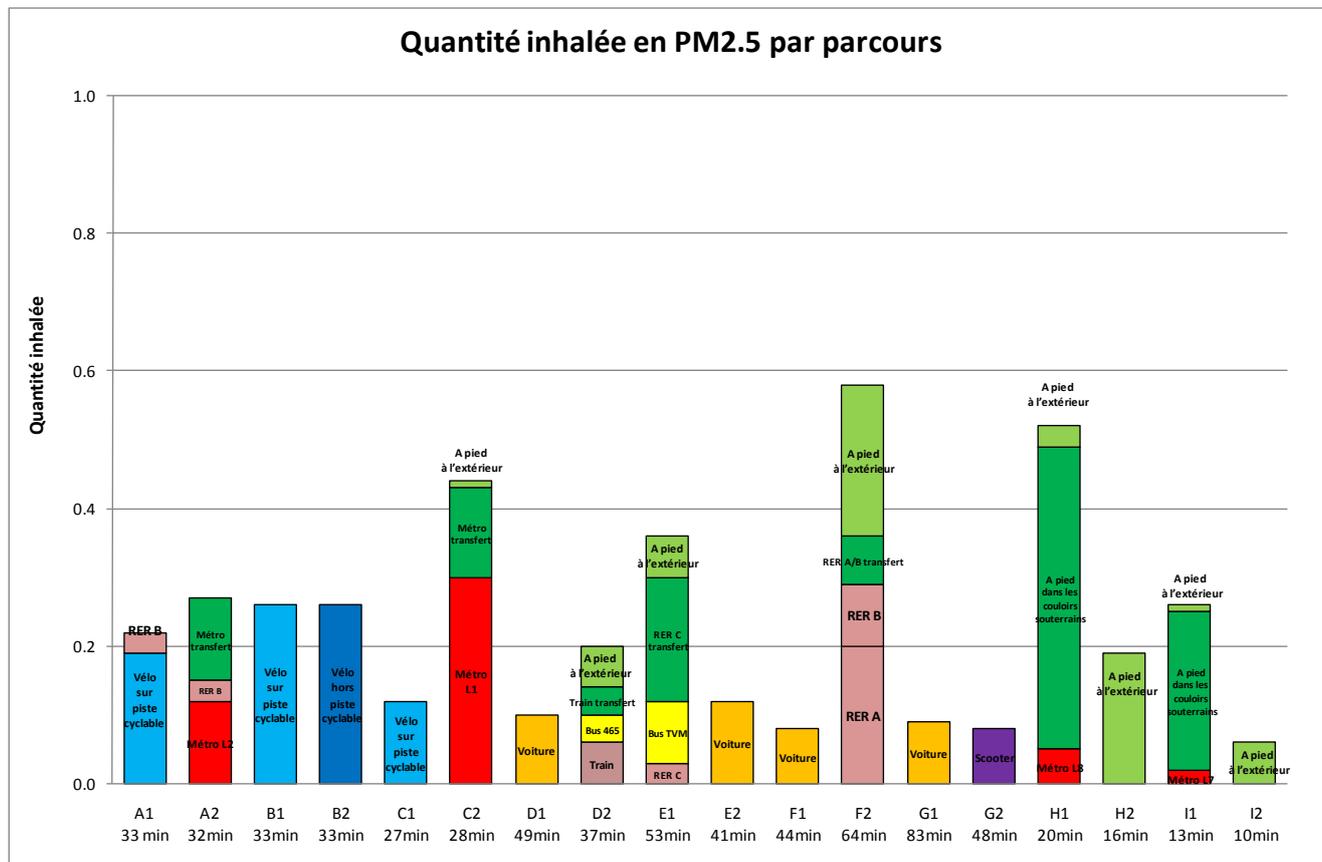


Figure 26 : Représentation des quantités inhalées corrigées en PM2.5 pour chaque parcours*

Le trajet présentant la quantité inhalée des particules PM2.5 maximale est toujours le trajet F2 (Aulnay-sous-Bois → Noisiel en RER), suivi de près des trajets H1 (Métro DROUOT, Paris → Gare Saint-Lazare, Paris en Métro) et C2 (Rue Abel, Paris → Avenue Montaigne, Paris en Métro).

Le calcul des quantités inhalées ne modifie pas la hiérarchisation des expositions par inhalation aux particules sur deux trajets comparés en parallèle utilisant des modes de transport différents (X_i / X_{i+1}).

Cependant, pour un même trajet, la prise en compte de la quantité inhalée peut modifier la part des différents modes de transport dans la quantité inhalée totale (exemple du trajet F2).

La prise en compte de la quantité inhalée a pour conséquence de placer la part attribuée au « Vélo » au même niveau que celle attribuée au « Métro ».

*Compte tenu des méthodes de mesures utilisées, ces résultats sont à utiliser avec les précautions d'usage. (Cf §4.5.1)

6.2 BILAN PAR MODE DE TRANSPORT

6.2.1 CONCENTRATION EN PM10

Les concentrations massiques en PM10 moyennes, minimum et maximum par mode de transport ont été calculées en intégrant l'ensemble des parcours (Figure 19).

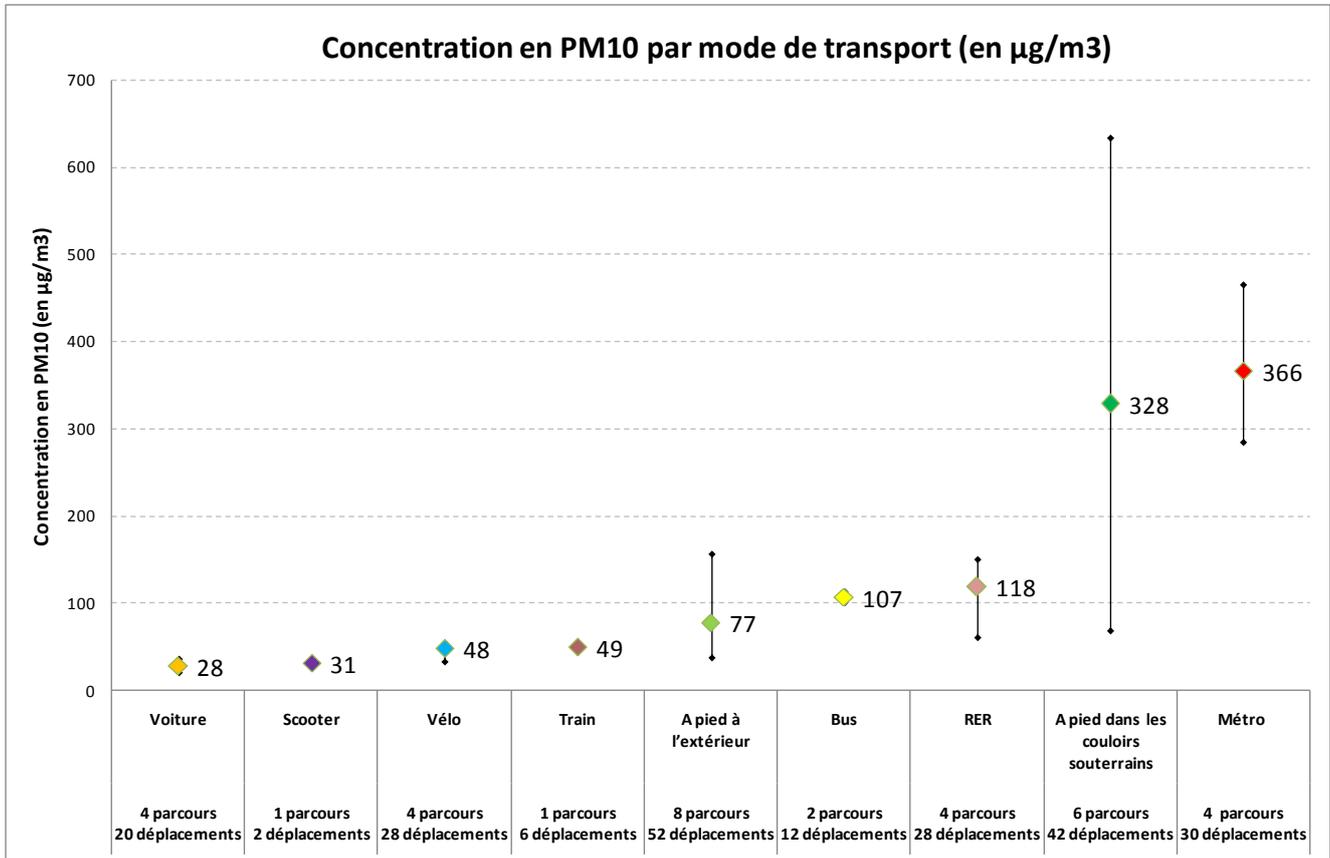


Figure 27 : Concentrations massiques corrigées en particules PM10 par mode de transport*

Les concentrations en PM10 varient entre 28 et 366 µg/m³. La concentration moyenne en PM10 la plus élevée est, dans le cadre de notre étude, associée au mode de transport « Métro ».

Les résultats en concentration massique en PM10 de cette étude ont été comparés avec les valeurs reportées dans les différentes publications de la synthèse bibliographique. La grande majorité des essais auxquels ces études font référence ont été réalisés avec des techniques optiques d'estimation des niveaux de concentration massique des PM en temps réel. Cette communauté de pratique permet une comparaison des résultats de mesures obtenus dans le cadre de cette étude.

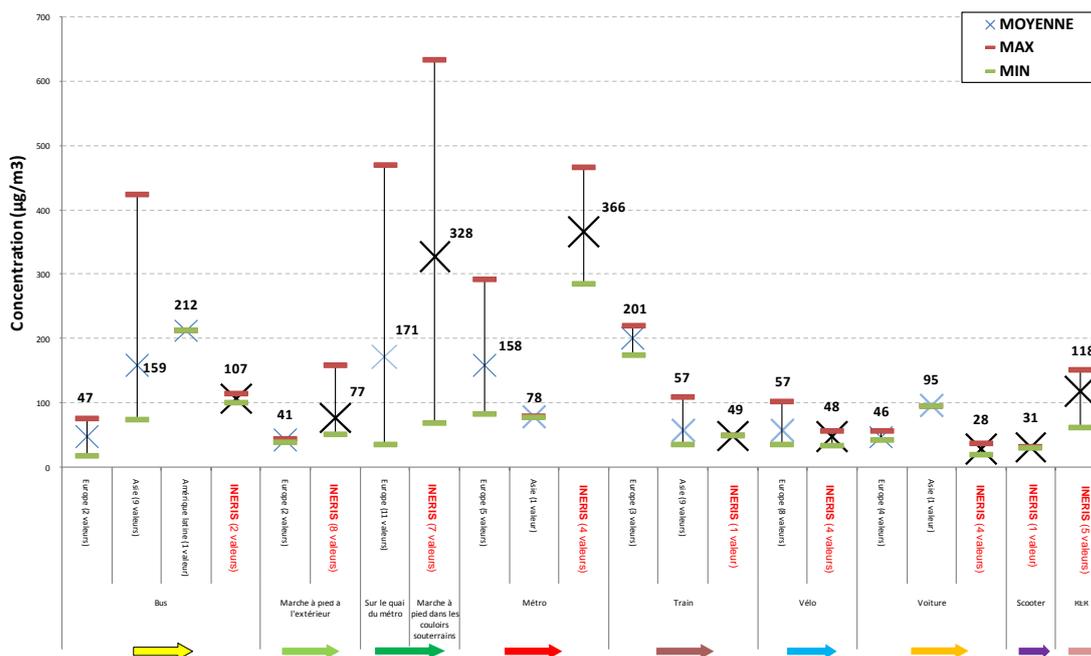


Figure 28 : Comparaison des résultats corrigés en PM10 avec ceux de la bibliographie

Les valeurs de concentrations mesurées sont cohérentes avec celles reportées dans la littérature.

6.2.2 CONCENTRATIONS EN PM2.5

Les concentrations massiques en particules PM2.5 par mode de transport sont présentées sur la Figure 21.

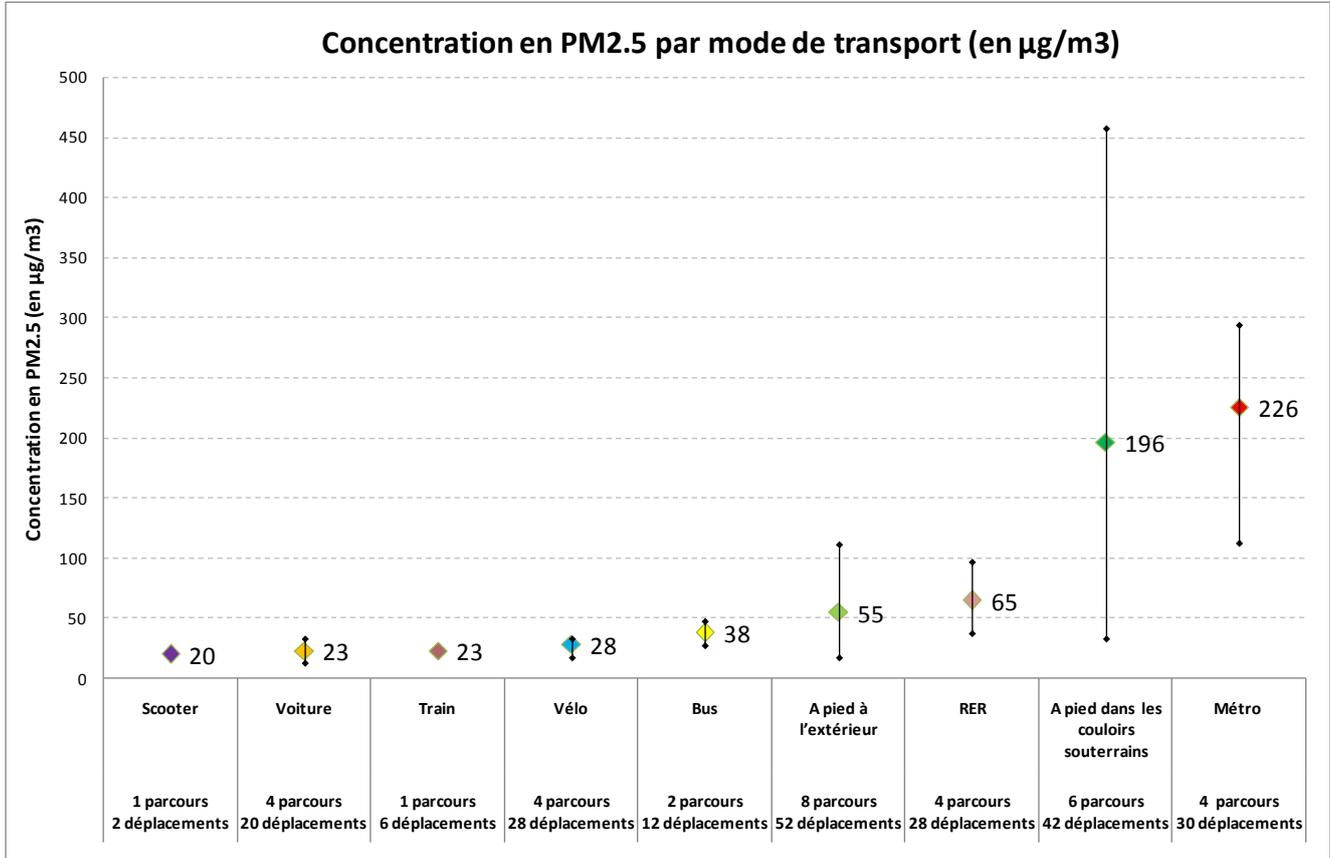


Figure 29 : Concentrations massiques corrigées en particules PM2.5 par mode de transport*

Après correction des résultats dans les milieux souterrains, les concentrations en PM2.5 varient entre 20 et 226 µg/m³. Les concentrations en PM2.5 les plus élevées sont, dans le cadre de cette étude, associées au mode de transport « Métro » suivi de la « Marche à pied dans les couloirs souterrains ».

Les résultats en concentration massique en PM2.5 de cette étude ont été comparés avec les valeurs reportées dans les différentes publications de la synthèse bibliographique. La grande majorité des essais auxquels ces études font référence ont été réalisés avec des techniques optiques d'estimation des niveaux de concentration massique des PM en temps réel. Cette communauté de pratique permet de comparer les résultats de mesures obtenus dans le cadre de cette étude à ces études.

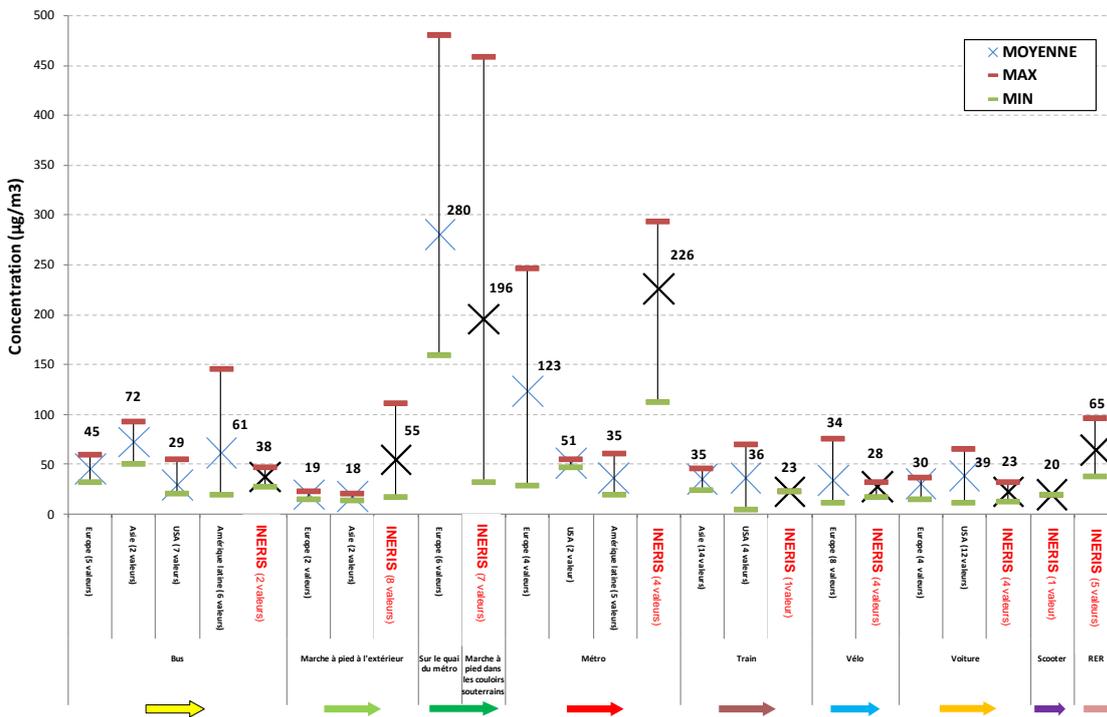


Figure 30 : Comparaison des résultats corrigés en PM2.5 avec ceux de la bibliographie*

Les valeurs de concentrations mesurées sont cohérentes avec celles reportées dans la littérature.

*Compte tenu des méthodes de mesures utilisées, ces résultats sont à utiliser avec les précautions d'usage. (Cf §4.5.1)

6.2.3 REPARTITION PM2.5/PM10 PAR MODE DE TRANSPORT

A titre exploratoire, des calculs de ratio PM2.5/PM10 ont été réalisés à des fins de comparaison qualitative.

Le ratio PM2.5/PM10 permet de connaître la répartition de particules fines et grossières dans un environnement. En effet, ce ratio est plus important dans les environnements présentant une proportion en particules fines importante. A l'inverse, ce ratio est plus faible dans les environnements présentant une proportion en particules grossières importante.

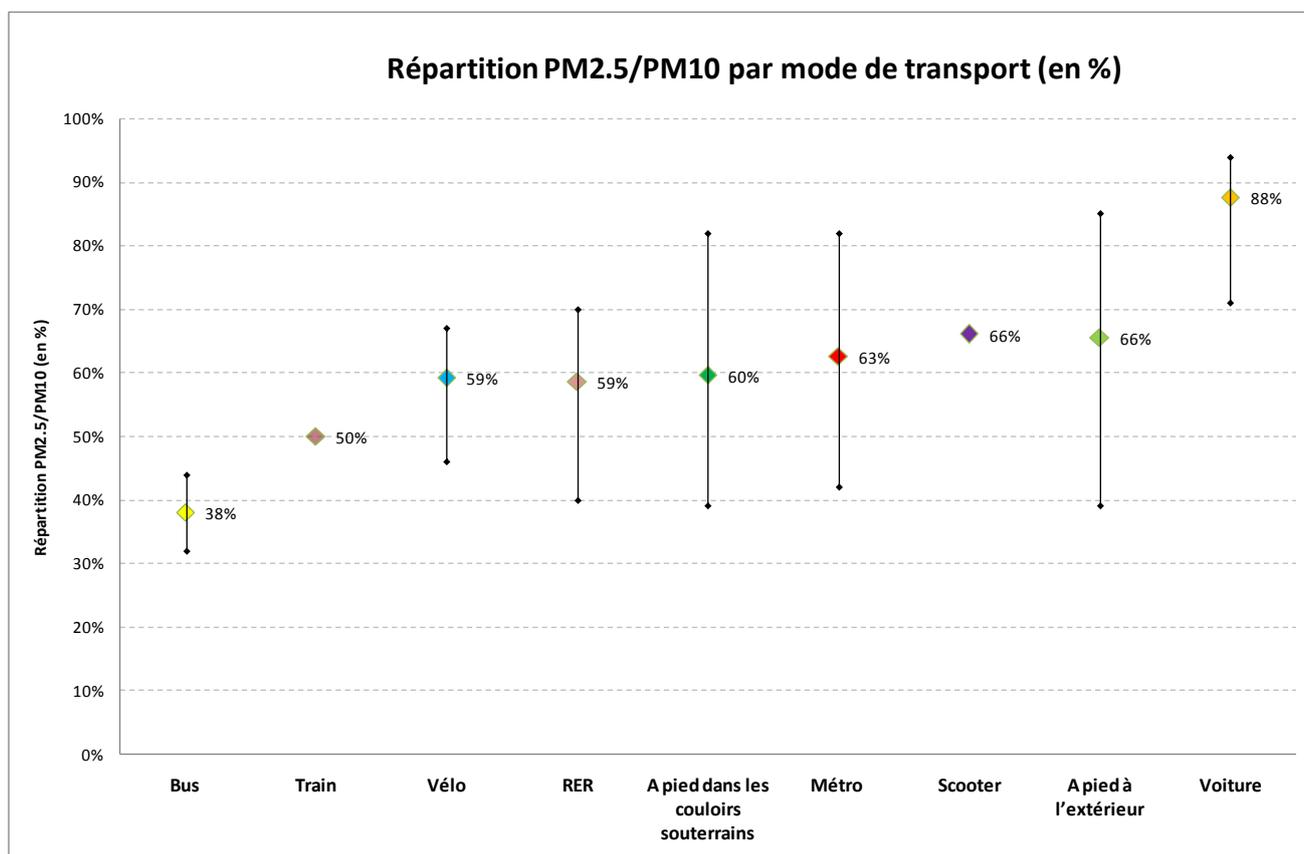


Figure 31 : Répartition PM2.5/PM10 par mode de transport

Sur ce graphe sont représentés les ratios moyens minimum et maximum calculés par mode de transport sur l'ensemble des parcours.

D'après le graphe ci-dessus, on constate que la majorité des modes de transport étudiés ont une répartition PM2.5/PM10 comprise entre 50% et 66%.

Le mode de transport ayant le plus faible ratio PM2.5/PM10 est le « Bus ». Cependant, ce résultat est à interpréter avec les précautions d'usage car ce ratio a été calculé à partir des moyennes de deux parcours en banlieue très différent en termes d'équipement.

Le mode de transport ayant le plus fort ratio PM2.5/PM10 est la « Voiture ». Ce mode de transport « Voiture » présente des concentrations en particules parmi les plus faibles en comparaison avec les autres modes de transport étudiés lors de cette étude. Cependant, c'est en « Voiture » que la répartition en particules fines est la plus importante. Il est probable que cela soit dû au système de filtration de l'entrée d'air de l'habitacle.

7. CONCLUSION

Il ressort de l'analyse bibliographique que les concentrations les plus importantes en NO₂, CO et toluène sont associées à l'habitacle de la voiture. Concernant le benzène, ce sont le train et la marche à pied dans la rue qui présentent les concentrations les plus élevées. Cependant, ce classement est à utiliser avec précaution car une seule valeur était disponible pour le train.

Concernant les concentrations particulières, cette synthèse révèle que les concentrations en PM₁₀ les plus importantes sont associées au quai et à la rame du métro et au train (3 valeurs disponibles). Les concentrations en PM_{2.5} les plus importantes sont associées au quai et rame du métro.

Une synthèse, par mode de transports, des classements obtenus pour chaque polluant à partir des concentrations moyennes relevées en Europe dans la littérature est proposée (Figure 32).

Ces tendances ne sont néanmoins qu'indicatives. Elles sont à prendre avec précaution. En effet, des distorsions peuvent être introduites par des modes de transports et des polluants qui sont plus ou moins bien étudiés (en nombre et qualité des études disponibles), facteurs entraînant une hétérogénéité des populations de données.

Dans les 63 publications analysées, cinq études ont cherché à comparer les niveaux d'exposition par inhalation aux particules mesurés dans plusieurs modes transports utilisés pour relier le même point de départ et d'arrivée ([H.S. Adams, 2001], [L.Y. Chan, 2002], [J.E. Gomez, 2007], [J. Gulliver, 2003] et [ORAMIP, 2008]).

Trois études ([H.S. Adams, 2001], [L.Y. Chan, 2002] et [J.E. Gomez, 2007]) ont réalisé ces comparaisons à partir de mesures intégrées et cumulées sur différents parcours (concentrations moyennes sans suivi temporel).

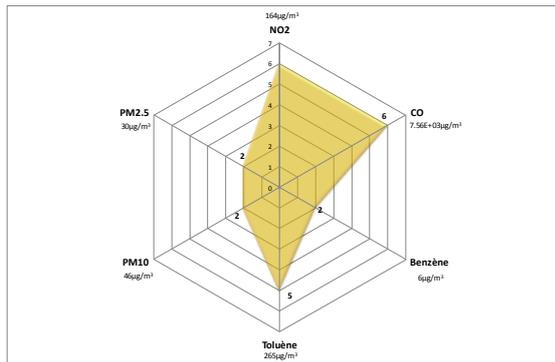
Les références [ORAMIP, 2008] et [J. Gulliver, 2003] ont réalisé ces mesures de concentrations en particules en simultané et en continu sur des parcours reliant le même point de départ et d'arrivée. A chaque parcours était associé un unique mode de transport.

Ainsi, aucune de ces publications ne fait référence à la comparaison des niveaux d'exposition par inhalation aux particules pouvant être mesurés en simultané et en continu lors d'une combinaison de différentes modes de transport permettant de relier le même point de départ et d'arrivée.

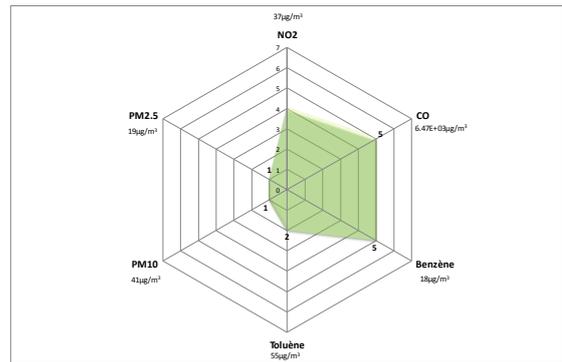
La notion de budget espace-temps d'exposition par inhalation aux particules pour différents modes de transport a été étudiée dans une seule étude [Raj Kumar Prasad, 2003]. Dans cette étude, les budgets espace-temps ont été reconstruits à partir de la combinaison de données sociologiques décrivant les durées d'occupations moyennes des populations dans différents microenvironnements et des résultats spécifiques de mesures effectuées dans le cadre de cette étude.

Dans ce contexte, Inter'Modal a permis d'initier une nouvelle approche globale intégrant une combinaison de différents modes de transport³ sur des parcours reliant le même point de départ et d'arrivée. L'exploitation des résultats a permis de hiérarchiser les expositions par inhalation sur chaque parcours en faisant intervenir pour chaque mode de transport des temps d'exposition par inhalation, des niveaux de concentrations et des taux d'inhalation spécifiques à chaque mode de déplacement et microenvironnements traversés.

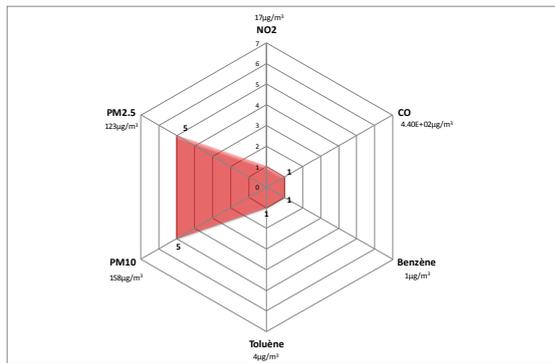
³ Habitacles d'automobiles, scooter, métro, RER, bus, marche à pied à l'extérieur et dans les couloirs souterrains du métro, vélo sur et hors piste cyclable



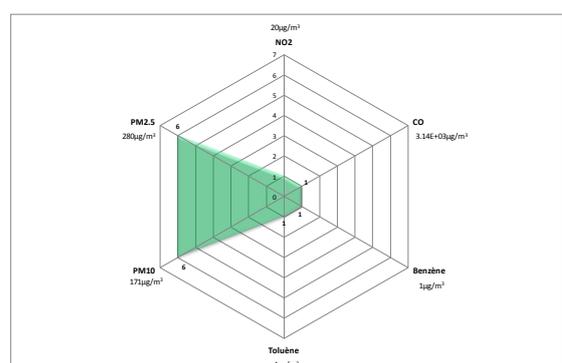
Voiture



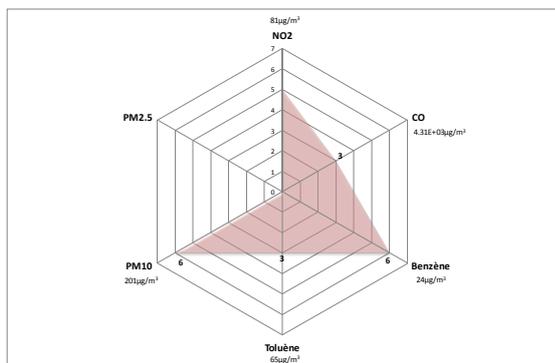
Marche à pied



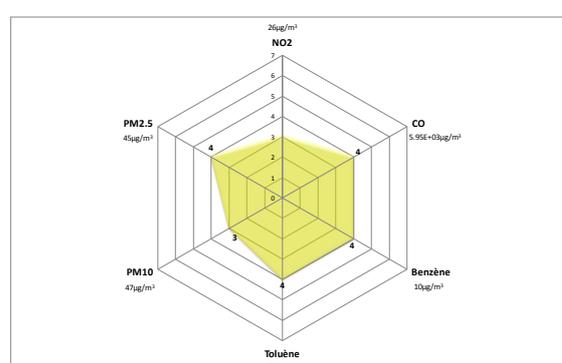
Rame de métro



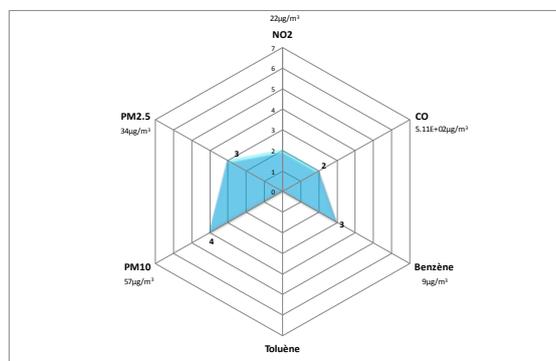
Sur le quai du métro



Train



Bus



Vélo

Figure 32 : Les concentrations moyennes relevées dans la littérature en Europe ont été classées par ordre croissant (le rang 1 étant le plus faible et le rang 7 le plus fort) en fonction des différents modes de transports

Cette étude a nécessité l'utilisation d'indicateurs optiques. Des mesures comparatives avec une méthode de référence ont été réalisées pendant deux journées dans deux environnements distincts (quai du RER et trafic) afin de déterminer des facteurs de corrections propres à ces deux environnements. Les deux coefficients de corrections déterminés sont cohérents avec ceux reportés dans la littérature.

Les résultats obtenus ne prétendent pas caractériser de manière exhaustive l'ensemble des expositions par inhalation. Elle n'est pas représentative de tous les modes de transports et déplacements. Néanmoins, les parcours ont été choisis afin d'illustrer la méthode instrumentale proposée au travers de parcours en Ile de France :

- permettant de tester différents modes de transport,
- pour lesquels les flux de déplacement des populations sont importants,
- cohérents avec les durées et les distances relevées dans les enquêtes de déplacement.

Les résultats en concentration massique en PM10 et en PM2.5 de cette étude ont été comparés avec les valeurs reportées dans la littérature. La grande majorité des essais auxquels ces études font référence ont été réalisés avec des techniques optiques d'estimation des niveaux de concentration massique des particules en temps réel. Cette communauté de pratique permet une comparaison de premier niveau avec les résultats de mesures obtenus dans le cadre de cette étude.

Les concentrations moyennes les plus élevées en particules PM10 et PM2.5 mesurées lors de la campagne Inter'Modal sont associées aux modes de transport « Métro » et « Marche à pied dans les couloirs souterrains ».

Compte tenu des méthodes de mesures utilisées, les résultats quantitatifs de cette étude sont à interpréter avec les précautions d'usage. La hiérarchisation des expositions par inhalation obtenue entre deux trajets est plus robuste. L'exploitation des données a permis grâce notamment à un traitement géostatistique des informations : d'identifier les zones de fortes expositions par inhalation au PM10 et PM2.5 d'un parcours, représenter ces concentrations au regard des budgets espace-temps associés à chaque microenvironnement traversé et proposer une hiérarchisation qualitative des quantités inhalées reçues pour chacun d'eux.

A titre exploratoire et à des fins de comparaison qualitative, des calculs de quantités inhalées d'exposition par inhalation, ont été réalisés, pour hiérarchiser les expositions par inhalation sur chaque parcours en faisant intervenir pour chaque mode de transport le temps d'exposition par inhalation et différents taux d'inhalation.

Pour un même trajet, la prise en compte de la quantité de particules inhalées peut modifier la hiérarchisation des modes de transport dans leur contribution à l'exposition par inhalation des populations.

Par exemple, cette étude montre que les concentrations moyennes en particules PM10 et PM2.5 dans la rame du RER peuvent être plus faibles que celles mesurées dans les couloirs et quais du RER. Dans le métro, les concentrations moyennes en particules dans la rame et dans les couloirs et sur les quais sont, quant à elles, du même ordre de grandeur.

Le calcul des quantités inhalées de particules, du fait de l'influence du temps d'occupation, inverse les tendances pour le RER (exposition par inhalation plus forte dans les rames que dans couloirs et sur les quais) et consolide l'analyse du métro.

Autre exemple, les concentrations moyennes en particules PM10 et PM2.5 mesurées en vélo sont beaucoup plus faibles que celles mesurées en métro. Or, cette différence s'atténue lors du calcul de la quantité de particules inhalées du fait de l'utilisation d'un taux d'inhalation ~3 fois plus important pour le vélo. Cependant, cette comparaison pour être complète devrait prendre en compte la composition différente des particules dans ces deux microenvironnements qui pourrait engendrer des risques différents.

Ces deux exemples montrent que les concentrations moyennes et les quantités inhalées sont donc deux paramètres importants et complémentaires. Leur prise en compte permet de mieux appréhender l'exposition par inhalation aux particules.

Sur la base des enseignements de cette première étude l'outil que nous proposons de développer va permettre de réaliser en routine et rapidement une exploitation de nombreuses données quantitatives et qualitatives. Un traitement géostatistique et statistiques des informations permettra d'identifier les zones de fortes expositions par inhalation d'un parcours, de représenter les concentrations au regard des budgets espace-temps associés à chaque microenvironnement traversé et proposer une hiérarchisation qualitative des quantités inhalées reçues pour chacun d'eux.

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Päivi Aarnio, Tarja Yli-Tuomi, Anu Kousa, Timo Mäkelä, Anne Hirsikko, Kaarle Hämeri, Mika Räisänen, Risto Hillamo, Tarja Koskentalo, Matti Jantunen, 2005, "The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM2.5) in the Helsinki subway system", *Atmospheric Environment* 39 (2005) 5059-5066

L. Abi Esber, M. El-Fadel, I. Nuwayhid, N. Saliba, 2007, "The effect of different ventilation modes on in-vehicle carbon monoxide exposure", *Atmospheric Environment* 41 (2007) 3644-3657

H.S. Adams, M.J. Nieuwenhuijsen, R.N. Colvile, M.A.S. McMullen, P. Khandelwal, 2001, "Fine particle (PM2.5) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK", *The Science of the Total Environment* 279 (2001) 29-44

S. D. Adar, Mark Davey, James R. Sullivan, Michael Compher, Adam Szpiro, L.-J. Sally Liu, 2008, "Predicting airborne particle levels aboard Washington State school buses", *Atmospheric Environment* 42 (2008) 7590-7599

Air Breizh, 2005, "Etude de la qualité de l'air dans le métro rennais"

Air Normand, 2008, "Caractérisation des Exposition par inhalations Professionnelles et des Usagers des Transports Routiers : Mesures Dynamiques en Habitable de Véhicule Inséré dans le Trafic"

Airparif (Février 2009), 2009, "Influence des aménagements de voirie sur l'exposition par inhalation des cyclistes à la pollution atmosphérique"

Airparif (Octobre 2009), 2009, "Exposition par inhalation des automobilistes franciliens à la pollution atmosphérique liée au trafic routier : trajet « domicile-travail »"

Airparif (Octobre 2007), 2007, "Mesures et caractérisation de l'air à l'intérieur de l'habitacle de voitures"

Air-APS, Ampasel, ATMO Drôme-Ardèche, Ascoparg, Coparly, 2007, "Suivi de l'exposition par inhalation individuelle". Convention Région Rhône-Alpes

Autoplus/Airparif, 2007, "Qualité de l'air au volant : premiers tests sur les possibilités de limiter son exposition par inhalation", *Autoplus, Airparif* 12/10/2007

S. A. Batterman, Chung-Yu Peng, James Braun, 2002, "Levels and composition of volatile organic compounds on commuting routes in Detroit, Michigan", *Atmospheric Environment* 36 (2002) 6015-6030

P, Berghmans, N. Bleux, L. Int Panis, V.K. Mishra, R. Torfs, M. Van Poppel, 2008, "Exposure assessment of a cyclist to PM10 and ultrafine particles", *Science of the total environment* 407 (2009) 1286-1298

Martin Branis, 2002, "Exposure of drivers and conductors to noise, heat, dust and volatile organic compounds in the state transport special buses of Kolkata city", *Transportation Research Part D* 8 (2003) 11-19

Martin Branis, 2005, "The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system", *Atmospheric Environment* 40 (2006) 348-356

L.Y Chan, W.L. Lau, S.C. Lee, C.Y. Chan, 2002, "Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong", *Atmospheric Environment* 36 (2002) 3363-3373

C.K. Chau, E.Y. Tu, D.W.T. Chan, J. Burnett, 2002, "Estimating the total exposure to air pollutants for different population age groups in Hong Kong", *Environment International* 27 (2002) 617-630

Xiaoying Cheng, Zhongchao Tan, Xinlei Wang, Richard Tay, 2006, "Air quality in a commercial truck cabin", *Transportation Research Part D* 11 (2006) 389-395

Yu-Hsiang Cheng, Yi-Lun Lin, Chia-Chen Liu, 2008, "Levels of PM10 and PM2,5 in Taipei Rapid Transit System", *Atmospheric Environment* 42 (2008) 7242-7249

Mickael Chertok, Alexander Voukelatos, Vicky Sheppard and Chris Rissel, 2004, "Comparison of air pollution exposure for five commuting modes in Sydney - car, train, bus, bicycle and walking", Health Promotion Journal of Australia 2004 : 15(1)

Yeh-Chung Chien, 2007, "Variations in amounts and potential sources of volatile organic chemicals in new cars", Science of the Total Environment (2007)

COPARLY, 2003, "Etude préliminaire de la qualité de l'air dans le métro lyonnais"

Greta Scotto di Marco, Stylianos Kephelopoulos, Juhani Ruuskanen, Matti Jantunen, 2005, "Personal carbon monoxide exposure in Helsinki, Finland", Atmospheric Environment 39 (2005) 2697-2707

A. Duci, A. Chaloulakou, N.Spyrellis, 2003, "Exposure to carbon monoxide in the Athens urban area during commuting", The Science of the Total Environment 309 (2003) 47-58

Anne François Dubosc, Véronique Delmas, 2005, "Mesures de qualité de l'air à l'intérieur de la gare SNCF de Rouen Quai central", Air Normand - Rapport d'étude n° E04_16

Enquête Globale de Transport (EGT), 2002, "Les déplacements des Franciliens en 2001 – 2002"

M. Cristina Fondelli, Elisabetta Chellini, Tarja Yli-Tuomi, Isabella Cenni, Antonio Gasparrini, Silvia Nava, Isabel Garcia-Orellana, Andrea Lupi, Daniele Grechi, Sandra Mallone, Matti Jantunen, 2008, "Fine particle concentrations in buses and taxis in Florence, Italy", Atmospheric Environment 42 (2008) 8185-8193

L.B. Georgoulis, O. Hänninen, E. Samoli, K. Katsouyanni, N. Künzli, L. Polanska, Y. Bruinen de Bruin, S. Alm, M. Jantunen, 2002, "Personal carbon monoxide exposure in five European cities and its determinants", Atmospheric Environment 36 (2002) 963-974

J.E. Gomez-Perales, R.N. Colville, M.J. Nieuwenhuijsen, A. Fernandez-Bremauntz, V.J. Gutiérrez-Avedoy, V.H. Paramo-Figueroa, S. Blanco-Jiménez, E. Bueno-Lopez, F. Mandujano, R. Bernabé-Cabanillas, E. Ortiz-Segovia, 2003, "Commuters' exposure to PM_{2.5}, CO, and benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico City", Atmospheric Environment 38 (2004) 1219-1229

J.E. Gomez-Perales, R.N. Colville, AA. Fernadez-Bremauntz, V.Gutiérrez-Avedoy, V.H. Paramo-Figueroa, S. Blanco-Jiménez, E. Bueno-Lopez, R. Bernabé-Cabanillas, F. Mandujano, M. Hidalgo-Navarro, M.J. Nieuwenhuijsen, 2007, "Bus, minibús, metro inter-comparison of commuters' exposure to air pollution in Mexico City", Atmospheric Environment 41 (2007) 890-901

F. Gouriou, J.-P. Morin, M.-E. Weill, 2004, "On-road measurements of particle number concentrations and size distributions in urban and tunnel environments", Atmospheric Environment 38 (2004) 2831-2840

J. Gulliver, D.J. Briggs, 2003, "Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments", Atmospheric Environment 38 (2004) 1-8

L. B. Hill, Ph.D. Senior Scientist, James Gooch, 2007, "A Multi-City Investigation of Exposure to Diesel Exhaust in Multiple Commuting Modes", CATF Special Report 2007-1

J F Hurley, J W Cherrie, K Donaldson, A Seaton and C L Tran, 2003, "Assessment of health effects of long-term occupational exposure to tunnel dust in the London Underground", Research Report TM/03/02

INSEE Ile-de-France, 2005, "Zone d'emploi de Saint-Denis"

INSEE Ile-de-France, 2005, "Zone d'emploi d'Orly"

INSEE Ile-de-France, 2005, "Zone d'emploi de Nanterre"

INSEE Ile-de-France, 2005, "Zone d'emploi de Versailles"

INSEE Ile-de-France, 2005, "Zone d'emploi de Paris"

INSEE Ile-de-France, 2005, "Zone d'emploi de Montreuil"

INSEE Ile-de-France, 2005, "Zone d'emploi de Créteil"

Jo, W. K. and S. J. Choi (1996). "Vehicle occupants' exposure to aromatic volatile organic compounds while commuting on an urban-suburban route in Korea." *Journal of the Air & Waste Management Association* 46(8): 749-754.

Wan-Kuen Jo and Jin-Woo Lee, 2002, "In-vehicle Exposure to Aldehydes While Commuting on Real Commuter Routes in a Korean Urban Area", *Environmental Research Section A* 88, 44-51 (2002)

Christer Johansson, Per-Ake Johansson, 2002, "Particulate matter in the underground of Stockholm", *Atmospheric Environment* 37 (2003) 3-9

S. Kaur, R.D.R. Clark, P.T. Walsh, S.J. Arnold, R.N. Colvile, M.J. Nieuwenhuijsen, 2005, "Exposure visualisation of ultrafine particle counts in a transport microenvironment", *Atmospheric Environment* 40 (2006) 386-398

S. Kaur, M. Nieuwenhuijsen, R. Colvile, 2005, "Personal exposure of street canyon intersection users to PM2,5, ultrafine particle counts and carbon monoxide in Central London, UK", *Atmospheric Environment* 39 (2005) 3629-3641

Y. M. Kim, Stuart Harrad, and Roy M. Harrison, 2001, "Concentrations and Sources of VOCs in Urban Domestic and Public Microenvironments", *Environ, Sci, Technol*, 2001

Wai-Lun Lau, Lo-Yin Chan, 2002, "Commuter exposure to aromatic VOCs in public transportation modes in Hong Kong", *The Science of the Total Environment* 308 (2003) 143-155

O. Lebihan, 2005, "Caractérisation de l'exposition par inhalation en habitacle automobile ", INERIS, DRC05 - N°66354 - AIRE N°467

Jin-Woo Lee, Wan-Kuen Jo, 2002, "Actual commuter exposure to methyl-tertiary butyl ether, benzene and toluene while traveling in Korean urban areas", *The Science of the Total Environment* 291 (2002) 219-228

Shun-Cheng Lee, Hai Guo, Wai-Ming Li, Lo-Yin Chan, 2002, "Inter-comparison of air pollutant concentrations in different indoor environments in Hong Kong", *Atmospheric Environment* 36 (2002) 1929-1940

M. Leutwyler, K. Siegmann, Ch. Monn, 2002, "Suspended particulate matter in railway coaches", *Atmospheric Environment* 36 (2002) 1-7

Marie Lewné, Gun Nise, Marie-Louise Lind Per Gustavsson, 2006, "Exposure to particles and nitrogen dioxide among taxi, bus and lorry drivers", *Int Arch Occup Environ Health* (2006) 79 : 220-226

Tian-Tian Li, Yu-Hua Bai, Zhao-Rong Liu, Jin-Feng Liu, Guang-Shan Zhang, Jin-Long Li, 2006, "Air quality in passenger cars of the ground railway transit system in Beijing, China", *Science of the Total Environment* (2006)

Mairie de Paris, 2009, <http://www.paris.fr/portail/deplacements>

Paola Manini, Giuseppe De Palma, Roberta Andreoli, Diana Poli, Paola Mozzoni, Giuseppina Folesani, Antonio Mutti, Pietro Apostoli, 2006, "Environmental and biological monitoring of benzene exposure in a cohort of Italian taxi drivers", *Toxicology Letters* 167 (2006) 142-151

C. Marchand, B. Bulliot, S. Le Calvé, Ph. Mirabel, 2005, "Aldehyde measurements in indoor environments in Strasbourg (France)", *Atmospheric Environment* 40 (2006) 1336-1345

Jean Paul Morin, Frédéric Dionnet, Véronique Delmas, Frantz Gouriou, David Preterre, Tiphonie Brunel, Michel Bobbia, Jérôme Cortinovic, Sébastien Lemeur, Benjamin Petruszewski, 2008, "Caractérisation des Exposition par inhalations Professionnelles et des usagers des transports routiers : Mesures dynamiques en habitacles de véhicules inséré dans le trafic », *Convention EST-2006-1-37*

K.W. Mui, K.W. Shek, 2004, "Influence of in-tunnel environment to in-bus air quality and thermal condition in Hong Kong", *Science of the total Environment* 347 (2005) 163-174

Observatoire des déplacements à Paris, 2006, "Le bilan, des déplacements en 2006 à Paris"

Observatoire des déplacements à Paris, 2007, "Le bilan, des déplacements en 2007 à Paris"

R.T. O'Donoghue, L.W. Gill, R.J. McKeivitt, B. Broderick, 2006, "Exposure to hydrocarbon concentrations while commuting or exercising in Dublin", *Environment International* 33 (2007) 1-8

ORAMIP, 2005, "Qualité de l'air dans le métro de toulouse"

ORAMIP, 2008, Lettre bimestrielle d'information sur la qualité de l'air en Midi-Pyrénées, N°92 - Septembre/Octobre 2008

Ricardo Ortiz, Hiroyuki Hagino, Kazuhiko Sekiguchi, Qingyue Wang, Kazuhiko Sakamoto, 2006, "Ambient air measurements of six bifunctional carbonyls in a suburban area", *Atmospheric Research* 82 (2006) 709-718

Mariai Teresa Piccardo, Anna Stella, Anna Redaelli, Daniele Balducci, Rosella Coradeghini, Claudio Minoia, Federico Valerio, 2004, "Personal daily exposures to benzo(a)pyrene of taxi drivers in Genoa, Italy", *Science of the Total Environment* 330 (2004) 39-45

Raj Kumar Prasad, V. Ravi Shankar, and Sumeet Saksena, 2003, "Daily Exposure to Air Pollution in Indoor, Outdoor, and In-vehicle Micro-environments: A pilot Study in Delhi", *Environmental Change, Vulnerability, and Governance Series N°57*, March 2003

Michael Riediker, Ronald Williams, Robert Devlin, Thomas Griggs, and Philip Bromberg, 2003, *Environmental Scien and Technology* 37 (2003) 2084-2093

Lisa D. Sabin, Eduardo Behrentz, Arthur M. Winer, Seong Jeong, Dennis R. Fitz, Davis V. Pankratz, Steven D. Colome and Scott A. Fruin, 2004, "Characterizing the range of children's air pollutant exposure during school bus commuted", *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* (2005) 15, 377-387

Naohide Shiohara, Adrian A. Fernandez-Bremauntz, Salvador Blanco Jiménez, Yukio Yanagisawa, 2005, "The commuters' exposure to volatile chemicals and carcinogenic risk in Mexico City", *Atmospheric Environment* 39 (2005) 3481-3489

D. Som, C. Dutta, A. Chatterjee, D. Mallick, T.K. Jana, S. Sen, 2006, "Studies on commuters' exposure to BTEX in passenger cars in Kolkata, India", *Science of the total Environment* (2006)

Busoon Son, Wonho Yang, Patrick Breyse, Taewoong Chung, and Youngshin Lee, 2003, "Estimation of occupational and nonoccupational nitrogen dioxide exposure for Korean taxi drivers using a microenvironmental model", *Environmental Research* 94 (2004) 291-296

STIF, 2009, "Schéma directeur du RER C », Rapport n° 2009/0568 au Conseil du Syndicat des transports d'Ile de France, Séance du 8 juillet 2009

US-EPA (1997), 1997, "Exposure Factors Handbook", chapitre 5

Henry Wöhrnschimmel, Miriam Zuk, Gerardo Martinez-Villa, Julia Ceron, Beatriz Cardenas, Leonora Rojas-Bracho, Adrian Fernandez-Bremauntz, 2008, "The impact of a Bus Rapid Transit system on commuters' exposure to Benzene, CO, PM2,5 and PM10 in Mexico City", *Atmospheric Environment* 42 (2008) 8194-8203

Weisel C.P., L. N. J., Lioy P.J. (1992). "Exposure to emissions from gasoline within automobiles cabins." *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 2(1): 79-95.

Toshiaki Yoshida, Ichiro Matsunaga, 2005, "A case study on identification of airborne organic compounds and time courses of their concentrations in the cabin of a new car for private use", *Environment International* 32 (2006) 58 -79

E. Zagury, Y. Le Moullec, I. Momas, 2000, "Exposure of Paris taxi drivers to automobile air pollutants within their vehicles", *Occup Environ Med* 2000 ; 57:406-410

9. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe I	VALIDATION DES DONNEES	6
Annexe II	RESULTATS SANS CORRECTION DES MILIEUX SOUTERRAINS	8
Annexe III	TAUX D'INHALATION	1
Annexe IV	RESULTATS SANS CORRECTION DES MILIEUX SOUTERRAINS	8

ANNEXE I

VALIDATION DES DONNEES

Comparaison entre les deux Grimm 1.108 :

La réponse des deux Grimm soumis au même aérosol a été évaluée dans l'air extérieur et en milieu confiné. Les figures suivantes concernent le suivi temporel et la comparaison des concentrations PM10 et PM2.5 mesurées par les deux Grimm dans l'air ambiant extérieur et dans l'air intérieur d'un couloir souterrain de transfert métro/RER.

Mises à part quelques valeurs extrêmes, les résultats de concentration PM10 et PM2.5 obtenus par les deux Grimm sont dans l'ensemble cohérents dans les deux environnements testés.

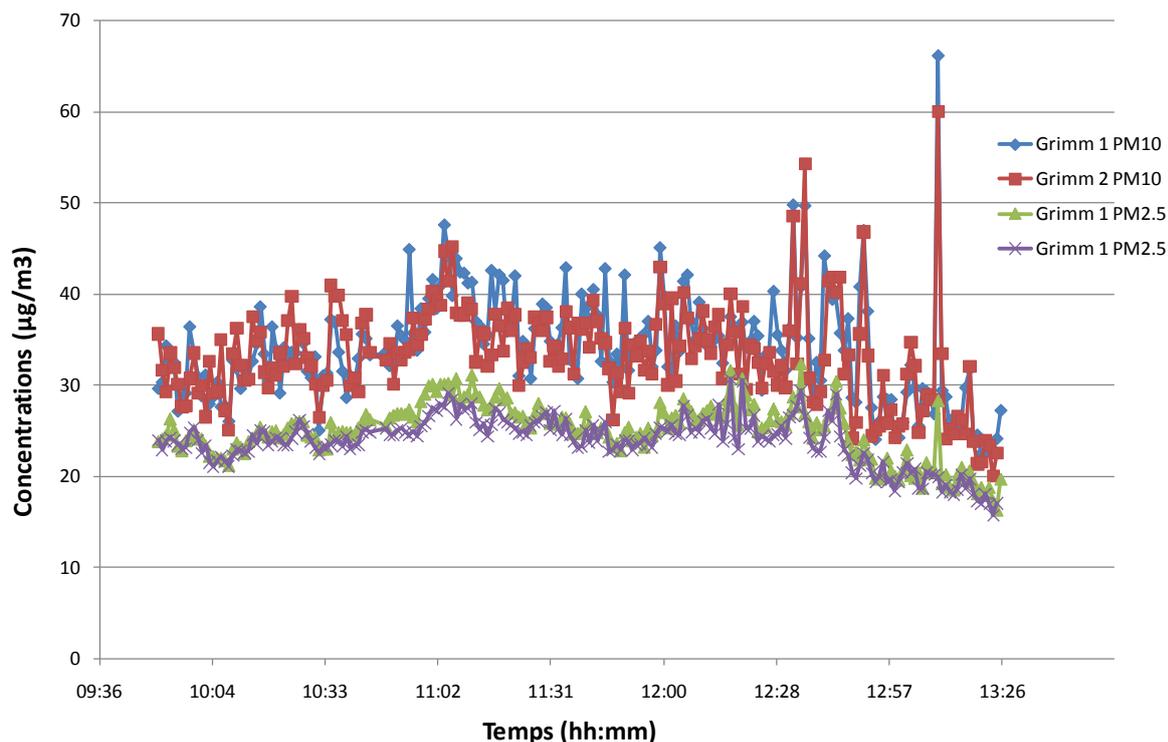


Figure A1 : Suivi temporel des concentrations en PM10 et PM2.5 mesurées par les deux Grimm placés en parallèle dans l'air ambiant extérieur

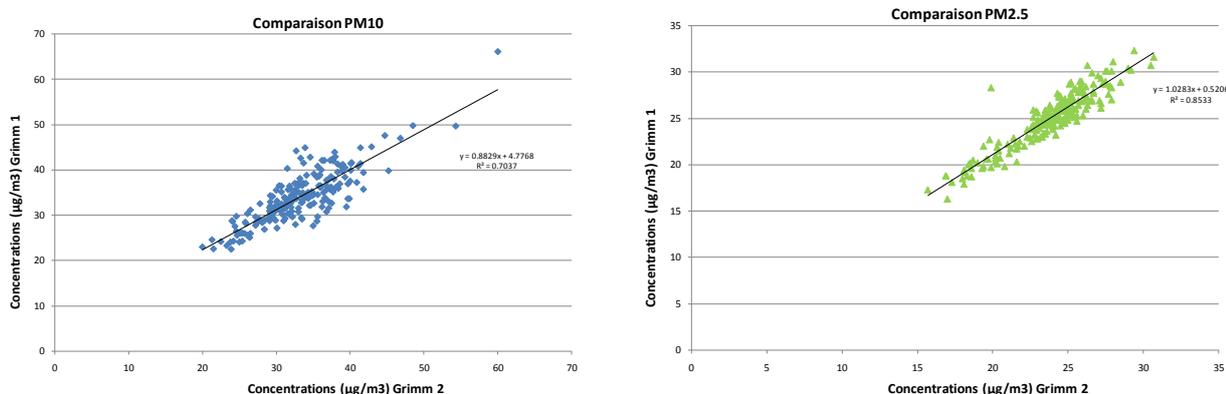


Figure A2 : Comparaison des concentrations PM10 et PM2.5 mesurées par les deux Grimm placés en parallèle dans l'air ambiant extérieur

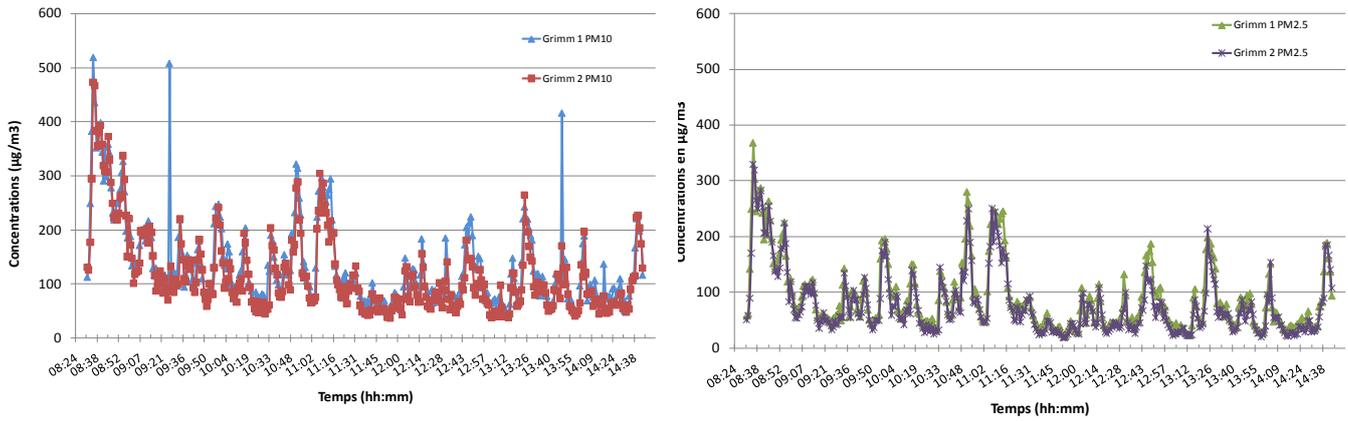


Figure A3 : Suivi temporel des concentrations en PM10 et PM2.5 mesurées par les deux Grimm placés en parallèle dans l'air intérieur sur le quai de la station Auber (RER A)

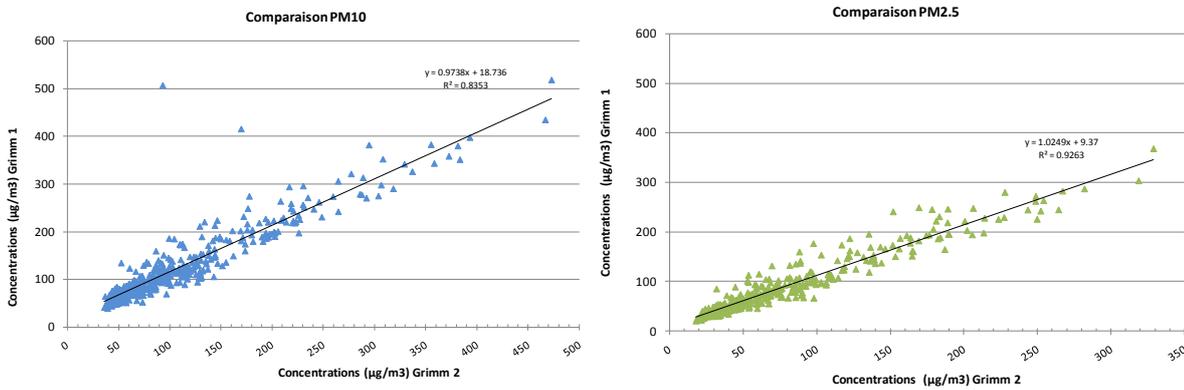


Figure A4 : Comparaison des concentrations en PM10 et PM2.5 mesurées par les deux Grimm placés en parallèle dans l'air intérieur sur le quai de la station Auber (RER A)

Comparaison entre les Grimm et une mesure TEOM-FDMS dans l'air ambiant :

Les deux Grimm ont été placés en parallèle d'un TEOM Air Normand d'une station de proximité trafic pendant une durée de 3h30. Les données TEOM ont par la suite été corrigées de la fraction volatile mesurée par un TEOM/FDMS de référence Air Normand.

Une sous-estimation d'environ 20% a été observée entre les deux systèmes. Compte tenu de ces observations, il ne semble pas nécessaire d'apporter une correction aux concentrations mesurées par les Grimm dans l'air ambiant extérieur.

Comparaison entre les Grimm et une mesure TEOM dans l'air intérieur d'un couloir de transfert métro/RER :

Les deux Grimm ont été placés en parallèle d'un TEOM dans l'air intérieur sur le quai de la station Auber en milieu souterrain pendant une durée de 5h. Les figures suivantes présentent une comparaison des concentrations horaires moyennes obtenues par les deux Grimm d'une part et par le TEOM d'autre part.

Les Grimm sous-estiment de manière systématique les concentrations mesurées. Cette observation témoigne de l'impact sur les résultats de la densité de l'aérosol rencontré dans l'air intérieur sur le quai de la station Auber lors des essais puisque, dans l'air extérieur ambiant, les résultats obtenus par les deux systèmes sont du même ordre de grandeur.

Il existe, comme l'indique la Figure A5 une relation linéaire entre les concentrations horaires obtenues par le TEOM et les deux Grimm. Cette observation permet d'évaluer quantitativement l'écart entre les deux systèmes de mesure et de corriger les données de concentrations mesurées par les Grimm dans l'air intérieur souterrain.

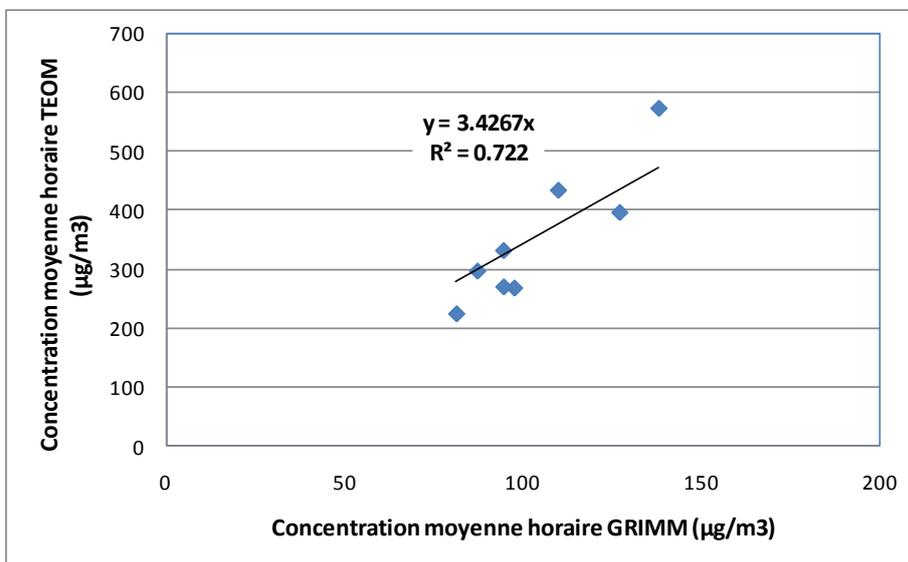


Figure A5 : Comparaison des concentrations PM10 mesurées par les Grimm et un TEOM RATP placés en parallèle dans l'air intérieur sur le quai de la station Auber (RER A)

Facteurs de correction :

Le tableau suivant présente la démarche suivie par cette étude et celles de la bibliographie ayant comparé leurs données avec des techniques gravimétriques.

Etudes	Fractions particulaires impactées	Appareils utilisés pour la calibration		Facteur de correction calculé	Lieu des mesures	Calibration
		y	x			
INERIS, Déplacements urbains	PM10 PM2.5	Grimm	TEOM FDMS	$Y = 0.3x$ (ou $x = 3.42y$)	Souterrains	Calibration effectuée dans les souterrains
				20% (sur la moyenne des concentrations)	Air ambiant	Pas de calibration
INERIS, comparaison des réponses des indicateurs optiques avec celle du TEOM-FDMS	PM10 PM2.5	Grimm	TEOM FDMS	$Y = 1.18x - 10.83$	En chambre d'exposition	
[Gulliver, 2003]	PM10 PM2.5 PM1	Osiris	TEOM	$Y = 0.97x$	Près de la route empruntée	Calibration non réalisée
[Chan, 2002]	PM10	DustTrak	Gravimétrie (High-Volume PM10)	$Y = 1.95x + 5.18$	Trottoir (1.5m de la route)	Calibration effectuée
	PM2.5	DustTrak	Gravimétrie (Partisol PM2.5)	$Y = 2.34x + 2.94$		
[Branis, 2005]	PM10	DustTrak	Jauge β	En hiver : $y = 1.87x + 1.04$	Extérieur	Calibration effectuée
	PM10			En été : $y = 3.46x - 3.99$		

Les facteurs de correction utilisés :

Lors de la comparaison des concentrations PM10 mesurées par les GRIMM et un TEOM RATP placés en parallèle dans l'air intérieur d'un couloir souterrain de transfert métro/RER, nous avons obtenu une équation $y=3.42x+0$ qui permet d'évaluer quantitativement l'écart entre ces deux systèmes de mesures. Ce facteur a donc été appliqué sur les concentrations obtenues pour les modes de transport utilisant les souterrains comme la rame du métro, la rame du RER et les couloirs souterrains pour les transferts.

A noter que certaines rames ont des portions de lignes en extérieur et en souterrain selon les trajets.

Parcours passant par les souterrains	Modes de transport impactés	Temps passé dans les souterrains	Facteur de correction utilisé
A1	RER B	50%	x (3.42 x 0.50)
A2	Métro rame	100%	x 3.42
	Métro transfert	100%	x 3.42
	RER B	50%	x (3.42 x 0.50)
C2	Métro rame	100%	x 3.42
	Métro transfert	100%	x 3.42
E1	RER C	0%	x 1
	RER C transfert	100%	x 3.42
F2	RER A	32%	x (3.42 x 0.32)
	RER B	32%	x (3.42 x 0.32)
	RER A/B transfert	100%	x 3.42
H1	A pied dans les couloirs souterrains	100%	x 3.42
	Métro rame	100%	x 3.42
I1	A pied dans les couloirs souterrains	100%	x 3.42
	Métro rame	100%	x 3.42

ANNEXE II

TAUX D'INHALATION

Taux d'inhalation utilisés :

Le taux d'inhalation correspond au volume d'air inspiré par unité de temps. Il est propre à chaque activités physiques [« Exposure Factors Handbook », 1997]. Par exemple le taux d'inhalation en vélo est équivalent à 3 fois le taux d'inhalation en transport en commun

Transports utilisés	Taux d'inhalation [« Exposure Factors Handbook », 1997] pour un homme de 70kg
A pied à l'extérieur	13 L/min
A pied dans les souterrains	13 L/min
Métro	9.83 L/min
RER	9.83 L/min
Vélo sur piste cyclable	30 L/min
Vélo hors piste cyclable	30 L/min
Voiture	10.79 L/min
Bus	9.83 L/min
Scoter	10.79 L/min

ANNEXE III

**RESULTATS SANS CORRECTION DES MILIEUX
SOUTERRAINS**

Bilan par parcours

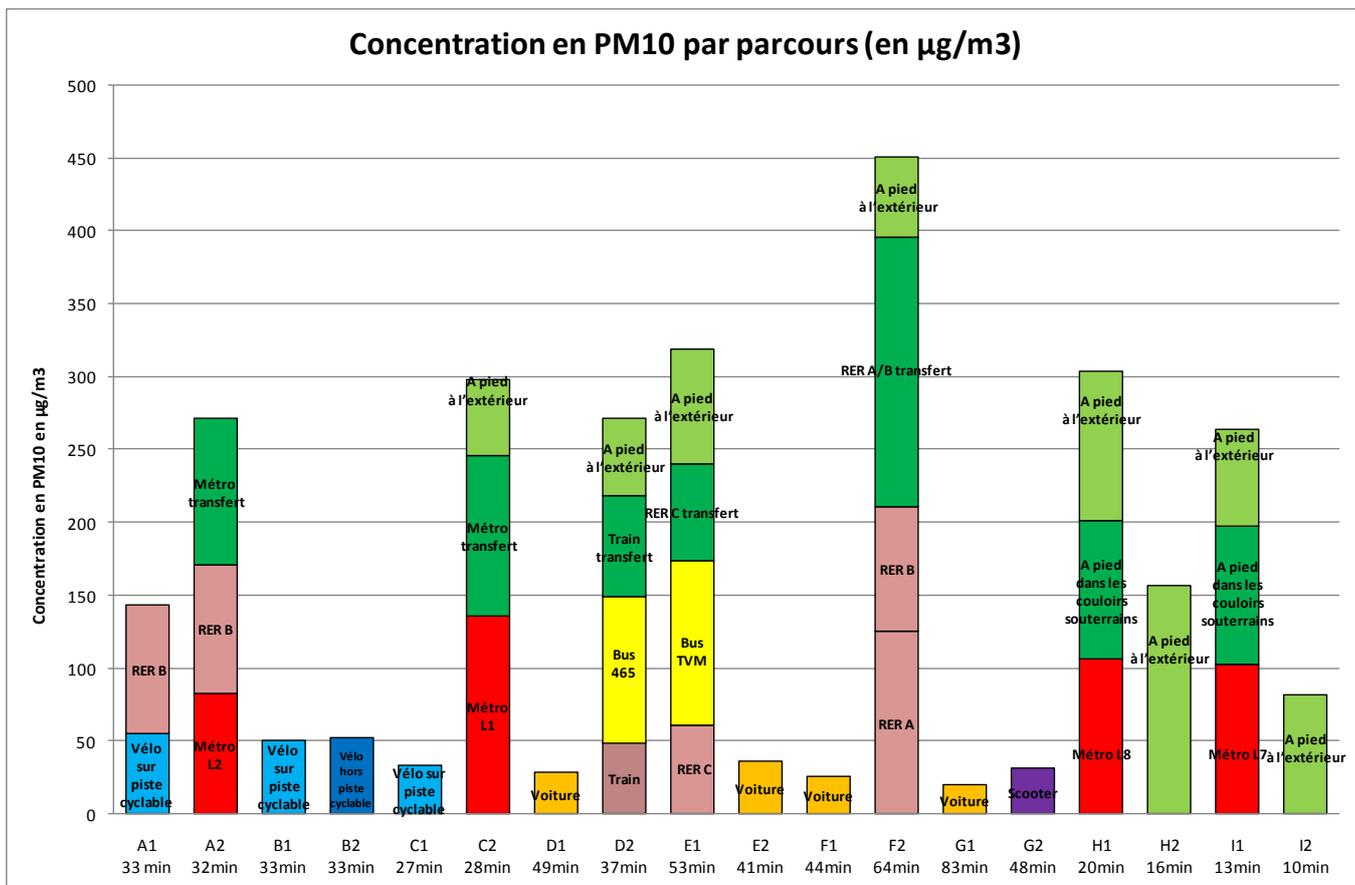


Figure B1 : Concentrations massiques non corrigées en particules PM10 par parcours

Le trajet présentant une concentration massique cumulée en particules PM10 maximale est le trajet F2 (Aulnay-sous-Bois → Noisiel en RER).

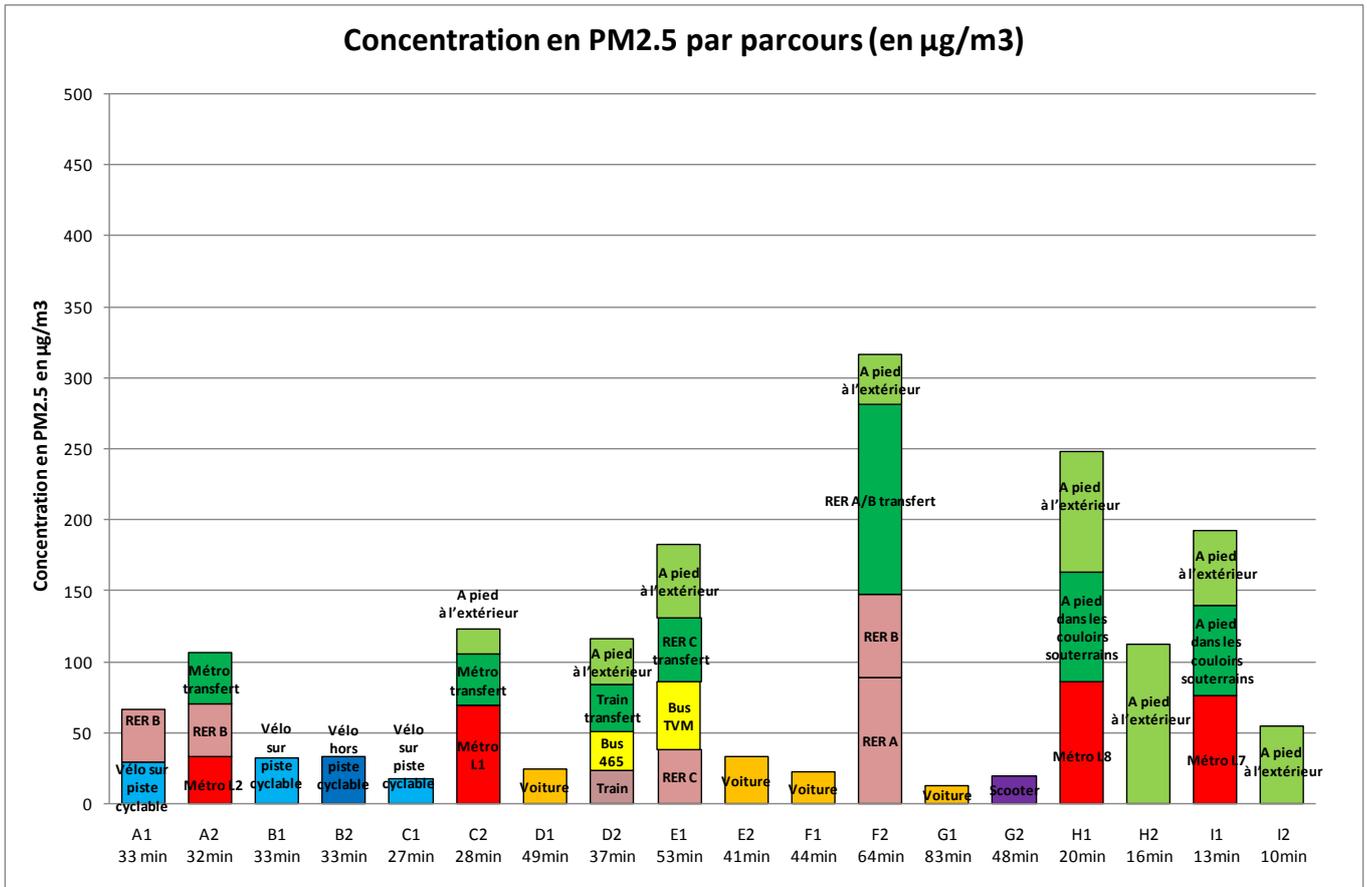


Figure B2 : Concentrations massiques non corrigées en particules PM2.5 par parcours

Le trajet présentant une concentration massique cumulée en particules PM2.5 maximale est le trajet F2 (Aulnay-sous-Bois → Noisiel en RER).

Comparaison relative des quantités inhalées de particules sur les différents parcours

A titre exploratoire, une estimation des quantités de particules inhalées a été réalisée à des fins de comparaison qualitative pour hiérarchiser les expositions par inhalation sur chaque parcours. Elle a été réalisée en faisant intervenir pour chaque mode de transport le temps d'exposition par inhalation et différents taux d'inhalation pour les différents modes de transports.

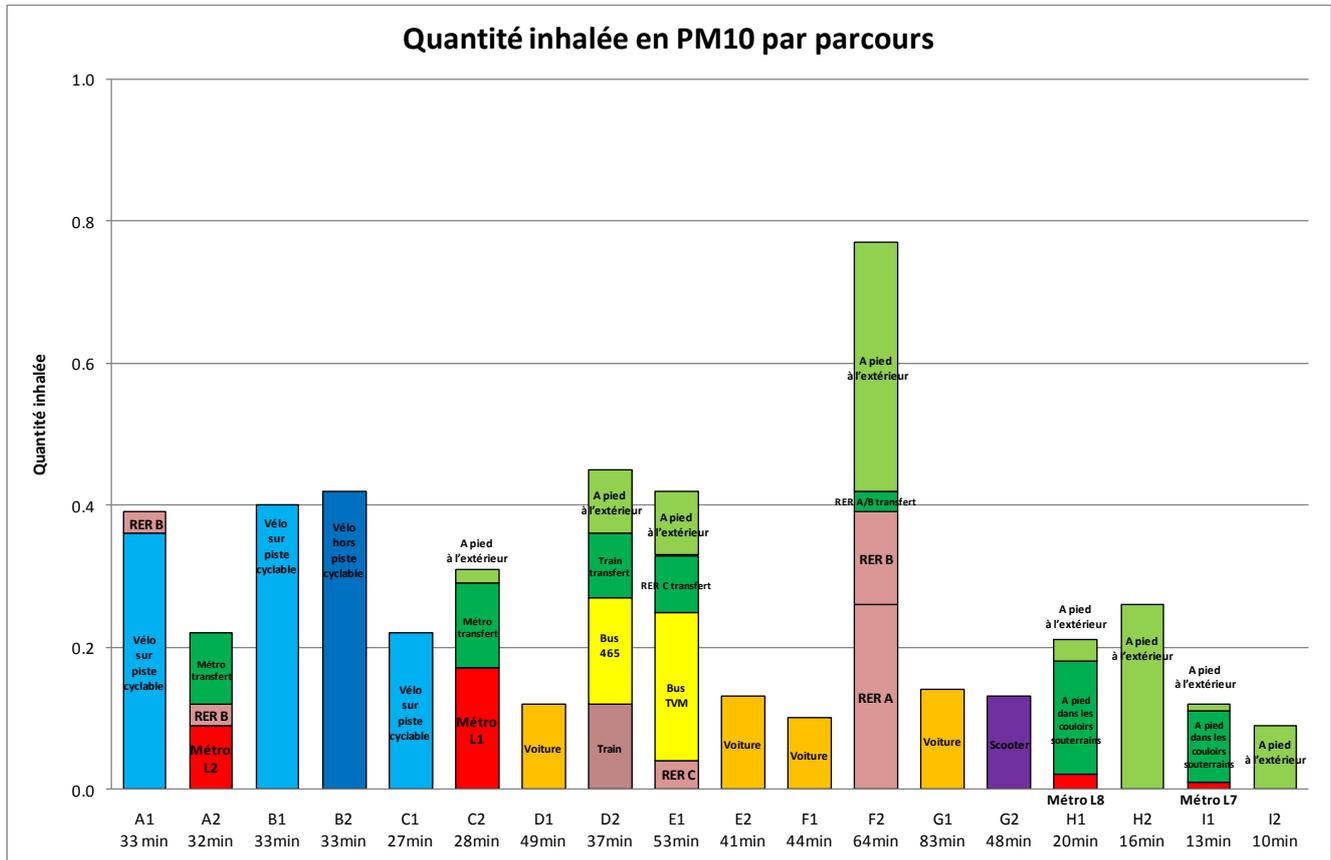


Figure B3 : Représentation des quantités inhalées non corrigées en PM10 pour chaque parcours

Sans correction des résultats dans les milieux souterrains, le parcours présentant la quantité inhalée de particules PM10 maximale est le parcours F2 (Aulnay-sous-Bois → Noisiel en RER).

Le calcul des quantités inhalées ne modifie pas la hiérarchisation des expositions par inhalation aux particules sur deux trajets comparés en parallèle utilisant des modes de transport différents.

Cependant, la prise en compte de la durée peut modifier la répartition des modes de transport pour un même trajet (exemple du trajet F2).

Le calcul de la quantité inhalée a pour conséquence de placer l'exposition par inhalation en « Vélo » supérieure à celle en « Métro ».

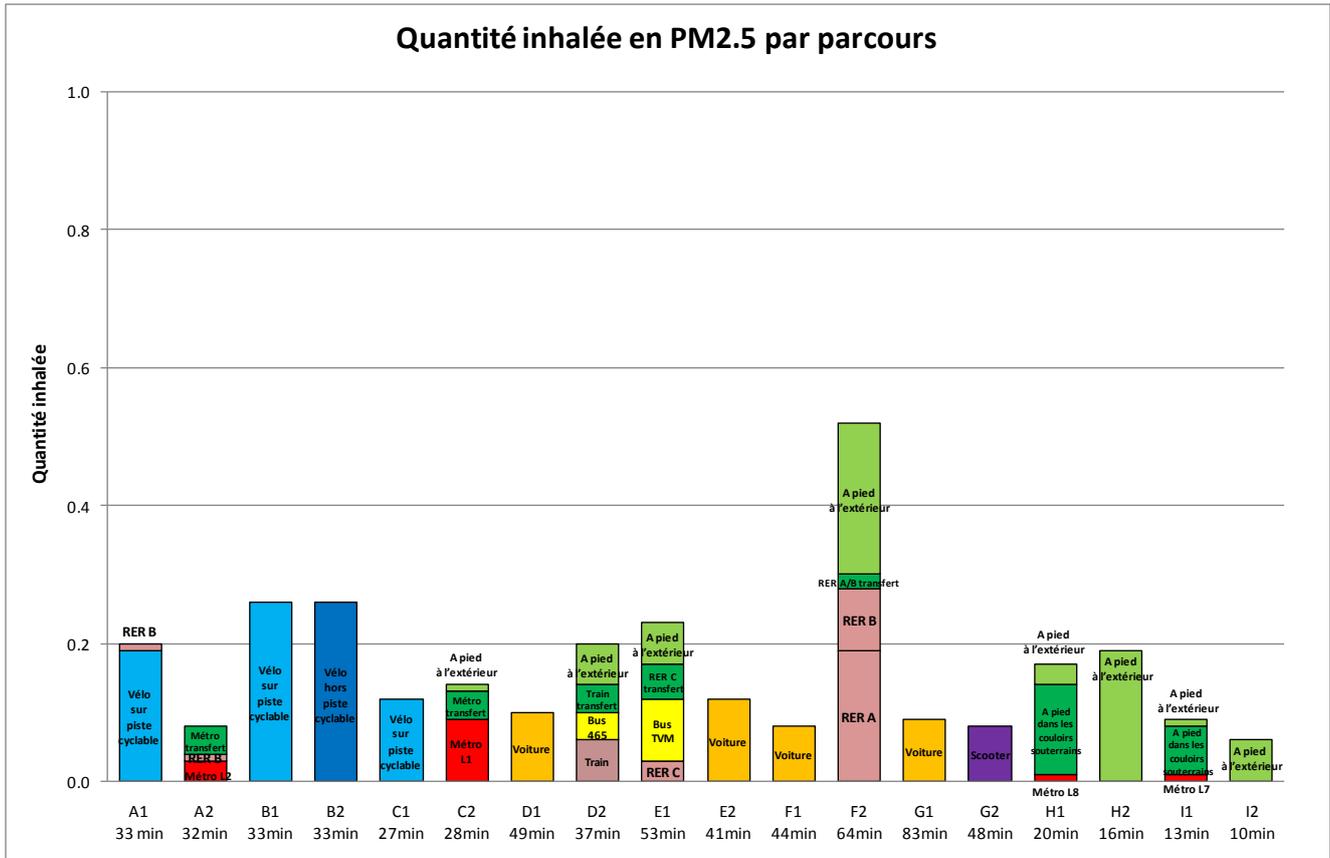


Figure B4 : Représentation des quantités inhalées non corrigées en PM2.5 pour chaque parcours

Sans correction des résultats dans les milieux souterrains, le parcours présentant la quantité inhalée de particules PM2.5 maximale est le parcours F2 (Aulnay-sous-Bois → Noisiel en RER).

Le calcul des quantités inhalées ne modifie pas la hiérarchisation des expositions par inhalation aux particules sur deux trajets comparés en parallèle utilisant des modes de transport différents.

Cependant, la prise en compte de la durée peut modifier la répartition des modes de transport pour un même trajet (exemple du trajet F2).

Le calcul de la quantité inhalée a pour conséquence de placer l'exposition par inhalation en « Vélo » supérieure à celle en « Métro ».

Bilan par mode de transport

Concentrations en PM10

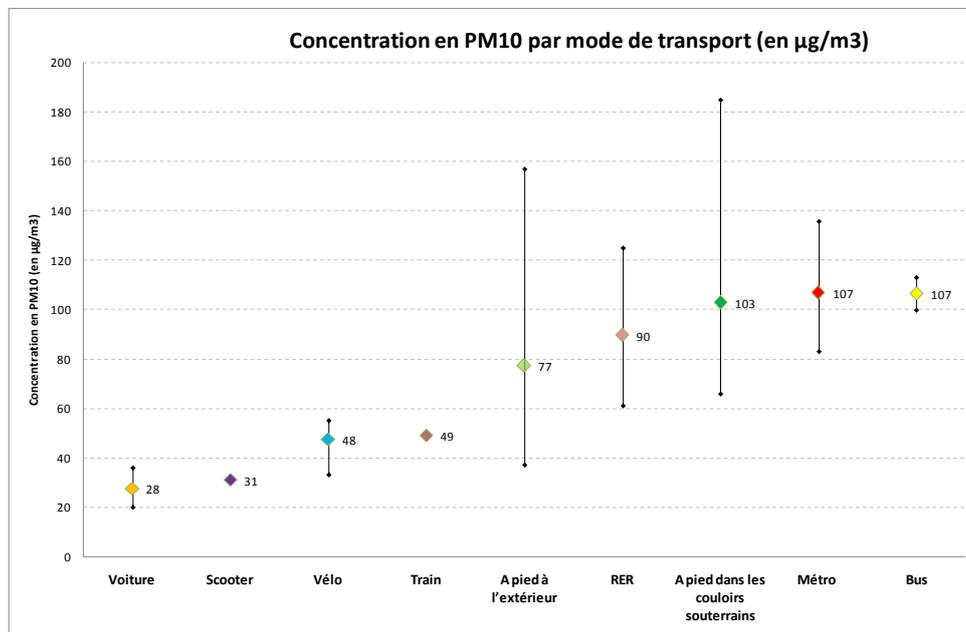


Figure B5 : Concentrations massiques non corrigées en particules PM10 par mode de transport

Les concentrations en PM10 varient entre 28 et 107 µg/m³. La concentration en PM10 la plus élevée est, dans le cadre de cette étude, associée aux modes de transport « Métro » et « Bus ».

Les résultats en concentration massique en PM10 de cette étude ont été comparés avec les valeurs reportées dans les différentes publications de la synthèse bibliographique.

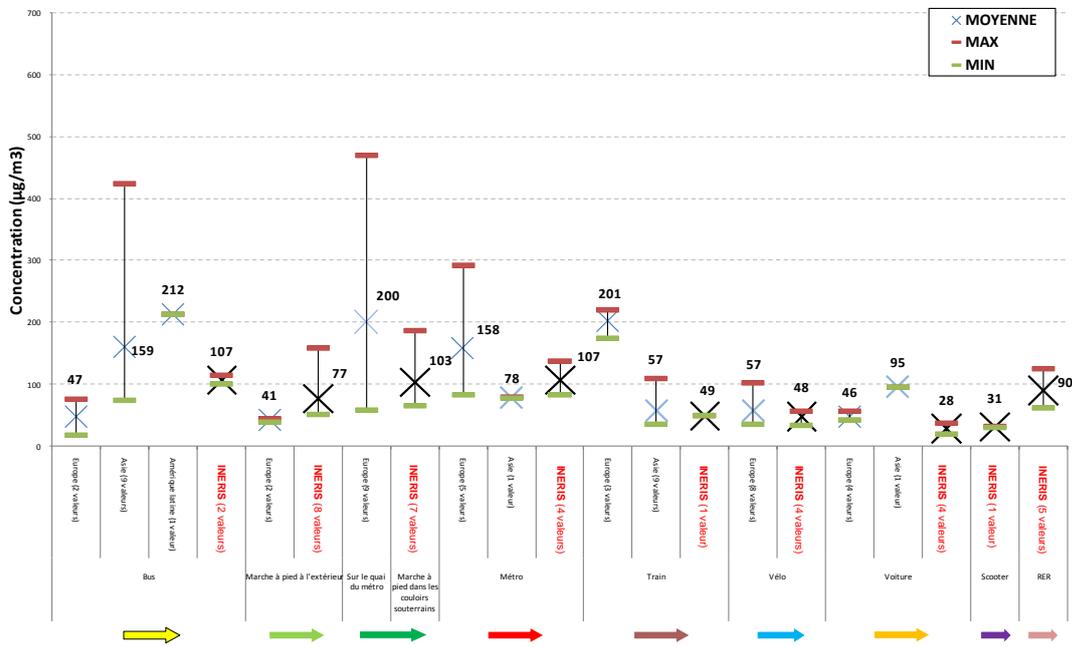


Figure B6 : Comparaison des résultats non corrigés obtenus en PM10 avec ceux de la bibliographie

Les valeurs de concentrations de concentrations mesurées sont cohérentes avec celles reportées dans la littérature.

Concentrations en PM2.5

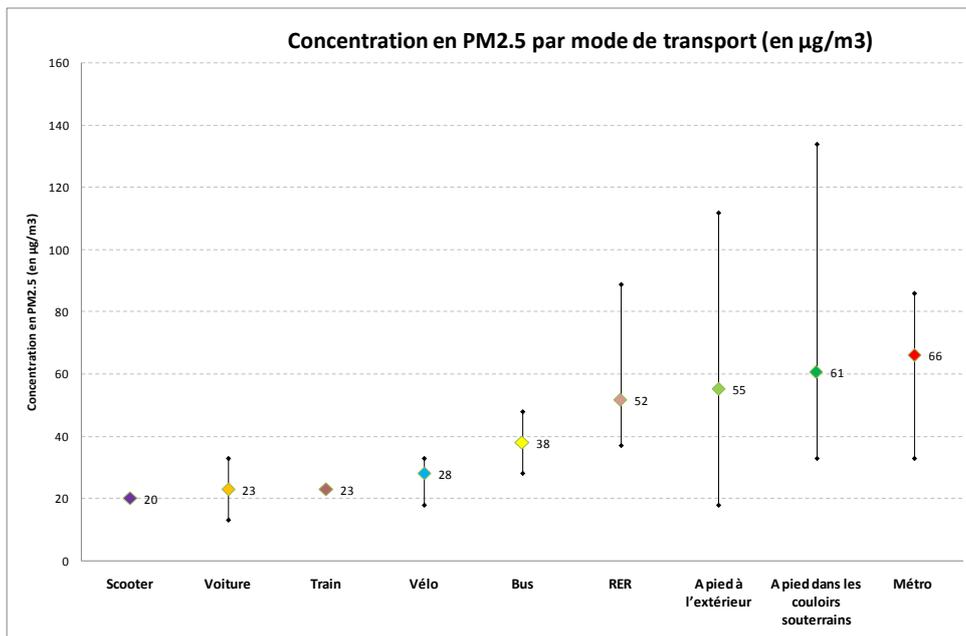


Figure B7 : Concentrations massiques non corrigées en particules PM2.5 par mode de transport

Sans correction des résultats dans les milieux souterrains, les concentrations en PM2.5 varient entre 20 et 66 µg/m³. La concentration en PM2.5 la plus élevée est, dans le cadre de cette étude, associée au mode de transport « Métro ».

Les résultats en concentration massique en PM_{2.5} de cette étude ont été comparés avec les valeurs reportées dans les différentes publications de la synthèse bibliographique.

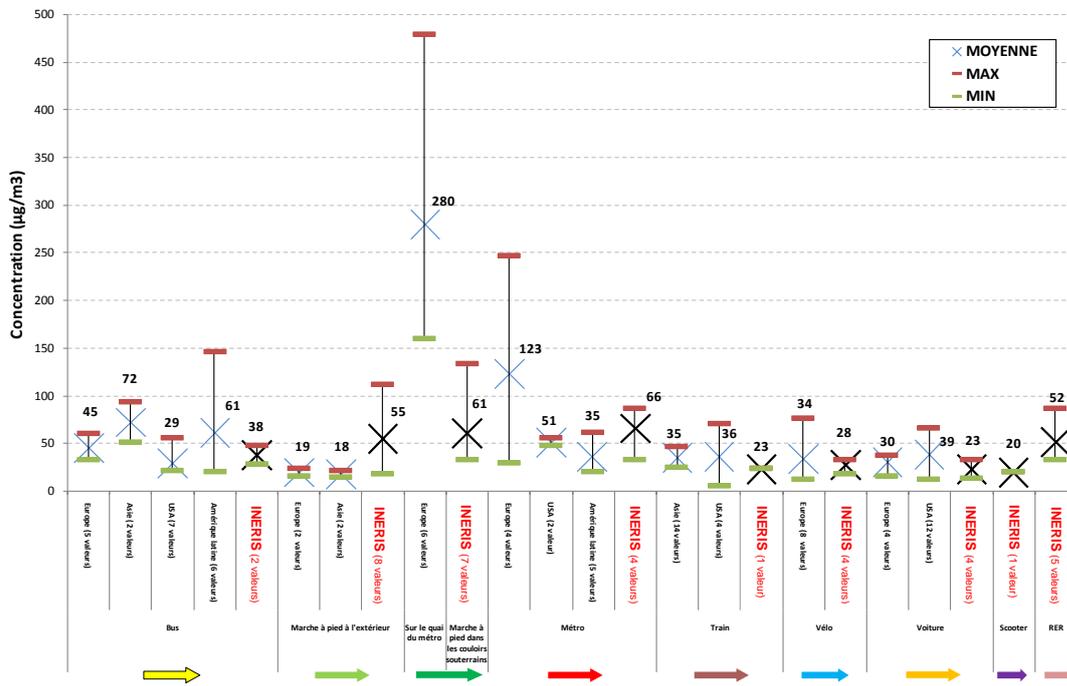


Figure B8 : Comparaison des résultats non corrigés obtenus en PM_{2.5} avec ceux de la bibliographie

Les valeurs de concentrations mesurées sont cohérentes avec celles reportées dans la littérature.