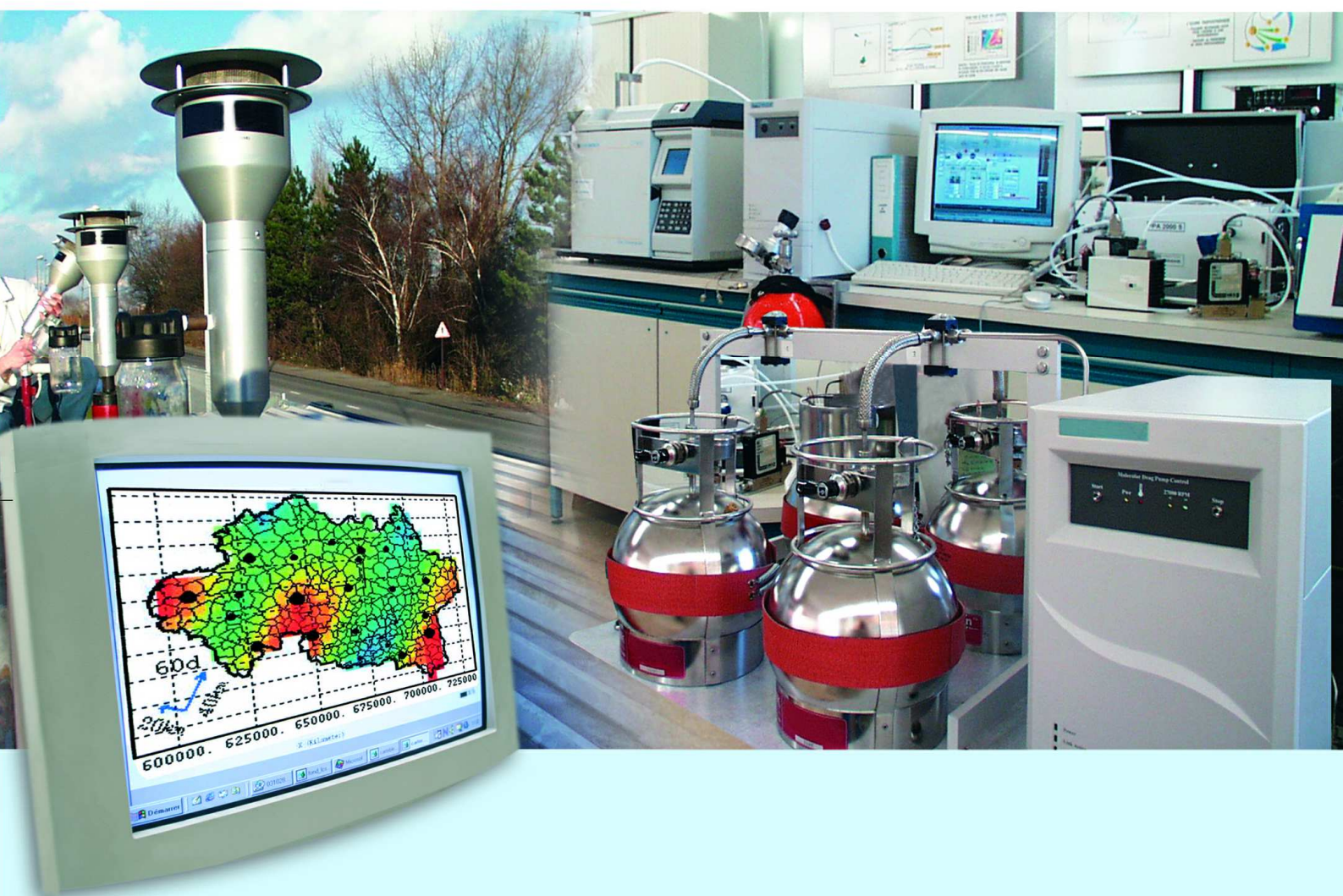




Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Modélisation et traitements numériques

Analyse statistique des données de $PM_{2.5}$ à l'échelle nationale

Juillet 2013

Programme 2012

M. BEAUCHAMP, L. MALHERBE





PREAMBULE

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué de laboratoires de l'Ecole des Mines de Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches finalisées à la demande du Ministère chargé de l'environnement, et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de pollution atmosphérique ont été financés par la Direction Générale de l'Energie et du Climat (bureau de la qualité de l'air) du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, et de l'Energie. Ils sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique au MEDDE et aux AASQA.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.



Analyse statistique des données de PM_{2.5} à l'échelle nationale

Laboratoire Central de Surveillance
de la Qualité de l'Air

Programme financé par la
Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC)
Bureau de la qualité de l'air

2012

M. Beauchamp, L. Malherbe

Ce document comporte 37 pages (hors couverture et annexes)




	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	M. Beauchamp L. Malherbe	B. Bessagnet	L. Rouïl
Qualité	Ingénieurs de l'Unité Modélisation Atmosphérique et Cartographie Environnementale Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'unité Modélisation Atmosphérique et Cartographie Environnementale Direction des Risques Chroniques	Responsable du pôle Modélisation Environnementale et Décision Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	9
1. INTRODUCTION	10
2. SEUILS REGLEMENTAIRES	11
3. ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNEES DE PM2.5	12
3.1 Recensement des sites de mesure	12
3.2 Statistiques élémentaires	13
3.2.1 Statistiques par typologie de stations, signal urbain et signal trafic.....	16
3.2.2 Statistiques par région	19
3.3 Carte analysée nationale de PM2.5	22
4. CORRELATIONS ET RATIOS ENTRE CONCENTRATIONS DE PM2.5 ET DE PM10	26
4.1 Recensement des sites de mesure de PM ₁₀	26
4.2 Statistiques élémentaires sur les PM ₁₀	27
4.3 Etude des liens entre PM _{2.5} et PM ₁₀	29
4.3.1 Etude en moyenne annuelle	29
4.3.2 Etude en situation d'épisode.....	31
5. CONCLUSION	34
6. REFERENCES	36
7. LISTE DES ANNEXES	37

RESUME

Le présent rapport dresse un bilan des mesures de PM_{2.5} réalisées de 2007 à 2011. Il constitue la mise à jour d'un précédent travail qui portait sur les années 2003 à 2005. Cette étude bénéficie d'un plus grand nombre de stations (114 sites de mesure des PM_{2.5} en 2011 contre 54 en 2005). A la différence de l'étude précédente, les données disponibles, mesurées par TEOM-FDMS, tiennent compte de la fraction semi-volatile des particules.

Plusieurs aspects de la pollution liée aux PM_{2.5} sont examinés : la variabilité spatiale des concentrations, leur évolution moyenne au cours des années, les relations entre les concentrations de PM_{2.5} et les concentrations de PM₁₀.

Si la valeur limite de 25 µg/m³ fixée pour 2015 est presque partout respectée (font exception quelques stations de proximité automobile), des niveaux relativement élevés - supérieurs à la valeur cible de 20 µg/m³ - sont mesurés dans la moitié est de la France, principalement en Rhône-Alpes et dans le Nord-Pas-de-Calais. En complément des statistiques annuelles par station, des cartographies des concentrations moyennes annuelles de PM_{2.5} ont été élaborées par krigeage, en combinant les données mesurées sur les stations de fond et les simulations issues de CHIMERE. Le nombre de stations disponibles pour le krigeage permet d'assurer une qualité de cartographie satisfaisante, notamment en 2011.

En moyenne sur la France, la concentration moyenne annuelle de PM_{2.5} est plus élevée sur les stations de proximité routière et plus faible sur les stations rurales. Localement, ces différences sont moins nettes. En comparaison de mesures urbaines voisines (distantes de moins de 5 km), un surplus de concentration modéré mais significatif est observé sur les stations de proximité. En revanche, la comparaison de données urbaines et rurales issues de sites proches (distantes de moins de 50 km) ne fait pas ressortir de signal urbain. Le petit nombre de stations permettant une telle comparaison limite toutefois l'analyse.

D'un point de vue temporel, aucune tendance significative sur la période 2007-2011 n'est mise en évidence à l'échelle de la France, et cela, quelle que soit la typologie de station. Le rapport moyen annuel PM_{2.5}/PM₁₀, qui est d'environ 70%, ne présente pas non plus d'évolution sensible sur cette période alors qu'en fonction du lieu et de la saison, il révèle une certaine variabilité.

1. INTRODUCTION

Ce rapport fait suite au rapport LCSQA de 2006 portant sur l'analyse statistique des données de $PM_{2.5}$ en milieu urbain¹. Une mise à jour du bilan réalisé à cette époque apparaît nécessaire du fait du développement du réseau de surveillance des $PM_{2.5}$, de la prise en compte, depuis 2007, de la fraction volatile des particules dans la mesure des PM_{10} et des $PM_{2.5}$, et de l'évolution du contexte réglementaire dans lequel cette mesure intervient. Les dépassements récurrents des valeurs limites liées aux PM_{10} conduisent de plus à s'interroger sur le rôle joué par les $PM_{2.5}$ dans ces dépassements et à réexaminer les relations entre ces deux classes de particules à l'aide de données récentes.

Cette note constitue une analyse exploratoire des données de $PM_{2.5}$ disponibles sur la période 2007-2011. La base de données utilisée date de décembre 2012. Elle présente des calculs de statistiques annuelles par station, une étude de la variabilité interannuelle des concentrations, ainsi qu'une étude des relations entre $PM_{2.5}$ et PM_{10} . Une carte analysée des moyennes annuelles de $PM_{2.5}$, qui combine observations et données du modèle CHIMERE, est également produite et discutée.

La méthodologie de calcul de l'IEM national et son application au calcul de l'IEM de référence (valeur initiale de l'IEM) ont fait l'objet d'une note séparée. Celle-ci est déjà disponible sur le site du LCSQA².

¹ Honoré C., Malherbe 2006. Analyse statistique des données de $PM_{2.5}$ en milieux urbain et périurbain. Rapport LCSQA, réf. INERIS- DRC - MECO-06 - 65022-CHo – LMa – N°206, www.lcsqa.org.

² Malherbe L., 2012. Evaluation de l'Indice d'Exposition Moyenne aux $PM_{2.5}$ (IEM) : règles de sélection des stations de mesure et de calcul de l'IEM. Note LCSQA, réf. DRC-12-126913-14098A, www.lcsqa.org.

2. SEUILS REGLEMENTAIRES

Le décret 2010-1250 du 21 octobre 2010, qui transpose en droit français la Directive 2008/50/CE, « précise notamment les normes à appliquer pour les particules PM_{2.5} jugées plus préoccupantes pour la santé que les particules PM₁₀, parce qu'elles pénètrent plus profondément dans les poumons en raison de leur petite taille et qu'elles s'accumulent dans l'organisme. » (Tableau 1)

Tableau 1 : Normes en vigueur pour les PM_{2.5} (seuils à respecter par site de mesure)

Type de seuil	Valeur du seuil	Période correspondante
Objectif de qualité	10 µg/m ³	moyenne annuelle civile
Valeur cible	20 µg/m ³	moyenne annuelle civile
Valeur limite	25 µg/m ³ à partir de 2015	moyenne annuelle civile
	26 µg/m ³ en 2014	
	26 µg/m ³ en 2013	
	27 µg/m ³ en 2012	
	28 µg/m ³ en 2011	
	29 µg/m ³ en 2010	

A partir des mesures de PM_{2.5} issues d'un ensemble de stations fixes situées en milieu urbain, les Etats Membres doivent en outre calculer un **indicateur d'exposition moyenne (IEM)** auquel s'appliquent deux exigences supplémentaires :

- un seuil à respecter à compter de 2015, qui est de 20 µg/m³ (obligation en matière de concentration relative à l'exposition);
- un objectif de réduction de l'exposition à atteindre en 2020, qui dépend de la valeur initiale de l'IEM (période 2009-2011).

Dans la suite de l'étude, les concentrations moyennes annuelles seront comparées à la valeur limite applicable en 2015, soit **25 µg/m³**.

3. ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNEES DE PM2.5

3.1 RECENSEMENT DES SITES DE MESURE

Cette étude s'appuie sur les données de PM_{2.5} issues des réseaux de surveillance et disponibles dans la base nationale de données de qualité de l'air, dont la gestion est assurée par le Laboratoire Central de la Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) depuis 2011. La période d'étude s'étend de 2007 à 2011. Le *Tableau 2* présente l'évolution de la répartition des sites de mesure en France entre la précédente étude réalisée en 2005 et 2011.

A ce jour, la quasi-totalité du réseau prend en compte la fraction volatile des particules, par les mesures de référence ou les mesures ajustées.

Le nombre de stations a doublé, passant de 54 en 2005 à 114 en 2011. Des stations rurales ont fait leur apparition (11), et deux sites industriels sont également présents près de Marseille. Le nombre de sites urbains est passé de 37 en 2005 à 81 en 2011 tandis que le réseau de sites périurbains a diminué et ne compte plus que quatre stations. Enfin, six nouveaux sites trafic sont également recensés.

Il faut noter aussi que les départements et régions d'outre-mer ont commencé depuis la précédente étude à s'équiper des techniques de mesure des PM_{2.5}.

Tableau 2 : Nombre des stations de mesure des PM_{2.5} par typologie

Type de station	2005	2011
Trafic (T)	10	16
Urbain (U)	37	81
Périurbain (PU)	7	4
Rural (R)	0	11
Industriel (I)	0	2
Tous types	54	114

Les régions les plus équipées sont pour la plupart caractérisées par des niveaux moyens de particules assez élevés (cf. §3.2.2) : le Nord-Pas-de-Calais, la Lorraine, l'Île-de-France, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et la région Rhône-Alpes. La région Loire-Atlantique, qui présente des niveaux de PM_{2.5} assez faibles (voir *Figure 2*) est particulièrement bien équipée.

Les exigences de la directive européenne de 2008 sur le taux de saisie minimal associé au calcul de la moyenne annuelle³ peuvent conduire à l'apparition de zones blanches. En 2010 et 2011, les mesures réalisées en Bretagne et en Basse-Normandie ne sont ainsi pas considérées.

La Figure 1 présente l'état du réseau en 2011 : les stations urbaines représentent plus de 70% des sites de mesures des PM_{2,5}.

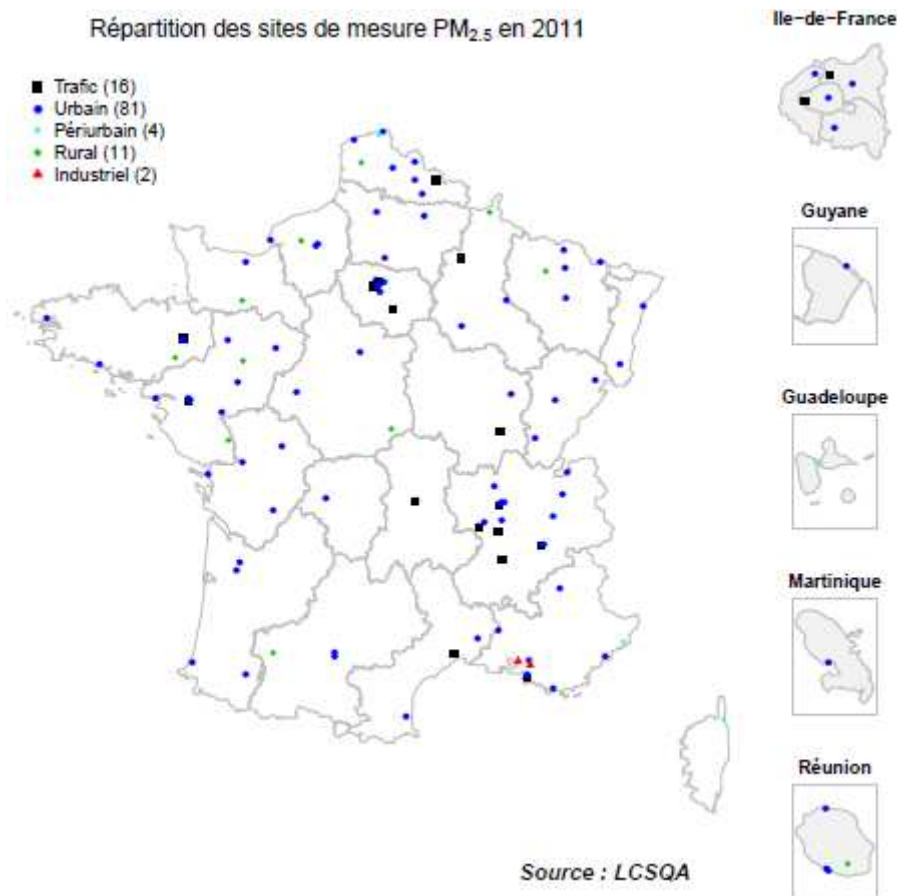


Figure 1 : Répartition des sites de mesure PM_{2,5} en 2011

Les statistiques annuelles présentées dans la suite du rapport sont calculées pour les **stations qui comptent plus de 85% de données valides sur l'année**³. Le nombre de telles stations, par région et par typologie, pour les années 2009 à 2011, est fourni dans le tableau de l'annexe 1.

3.2 STATISTIQUES ELEMENTAIRES

Les Figure 2 à Figure 4 présentent les moyennes annuelles de PM_{2,5} pour les années 2009 à 2011.

Les cartes des années 2007 à 2008 sont présentées à titre indicatif en annexe 2 car seules 3 stations en 2007 et 12 stations en 2008 mesurant la fraction volatile des particules avaient un taux de données horaires valides supérieur à 85%³.

³ La directive européenne de 2008 (Directive 2008/50/CE) spécifie que le pourcentage de données horaires valides hors période d'étalonnage et de maintenance doit être supérieur ou égal à 90% pour le calcul de la moyenne annuelle. En l'absence d'informations sur cette période de maintenance, ce taux minimal a été abaissé à 85% dans nos calculs, conformément aux recommandations du guide IPR sur les nouvelles modalités de rapportage.

Un gradient de concentration peut être mis en évidence d'Est en Ouest : les régions les plus exposées sont le Nord-Pas-de-Calais et Rhône-Alpes. La Lorraine, la Picardie et la région Champagne-Ardenne présentent également des niveaux assez élevés selon les années et les sites de mesures.

Les sites dont les concentrations moyennes annuelles dépassent la valeur limite annuelle sont tous des sites de trafic, à l'exception d'un site urbain dans le Nord-Pas-de-Calais en 2011 (station 06003 de Douai-Theuriet à $26 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) et d'un site industriel à Marseille en 2010 (station 02020 de Rognac-les-Brets à $26 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

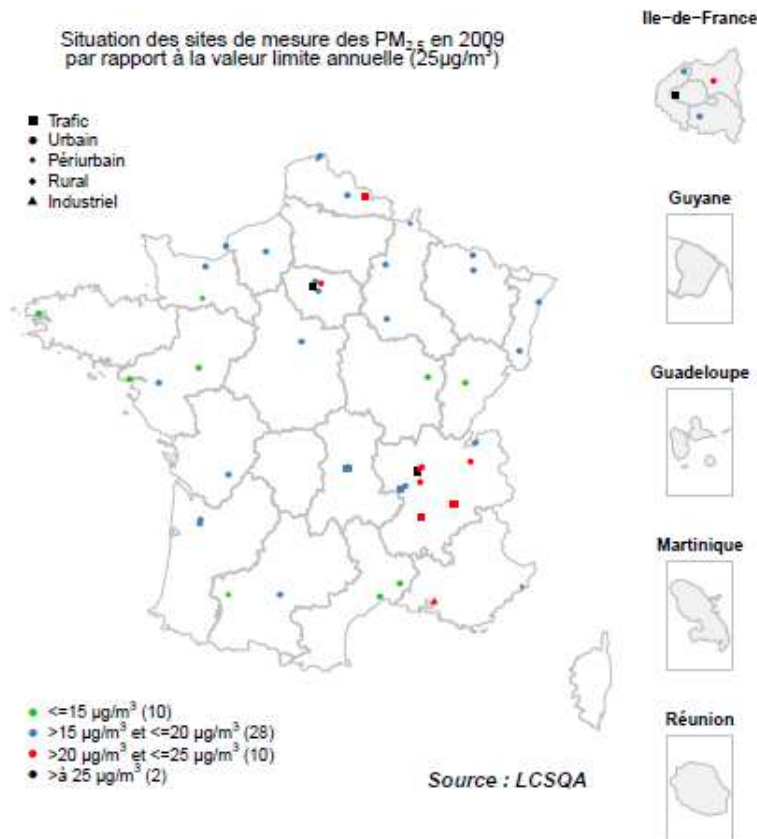


Figure 2 : situation des sites de mesures de $\text{PM}_{2,5}$ en 2009 par rapport à la valeur limite annuelle ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

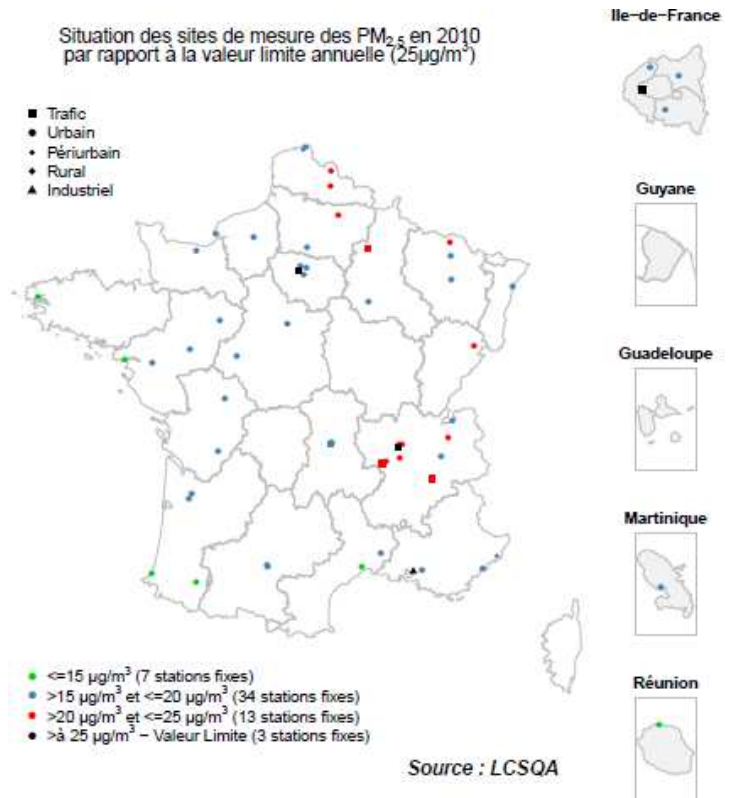


Figure 3: situation des sites de mesures de PM_{2,5} en 2010 par rapport à la valeur limite annuelle (25µg/m³)

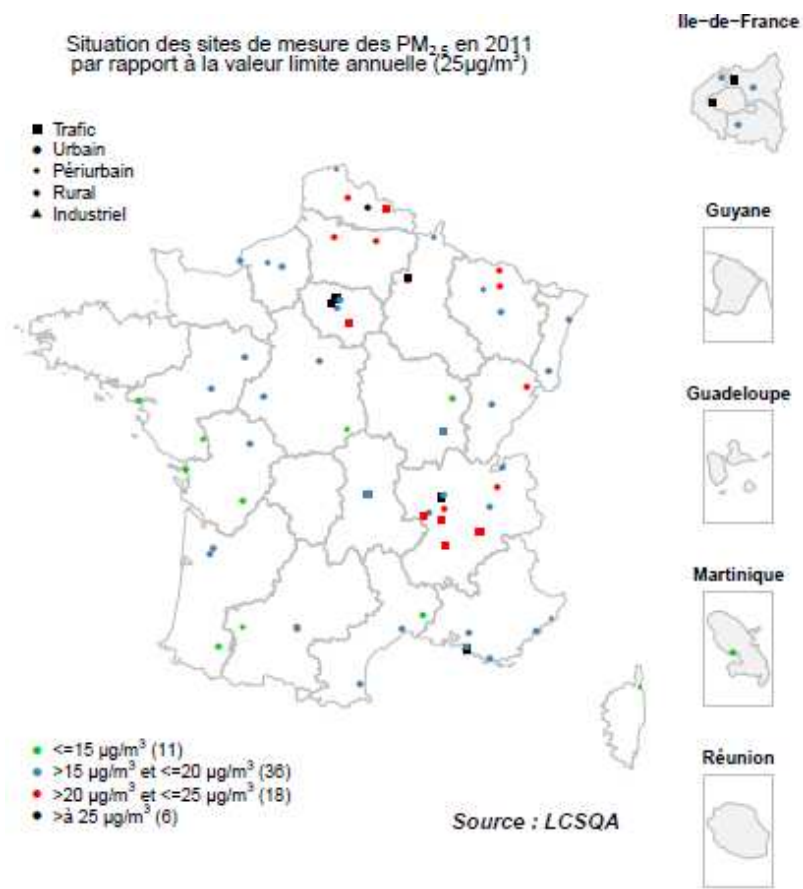


Figure 4 : Situation des sites de mesure de PM_{2,5} entre 2009 et 2011 par rapport à la valeur limite annuelle (VL à respecter à partir de 2015)

La Figure 5 présente l'évolution des moyennes annuelles de $PM_{2.5}$ entre 2007 et 2011. Les typologies urbaines et périurbaines ont été regroupées au sein d'un même ensemble appelé « fond urbain ».

Seules les typologies Trafic et Fond Urbain disposent d'une quantité suffisante de données sur les cinq dernières années. Aucune tendance ne semble se dégager.

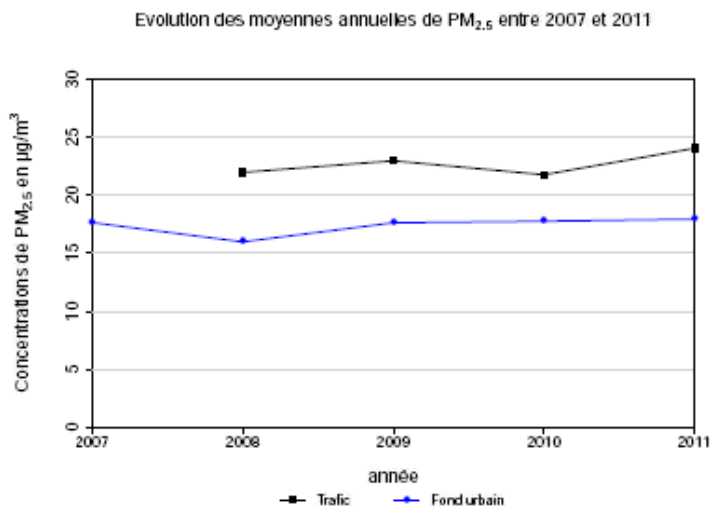


Figure 5 : Evolution des moyennes annuelles de $PM_{2.5}$ entre 2007 et 2011 pour les typologies Trafic et Fond Urbain (urbain et périurbain)

3.2.1 STATISTIQUES PAR TYPOLOGIE DE STATIONS, SIGNAL URBAIN ET SIGNAL TRAFIC

Les statistiques établies par typologie de stations (Figure 4) montrent qu'en moyenne sur les stations, les concentrations observées en milieu rural sont inférieures à celles observées en milieu urbain et que les concentrations à proximité du trafic automobile sont sensiblement supérieures à ces dernières (cette conclusion avait déjà pu être tirée de l'étude LCSQA 2010⁴ portant sur les campagnes de mesures PM_{10}).

Ces statistiques décrivent une situation moyenne sur la France, sans prise en compte de la géographie ni des particularités locales. En complément, une comparaison des mesures selon la typologie est réalisée à plus petite échelle. Des couples de stations situées à faible distance l'une de l'autre sont considérés à cette fin. Il s'agit de couples constitués d'une station rurale et d'une station urbaine, afin d'évaluer l'effet des sources urbaines, et de couples composés d'une station urbaine et d'une station de proximité routière, afin d'évaluer l'influence du trafic.

Cette analyse est toutefois limitée par le nombre de paires identifiées. En particulier, la distance minimale qui sépare une station urbaine d'une station rurale est de 31km en 2011 et seules trois stations rurales sont situées à moins de 50 km de stations urbaines. Quelques statistiques descriptives pour ces trois couples sont présentées dans le tableau ci-après (Tableau 3). D'après ces statistiques, la même station rurale 10132 a des concentrations en moyenne supérieures à celles de la station urbaine 10016 et inférieures à celles de la station 28028. Ces résultats montrent la difficulté

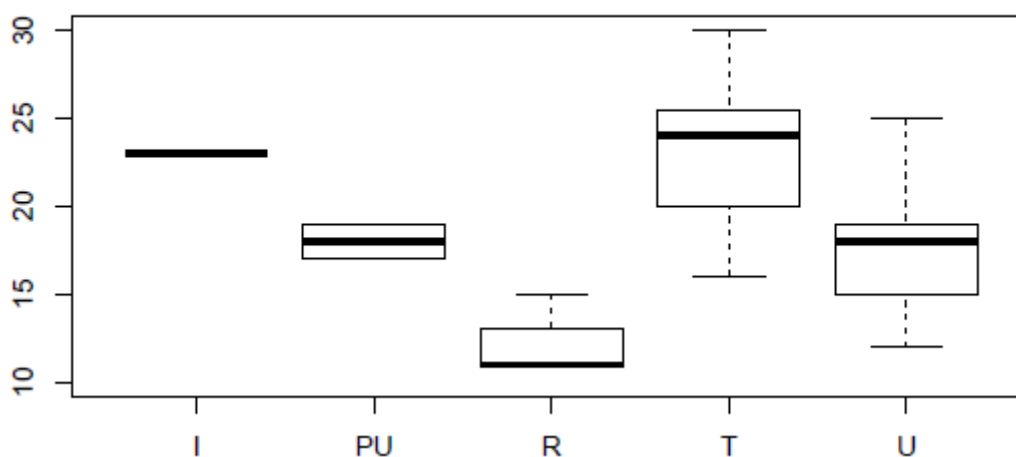
⁴ M. Beauchamp, O. Favez, L. Malherbe, 2010. Variabilité spatiale des concentrations de PM_{10} autour de sites de proximité automobile : mise en œuvre et exploitation de campagnes de mesure. Rapport LCSQA DRC-11-118225-13905A, www.lcsqa.org.

de dégager une tendance à partir de peu de sites. Ils suggèrent qu'à moins de 50 km, le signal urbain est faible et difficilement interprétable.

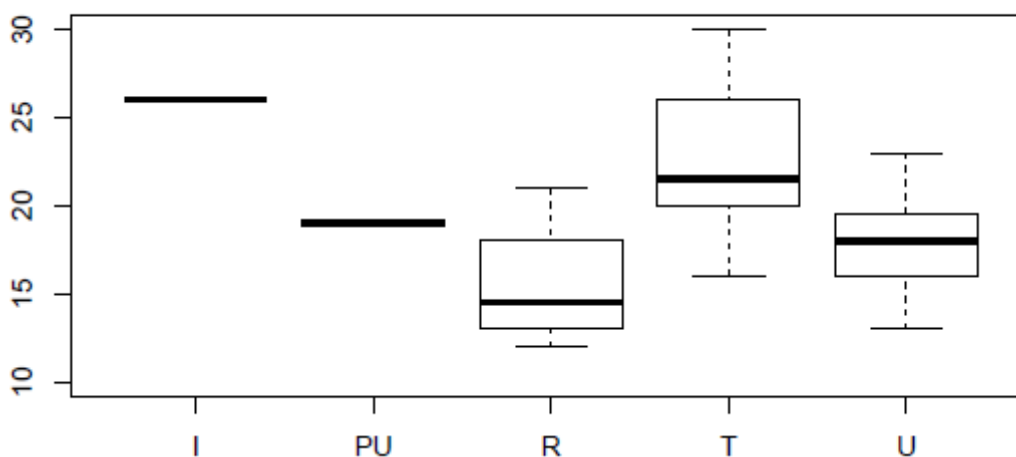
Tableau 3 : Statistiques sur les écarts de concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre sites urbains et sites ruraux distants de moins de 50 km

station RURALE	station URBAINE	min	max	moyenne	médiane
10132	10016	-15	18	2.8	3
10132	28028	-39	7	-3.6	-1
23177	23120	-14	8	-0.5	-1

Statistiques $\text{PM}_{2.5}$ par typologie en 2009



Statistiques $\text{PM}_{2.5}$ par typologie en 2010



Statistiques PM_{2.5} par typologie en 2011

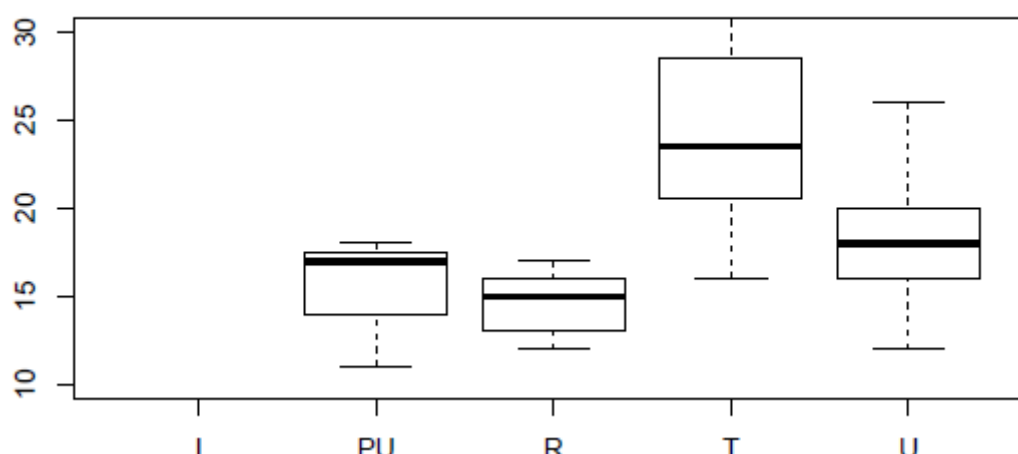


Figure 6 : Distribution sous forme de « boîte à moustaches » des concentrations de PM_{2.5} par typologie de stations entre 2009 et 2011. Chaque boîte à moustache représente, de bas en haut, le minimum, le quantile 25 (bas de la boîte), la médiane (en gras), le quantile 75 (haut de la boîte) et le maximum.

On dispose de plus de données pour étudier le signal lié au trafic : d'après la Figure 7, qui représente les séries temporelles journalières de deux couples formés d'une station urbaine et d'une station trafic distantes de moins de 5 km, l'influence du trafic automobile est plus ou moins marquée selon le site et la période. Le signal a été observé sur 4 stations en 2011. Le Tableau 4 présente des statistiques descriptives sur ces 4 couples. Les niveaux mesurés à proximité du trafic sont supérieurs aux valeurs mesurées en fond urbain, même si les différences sont parfois très faibles.

Tableau 4 : Statistiques sur les écarts de concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre sites urbains et sites trafic distants de moins de 5 km

station TRAFIC	station URBAINE	min	max	moy	median
14013	14012	-18	24	5.17	5
15039	15043	-11	12	1.65	1
23140	23188	-13	12	0.08	0
36003	36002	-6	8	2.03	2

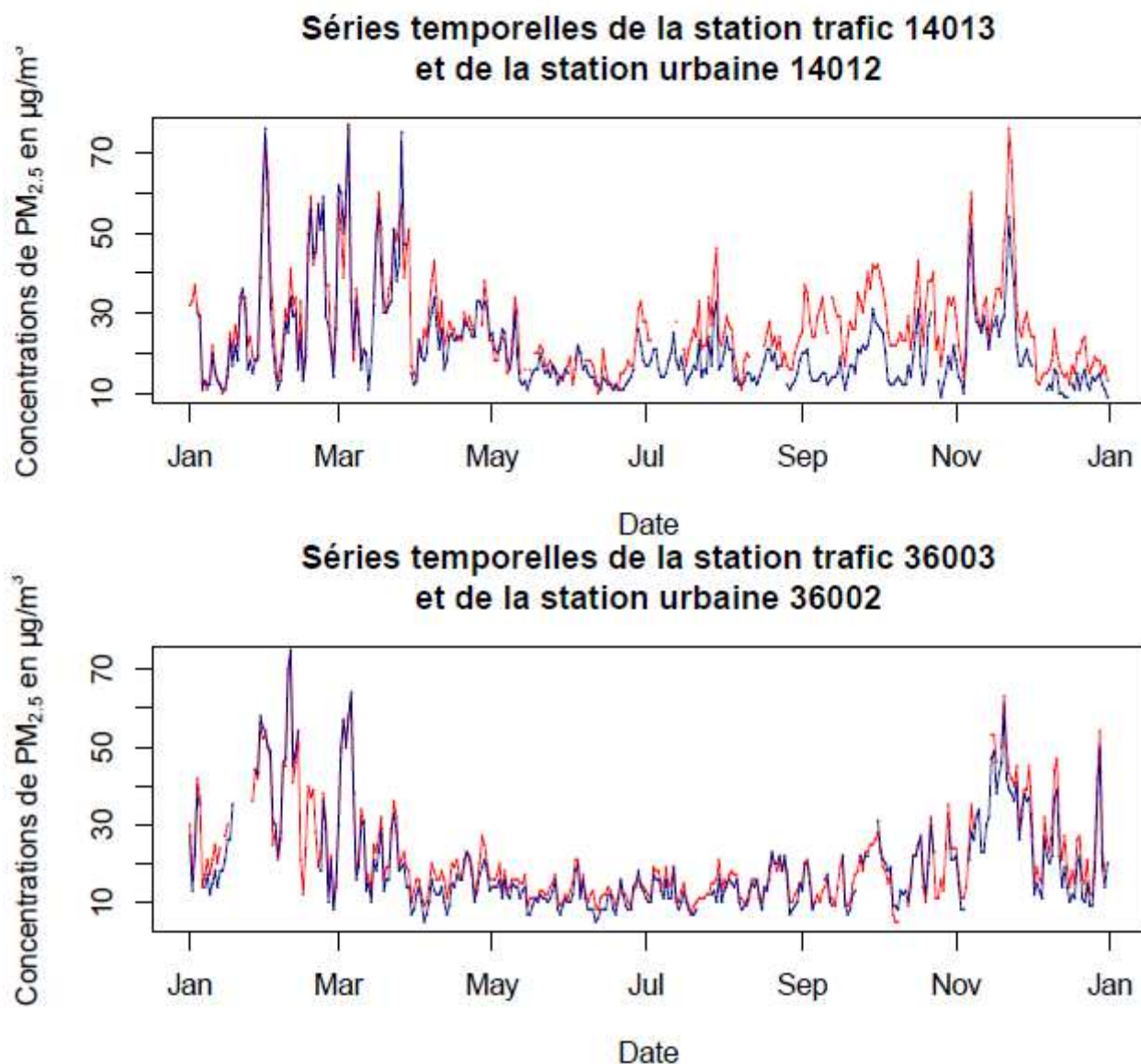


Figure 7 : Séries temporelles journalières des concentrations de $PM_{2.5}$ pour les couples de stations Jean-d'Aulan (14012)-Venise (14013) (Reims) et Valence Urbaine Centre (36002)-Valence Trafic (360033). Les données des stations de fond sont en bleu et les données des stations trafic sont en rouge.

3.2.2 STATISTIQUES PAR REGION

Le tracé des statistiques par région fait lui aussi apparaître des concentrations en $PM_{2.5}$ plus élevées dans les régions de l'Est de la France. Si ces résultats sont à nuancer en raison du petit nombre de stations par région, la faible variabilité intra-régionale des concentrations permet néanmoins de considérer ces remarques comme fiables.

Sur les graphes de la Figure 8, les régions sont ordonnées en fonction des niveaux moyens de concentration mesurés sur les sites urbains de fond. Pour certaines régions, les concentrations moyennes observées entre 2009 et 2011 sont stables : c'est le cas de la région Rhône-Alpes qui présente toujours des valeurs relativement élevées ; pour d'autres, elles indiquent une évolution à la hausse (ex : Nord-Pas-de-Calais, Champagne-Ardenne) ou à la baisse (ex : Aquitaine). L'historique est toutefois insuffisant pour étudier le caractère significatif de ces tendances.

Le classement des régions change s'il repose sur les concentrations mesurées en zone rurale. Toutes les régions ne sont cependant pas équipées pour de telles mesures. En 2011, dans les quelques régions concernées, les moyennes régionales sur les sites ruraux de fond sont inférieures de 13% à 38% aux moyennes régionales sur les sites urbains de fond. Les écarts entre les deux typologies sont semblables les années précédentes même s'il faut noter qu'en 2010, la moyenne rurale observée en Lorraine est supérieure de 7% à la moyenne urbaine, ce qui confirme la difficulté d'analyser le signal urbain, comme cela a été vu en §3.2.1.

En 2011, dans les quelques régions disposant de mesures de PM_{2.5} près du trafic, les moyennes régionales sur les sites de proximité automobile sont supérieures de 15% à 25% aux moyennes régionales sur les sites urbains de fond. Ce chiffre est plus faible les années précédentes, chutant même à 4% sur la région Rhône-Alpes en 2009. Se distingue l'Ile-de-France, où ce surplus de pollution est de 58%, 64% et 70% pour les trois dernières années. Ces pourcentages élevés sont dus principalement aux mesures réalisées sur les stations Boulevard Périphérique Auteuil (de 2009 à 2011) et Autoroute A1 Saint-Denis (2011), deux sites sous forte influence du trafic. La moyenne annuelle mesurée en 2011 sur la station RN6-Melun se situe en revanche dans la même gamme de valeurs que les données de proximité observées dans d'autres régions françaises.

Les pourcentages fournis précédemment n'ont qu'un caractère indicatif, en raison du nombre limité de stations rurales et de stations de proximité (respectivement 11 et 16 sites en 2011, cf. §3.1). Pour ces deux typologies, l'effectif se réduit généralement à une station par région, sauf en Ile-de-France (3 stations « trafic » en 2011) et en Rhône-Alpes (3 à 5 stations « trafic » selon l'année). En ce qui concerne la typologie urbaine, les comparaisons entre les régions et les années doivent prendre en considération les variations d'effectif (cf. annexe 1). Comme il a été mentionné au paragraphe 3.1, certaines régions sont plus équipées que d'autres pour la mesure des PM_{2.5}. D'un point de vue temporel, le nombre de stations utilisées dans le calcul des moyennes (compte tenu du taux de saisie annuel) est relativement stable sur la période 2009-2011, avec cependant quelques exceptions. Dans le Nord-Pas-de-Calais, il est ainsi passé de 2 en 2009 à 4 en 2010 puis 5 en 2011, en Picardie, il est passé de 1 à 3, et en PACA, de 1 à 4. Ces évolutions affectent peu le classement de la Picardie et de PACA. Le changement de classement du Nord-Pas-de-Calais entre 2009 et 2010 est plus sensible ; il s'explique également par une hausse des concentrations sur l'une des stations urbaines.

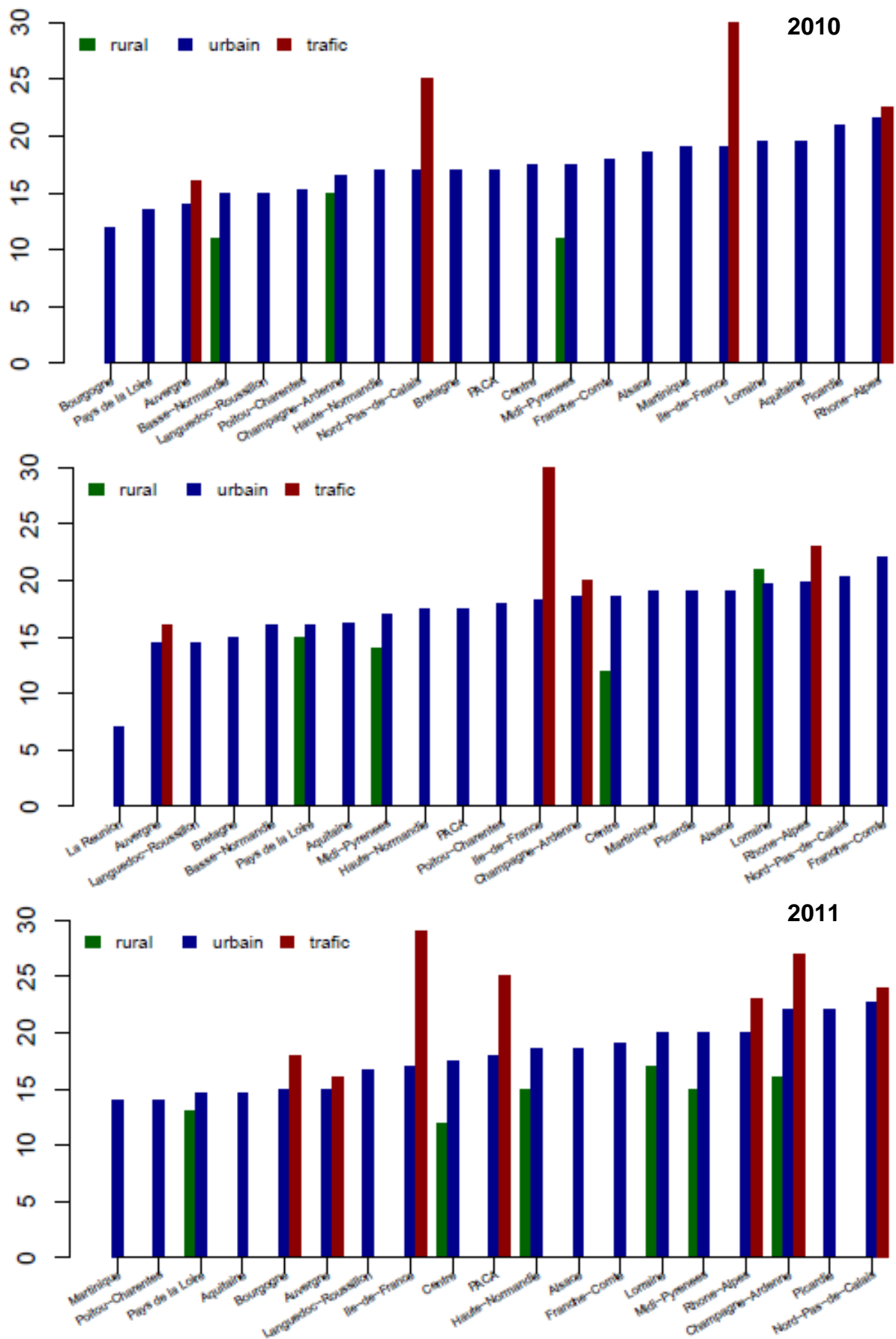


Figure 8 : Moyenne par région et par type de station des concentrations moyennes annuelles de $PM_{2.5}$ entre 2009 et 2011.

3.3 CARTE ANALYSEE NATIONALE DE PM2.5

Une carte analysée est une combinaison de données de mesures et de données de modélisation. Le modèle déterministe de chimie-transport CHIMERE fournit des cartes journalières des concentrations en PM_{2.5} sur la France à 10km de résolution. Ces cartes sont agrégées pour obtenir une carte moyenne annuelle des concentrations en PM_{2.5} (voir Figure 9) qui est ensuite spatialisée sur une grille de 1 km de résolution. Les données ainsi obtenues sont utilisées dans un modèle de krigeage en dérive externe avec comme variable d'observation les concentrations moyennes annuelles mesurées sur les stations de typologie rurale, urbaine et périurbaine.

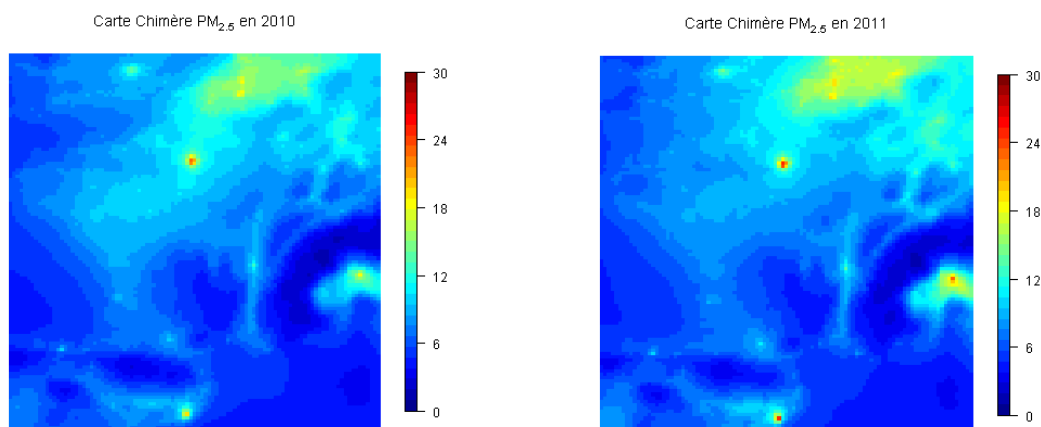


Figure 9 : Cartographies de la moyenne annuelle de PM_{2.5} simulée par CHIMERE en 2010 et 2011

Le variogramme $\gamma(h)$, présenté en Figure 10 qui caractérise la variabilité des concentrations pour une paire de points distants de h , a été modélisé à l'aide de la librairie RGeoS, développé par le centre de Géosciences de l'Ecole des Mines de Paris⁵.

Le modèle est ajusté avec trois composantes : un effet de pépite, une composante sphérique à faible portée et une composante linéaire à grande portée.

⁵ RGeoS. Renard D. and Bez N., Desassis, Laporte F., (2010). RGeoS: The Geostatistical package. Ecole des Mines de Paris. Free download from www.geosciences.mines-paristech.fr

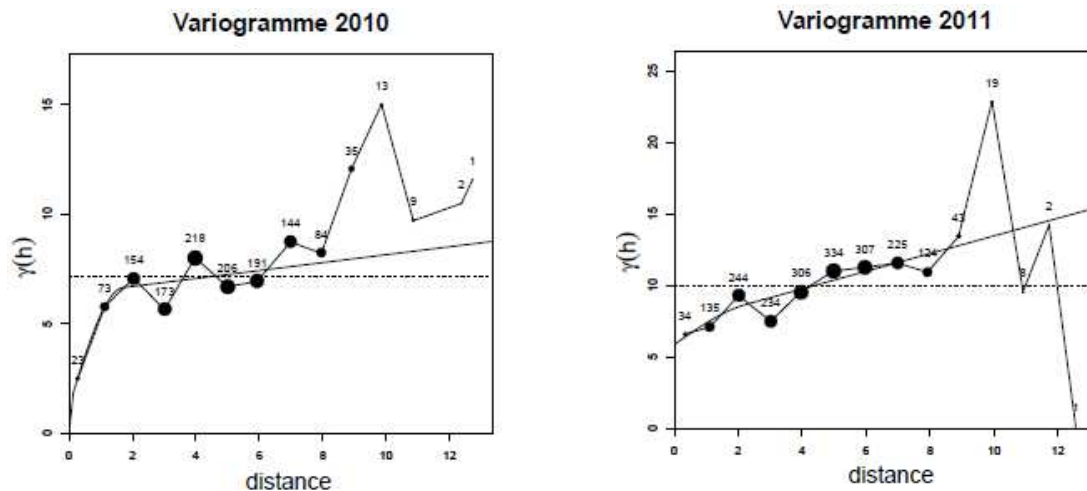
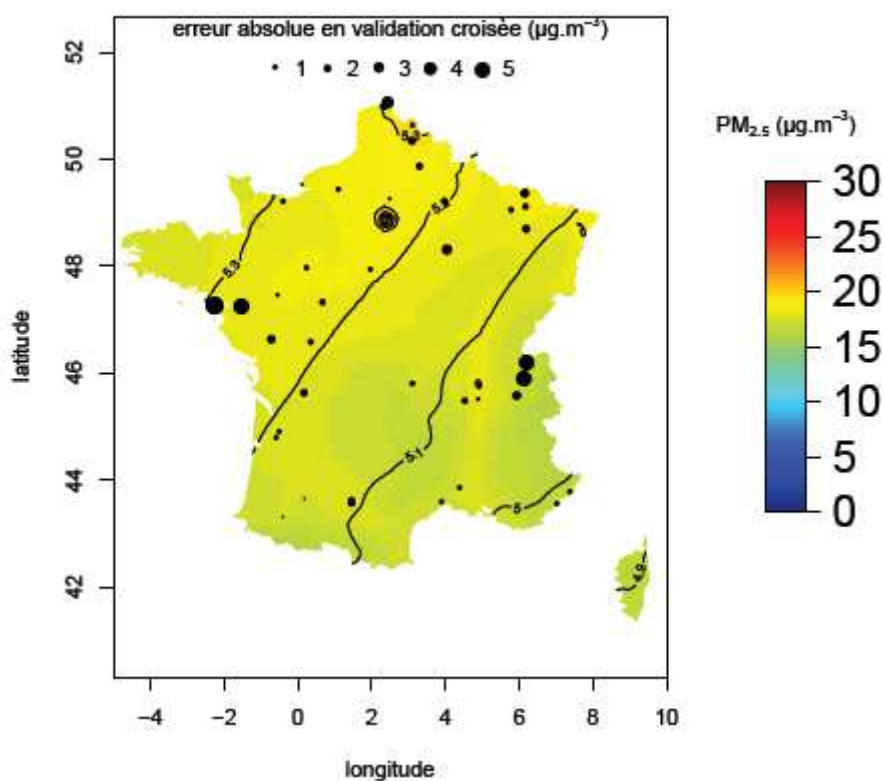


Figure 10 : Variogramme ajusté sur les stations françaises PM_{2.5} rurales, urbaines et périurbaines en 2010 et 2011

Un voisinage glissant a été utilisé pour le krigeage : les 20 stations les plus proches sont utilisées pour estimer la valeur des concentrations. Des tests de sensibilité montrent que les différences entre voisinage glissant et unique sont très faibles sur cette carte. La Figure 11 présente les cartographies analysées des concentrations moyennes annuelles de PM_{2.5} en 2010 et 2011. Les erreurs absolues en validation croisée observées aux stations sont également affichées sur les cartographies ainsi que les isolignes de l'écart-type de krigeage qui fournissent une information sur la précision de la carte obtenue. Plus l'écart-type de krigeage (qui correspond à la racine carrée de la variance de l'erreur de krigeage) est élevé, moins précise est l'estimation. La carte élaborée pour 2010 apparaît ainsi moins fiable que celle construite en 2011. Le gradient de concentration Est-Ouest qui est observé sur les mesures est d'ailleurs nettement moins prononcé sur la carte analysée 2010 que sur la carte 2011. En 2010, seule la concentration moyenne estimée sur le nord de la France est significativement supérieure à la moyenne nationale. Il est possible que les niveaux de concentration observés en 2010, plus faibles que ceux de 2011, et le nombre de mesures disponibles en région Rhône-Alpes en 2010, moins important lui aussi, ne permettent pas de visualiser ce gradient. La variabilité des concentrations de fond y est également moins élevée, ce qui est cohérent avec les observations aux stations fixes.

Carte analysée PM_{2.5} en 2010



Carte analysée PM_{2.5} en 2011

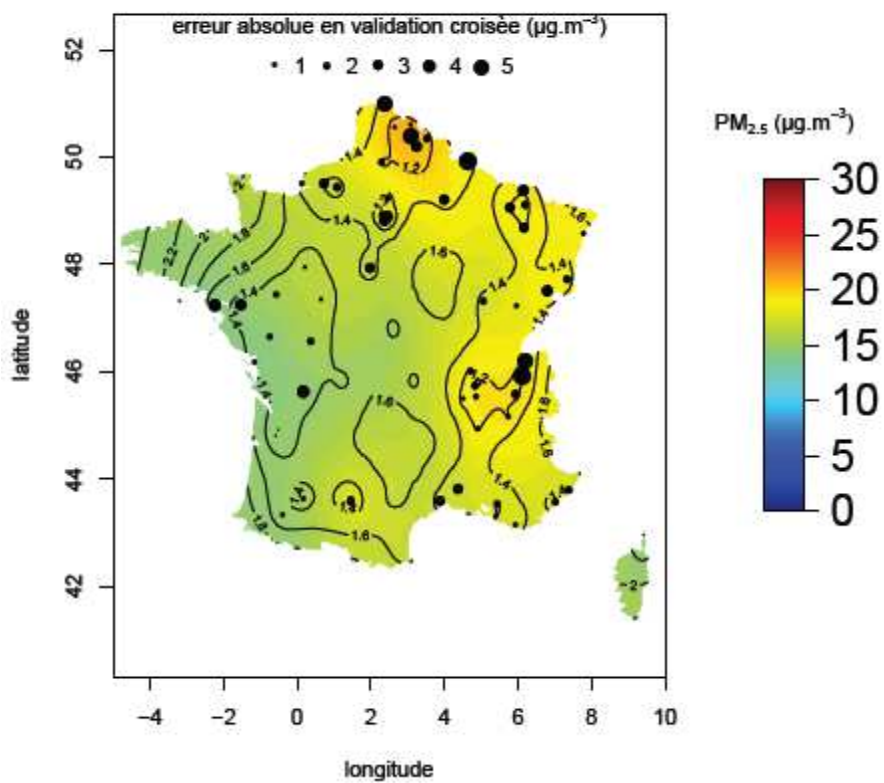


Figure 11 : Carte analysée de PM_{2.5} en 2010 et 2011

Les résultats de validation croisée aboutissent à des erreurs raisonnables pour ce polluant (les nuages de points sont bien dispersés autour de la bissectrice), sauf pour quelques stations (Renvoi à la figure). Ces dernières se situent dans les régions Nord-Pas-de-Calais, Rhône-Alpes et Île-de-France, où la variabilité des concentrations est plus forte que celle observée en moyenne sur le reste de la France, et au sud de la Bretagne, où l'information disponible sur les niveaux de $PM_{2.5}$ est plus limitée.

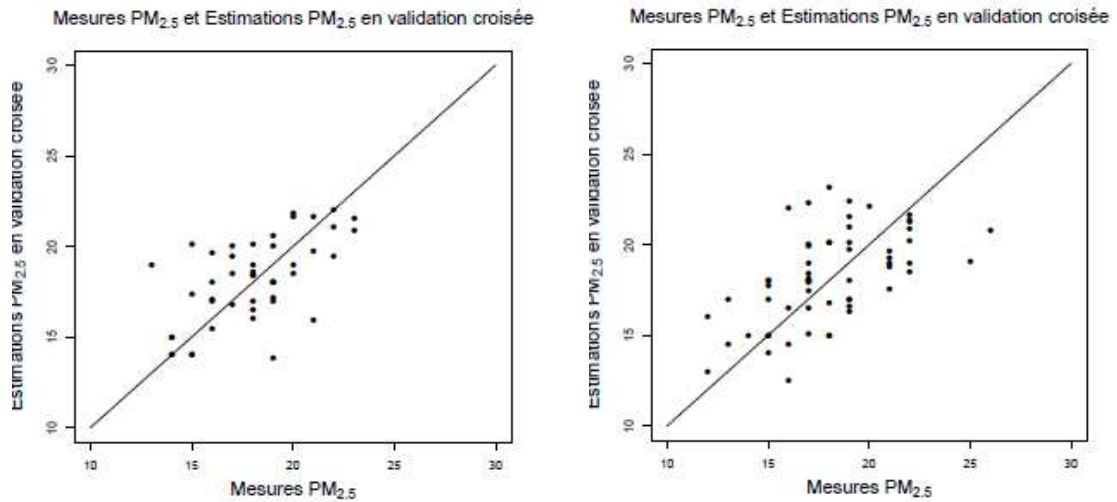


Figure 12 : Mesures de $PM_{2.5}$ et Estimations en validation croisée en 2010 et 2011

4. CORRELATIONS ET RATIOS ENTRE CONCENTRATIONS DE PM_{2.5} ET DE PM₁₀

4.1 RECENSEMENT DES SITES DE MESURE DE PM₁₀

Comme en 2005, les sites de mesure de PM₁₀ sont plus nombreux que les sites PM_{2.5}. Les stations urbaines représentent toujours plus de la moitié des sites et le nombre de stations rurales a été multiplié par trois.

Tableau 5 : Dispositif de mesure des PM₁₀ en 2005 et en 2011

Type de station	2005	2011
Urbain	185	203
Périurbain	48	40
Rural	8	24
Tous types	336	385

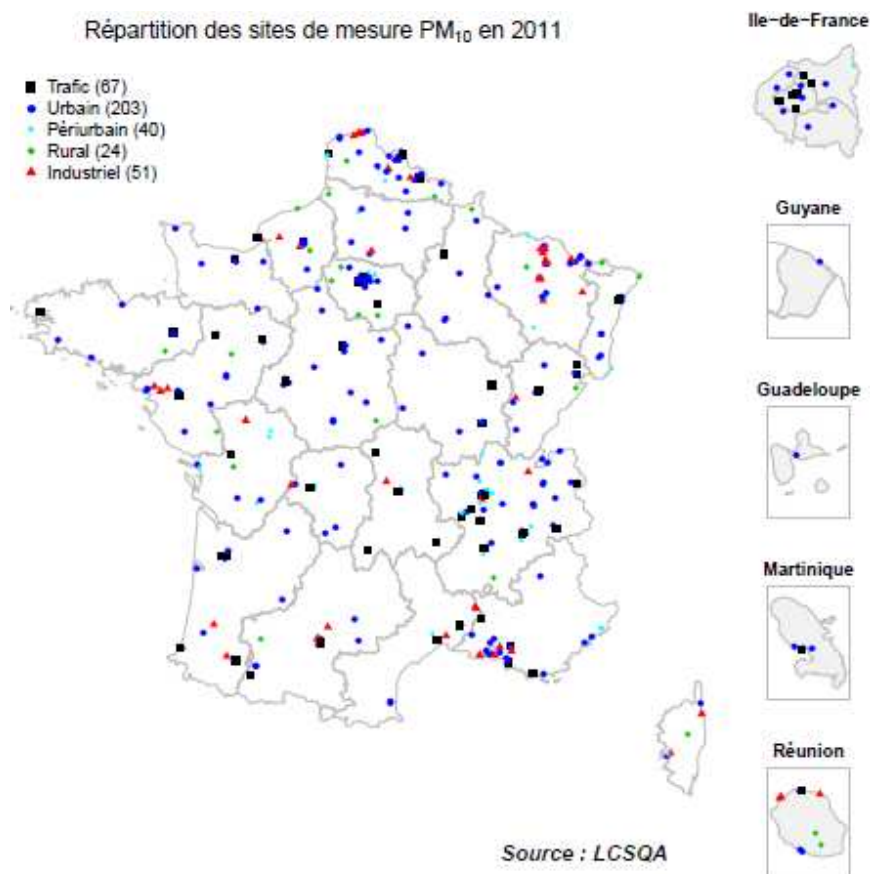


Figure 13 : Répartition des sites de mesure PM₁₀ en 2011

Le réseau de mesure des PM₁₀ est dans l'ensemble plus homogène que celui des PM_{2.5}, notamment dans les régions du centre de la France (Limousin, Bourgogne, Auvergne, Centre).

4.2 STATISTIQUES ELEMENTAIRES SUR LES PM₁₀

Le gradient de concentration d'est en ouest observé sur les PM_{2.5} existe également pour les PM₁₀, mais il est beaucoup moins prononcé. D'après les concentrations moyennes annuelles observées sur les sites de fond, la région la plus impactée en métropole est la région PACA. Le Nord-Pas-de-Calais, l'Île-de-France ainsi que la région Rhône-Alpes présentent aussi des niveaux supérieurs à la moyenne nationale. Les régions de la façade ouest (Pays de la Loire, Poitou-Charente) et du centre (Limousin, Auvergne, Centre) sont les moins exposées.

On note également que les mesures relevées en Lorraine sont significativement plus faibles que celles des autres régions du Nord-Est, ce qui n'était pas le cas pour les PM_{2.5}, la région présentant des concentrations parmi les plus fortes observées en métropole.

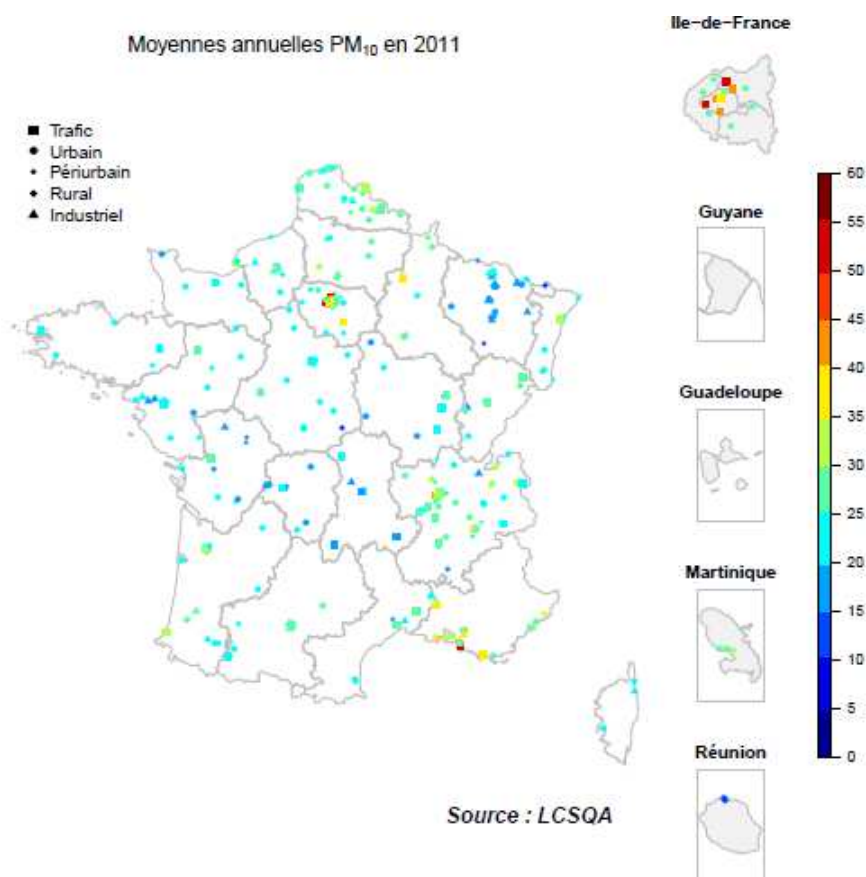


Figure 14 : Moyennes annuelles des concentrations en PM₁₀ en 2011

Les statistiques annuelles par région et par type de station montrent des disparités importantes entre le classement des régions par niveau de fond urbain et le classement par niveau de fond rural.

Enfin, la différence observée entre niveaux de fond et de proximité automobile en Île-de-France est, comme pour les PM_{2.5}, plus grande que dans les autres régions. La différence notable également constatée en Martinique est liée à la station Renéville de Fort-de-France, station implantée à proximité d'un axe à trafic dense.

Il faut aussi noter que pour plusieurs régions (Nord-Pas-de-Calais, Bourgogne, Bretagne, Centre, Auvergne), aucun signal associé au trafic n'est mis en évidence ; les concentrations sont équivalentes aux concentrations urbaines. Cela peut être dû au nombre de stations trafic éventuellement réduit, ce qui fragilise l'analyse.

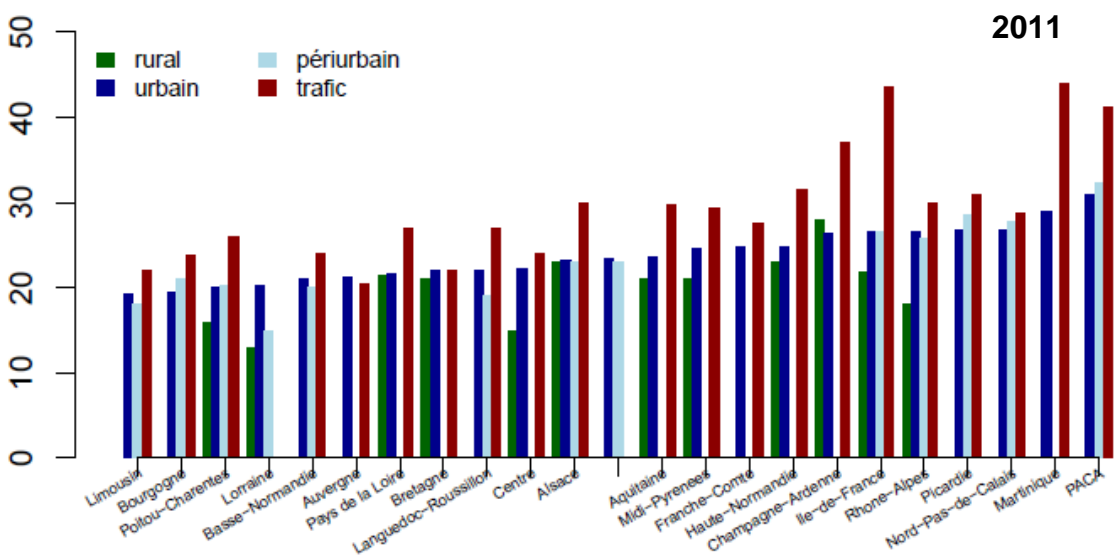
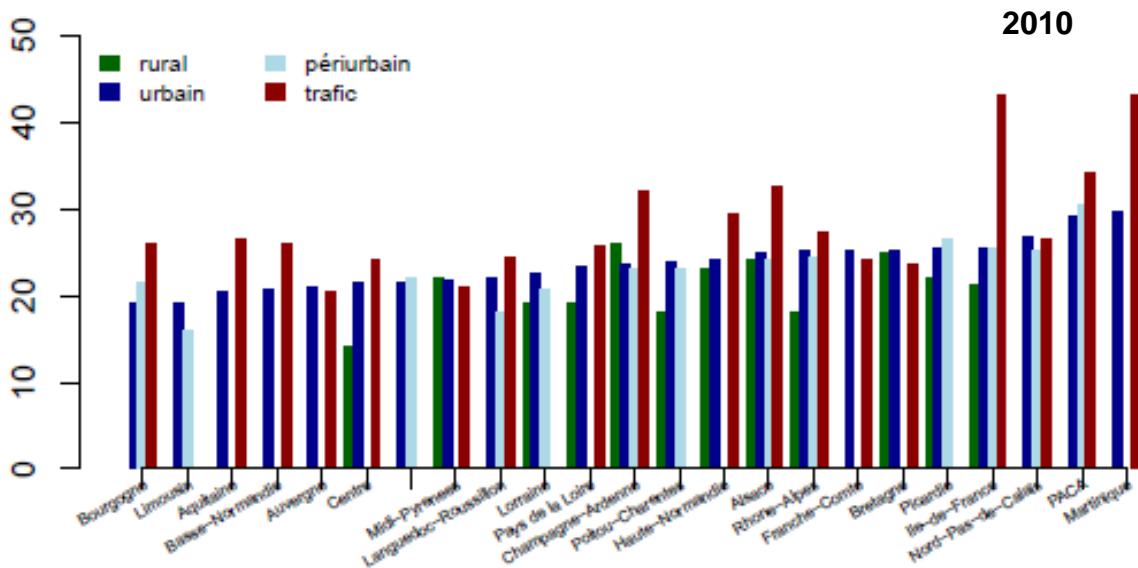
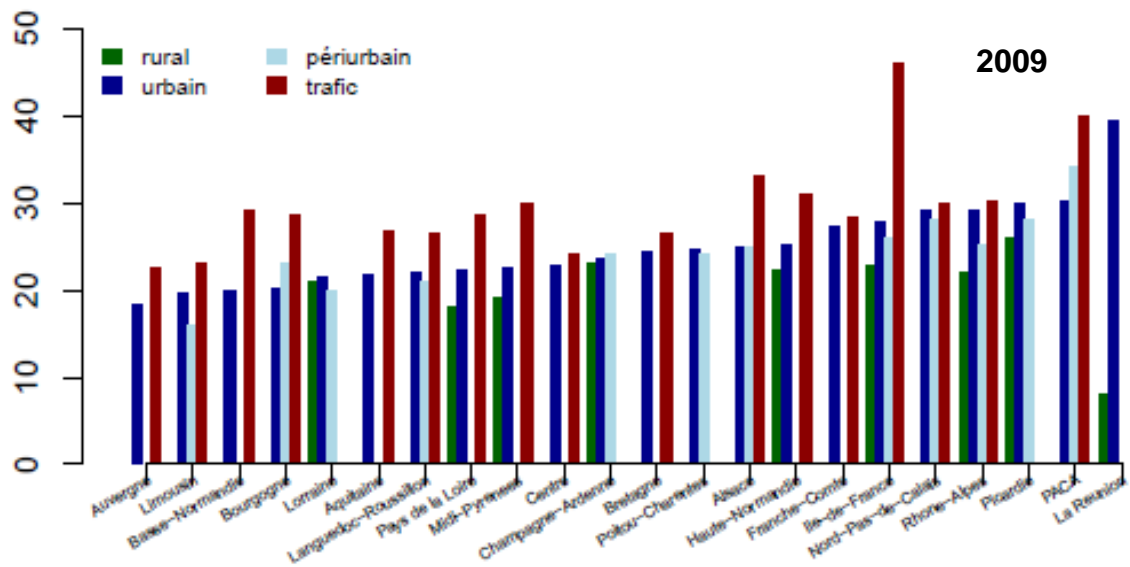


Figure 15 : Statistiques PM₁₀ par région entre 2009 et 2011

4.3 ETUDE DES LIENS ENTRE $PM_{2.5}$ ET PM_{10}

La comparaison entre les concentrations moyennes horaires de $PM_{2.5}$ et de PM_{10} s'effectue ici au moyen du rapport $PM_{2.5}/PM_{10}$.

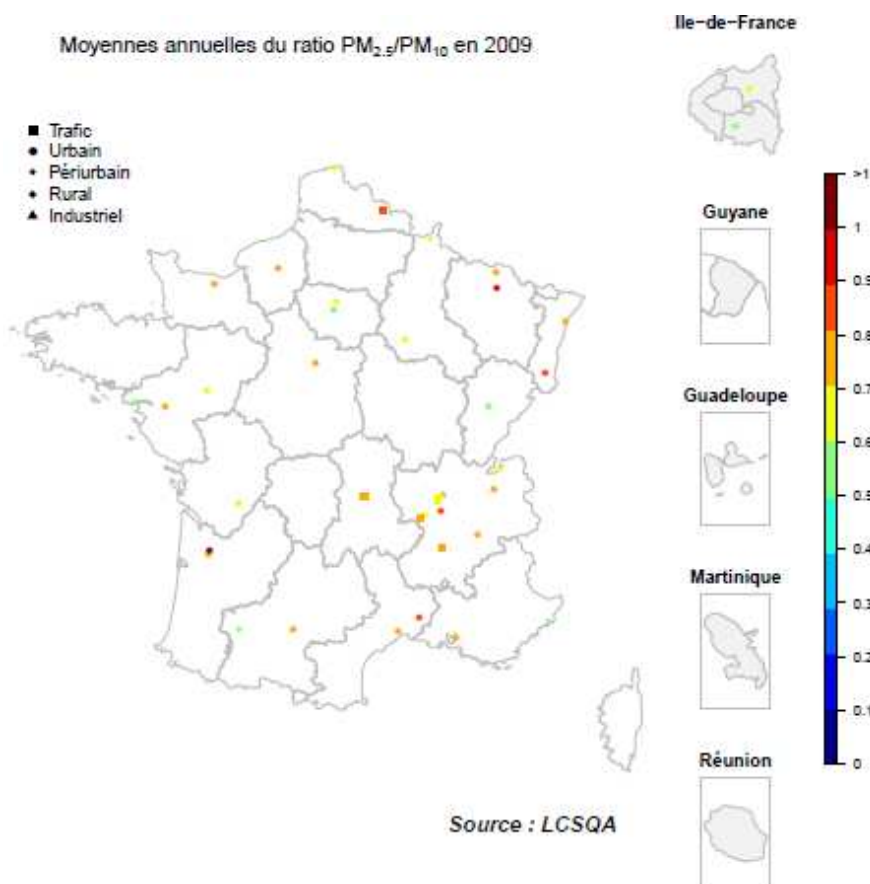
4.3.1 ETUDE EN MOYENNE ANNUELLE

La Figure 15 cartographie le rapport $PM_{2.5}/PM_{10}$ en moyenne annuelle pour les années 2009 à 2011.

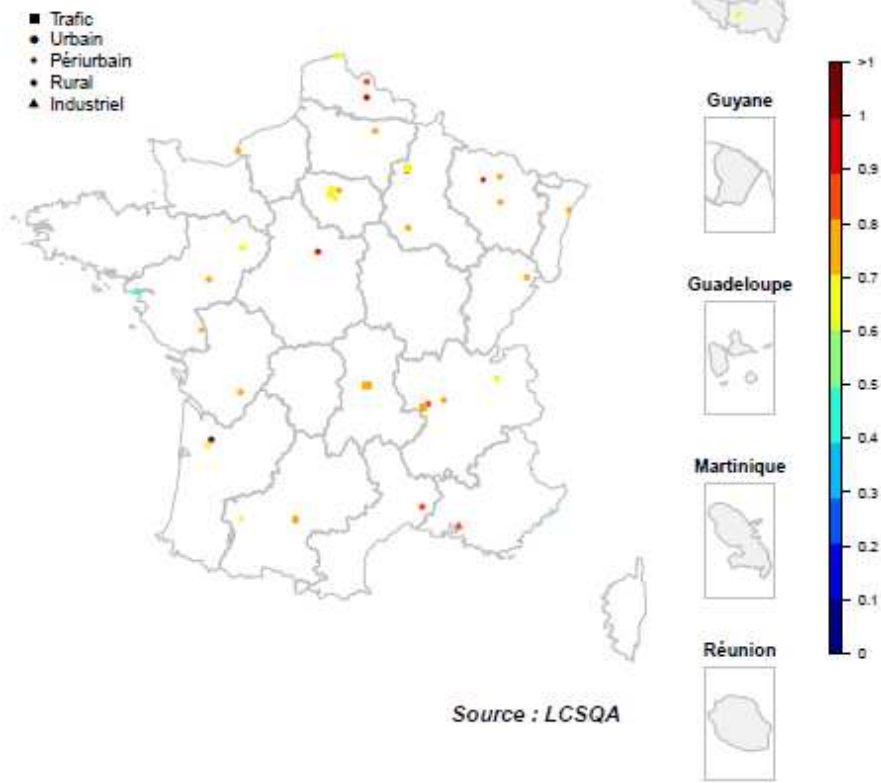
Les situations sont assez variées mais il semble tout de même que l'Est de la France présente dans son ensemble des ratios plus élevés qu'à l'Ouest, à l'exception de certains sites, notamment en Languedoc-Roussillon (Floirac-Bordeaux: 97% en 2010) et en Midi-Pyrénées (Les Carmes – Perpignan : 93% en 2011).

Lorsque le ratio est proche de 1, la majeure partie des PM_{10} est constituée par des $PM_{2.5}$ ce qui explique l'atténuation de la tendance Ouest-Est entre les niveaux de concentration observés en PM_{10} et ceux observés en $PM_{2.5}$.

Comme cela avait déjà été montré dans la précédente étude, les séries temporelles du rapport $PM_{2.5}/PM_{10}$ montre que ce dernier est très variable dans le temps. La Figure 16 montre de plus la relation entre le rapport $PM_{2.5}/PM_{10}$ calculé en moyenne sur l'été et celui calculé en moyenne sur l'hiver : presque partout, ce ratio est plus élevé en hiver qu'en été. En effet, les phénomènes de resuspension sont plus importants en été, par ailleurs les particules fines primaires émises par les activités de chauffage ainsi que les particules secondaires inorganiques sont produites en quantité moindre en été.



Moyennes annuelles du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ en 2010



Moyennes annuelles du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ en 2011

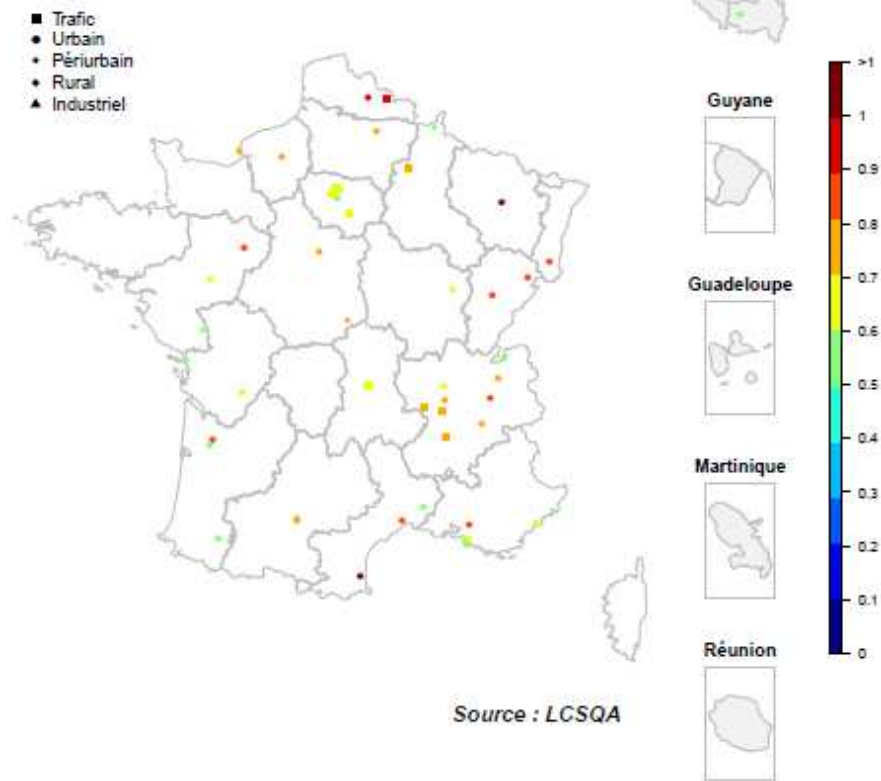


Figure 16 : Moyennes annuelles du rapport $PM_{2.5}/PM_{10}$ entre 2009 et 2011

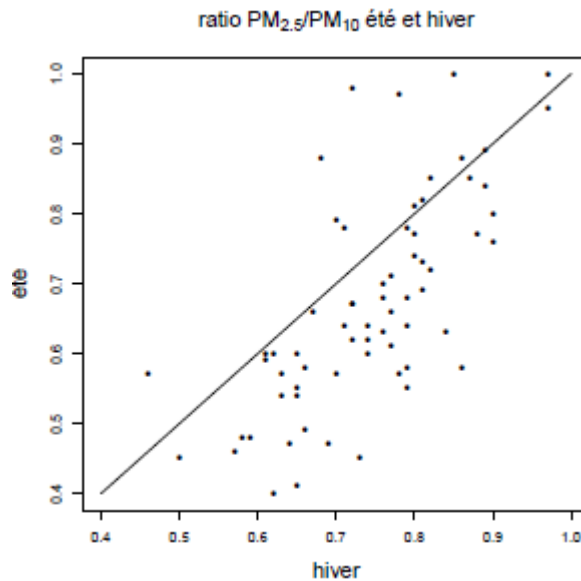


Figure 17 : Nuage de points Ratio Hiver (abscisse) et Ratio Eté (ordonnée) en 2011

Comme pour les $PM_{2.5}$, il ne se dégage pas de tendances significatives entre 2007 et 2011, quelle que soit la typologie de station. La différence entre le rapport calculé en moyenne sur des sites urbains et celui calculé sur des sites trafic est toujours inférieure ou égale à 5%.

Evolution des moyennes annuelles du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ entre 2007 et 2011

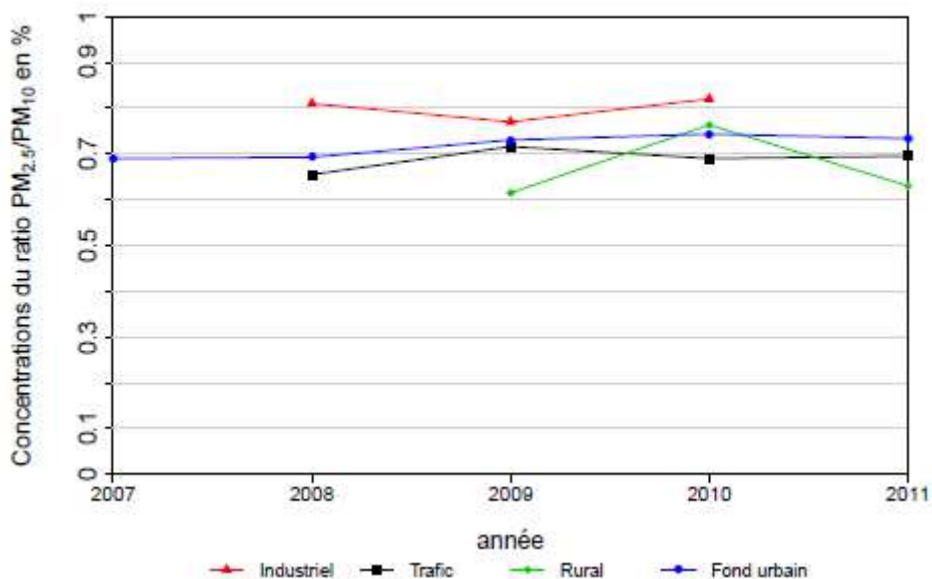


Figure 18 : Evolution du rapport $PM_{2.5}/PM_{10}$ en moyenne annuelle entre 2007 et 2011

4.3.2 ETUDE EN SITUATION D'EPISODE

Cette partie porte plus spécialement sur le rapport $PM_{2.5}/PM_{10}$ en situation d'épisode, lorsque les concentrations moyennes journalières de PM_{10} excèdent $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette analyse est conduite sur les années 2007 à 2011, pour 72 stations équipées de TEOM-FDMS et qui ont, pendant tout ou partie de cette période, délivré simultanément des données de PM_{10} et de $PM_{2.5}$.

Des statistiques du rapport $PM_{2.5}/PM_{10}$ sur les jours de dépassement (période 2007-2011) ont été calculées en chaque station. Le rapport moyen (très proche du rapport médian) est représenté sur la carte ci-après (Figure 19).

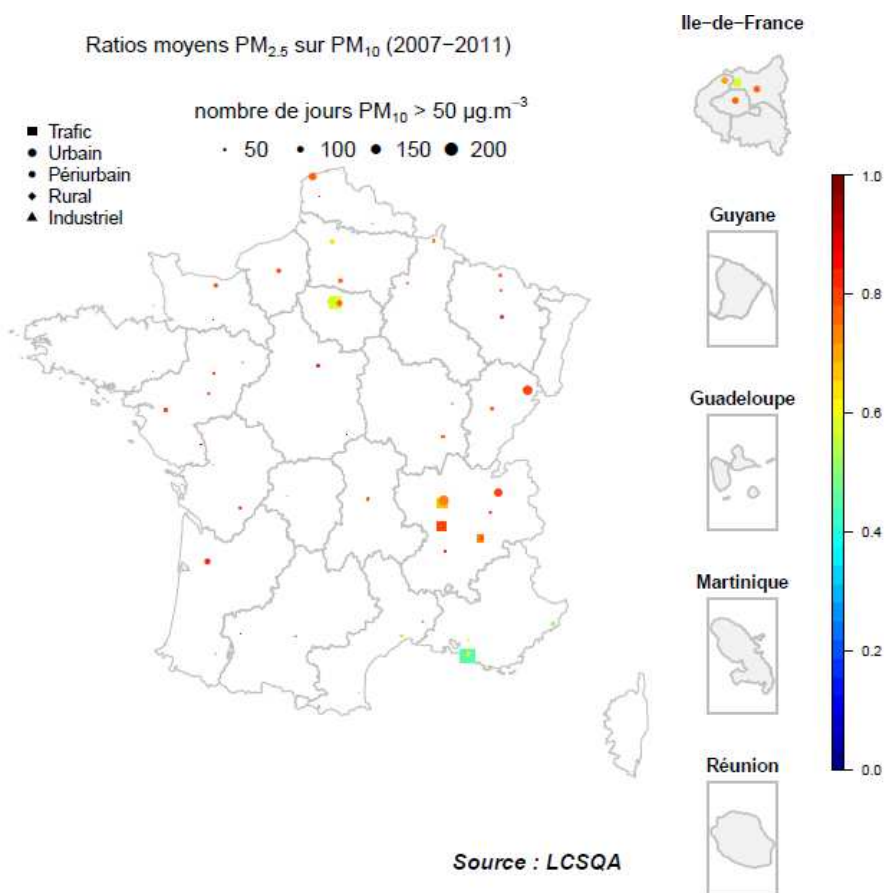


Figure 19 : Moyenne du rapport $PM_{2.5}/PM_{10}$ sur les jours de dépassement (concentration de PM_{10} supérieure à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) entre 2007 et 2011. La taille des points est d'autant plus grande que le nombre de dépassements est plus élevé.

La distribution par station de ce ratio est fournie sous forme de boîte à moustaches (Figure 20).

Le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ mesuré sur les sites de fond durant les jours de dépassement varie le plus souvent entre 60% et 100%, avec un ratio médian compris entre 70% et 90% pour une majorité de stations. Alors qu'en moyenne sur l'année et sur l'ensemble de la France, les résultats ne diffèrent pas sensiblement d'un type de station à un autre (cf. 4.3.1), dans une même agglomération, la valeur du rapport $PM_{2.5}/PM_{10}$ à proximité du trafic apparaît plus faible qu'en site de fond. Cette différence est significative selon un test de comparaison de moyennes réalisé à l'échelle de l'agglomération⁶. Elle pourrait s'expliquer par la moindre abondance relative des particules fines près du trafic à cause d'un surplus de concentration de particules plus grossière dû à la resuspension. C'est en région PACA que les ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ observés sont les plus bas. Une remise en suspension accrue des PM_{10} du fait d'un climat estival plus sec et la contribution des épisodes de poussières sahariennes aux concentrations de PM_{10} en sont de possibles raisons.

⁶ Clermont-Ferrand, Montpellier, Marseille, Lyon, Grenoble, Paris et sa couronne

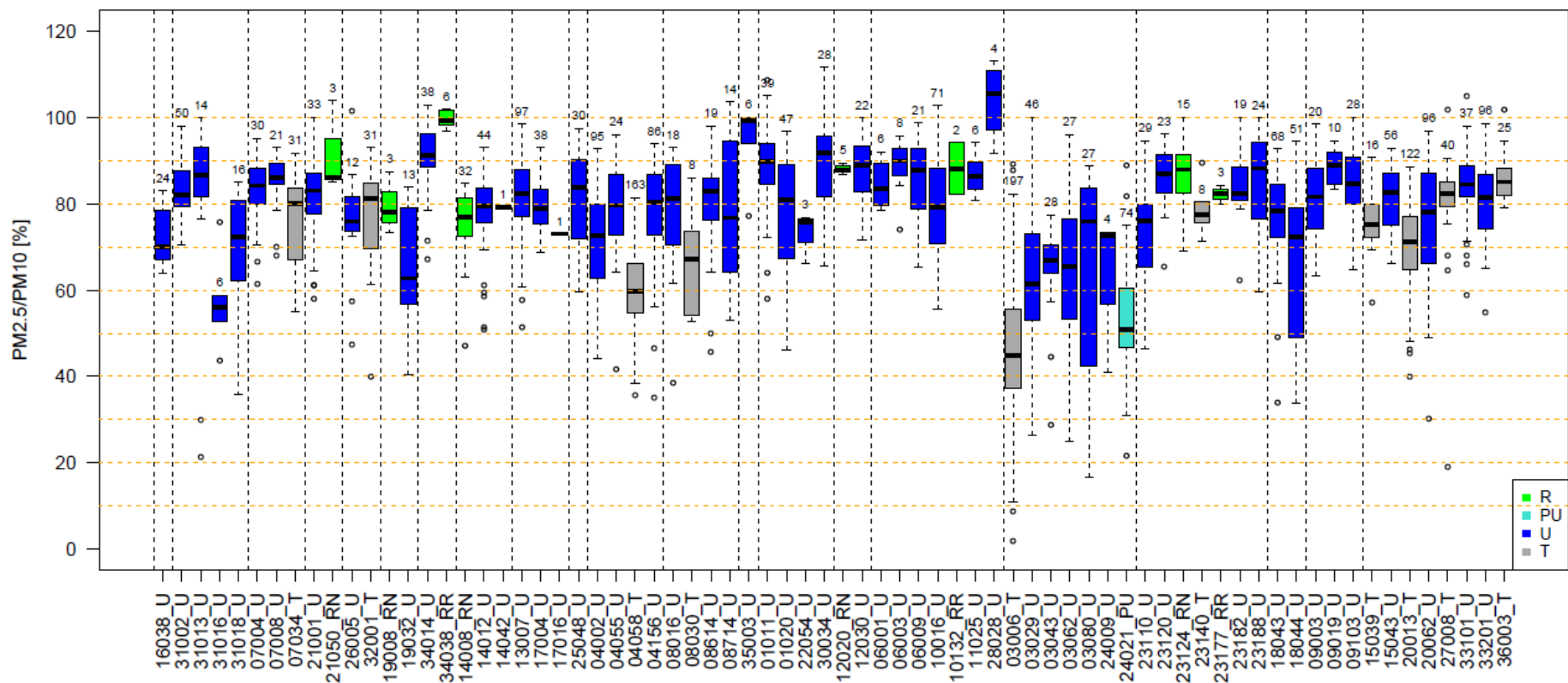


Figure 20 : Distribution du rapport $PM_{2.5}/PM_{10}$ sur les jours où la concentration de PM_{10} est supérieure à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 2007 et 2011.

Chaque boîte à moustaches représente, de bas en haut, le minimum (hors valeurs extrêmes), le premier quartile, la médiane, le troisième quartile, le maximum (hors valeurs extrêmes). Les valeurs qui s'écartent le plus de la distribution sont représentées par des points. Le nombre de données est indiqué en haut de chaque boîte. Les stations sélectionnées sont les stations qui ont, sur tout ou partie de cette période, fourni simultanément des données de PM_{10} et $PM_{2.5}$ par TEOM-FDMS. R=station rurale de fond ; PU=station périurbaine de fond ; U : station urbaine de fond ; T : station de trafic.

Les boîtes à moustaches sont regroupées par région, de gauche à droite : Alsace, Aquitaine, Auvergne, Basse-Normandie, Bourgogne, Bretagne, Centre, Franche-Comté, Haute-Normandie, Île-de-France, Languedoc-Roussillon, Limousin, Lorraine, Midi-Pyrénées, Nord-Pas-de-Calais, PACA, Pays-de-la-Loire, Picardie, Poitou-Charentes, Rhône-Alpes.

5. CONCLUSION

La surveillance des PM_{2.5} s'est significativement développée au cours de ces dernières années, en réponse aux dispositions de la Directive 2008/50/CE pour ce polluant. Entre 2005 et 2011, le nombre de sites de mesure des PM_{2.5} a doublé. Ce développement a été le plus important dans les zones urbaines mais il concerne également les zones rurales et la proximité routière.

Les données de concentration de PM_{2.5} prises en compte dans ce travail sont les mesures effectuées par TEOM-FDMS entre 2007 et 2011. L'exploitation de ces données permet de dresser le bilan suivant :

- En moyenne annuelle, un gradient apparaît entre l'Est et l'Ouest de la France. Des concentrations de PM_{2.5} plus élevées sont observées dans la moitié Est, notamment en certains sites du Nord-Pas-de-Calais et de Rhône-Alpes où elles excèdent 20 µg/m³. Les niveaux de PM_{2.5} en Lorraine sont également assez élevés.
- Les concentrations calculées en moyenne sur la France par année et par typologie de site ne révèlent pas de tendance sur les dernières années. Elles montrent en revanche un accroissement de la concentration entre les sites ruraux et les sites urbains (de 13% à 38% en 2011) et entre les sites urbains et les sites de proximité routière (de 15% à 25% en 2011). Ces statistiques masquent toutefois une variabilité de cet accroissement selon le lieu et la période. Trois couples de stations fond rural/fond urbain situées à moins de 50 km l'une de l'autre et quatre couples de stations fond urbain/trafic distantes de moins de 5 km ont été identifiés. La comparaison des séries pour les trois premiers couples ne fait pas clairement ressortir de signal urbain ; le signal « trafic », plus ou moins prononcé, est compris en moyenne entre 0 et 5 µg/m³.
- Pour les années les plus récentes, le nombre et la répartition spatiale des sites de mesure de PM_{2.5} permettent une exploitation cartographique à l'échelle de la France. Des cartes moyennes annuelles ont été établies par krigeage à partir des concentrations mesurées sur les sites de fond et des données de simulation issues du modèle de chimie transport CHIMERE. Une évaluation par validation croisée conduit à des erreurs raisonnables (inférieures à 5 µg/m³). D'après la carte d'écart-type de krigeage, qui reflète la précision de l'estimation, la carte obtenue pour l'année 2011 est la plus fiable. Elle met en évidence le gradient observé sur les stations de mesure.
- En moyenne sur la France, le rapport moyen annuel entre les concentrations de PM_{2.5} et les concentrations de PM₁₀ est d'environ 70%, quel que soit le type de station. Il est relativement stable d'une année sur l'autre. Des disparités apparaissent cependant entre saisons, avec un ratio plus élevé en hiver. Une étude par station a été réalisée sur les jours de dépassement (les jours où la concentration de PM₁₀ dépasse 50 µg/m³) : le rapport PM_{2.5}/PM₁₀ peut atteindre ou dépasser 80% et dans une même agglomération, il est moindre à proximité du trafic ; des particularités

régionales sont mises en évidence, comme un ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ plus faible en région PACA.

Cet état des lieux pourra être mis à jour en 2015 ou 2016 de manière à confirmer ces observations et disposer d'un historique suffisant pour des études de tendance.

6. REFERENCES

Honoré C., Malherbe 2006. Analyse statistique des données de PM_{2.5} en milieux urbain et périurbain. Rapport LCSQA, réf. INERIS- DRC - MECO-06 - 65022-CHo – LMa – N°206, www.lcsqa.org.

Malherbe L., 2012. Evaluation de l'Indice d'Exposition Moyenne aux PM2.5 (IEM) : règles de sélection des stations de mesure et de calcul de l'IEM. Note LCSQA, réf. DRC-12-126913-14098A, <http://www.lcsqa.org>.

7. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Nombre de sites de mesure par région et par typologie (sites pour lesquels le taux de saisie annuel est d'au minimum 85%)	3
Annexe 2	Situation des sites de mesure de PM _{2.5} entre 2007 et 2008 par rapport à la valeur limite annuelle	1

ANNEXE 1 Nombre de sites de mesure par région et par typologie (sites pour lesquels le taux de saisie annuel est d'au minimum 85%)

Région	Type de station				
	Trafic (T)	Urbain (U)	Périurbain (P)	Rural (R)	Industriel (I)
Alsace	0	2	0	0	0
Alsace	0	1	0	0	0
Alsace	0	2	0	0	0
Aquitaine	0	2	0	0	0
Aquitaine	0	4	0	0	0
Aquitaine	0	3	0	0	0
Auvergne	1	2	0	0	0
Auvergne	1	2	0	0	0
Auvergne	1	1	0	0	0
Basse-Normandie	0	1	0	1	0
Basse-Normandie	0	1	0	0	0
Basse-Normandie	0	0	0	0	0
Bourgogne	0	1	0	0	0
Bourgogne	0	0	0	0	0
Bourgogne	1	1	0	0	0
Bretagne	0	2	0	0	0
Bretagne	0	1	0	0	0
Bretagne	0	0	0	0	0
Centre	0	2	0	0	0
Centre	0	2	0	1	0
Centre	0	2	0	1	0
Champagne-Ardenne	0	2	0	1	0
Champagne-Ardenne	1	2	0	0	0
Champagne-Ardenne	1	1	0	1	0
Corse	0	0	0	0	0
Corse	0	0	0	0	0
Corse	0	0	1	0	0
Franche-Comté	0	2	0	0	0

Région	Type de station				
	Trafic (T)	Urbain (U)	Périurbain (P)	Rural (R)	Industriel (I)
Franche-Comté	0	1	0	0	0
Franche-Comté	0	2	0	0	0
Guadeloupe	0	0	0	0	0
Guadeloupe	0	0	0	0	0
Guadeloupe	0	0	0	0	0
Guyane	0	0	0	0	0
Guyane	0	0	0	0	0
Guyane	0	0	0	0	0
Haute-Normandie	0	2	0	0	0
Haute-Normandie	0	2	0	0	0
Haute-Normandie	0	3	0	1	0
Ile-de-France	1	3	0	0	0
Ile-de-France	1	3	0	0	0
Ile-de-France	3	3	0	0	0
Limousin	0	0	0	0	0
Limousin	0	0	0	0	0
Limousin	0	1	0	0	0
Lorraine	0	2	0	0	0
Lorraine	0	3	0	1	0
Lorraine	0	3	0	1	0
Languedoc-Roussillon	0	3	0	0	0
Languedoc-Roussillon	0	2	0	0	0
Languedoc-Roussillon	0	3	0	0	0
Martinique	0	1	0	0	0
Martinique	0	1	0	0	0
Martinique	0	1	0	0	0
Midi-Pyrénées	0	2	0	1	0
Midi-Pyrénées	0	2	0	1	0
Midi-Pyrénées	0	2	0	1	0
Nord-Pas-de-Calais	1	2	1	0	0

Région	Type de station				
	Trafic (T)	Urbain (U)	Périurbain (P)	Rural (R)	Industriel (I)
Nord-Pas-de-Calais	0	3	1	0	0
Nord-Pas-de-Calais	1	5	1	0	0
PACA	0	1	1	0	1
PACA	0	3	1	0	1
PACA	1	4	1	0	0
Poitou-Charentes	0	3	0	0	0
Poitou-Charentes	0	3	0	0	0
Poitou-Charentes	0	3	0	0	0
Picardie	0	1	0	0	0
Picardie	0	2	0	0	0
Picardie	0	3	0	0	0
Pays-de-la-Loire	0	4	0	0	0
Pays-de-la-Loire	0	4	0	1	0
Pays-de-la-Loire	1	4	0	1	0
Rhône-Alpes	4	9	0	0	0
Rhône-Alpes	3	7	0	0	0
Rhône-Alpes	5	9	0	0	0
Réunion	0	0	0	0	0
Réunion	0	1	0	0	0
Réunion	0	0	0	0	0

ANNEXE 2 SITUATION DES SITES DE MESURES PM_{2.5} ENTRE 2007 ET 2008 PAR RAPPORT A LA VALEUR LIMITE ANNUELLE (à respecter en 2015)

Les cartographies 2007 et 2008 de la situation des sites de mesures PM_{2.5} par rapport à la valeur limite annuelle présentent un nombre de points particulièrement faible. Cela s'explique par le petit nombre de sites permettant à l'époque la mesure de la fraction volatile des particules et par la faible couverture temporelle des stations d'Ile-de-France en 2007.

