



HAL
open science

Évolution de la pollution atmosphérique urbaine dans 13 grandes villes françaises entre 2008 et 2015

Fouad Amrani, Julie Prud'Homme, Cara Maesano, Isabella Annesi-Maesano

► **To cite this version:**

Fouad Amrani, Julie Prud'Homme, Cara Maesano, Isabella Annesi-Maesano. Évolution de la pollution atmosphérique urbaine dans 13 grandes villes françaises entre 2008 et 2015. *Revue des Maladies Respiratoires*, A paraître, 10.1016/j.rmr.2019.09.003 . hal-02353833

HAL Id: hal-02353833

<https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-02353833>

Submitted on 7 Nov 2019

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

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

Evolution de la pollution atmosphérique urbaine dans 13 grandes villes françaises entre 2008 et 2015

Fouad Amrani¹

Julie Prud'homme¹

Cara Maesano¹

Isabella Annesi-Maesano¹

¹Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, INSERM, Institut Pierre Louis d'Epidémiologie et de Santé Publique (IPLESP UMRS 1136), Epidémiologie des Maladies Allergiques et Respiratoires (EPAR), Faculté de Médecine Saint-Antoine, 75012 Paris, France

Correspondance :

Dr Isabella Annesi-Maesano

Equipe EPAR, IPLESP, INSERM et Sorbonne Université, Faculté de Médecine Saint-Antoine, 27 rue Chaligny, 75012 Paris, France

Tél : +33144738449

Fax : +33144738454

Isabella.annesi-maesano@inserm.fr

Déclaration de liens d'intérêts :

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Résumé en français : Article de recherche original « Evolution de la pollution atmosphérique urbaine en France métropolitaine entre 2008 et 2015 »

CONTEXTE : La pollution atmosphérique est un enjeu majeur de santé publique et constitue une préoccupation majeure en France et dans le monde. Preuve en est que la pollution de l'air est l'une des 1^{ères} préoccupations environnementales des français. Le but de cette étude fut d'établir un suivi des concentrations réelles observées de différents polluants atmosphériques au sein de grandes villes de France.

METHODE : Pour 13 grandes villes de France Métropolitaine nous avons récolté les données de stations de mesures auprès des agences de Surveillances de la Qualité de l'Air pour différents polluants : NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}. A l'aide de ces données nous avons produit des séries temporelles mensuelles de ces polluants en couvrant la période 2008-2015. Nous avons également calculé les pentes de ces séries temporelles de même que les coefficients de corrélation.

RESULTATS : Les résultats ne montrent pas de tendances franches à la diminution mais plutôt à la stagnation pour les polluants considérés. Notre travail démontre donc que la surveillance et la prise de mesures dans le sens de la réduction de la pollution de l'air doivent être accrues.

Mots-clés : Evolution, Pollution de l'air, France Métropolitaine, Urbaine, Surveillance de la qualité de l'air

Nombre de mots : 184

Abstract in English: Evolution of urban air pollution in metropolitan France between 2008 and 2015

BACKGROUND: Air pollution is a major public health issue and is a major concern in France and around the world. Proof of this is that air pollution is one of the first environmental concerns of the French. The purpose of this study was to establish a monitoring of the actual observed concentrations of different atmospheric pollutants in major French cities.

METHOD: For 13 major cities in Metropolitan France, we collected data from measurement stations from Air Quality Monitoring agencies for various pollutants: NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}. Using these data we have produced monthly time series of these pollutants covering the period 2008-2015. We also calculated the slopes of these time series as well as the correlation coefficients.

RESULTS: The results do not show trends that are prone to decrease but rather to stagnate for the air pollutants considered. Our work therefore indicates that monitoring and taking steps to reduce air pollution must be increased.

Introduction

Il est maintenant bien connu que la pollution atmosphérique a des effets délétères à court et à long terme sur la santé respiratoire [1]. Un certain nombre de publications affirme que la qualité de l'air s'est améliorée dans les pays industrialisés ces dernières années, ce qui permet d'envisager une réduction des impacts sanitaires de la pollution atmosphérique. De nombreuses études présentées dans la littérature se basent sur les émissions des polluants de l'air qui sont estimées de façon théorique en sommant les quantités en tonnes de polluants rejetés dans l'atmosphère par les activités humaines ou par des sources naturelles [2].

Le but de notre travail était de décrire l'évolution de la pollution atmosphérique entre 2008 et 2015 au sein de 13 villes de la France Métropolitaine en considérant les concentrations des principaux polluants atmosphériques mesurées de façon objective par les différentes stations de monitoring de la qualité de l'air.

Les polluants de l'air considérés dans cette étude sont ceux permettant de caractériser de façon globale la qualité de l'air par l'intermédiaire de l'indice ATMO et qui sont surveillés de façon réglementaire, notamment le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone (O₃) et les particules (Particulate Matter - PM - en anglais) de taille inférieure à 10 µm (PM₁₀) et 2,5 µm (PM_{2.5}).

Matériel et méthodes

Nous avons retenu pour cette étude 13 villes de la France Métropolitaine de plus de 100 000 habitants présentant une répartition homogène sur le territoire : Lille, Rouen, Rennes, Le Havre, Strasbourg, Paris, Tours, Lyon, Grenoble, Clermont-Ferrand, Bordeaux, Toulouse, Marseille.

La période de suivi comprenait environ 8 années et s'étendait du mois de janvier 2008 au mois d'avril 2015. Cette période a été choisie afin de prendre en compte la modification de la méthode de mesure des PM₁₀ en janvier 2007. Les données d'exposition aux polluants atmosphériques choisis, à savoir NO₂, O₃, PM₁₀ et PM_{2.5}, ont été colligées auprès des Associations agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) en France Métropolitaine. A noter que les PM_{2.5} étaient disponibles seulement pour un nombre réduit de stations, (32 pour l'ensemble des villes de l'étude). Nous avons considéré les sites de mesure provenant de stations urbaines de fond, des stations périurbaines (comprenant les stations rurales) et des stations de mesures à proximité du trafic.

Sur le plan de l'analyse statistique, pour commencer, pour chaque polluant atmosphérique et chaque ville nous avons estimé la moyenne, le minimum, le maximum et la médiane des concentrations pour la période considérée de façon à pouvoir comparer les niveaux mesurés entre les villes.

Ces concentrations ont été comparées lorsque cela était possible aux valeurs limite fixées par l'Union Européenne et aux valeurs guides recommandées par l'Organisation Mondiale de la santé (OMS) : Dioxyde d'azote (NO₂) - moyenne annuelle 40µg/m³ ; Ozone (O₃) – 100 µg/m³ sur 8 heures consécutives ; Particules fines de diamètre inférieur ou égal à 10

micromètres (PM₁₀) – moyenne annuelle 20µg/m³ ; Particules fines de diamètre inférieur ou égal à 2.5 micromètres (PM_{2.5}) – moyenne annuelle 10µg/m³.

Ensuite, pour chaque polluant atmosphérique et chaque ville, des séries temporelles renseignant les moyennes mensuelles des concentrations mesurées en microgrammes par mètre cube (µg/m³) entre 2008 et 2015 ont été bâties afin d'étudier la tendance sur la période considérée.

Pour cela nous avons résumé l'évolution des concentrations par une droite établie sur l'ensemble des valeurs au cours de la période et estimé le coefficient de détermination R². Le R², carré du coefficient de corrélation linéaire, correspond également à la proportion de la variance expliquée par le modèle et mesure l'adéquation entre le modèle issu d'une régression linéaire simple et les données observées qui ont permis de l'établir. Les pentes des droites de régression linéaire ont été calculées afin de déterminer la nature de la tendance le long de la série temporelle.

Résultats

Comme attendu, les valeurs des concentrations des principaux polluants atmosphériques variaient d'une ville à l'autre pour la période considérée.

Par ailleurs, celles-ci dépassaient souvent les valeurs guides de l'Union Européenne ainsi que de l'OMS (Tableau 1).

Les médianes les plus élevées pour le NO₂ étaient observées à Paris (concentration médiane de 77 µg/m³ à proximité du trafic). La ville de Toulouse détenait la valeur médiane maximale pour l'Ozone. On retrouvait à Marseille et à Grenoble les plus hautes médianes observées pour les PM₁₀ et les PM_{2.5}. Les minimums, moyennes et maximums étaient également très variables d'une ville à une autre (Tableaux 1, 2, 3 et 4).

Aucune diminution notable n'était constatée en ce qui concerne les concentrations moyennes des polluants atmosphériques considérés pour la période entre janvier 2008 et avril 2015 (Fig. 1 à 3). Les pentes des droites de régression linéaires calculées pour tous les polluants ne dépassaient guère 0.01 en valeur absolue, indiquant ainsi qu'il n'y avait pas de tendance franche à la diminution mais plutôt à la stagnation pour la plupart des polluants considérés, les R² sont fournis à titre indicatif et présentaient une tendance similaire aux coefficients de pente (Tableaux 5, 6, 7 et 8).

Plus de détails sont montrés ci-dessous dans la présentation des résultats par polluant.

Dioxyde d'azote

Dans le cas des stations de fond urbaines, les concentrations de NO₂ ne semblaient pas diminuer tout au long de la période considérée et variaient en fonction des villes (Figure 1).

Les concentrations moyennes les plus élevées observées s'étendaient du mois de décembre à mars, mois durant lesquels des pics de pollution sont fréquemment observés dans les grandes agglomérations. Les niveaux de concentrations les plus bas étaient observés à Rennes ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et les plus importants à Paris où les concentrations dépassaient $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La moyenne annuelle guide fixée de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par l'OMS et suivie par l'Union Européenne était dépassée certains mois de l'année dans les villes de Paris, Lyon, Marseille, Grenoble et Tours (Figure 1).

Une tendance similaire était observée lorsque l'on considère les stations de mesures situées à proximité d'une zone de trafic (Fig. 2). Les niveaux de concentrations observés en NO_2 semblaient rester constants dans les 13 villes de l'étude entre janvier 2008 et avril 2015. Une différence notable avec les stations urbaines était que les niveaux observés étaient beaucoup plus élevés dans les zones de type trafic, jusqu'à $102 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mesurés à Paris. Pratiquement toutes les villes concernées par cette étude dépassaient la concentration limite de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le NO_2 fixée par l'Union Européenne et l'OMS le long des stations trafic.

Ozone

Les concentrations d' O_3 mesurées en milieu de fond urbain présentaient une même tendance et ce quelle que soit la ville considérée (Fig. 1). Les concentrations moyennes les plus faibles étaient observées à Paris. Les valeurs les plus élevées à Toulouse, Marseille et Lyon. Les pics d' O_3 étaient observés entre le printemps et l'été lors de périodes de fort ensoleillement. Aucun changement notable dans les niveaux des concentrations d' O_3 n'était à signaler entre 2008 et 2015. Comme attendu, on trouvait de l' O_3 en zone périurbaine ou rurale (Fig. 3). Strasbourg était la ville la moins polluée (min= $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et médiane= $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Les villes de Toulouse, Le Havre et Marseille étaient les plus concernées par la pollution par l'ozone ; les valeurs médianes y étaient comprises entre 54 et $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La valeur maximale de $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a été atteinte dans la ville de Toulouse.

PM₁₀

Au sein des stations de mesure urbaines de fond les concentrations moyennes en PM_{10} s'échelonnaient entre $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (pour la ville de Rennes) et $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la ville de Marseille. Les villes de Clermont-Ferrand et Rennes étaient les moins polluées (médiane= $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$). La valeur limite annuelle fixée par l'Union Européenne était dans l'ensemble respectée par la plupart des villes (Fig. 1). On assistait toutefois à des dépassements lors des épisodes de pollutions hivernaux dans les villes de Grenoble, Rouen, Toulouse, Paris, Marseille, Lille et Strasbourg. Par contre la valeur guide fixée par l'OMS de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ était dépassée durant presque toute la période de suivi entre 2008 et 2015. Lorsque l'on considère les stations de mesure à proximité du trafic, les dépassements de la valeur limite fixée par l'Union Européenne sont plus fréquents (Fig. 2). De même pour les stations urbaines et même davantage, la concentration de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ n'était presque jamais respectée.

Particules fines (PM_{2.5})

Les données ne montraient pas de diminution des concentrations en $PM_{2.5}$ (Tableau 8) avec des valeurs dépassant dans certaines villes la norme européenne (fixée à $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) à certaines périodes de l'année à la fois au niveau de la pollution de fond (Fig. 1) et de proximité (Fig. 2). Nous constatons cependant une diminution des niveaux de particules fines au sein des villes de Lyon et Strasbourg. En effet, les pics de pollution semblaient moins intenses par rapport à ceux observés entre 2008 et 2011. En terme de médiane et de maximum, les villes de Strasbourg et Lyon (stations urbaines) et de Grenoble (stations proximité trafic) présentaient les niveaux les plus élevés (concentration médiane= $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et max= $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Rennes est la ville de notre échantillon où les concentrations mesurées étaient les plus faibles (concentration médiane $10\text{-}12 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En revanche, la valeur limite recommandée par l'OMS pour ces mêmes particules ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) n'était pas respectée quelle que soit la ville considérée.

Discussion

Bien qu'en termes de concentrations les niveaux de certains polluants atmosphériques comme le plomb et le dioxyde de soufre aient diminué de façon significative ces dernières décennies en France, les niveaux observés d'autres polluants comme le dioxyde d'azote, l'ozone et les particules fines dans les 13 villes de plus de 100 000 habitants considérées dans notre travail ne diminuaient pas de façon significative entre 2008 et 2015 et demeuraient préoccupants. Ceci est observé à la fois pour les concentrations de fond et celles de proximité.

Dans le cas des PM_{10} , la France ne respecte pas les valeurs limites dans plusieurs agglomérations notamment Paris, Lyon, Grenoble et Bordeaux. En 2015, la France, tout comme l'Allemagne, l'Espagne, la Hongrie, l'Italie, la République tchèque, la Roumanie, le Royaume-Uni et la Slovaquie, a d'ailleurs été assignée en justice par la Commission Européenne pour non-respect de la directive européenne 2008/50/CE en regard des niveaux de PM_{10} mesurés. Cette directive impose une valeur limite journalière de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} ainsi que 35 jours de dépassements autorisés par an. De 2009 à 2011, la Commission Européenne a envoyé plusieurs avertissements à la France suite au non-respect des normes de dépassement pour les particules fines PM_{10} . Une mise en demeure lui a été adressée en 2013. Enfin, en 2015, la France a reçu un premier avis motivé de la part de l'UE. Dix zones géographiques étaient concernées : Douai-Béthune-Valenciennes, Grenoble, Lyon, Marseille, Nice, Paris, Toulon, les zones urbaines des régions PACA et Rhône-Alpes, ainsi que la Martinique. La Commission Européenne a également reproché à la France de ne pas respecter les seuils réglementaires d'émission de dioxydes d'azote (NO_x), fixés par la réglementation européenne en 2010. Un avis motivé de la Commission a été émis au mois de février 2017. 13 zones géographiques étaient concernées : Clermont-Ferrand, Grenoble, Lyon, Marseille, Montpellier, Nice, Paris, Reims, Saint-Etienne, Toulon, Toulouse et la vallée de l'Arve. En revanche, la France respectait la réglementation européenne limitant le taux des particules les plus fines $PM_{2.5}$ (concentration limitée à $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Il est prévu que cette limite soit abaissée à $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2020 auquel cas il sera fort probable que la France soit sujette à des dépassements.

La pollution atmosphérique demeure le plus grand risque écologique et sanitaire pour la santé en Europe. De plus, il a été démontré que la pollution atmosphérique induit un coût estimé entre 1 à 2 milliards d'euros chaque année lorsque l'on considère les 5 pathologies respiratoires les plus fréquentes (Rafenberg et al. 2015). Cette évaluation sous-estimerait le coût total car prenant en compte uniquement les coûts directs d'une partie des pathologies associées à la pollution atmosphérique. La France gagnerait donc à renforcer la surveillance des polluants atmosphériques. Dans le cas des particules fines, les PM_{2.5}, le gouvernement fixe un objectif de concentration à respecter de 10 µg/m³ dès l'horizon 2030, correspondant à la valeur limite recommandée par l'OMS pour les particules fines.

Les observations faites en France sont similaires à celles d'autres pays comme rapporté par l'Agence Environnementale Européenne en 2016[5]. De même qu'en France, de nombreux dépassements de la norme des concentrations en PM₁₀ fixée par l'Union Européenne se sont produits en 2014 d'après la base de données de la qualité de l'air en Europe (Air Quality e-Reporting Database, EEA, 2016a).

Bien évidemment, nous ne pouvons pas considérer notre investigation comme représentative. Tout d'abord nous n'avons considéré que 8 années. Cependant, les études longitudinales ont montré qu'une tendance pouvait être dégagée à partir de la 5^{ème} année de suivi. Par ailleurs, il était important de prendre en compte la nouvelle méthodologie de mesure des particules fines. Ensuite le nombre de villes est limité. Ces villes ne représentent qu'une partie de la France mais elles couvrent le territoire national pour un total de 5 768 844 habitants. Par ailleurs, le nombre total de stations peut être critiqué notamment en termes de stations de proximité qui sont peu nombreuses. Enfin, la représentativité des stations de mesurage de la qualité de l'air a été établie dans le passé et il faudrait en faire un contrôle de qualité. Dans le cas des particules fines (PM_{2.5}), les données comportaient un grand nombre de données manquantes ce qui nous incite à être prudents. De plus, il est à signaler que ces particules restent peu surveillées en France alors que les PM_{2.5} sont davantage dangereuses que leurs homologues de taille plus grande, les PM₁₀. En effet, les PM_{2.5} augmentent le risque de pathologies respiratoires mais aussi d'autres pathologies par le biais des alvéoles pulmonaires où ont lieu les échanges gazeux avec le sang. Dans notre étude seulement 32 stations les mesuraient et souvent des données étaient manquantes.

En dépit des critiques éventuelles, notre étude est la première à considérer des concentrations de polluants atmosphériques mesurées de façon objective, par des stations de mesures homologuées sur une période si longue et à une large échelle spatiale.

Notre étude indique que la pollution de l'air ne diminue pas de façon significative quelle que soit le type de station considérée (urbaine, périurbaine ou de proximité trafic). Ceci est d'autant plus vrai pour les stations de proximité, ce qui augmente les effets adverses de la pollution atmosphérique pour les personnes qui habitent dans leurs alentours. La pollution atmosphérique reste un enjeu de santé publique majeur en France. La surveillance et la prise de mesures dans le sens de la réduction de cette nuisance doivent être accrues.

Remerciements

Nous tenons à remercier les Agences Nationales de la Qualité de l’Air pour nous avoir fourni les données de pollution de l’air : AirAQ, ATMO Auvergne, ATMO Midi Pyrénées, ATMO Rhône-Alpes, Air Normand, ATMO Nord Pas de Calais, Airparif, Air PACA, Air Breizh, ASPA et Lig’Air.

Références

[1] Charpin D, Paireon JC, Annesi-Maesano I et al. [Outdoor pollution and its effects on lung health. Expert document from the groupe pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogeniques (PAPPEI) of the Societe de pneumologie de langue francaise (SPLF)]. Rev Mal Respir. 2016;33(6):484-508.

[2] CITEPA, édition mars 2017. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France métropolitaine, format CEE-NU

[3] Pascal, M., Corso, M., Chanel, O. et al. (2013). Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities: results of the Aphekom project. Sci. Total Environ. 449, 390–400.

[4] Rafemberg C., Dixsaut G., Annesi-Maesano I. (2015) Evaluation of the cost of air pollution to the French health care system. Environnement, Risques & Santé Volume 14, issue 2

[5] Air quality in Europe-2016 report THAL16127ENN_Air_quality_in_europe_report_2016.pdf
<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2016>

Tableau 1 : Indicateurs de dispersions (Minimum, Maximum, Moyenne, Médiane) pour le polluant NO₂ en µg/m³ entre janvier 2008 et mars 2015 selon le type de station. Les valeurs les plus basses pour chaque série de villes sont indiquées en gris, les plus élevées en gras.

NO ₂	Min	Max	Moyenne	Médiane	Min	Max	Moyenne	Médiane
<i>Stations de fond</i>					<i>Stations de proximité</i>			
Bordeaux	9	37	20	20	20	63	36	36
Lille	13	51	28	28	19	63	37	36
Lyon	17	63	32	32	44	89	61	61
Marseille	21	51	34	33	45	81	63	62
Rennes	5	36	18	19	23	54	38	38
Strasbourg	15	57	28	28	34	80	54	54
Clermont-Ferrand	11	49	25	24	22	66	39	39
Grenoble	10	48	25	23	38	71	52	51
Le Havre	11	42	22	22	22	58	41	41
Paris	22	56	39	40	51	102	77	77
Rouen	15	43	27	27	30	67	46	47
Toulouse	10	36	22	22	46	84	63	62
Tours	8	33	17	17	27	67	44	45

Tableau 2 : Indicateurs de dispersions (Minimum, Maximum, Moyenne, Médiane) pour le polluant O₃ (exprimé en µg/m³) entre janvier 2008 et mars 2015 selon le type de station. Les valeurs les plus basses pour chaque série de villes sont indiquées en gris, les plus élevées en gras.

O ₃	Min	Max	Moyenne	Médiane	Min	Max	Moyenne	Médiane
<i>Stations de fond</i>					<i>Stations périurbaines/rurales</i>			
Bordeaux	25	80	52	57	27	80	53	57
Lille	15	76	43	42	15	71	41	41
Lyon	10	84	44	45	14	86	46	47
Marseille	20	85	52	54	20	80	49	54
Rennes	21	70	48	48	23	66	48	47
Strasbourg	3	71	39	36	4	76	41	39
Clermont-Ferrand	20	81	51	54	25	83	56	59
Grenoble	7	79	39	40	14	86	45	46
Le Havre	24	78	55	56	19	72	49	49
Paris	8	70	38	37	18	74	49	50
Rouen	14	71	43	43	25	84	55	55
Toulouse	26	84	55	60	36	88	61	66
Tours	24	77	51	52	28	77	53	55

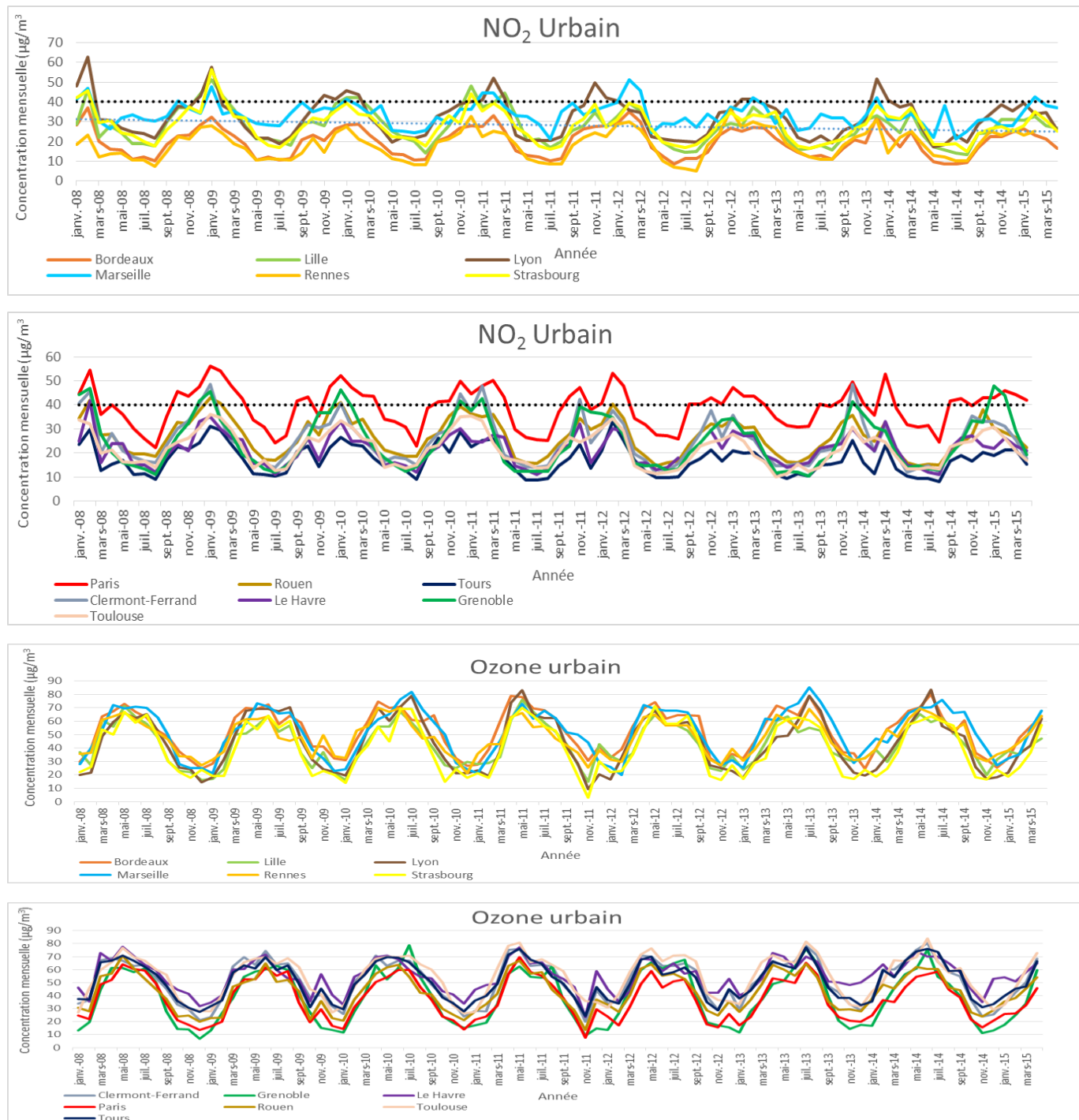
Tableau 3 : Indicateurs de dispersions (Minimum, Maximum, Moyenne, Médiane) pour le polluant PM₁₀ (exprimé en µg/m³) entre janvier 2008 et mars 2015 selon le type de station

PM ₁₀	Min	Max	Moyenne	Médiane	Min	Max	Moyenne	Médiane
<i>Stations de fond</i>					<i>Stations de proximité</i>			
Bordeaux	11	41	23	22	13	41	23	23
Lille	12	52	27	26	15	56	28	26
Lyon	14	61	27	25	17	78	34	32
Marseille	21	61	31	31	22	67	38	38
Rennes	9	43	20	19	12	45	22	20
Strasbourg	13	57	24	22	15	71	31	29
Clermont-Ferrand	11	35	19	18	13	46	22	20
Grenoble	11	50	25	24	19	71	34	32
Le Havre	13	49	23	22	11	59	29	28
Paris	13	48	26	25	21	56	36	34
Rouen	13	49	25	23	15	54	29	27
Toulouse	12	33	21	20	20	55	34	33
Tours	11	41	22	20	12	45	24	23

Tableau 4 : Indicateurs de dispersions (Minimum, Maximum, Moyenne, Médiane) pour le polluant PM_{2.5} (exprimé en µg/m³) entre janvier 2008 et mars 2015 selon le type de station

PM _{2.5}	Min	Max	Moyenne	Médiane	Min	Max	Moyenne	Médiane
<i>Stations de fond</i>					<i>Stations de proximité</i>			
Bordeaux	4	29	14	15				
Lille	7	41	19	17	11	38	20	19
Lyon	8	54	20	19				
Marseille	7	31	16	16	11	36	20	20
Rennes	6	21	11	10	5	33	14	12
Strasbourg	7	54	18	17	14	38	22	20
Clermont-Ferrand	4	30	13	11	6	31	15	13
Grenoble	6	39	19	18	11	50	23	21
Le Havre	6	40	15	14		31	14	13
Paris	8	35	17	15	11	35	20	19
Rouen	7	36	17	17				
Toulouse	7	27	15	14	9	21	14	14
Tours	5	41	16	15				

Figure 1 : Série temporelle décrivant les niveaux de concentrations moyennes mensuelles de NO₂, O₃, PM₁₀ et PM_{2.5} en µg/m³ entre janvier 2008 et mars 2015 pour les stations urbaines de fond.



[rnr170206 – R1]

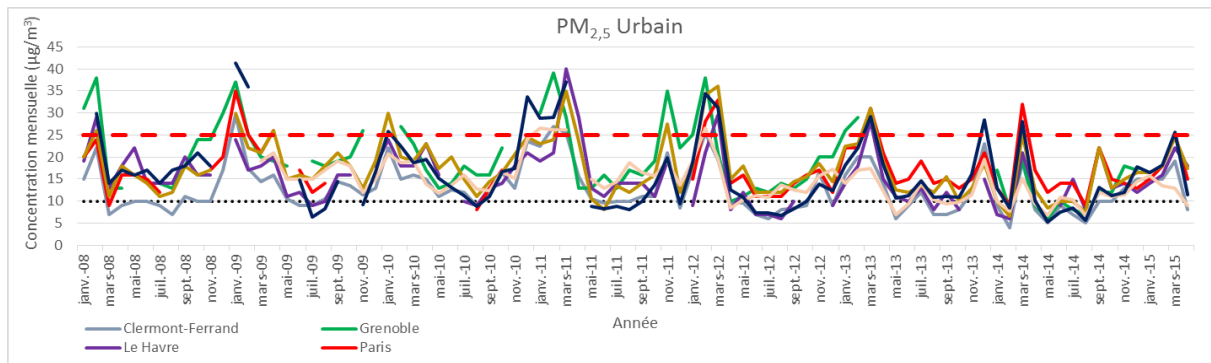
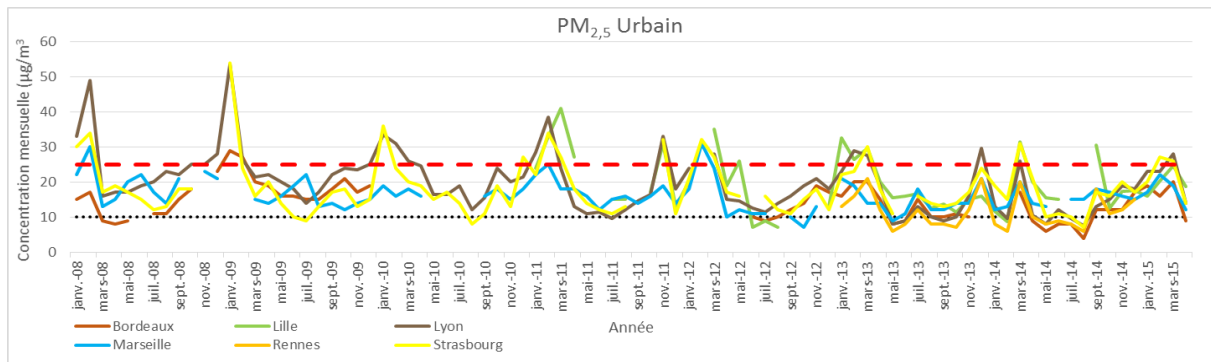
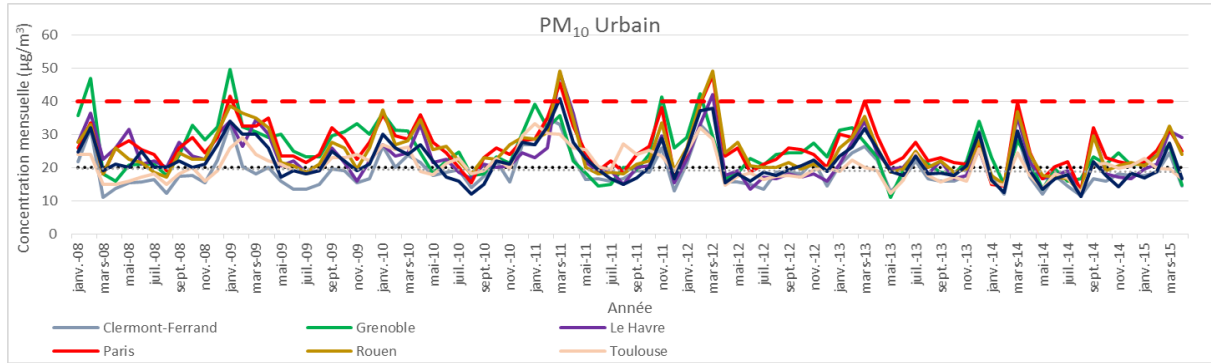
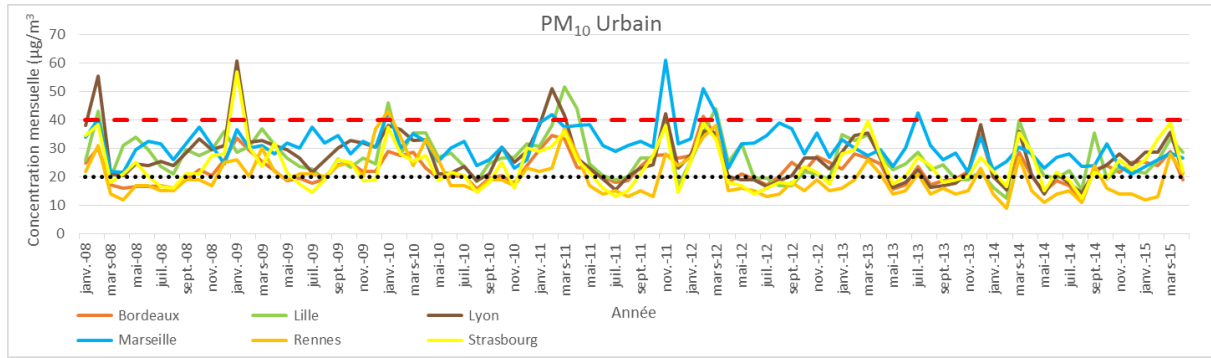
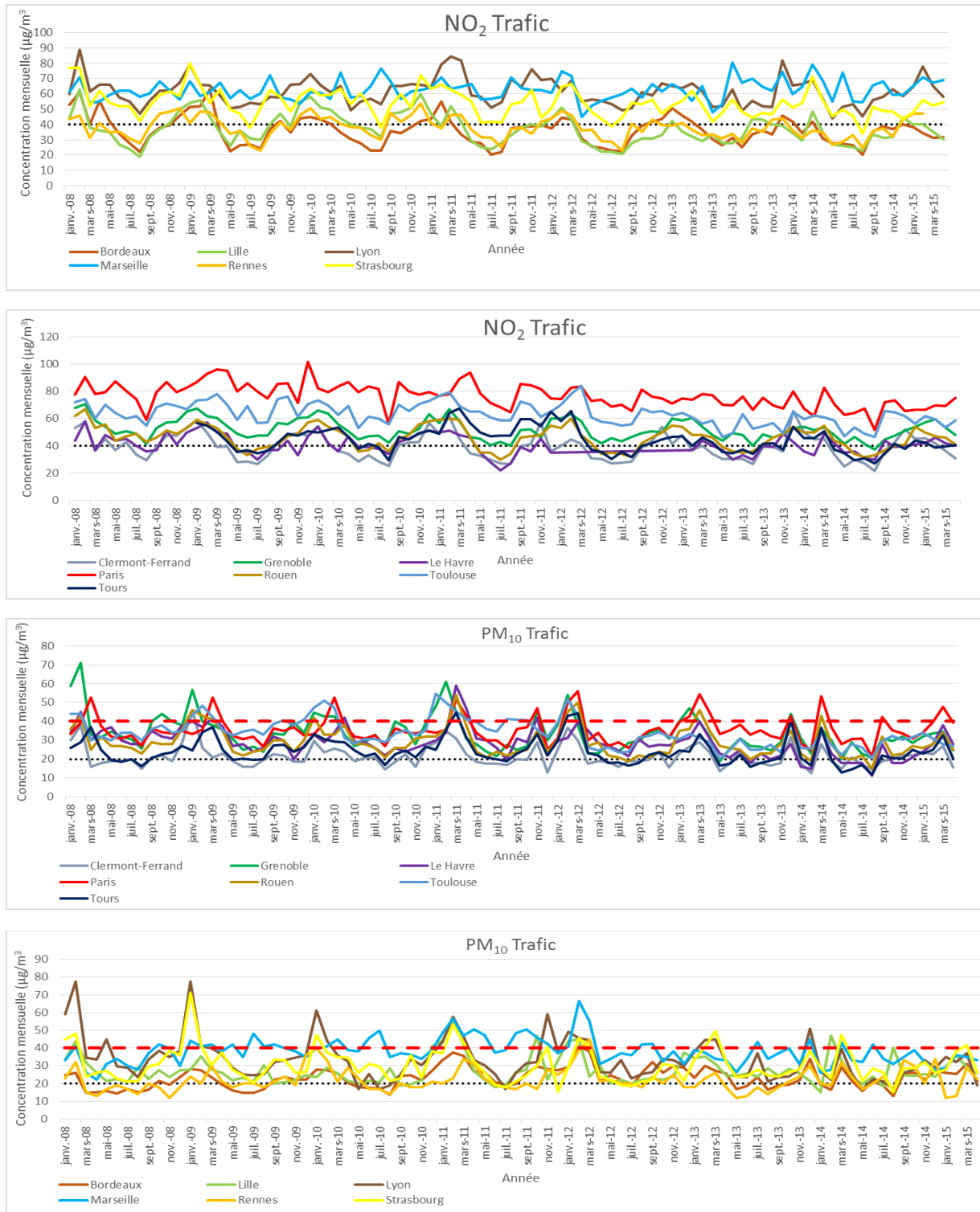


Figure 2 : Série temporelle décrivant les niveaux de concentrations mensuelles de NO₂, O₃, PM₁₀ et PM_{2.5} en µg/m³ entre janvier 2008 et mars 2015 pour les stations urbaines de proximité trafic.



[rnr170206 – R1]

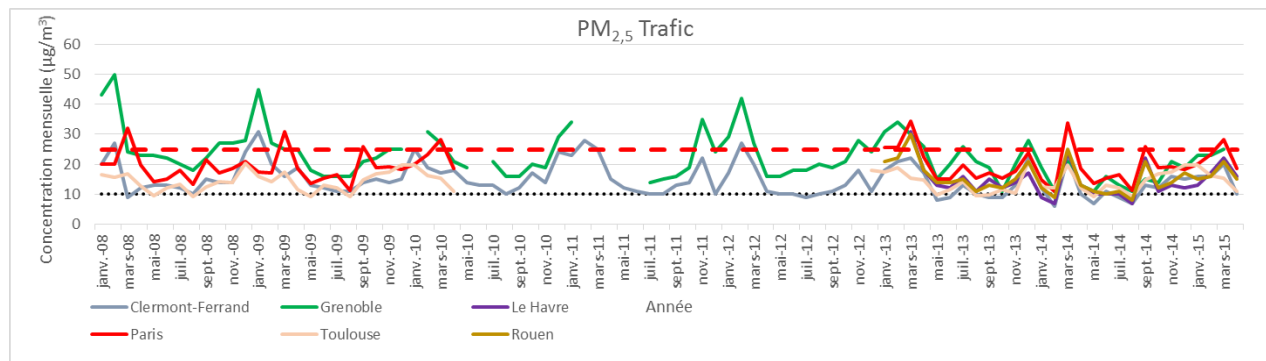
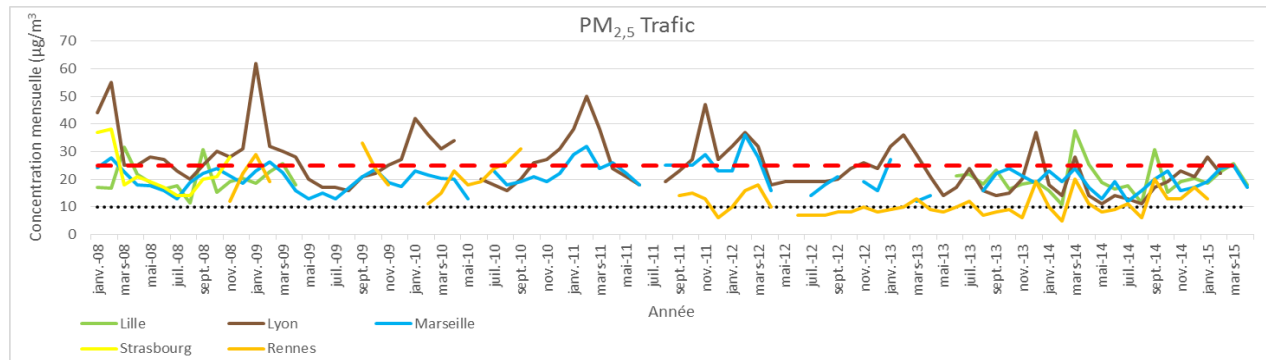


Figure 3 : Série temporelle décrivant les niveaux de concentrations mensuelles d'O₃ en µg/m³ entre janvier 2008 et mars 2015 pour les stations périurbaines et rurales.

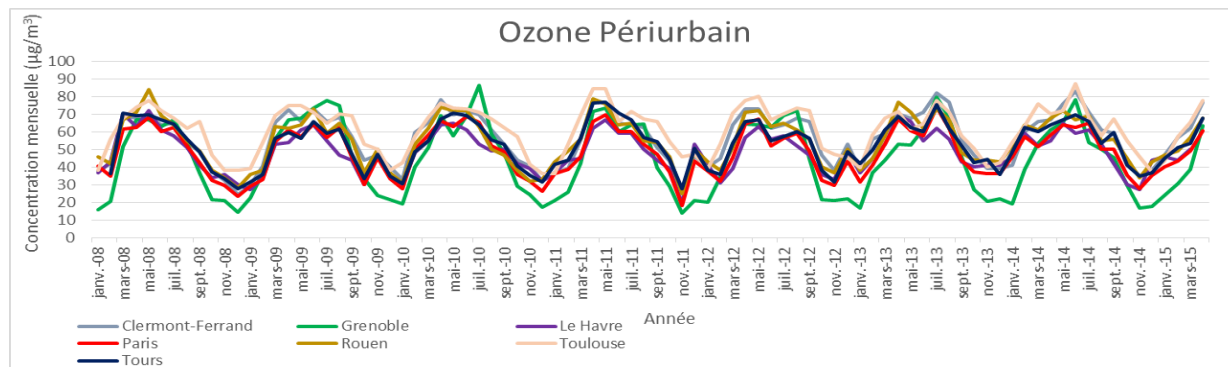
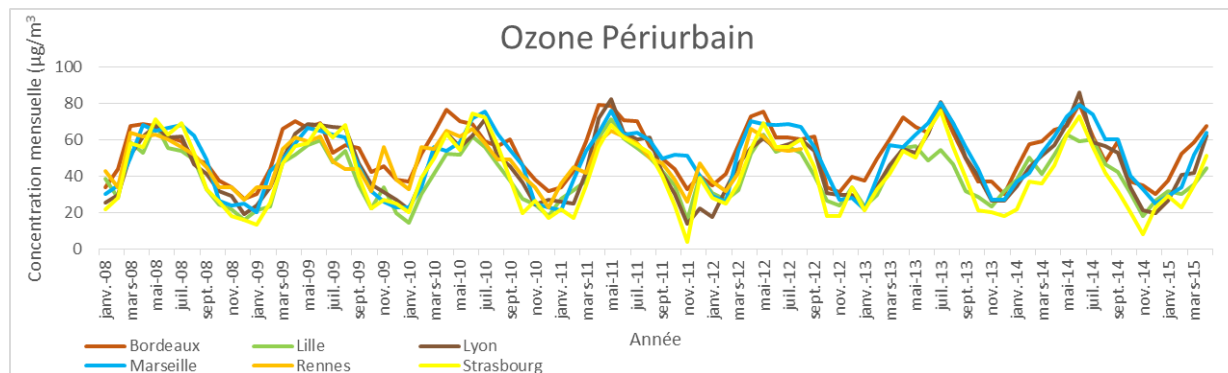


Tableau 5 : Valeurs des pentes des droites de régression linéaire et du coefficient de corrélation R^2 calculés à partir des séries temporelles du polluant NO_2 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre janvier 2008 et mars 2015 selon le type de station

NO_2	Valeur de la pente	R^2	Valeur de la pente	R^2
	Stations de fond		Stations de proximité	
Bordeaux	-0.0008	0.0072	-0.0029	0.0583
Lille	-0.0029	0.063	-0.002	0.0456
Lyon	-0.00018	0.0201	-0.0015	0.0169
Marseille	-0.0012	0.0231	0.0015	0.0315
Rennes	0.0016	0.0287	-0.002	0.0456
Strasbourg	-0.0024	0.0505	-0.0041	0.124
Clermont-Ferrand	-0.0018	0.0218	-0.0026	0.083
Grenoble	-0.0015	0.0278	-0.0033	0.1187
Le Havre	-0.0005	0.0032	-0.0026	0.083
Paris	-0.0003	0.0008	-0.0066	0.3199
Rouen	-0.0022	0.0473	-0.0032	0.0855
Toulouse	-0.0015	0.0278	-0.005	0.2337
Tours	-0.0015	0.0381	-0.0044	0.1059

Tableau 6 : Valeurs des pentes des droites de régression linéaire et du coefficient de corrélation R^2 calculés à partir des séries temporelles du polluant O_3 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre janvier 2008 et mars 2015 selon le type de station

O_3	Valeur de la pente	R^2	Valeur de la pente	R^2
	Stations de fond		Stations de proximité	
Bordeaux	-0.0004	0.0004	0.0002	9 E-05
Lille	2 E-05	7 E -07	-0.0004	0.0005
Lyon	-0.0014	0.0031	3 E-07	2 E-10
Marseille	0.0016	0.0049	0.0015	0.0048
Rennes	-2 E -05	1 E -06	0.0002	6 E-05
Strasbourg	-0.0011	0.0021	-0.0029	0.015
Clermont-Ferrand	0.0005	0.0007	0.0022	0.0138
Grenoble	-7 E -05	7 E -06	-0.0019	0.0049
Le Havre	0.0014	0.0078	-0.0002	0.0002
Paris	-0.0016	0.0061	0.0002	0.0001
Rouen	0.0008	0.0018	0.0007	0.0015
Toulouse	0.0011	0.0029	0.0002	0.0002
Tours	0.0005	0.0008	0.0009	0.003

Tableau 7 : Valeurs des pentes des droites de régression linéaire et du coefficient de corrélation R^2 calculés à partir des séries temporelles du polluant PM_{10} en $\mu g/m^3$ entre janvier 2008 et mars 2015 selon le type de station

PM_{10}	Valeur de la pente	R^2	Valeur de la pente	R^2
	Stations de fond		Stations de proximité	
Bordeaux	2 E -05	9 E -06	0.0007	0.0064
Lille	-0.0025	0.0679	0.0003	0.0009
Lyon	-0.0039	0.119	-0.005	0.1058
Marseille	-0.0018	0.0439	-0.0012	0.0159
Rennes	-0.0026	0.0837	0.0007	0.0064
Strasbourg	-0.0007	0.005	-0.0017	0.0206
Clermont-Ferrand	-0.0003	0.0022	-0.0012	0.0267
Grenoble	-0.0033	0.1166	-0.0045	0.136
Le Havre	-0.0022	0.0674	-0.0046	0.213
Paris	-0.0018	0.0427	-3 E -06	1 E -07
Rouen	-0.0018	0.0387		
Toulouse	-0.0011	0.0365		
Tours	-0.0019	0.0623		

Tableau 8 : Valeurs des pentes des droites de régression linéaire et du coefficient de corrélation R^2 calculés à partir des séries temporelles du polluant $PM_{2.5}$ en $\mu g/m^3$ entre janvier 2008 et mars 2015 selon le type de station

$PM_{2.5}$	Valeur de la pente	R^2	Valeur de la pente	R^2
	Stations de fond		Stations de proximité	
Bordeaux	-0.0004	0.0013		
Lille	-0.0045	0.064	4 E -05	6 E -05
Lyon	-0.0044	0.1664	-0.0051	0.1651
Marseille	-0.0016	0.0753	-0.0005	0.0072
Rennes	-0.0016	0.0051	-0.0059	0.3334
Strasbourg	-0.0011	0.0128	-0.0373	0.2032
Clermont-Ferrand	-0.001	0.0219	-0.0016	0.0527
Grenoble	-0.0043	0.172	-0.0033	0.1172
Le Havre	-0.002	0.0628	-0.003	0.0165
Paris	-0.0008	0.0127	0.0001	0.0006
Rouen	-0.0016	0.0376	-0.005	0.0599
Toulouse	-0.00035	0.2488	8 E -05	0.0005
Tours	-0.0026	0.0585		

[rnr170206 – R1]