

VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE LA CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE DES PARTICULES A BERLIN

Wilfried ENDLICHER, Thomas DRAHEIM, Uta WOLF-BENNING et Jan FIEDLER

Institut de Géographie, Université Humboldt de Berlin

Unter den Linden 6

10099 Berlin, Allemagne

wilfried.endlicher@geo.hu-berlin.de

Résumé

A Berlin, les niveaux de la concentration des particules augmentent de nouveau depuis l'an 2000 à cause de l'accroissement du trafic. Les progrès importants dus aux catalyseurs sont réduits par l'augmentation de la circulation routière. Une différenciation temporelle et spatiale de la pollution atmosphérique a été observée. Les types de temps jouent un rôle important dans la variabilité temporelle de la pollution par particules. La fraction plus grosse PM₁₀ a une plus grande variabilité spatiale que les particules plus fines PM_{2.5}. Les valeurs limites de la directive européenne ne sont pas respectées dans des secteurs avec une circulation routière importante.

Mots clé : Pollution atmosphérique, particules en suspension, poussière fine, types de temps, qualité de l'air à Berlin.

Abstract

Spatial and temporal variability of atmospheric particle concentration in Berlin

Despite of a significant improvement in urban air quality during the last decade, traffic related emissions like particulate matter and nitrogen dioxide are still a problem in urban areas. Reduced vehicle emissions due to exhaust emission catalysts are compensated by increasing traffic. In Berlin a marked spatial and a high temporal variability of particulate matter is observed. Weather types play an important role for the temporal variability of the pollution by particulate matter. Particulate matter background concentrations are already at a high level in particular in case of prevailing weather types from east to south. But it is evident that within the agglomeration highest levels are observed at traffic related sites. A distinctive spatial variability was rather observed for PM₁₀ than for PM_{2.5}. Traffic related sites show higher soot portions in general. At traffic hot spots it is obviously a problem to comply with the European air quality limit value for daily ambient PM₁₀ levels valid since 2005. Therefore a low emission zone was introduced in Berlin in the beginning of 2008. But further measures reducing individual motor-driven traffic in general are rather required. The observed annual mean values for PM₁₀ indicate that the compliance with the annual mean limit value of 40 µg/m³ should not be a certain problem. This is not also supposed for the future annual mean limit value of 25 µg/m³ for PM_{2.5} valid from 2015.

Keywords: Air pollution, particulate matter, airborne dust, weather types, air quality in Berlin.

Introduction

Depuis la catastrophe du smog à Londres en décembre 1952, la problématique de la pollution atmosphérique est bien connue. Les conséquences juridiques furent la création des lois anti-pollution en Europe comme le Clean Air Act en 1956 en Grande Bretagne. Depuis sa fondation la même année, l'Union Européenne travaille pour l'harmonisation de la législation entre autres dans le domaine de la protection de l'environnement. En même temps, la conscience écologique croissante depuis les années 60 a aussi aidé à approfondir les recherches pour mieux comprendre les processus de l'émission des produits nocifs dans l'atmosphère, de leur transformation chimique, de leur concentration ambiante et leur dépôt dans les secteurs sensibles. On constate depuis de nombreux progrès dans ce domaine. Parallèlement, les méthodes de mesures et de modélisation ont été considérablement améliorées. Des études épidémiologiques ont montré l'importance de la réduction des produits nocifs dans l'air pour la santé humaine. Les particules en suspension avec un diamètre aérodynamique inférieur ou égal à ~10 µm (ci-après PM₁₀) sont particulièrement

dangereuses, parce qu'elles ne sont pas retenues dans la cavité nasale, mais elles peuvent entrer dans le système broncho-pulmonaire jusqu'aux alvéoles et même dans la circulation sanguine. Elles peuvent alors non seulement causer des maladies broncho-pulmonaires (par exemple des cancers), mais aussi des maladies cardio-vasculaires (Wichmann et Peters, 2002 ; figure 1).

Organes exposés	Dimension des particules (diamètre aérodynamique)
Nez et gorge	5 – 10 μm
Trachée-artère	3 – 5 μm
Bronches	2 – 3 μm
Bronchioles	1 – 2 μm
Alvéoles (vésicules pulmonaires)	0,1 – 1 μm

Figure 1 : Organes respiratoires exposés aux particules fines : plus les particules sont petites, plus elles pénètrent profondément dans l'appareil broncho-pulmonaire. *Deposition of particulate matter in human respiratory system: smaller particles enter deeper into the respiratory system.*

Voilà pourquoi la directive européenne 1999/30/CE met en relief l'importance grandissante de la qualité de l'air ambiant et du contrôle de la pollution atmosphérique dans des limites strictes (Conseil Européen, 1999). Depuis 2005, la valeur limite annuelle de PM_{10} est fixée à $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et la valeur limite journalière à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette dernière valeur ne doit pas être dépassée plus de 35 fois par année civile. Selon un projet d'une nouvelle directive européenne, une valeur limite annuelle de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les particules plus petites qu'environ $2,5 \mu\text{m}$ (ci-après $\text{PM}_{2.5}$) serait ajoutée en 2015. En outre, la Suisse a fixé sa valeur limite de PM_{10} à une moyenne annuelle de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et n'accepte qu'un dépassement d'une concentration journalière de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par année civile (figure 2). Ce développement, c'est-à-dire la baisse des valeurs limites permises, est la conséquence de la meilleure connaissance de l'influence néfaste de la pollution de l'air ambiant pour la santé (WHO, 2003, 2004 et 2006).

Les polluants atmosphériques	Union Européenne		Suisse
Date à laquelle la valeur limite doit être respectée	2005	2010	1998
Particules (PM_{10})	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne par 24 h à ne pas dépasser plus de 35 fois par année civile		$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne par 24 h ; ne doit en aucun cas être dépassée plus d'une fois par année
	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne annuelle		$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne annuelle
Particules ($\text{PM}_{2.5}$)	-	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne annuelle (limite contraignante à partir de 2015)	-

Figure 2 : Valeurs limites en vigueur dans l'UE et en Suisse. *Air quality limit values set by European legislation as well as Swiss legislation.*

Au début des années 2000, il devenait de plus en plus clair à Berlin comme dans beaucoup d'autres villes européennes qu'une continuité des émissions ne permet pas de respecter les valeurs limites de PM_{10} . Pour créer des mesures d'anti-pollution efficaces, il a fallu des

recherches sur la variabilité spatio-temporelle de la concentration atmosphérique des particules en suspension. Cet aspect géographique, prenant en considération aussi bien les spécificités du site de mesure que des facteurs météorologiques, a été le sujet de deux projets de recherche dont les résultats sont présentés ici.

1. Buts et méthodes de la recherche

Le premier projet a étudié la variabilité spatiale et temporelle de la concentration de PM_{10} à Berlin sur la base des données du réseau officiel des mesures en continu de la ville (BLUME ; figure 3), mais a aussi pris en considération les différents types de temps. Le changement temporel à moyen terme entre 1991 et 2006, c'est-à-dire après la chute du mur de Berlin, et les conditions de pollution de l'air ambiant dans différents quartiers urbains ont été les deux points essentiels de cette recherche.

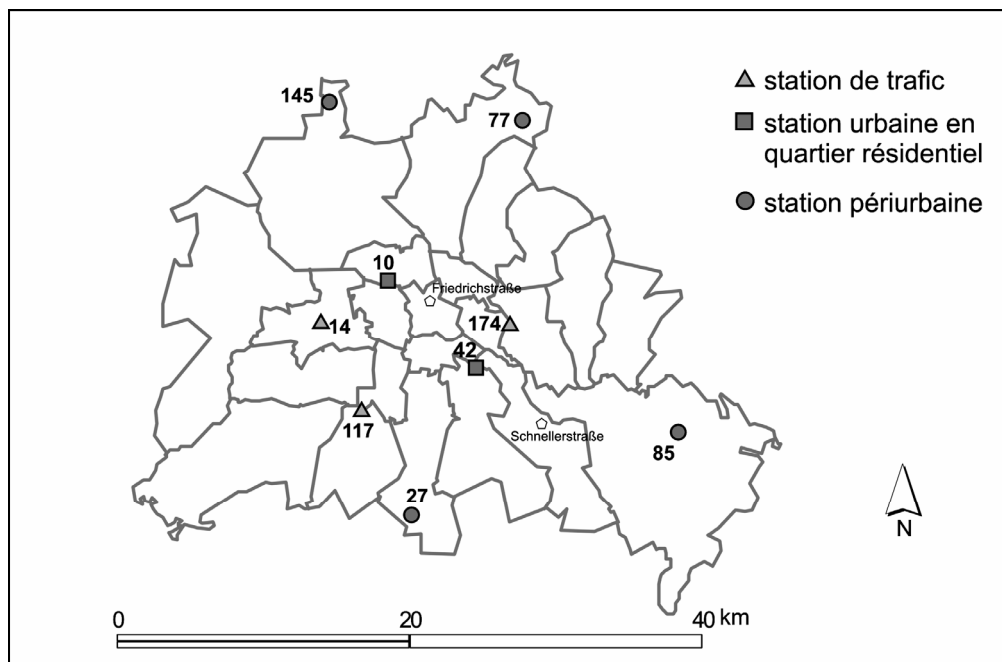


Figure 3 : Localisation des sites de mesures à Berlin, sélectionnés dans le réseau officiel de la ville (BLUME) et cités dans le texte. *Location of the measuring sites in Berlin; selected sites of the official Berlin air quality monitoring network (BLUME) and additional sites as mentioned in the text.*

Le deuxième projet s'est basé sur nos propres programmes de mesures. Entre mars 2003 et juin 2004, nous avons déterminé la concentration des polluants atmosphériques hebdomadaire simultanément sur 19 sites de la ville. Les grandeurs suivantes ont été étudiées :

- la concentration atmosphérique des particules avec un diamètre aérodynamique $> 2,5 \mu m$ et $\leq 10 \mu m$ (ci-après désignées comme 'grosses particules' = $PM_{2.5-10}$ total) ;
- la concentration ambiante des grosses particules noires (suie) (ci-après désignées par $PM_{2.5-10}$ noir) ;
- la concentration atmosphérique des particules avec un diamètre aérodynamique $\leq 2,5 \mu m$ (ci-après désignées comme 'particules fines' = $PM_{2.5}$ total) sur six sites ;
- la concentration ambiante des particules fines noires (suie) (ci-après désignées par $PM_{2.5}$ noir) sur six sites ;
- la teneur du dépôt sec des particules en anions et cations (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}).

Les méthodes choisies sont relativement peu coûteuses. Certes, ces analyses ne donnent que des valeurs moyennes hebdomadaires, mais elles livrent des informations spatiales assez détaillées (Schultz, 1994). La concentration des grosses particules est calculée d'après leur dépôt par sédimentation laminaire (formule de Stokes) sur une plaque collante (Schultz, 1994). Cet échantillonnage et le recensement des particules selon leur diamètre et leur couleur (transparente ou noire) par microscopie automatique sont effectués selon la directive VDI 2119 - feuille 4 (1997). Les ions hydrosolubles sont déterminés par chromatographie des ions après dissolution du dépôt sur la même plaque collante dans de l'eau déminéralisée chaude (Schultz *et al.*, 1995).

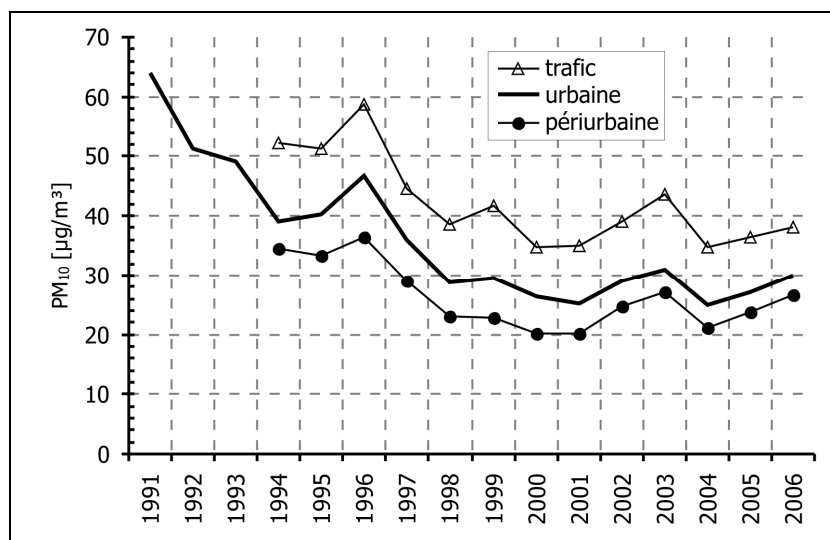
Les particules fines sont aspirées sur un filtre en fibre de verre après séparation des particules d'un diamètre aérodynamique supérieur à $2,5 \mu\text{m}$ par impaction (échantillonneur du type « mini volume sampler » des constructeurs Leckel et Derenda). La masse des particules fines noires adsorbée est mesurée par photométrie ($\lambda = 650 \text{ nm}$), celle de la totalité des particules par une microbalance (Wolf-Benning, 2006). Les concentrations ambiantes moyennes sont calculées à partir des masses adsorbées sur le filtre et le volume de l'air aspiré. Les valeurs de la concentration ambiante des polluants, la taille des particules ainsi que leur composition chimique sont ainsi nommées « empreintes digitales » spécifiques de chaque site de mesure. Elles permettent l'identification des sources de la pollution de l'air ambiant et la description du transport dans l'atmosphère. Finalement, la connaissance de la variabilité spatiale dans une dimension locale joue un rôle clé dans la recherche épidémiologique étudiant les conséquences des contaminants atmosphériques pour la santé humaine (Hoek *et al.*, 2002).

2. Résultats

2.1. La variabilité temporelle

La qualité de l'air ambiant s'est considérablement améliorée à Berlin – première ville et troisième agglomération de l'Allemagne avec respectivement 3,4 et 4,3 millions d'habitants¹ – sur la période 1991-2000 grâce aux mesures d'assainissement prises par les autorités politiques et à la désindustrialisation dans le territoire oriental de l'Allemagne (figure 4).

Figure 4 : Développement de la pollution par PM_{10} à Berlin entre 1991 et 2006 (données issues du réseau BLUME de la ville de Berlin. *Long-term development of PM_{10} in Berlin from 1991 to 2006. Data was provided by the official Berlin air quality monitoring network (BLUME).*

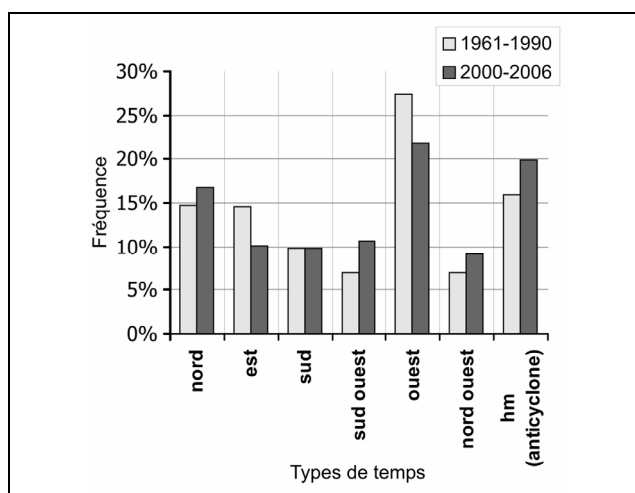


¹ Jusqu'en 1989, la partie occidentale (Berlin-Ouest) était politiquement une 'île' dans la R.D.A. ; après l'unification de l'Allemagne en 1990, la législation fédérale et européenne s'impose dans toute la ville et les alentours.

Néanmoins, en 2000, on remarque un arrêt dans l'amélioration générale de la situation ; depuis cette date, les concentrations des particules en suspension (PM_{10}) augmentent de nouveau. Le niveau actuel est toujours assez problématique en ce qui concerne le respect des valeurs limites prévues par la directive 1999/30/CE. Les PM_{10} montrent une grande variabilité spatiale avec la concentration la plus élevée aux points de prélèvement situés dans des sites avec un trafic intense. Ces « points chauds », où la pollution est due en grande partie à la circulation, sont les plus pollués ; les quartiers résidentiels (arrière-plan urbain) le sont déjà moins. Les banlieues sont les zones les moins polluées.

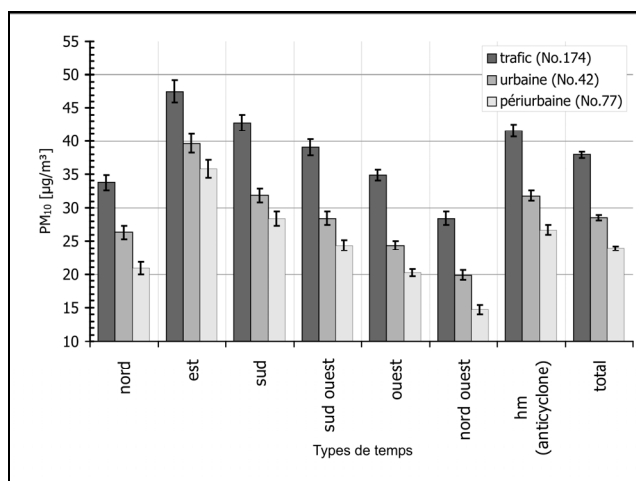
En outre, la répartition spatiale de la pollution est modulée par les types de temps et les saisons. La figure 5 montre la fréquence des types de temps généralisés en Allemagne du Nord ; les types d'ouest, mais aussi d'est et anticycloniques sont les plus fréquents.

Figure 5 : Fréquence des types de temps (données issues du Service Météorologique allemand). *Frequency of different weather types based on data provided by the German Weather Service.*



La figure 6 met en évidence la relation entre la concentration de PM_{10} et les types de temps respectifs. On remarque que les concentrations les plus élevées se forment pendant les situations d'est, du sud, du sud-ouest et anticycloniques. Des types de temps anticycloniques favorisent l'accumulation des polluants dans les couches basses de l'atmosphère. Des types de temps du nord-ouest, du nord et d'ouest augmentent la dispersion et réduisent la concentration de PM_{10} . Celle-ci est sensiblement plus élevée pendant les types de temps d'est et du sud, parce que pendant ces deux types de temps, les masses d'air continentales sont chargées de particules (peut-être dues aux grandes surfaces agricoles et aux sources industrielles dans les régions de provenance, mais aussi aux particules synthétisées pendant le transport).

Figure 6 : Influence des types de temps sur la concentration ambiante de PM_{10} à Berlin (période 2000-2006 ; d'après Draheim, 2005). *Impact of weather types on ambient PM_{10} levels in Berlin (calculation period 2000-2006 ; Draheim, 2005, modified).*



La répartition spatiale concernant la catégorie du site de mesure est assez homogène pendant des situations météorologiques différentes, c'est-à-dire que les taux les plus importants sont toujours observés dans les rues avec un trafic intense, alors que les taux les plus faibles sont relevés dans les faubourgs et en dehors de la ville.

Une comparaison des concentrations des particules PM_{10} et $PM_{2.5}$ total amène à une évaluation encore plus différenciée (figure 7) : de plus petites différences spatiales par type de temps apparaissent pour les particules fines ($PM_{2.5}$ total), car elles ont une durée de vie atmosphérique plus longue et, par conséquent, une dispersion plus homogène. Par contre, les particules plus grosses résultent plutôt des sources locales.

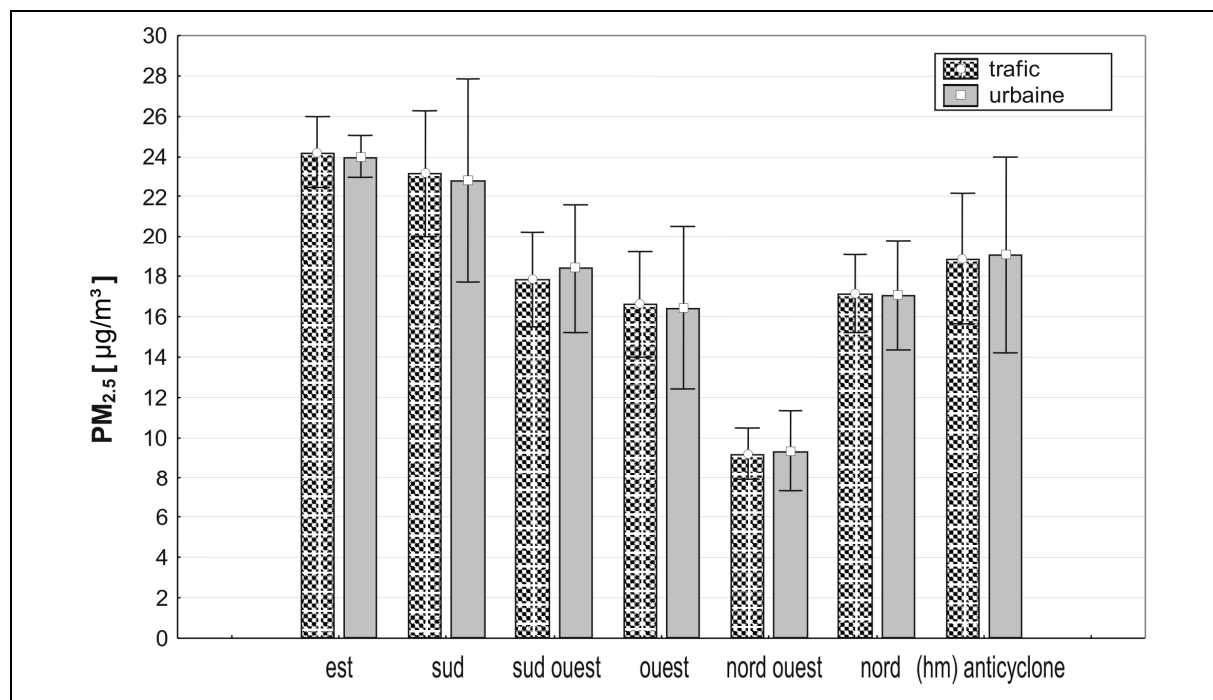
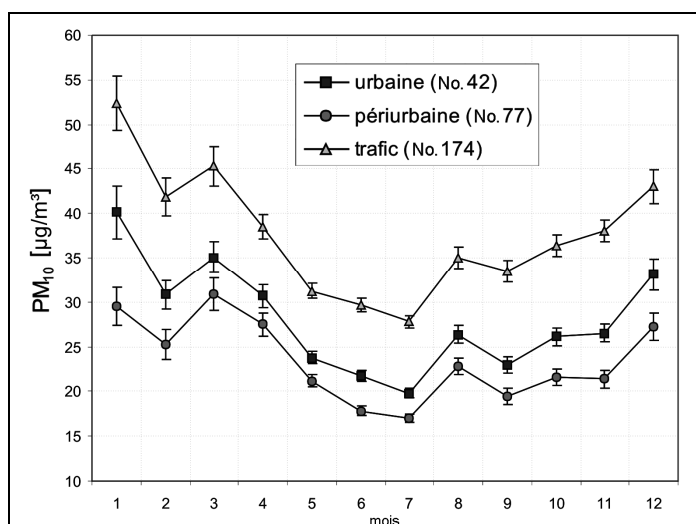


Figure 7 : Répartition spatiale et influence des types de temps sur la concentration des particules fines ($PM_{2.5}$ total) à Berlin (d'après Wolf-Benning, 2006). *Impact of weather types on ambient $PM_{2.5}$ levels differentiated between traffic site and urban background site (source: Wolf-Benning, 2006).*

Les PM_{10} ont aussi un régime annuel très net : les concentrations les plus élevées arrivent en saison froide avec la plus grande stabilité de l'air (figure 8).

Figure 8 : Régime annuel moyen de PM_{10} dans différents sites de Berlin (moyenne 2000-2004 ; d'après Draheim, 2005). *Average annual variability of PM_{10} in Berlin differentiated between traffic site, urban and suburban background site (mean 2000-2004 ; from Draheim, 2005, modified).*

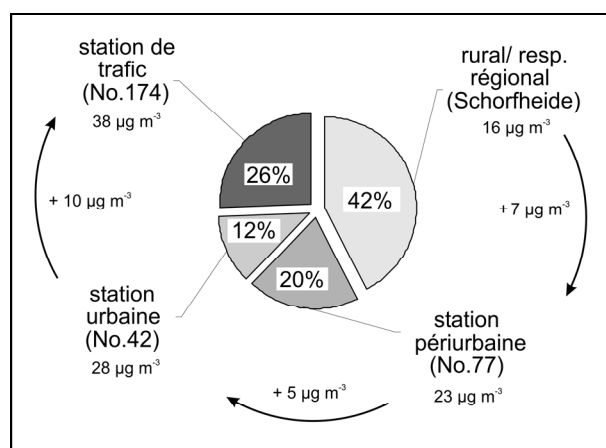


2.2. La variabilité spatiale

2.2.1. Différences de la concentration de PM_{10} entre ville et environs

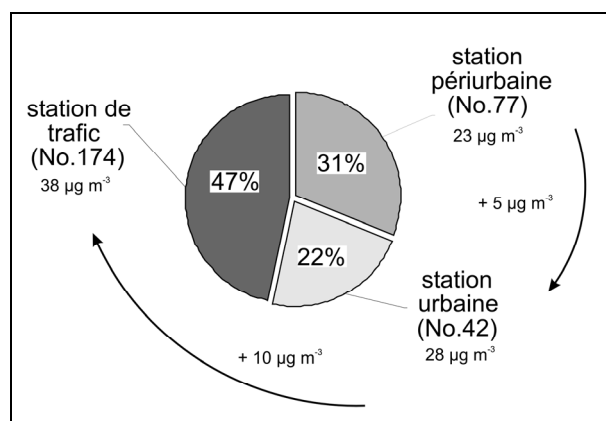
L'analyse des données du réseau officiel de la ville a déjà montré une variabilité surprenante des données prélevées à différents endroits. Pour la plus grande efficacité des mesures à prendre dans l'avenir pour diminuer cette pollution, il faut aussi savoir d'où proviennent les particules, de la ville même, des environs, ou bien de secteurs plus lointains. La comparaison des valeurs des quatre stations représentatives pour des sites très différents (avec beaucoup de circulation automobile, dans un quartier résidentiel, à la périphérie de la ville et en situation rurale) montre qu'à peu près 42% de la pollution PM_{10} annuelle à Berlin vient de l'extérieur (figure 9).

Figure 9 : Répartition par catégorie de sites de la concentration de PM_{10} à Berlin (moyenne 2000-2004) ; sur la base de données du réseau officiel de la ville de Berlin. *Distribution of measured PM_{10} in Berlin between different site categories (mean 2000-2004); analysis based on data provided by the official Berlin air quality monitoring network.*



Mais cependant, si l'on regarde seulement la pollution de source locale berlinoise, sur les 58% restant, à peu près 47% proviennent de la pollution causée par le trafic (figure 10). Cela veut dire que des mesures avec le but d'améliorer la qualité de l'air doivent se concentrer sur ce problème.

Figure 10 : Répartition par catégorie du site de la concentration de PM_{10} à Berlin sans prendre en considération la part rurale régionale, moyenne 2000-2004. Sur la base de données du réseau officiel de la ville de Berlin. *Distribution of measured PM_{10} between different site categories within the Berlin agglomeration (mean 2000-2004; analysis based on data provided by the official Berlin air quality monitoring network).*



2.2.2. Concentration des grosses particules $PM_{2.5-10}$ et $PM_{2.5}$ à différents endroits du centre ville

Pour connaître la variabilité dans des sites différents en centre ville, six postes de mesures, dont trois au centre ville, peu éloignés l'un de l'autre et trois dans un quartier périurbain, ont été choisis et équipés de capteurs passifs et actifs pendant une année. Au centre ville, ces sites comprennent une rue très fréquentée (Friedrichstraße), une rue secondaire avec circulation automobile réduite (Planckstraße) et une cour intérieure près de la rivière Spree (évêché militaire). En quartier périurbain, une rue très fréquentée (Schnellerstraße), une cour

intérieure et la rive de la rivière Spree ont été choisies. Les valeurs moyennes de $PM_{2.5-10}$ total montrent des différences considérables (figures 11a et b), mais les $PM_{2.5}$ total ne diffèrent presque pas (figure 11c). C'est-à-dire, plus les particules sont petites, plus leur variabilité spatiale est réduite. Mais, par contre, si l'on analyse dans l'échantillon de $PM_{2.5}$ total seulement la partie de suie ($PM_{2.5}$ noir, qui sont surtout des particules particulièrement dangereuses pour la santé humaine en provenance des moteurs Diesel et de la gomme des pneus), les concentrations de la Friedrichstraße et de la Schnellerstraße sont nettement plus élevées, ce qui montre bien l'influence de la circulation routière automobile sur la composition des $PM_{2.5}$ total (figure 11d).

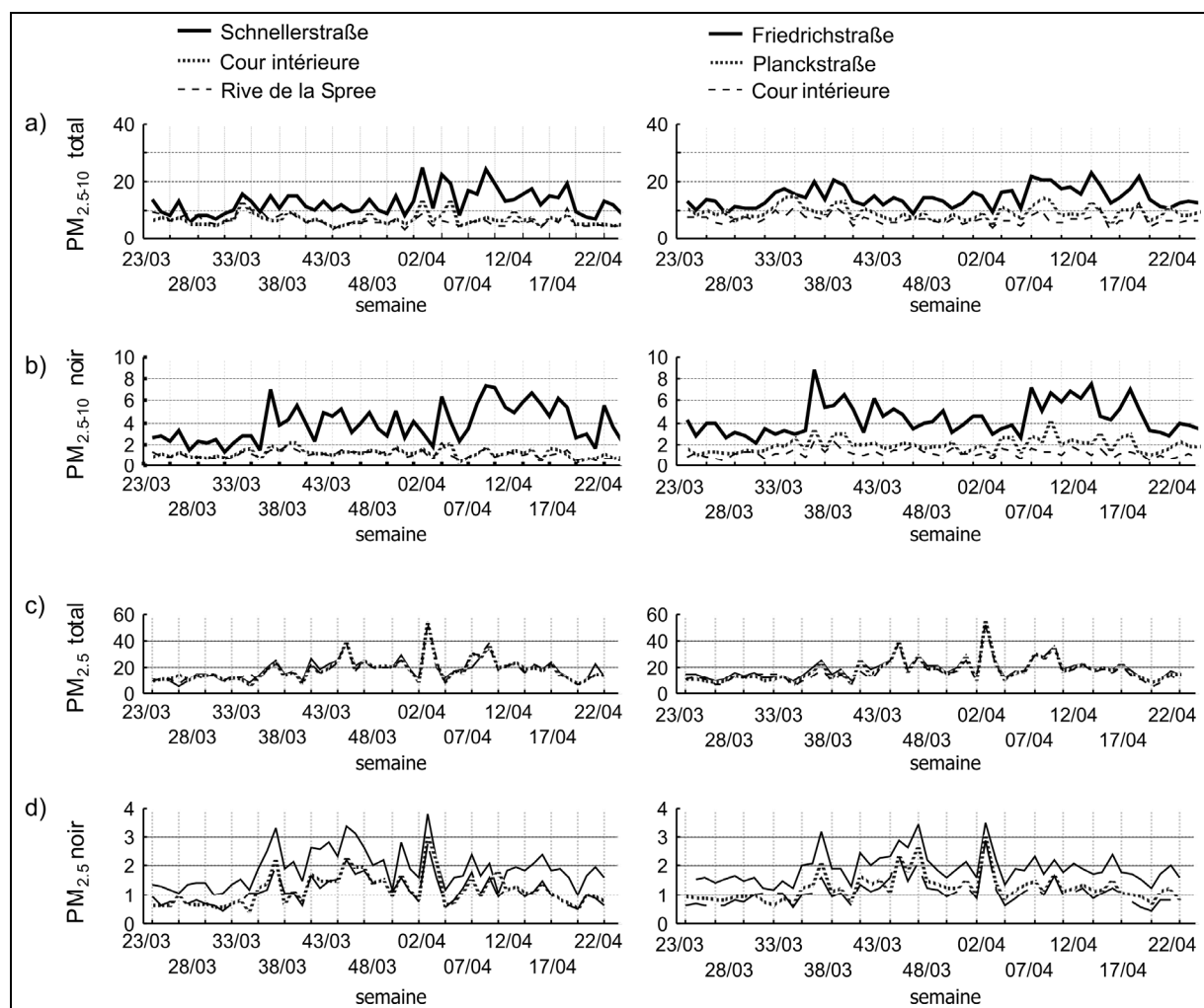


Figure 11 : Comparaison des concentrations de PM aux trois sites au centre ville : colonne de droite, Friedrichstraße (circulation automobile élevée), Planckstraße (circulation automobile réduite) et une cour intérieure ; dans un quartier périurbain, au sud-est de la ville, colonne de gauche : Schnellerstraße (circulation automobile élevée), une cour intérieure et la rive de la rivière Spree ; a) grosses particules $PM_{2.5-10}$ total, b) suie dans les grosses particules $PM_{2.5-10}$ noir, c) particules fines $PM_{2.5}$ total, d) suie dans les particules fines $PM_{2.5}$ noir (source : Wolf-Benning, 2006).

Comparison of particulate matter concentrations at three sites in the centre of Berlin (highly frequented road Friedrichstraße, less frequented road Planckstraße, backyard at the road Planckstraße) and further three sites in a rather suburban area in the southeast of Berlin (highly frequented road Schnellerstraße, backyard near to this road, yard near to the river Spree); a) coarse particles $PM_{2.5-10}$ total b) soot portion of coarse particulate matter $PM_{2.5-10}$ (black) c) fine particles $PM_{2.5}$ total d) soot portion of fine particulate matter $PM_{2.5}$ black (source: Wolf-Benning, 2006).

3. Discussion et conclusion

Les résultats de l'étude montrent la complexité du problème : bien qu'une amélioration générale de la qualité de l'air à Berlin ait été observée dans les années 90, le développement dans les cinq dernières années est loin d'être satisfaisant, notamment pour les particules. La variabilité temporelle due aux saisons et aux différents types de temps avec leurs masses d'air plus ou moins propres ou polluées est plus grande que la variabilité spatiale. La figure 12 montre que les valeurs limites prévues de l'UE pour l'année 2005 n'ont pas été respectées dans les secteurs urbains où le trafic est dense. Ce n'est pas la valeur annuelle, mais le dépassement trop fréquent de la valeur limite journalière qui pose le problème le plus difficile à résoudre.

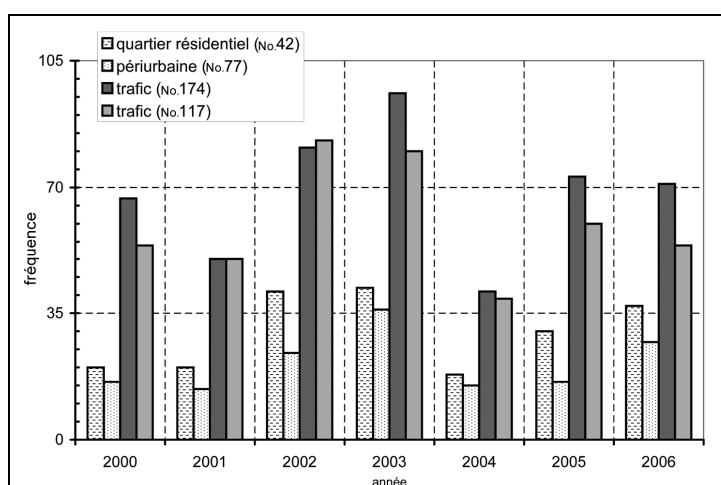


Figure 12 : Nombre de dépassements de la valeur limite journalière de $50 \mu g/m^3$ PM_{10} (moyenne de 24 heures à ne pas à dépasser plus de 35 fois par an) au cours des années 2000 à 2006 à Berlin à différentes catégories de sites (données issues du réseau BLUME de la ville de Berlin). *Number of PM_{10} daily averages above $50 \mu g/m^3$ in Berlin, period 2000 to 2006. Analysis based on data provided by the official Berlin air quality monitoring network (BLUME).*

Si l'on regarde en détail le développement d'un épisode de pollution pendant plusieurs jours, on se rend compte que des efforts considérables seront nécessaires pour parvenir à une réduction sensible des concentrations des particules (figure 13).

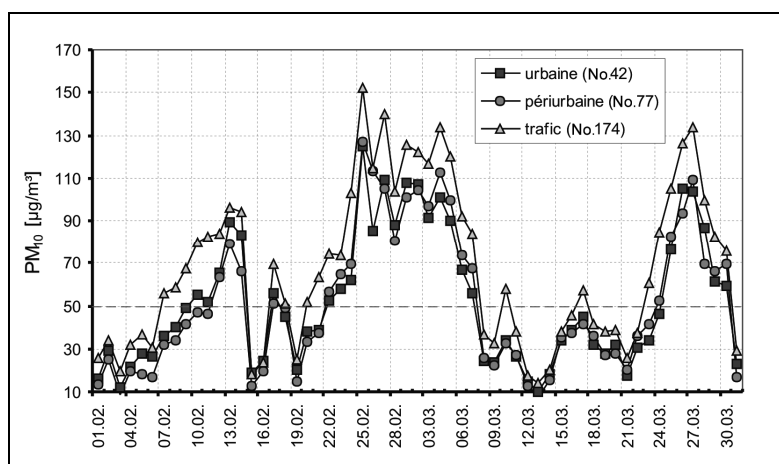


Figure 13 : Développement de la concentration de PM_{10} entre le 1^{er} février et le 31 mars 2003 pendant un épisode de pollution élevée (données issues du réseau BLUME de la ville de Berlin). *Development of PM_{10} daily averages from February to March 2003 in Berlin - period with highly elevated levels of PM_{10} . Figure based on data provided by the official Berlin air quality monitoring network (BLUME).*

Ces réductions doivent comprendre aussi bien des mesures locales que régionales et internationales (Lenschow *et al.*, 2001). Toute la population européenne est concernée par cette pollution atmosphérique et des quantités importantes peuvent provenir des régions éloignées. Il s'agit donc d'un problème international, qu'on ne peut pas résoudre seulement avec des remèdes locaux. Des solutions régionales et internationales doivent être trouvées pour réduire toutes sortes de particules venant de l'agriculture (déflation), du bâtiment (particules de la construction), de la combustion (assainissement des chauffages et installation des chauffages à gaz) et surtout de la circulation routière. C'est pour ce dernier problème, que les administrations locales des villes – et non seulement à Berlin, mais partout en Europe – doivent se concentrer et chercher des solutions, comme par exemple :

- la réduction générale de la circulation automobile par amélioration des transports en commun ;
- l'équipement des camions et des voitures de tourisme avec des filtres à particules, dont l'efficacité même pour les particules ultrafines doit être assurée ;
- l'interdiction de l'accès à la ville pour les camions et les voitures sans filtre (effectué au centre-ville de Berlin le 1^{er} janvier 2008 comme « zone à faibles émissions polluantes ») ;
- la réduction des feux de signalisation et l'augmentation de la fluidité de la circulation (construction de ronds-points, synchronisation de la signalisation routière) ;
- l'amélioration de l'état du revêtement des rues.

Aux « points chauds » avec un trafic intense, c'est évidemment un problème de respecter la limite européenne de qualité de l'air ambiant pour la moyenne journalière de la concentration de PM₁₀ existant depuis 2005. Pour cette raison, une « zone à faibles émissions polluantes » fut introduite à Berlin au début de l'année 2008. Mais la complexité du problème qui dépend fortement des conditions météorologiques ne permet pas des progrès rapides et significatifs. Il faut en plus prendre des mesures réduisant en général le trafic de véhicules motorisés. Le respect de la limite annuelle de la concentration de 40 µg/m³ pour PM₁₀ ne sera pas un grand problème, comme le montre les résultats des dernières années. On peut s'attendre à ce que la limite annuelle de 25 µg/m³ pour la concentration de PM_{2.5} prévue pour 2015 ne soit pas respectée dans les secteurs urbains avec un trafic dense.

Bibliographie

CONSEIL EUROPÉEN, 1999 : Directive 1999/30/CE du conseil du 22 avril 1999 relative à la fixation des valeurs limites pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant. Journal officiel des Communautés européennes L 163/41-163/60 du 29.06.1999 FR.

DRAHEIM T., 2005 : Die räumliche und zeitliche Variabilität der PM₁₀-Schwebstaubkonzentration in Berlin unter Berücksichtigung der Großwettertypen. *Berliner Geographische Arbeiten*, 103.

HOEK G., MELIEFSTE K., CYRYS J., LEWNÉ M., BELLANDER T., BRAUER M., FISCHER P., GEHRING U., HEINRICH J., VAN VLIET P. et BRUNEKREEF B., 2002 : Spatial variability of fine particle concentrations in three European areas. *Atmospheric Environment*, **36**, 4077-4088.

LENSCHOW P., ABRAHAM H.-J., KUTZNER K., LUTZ M., PREUSS J.-D. et REICHENBÄCHER W., 2001 : Some ideas about the sources of PM₁₀. *Atmospheric Environment*, **35**(1), 23-33.

SCHULTZ E., 1994 : Size fractionated determination of black carbon particles in airborne dust originating from highway traffic. *The Science of the Total Environment*, **146/147**, 289-296.

SCHULTZ E., STAIGER H. et JENDRITZKY G., 1995 : Probandennahe Messungen in Innenräumen und an der Außenluft ; erweiterte stoffliche Differenzierung von Staubinhaltsstoffen. In: ELTSCHKA R., KÜHR J., SCHULTZ E. (Eds.), *Luftverunreinigungen und Atemwegserkrankungen*, Landsberg, 249-407.

VDI 2119 feuille 4, 1997 : Measurement of Particulate Precipitations - Microscopic differentiation and size fractionated determination of particle deposition on adhesive collection plates - Sigma-2 sampler. Guideline VDI 2119 part 4, 1997-08, Berlin.

WICHMANN E.-H. et PETERS A., 2002 : Ultrafine particles: Characterization, Health Effects, and Pathophysiological Mechanisms. Rochester, EPA Particulate Matter Center Report, 1-12.

WOLF-BENNING U., 2006 : Kleinräumliche und zeitliche Variabilität von Fein- und Grobstaub sowie Stickstoffdioxid in Berlin. *Berliner Geographische Arbeiten*, 105.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2003 : *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*. World Health Organisation. Bonn.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2004 : *Health Aspects of Air Pollution - Results from the WHO Project "Systematic Review of Health Aspects of Air Pollution in Europe"*. World Health Organisation.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2006 : *Air Quality Guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. World Health Organisation Regional Publications, European Series.

Liens internet consultés :

<http://www.bafu.admin.ch/index.html?lang=fr>

<http://www.euro.who.int>

http://www.euro.who.int/InformationSources/Publications/Catalogue/20070323_1

<http://www.berlin.de/sen/umwelt/luftqualitaet/index.shtml>