

POLLUTION DE L'AIR AUX PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'AIR (PM) ET SANTÉ DES INDIVIDUS : UN DOMAINE DE RECHERCHE PLURIDISCIPLINAIRE EN DÉVELOPPEMENT POUR LES GÉOGRAPHES

Gérard BELTRANDO

Résumé

Les relations entre les conditions environnementales et la santé sont un des enjeux majeurs des sociétés modernes. Dans cette vaste problématique, le cas des particules en suspension dans l'air (PM) occupe une place importante et si plusieurs disciplines s'y intéressent (de la chimie à l'épidémiologie), la répartition dans le temps et l'espace de ces polluants n'est pas encore suffisamment inventoriée pour répondre aux demandes de la recherche médicale et aux attentes sociétales. Par une approche basée sur des mesures itinérantes, avec des capteurs portatifs et un protocole spécifique tenant compte des particularités de chaque territoire, puis en intégrant ces données dans un SIG, le géographe peut renforcer sa participation à cette problématique pluridisciplinaire. Le géographe intervient aussi pour prendre en compte la question des emboitements d'échelles d'analyse et pour préciser les lieux de vie fréquentés par les individus, ce qui contribue à évaluer la pollution inhalée sur le court, moyen et long terme.

Mots-clés

mesures ponctuelles, PM, étude pluridisciplinaire, exposition à la pollution, géographie appliquée

Abstract

The relationship between environmental conditions and health become a major topic in modern society. In this large issue, the case of Particulate Matter in the air (PM) as an important place and, if several disciplines are interested (from physics to epidemiology), the distribution in space and time of these pollutants are not yet sufficiently inventoried to meet the demands of medical research and to meet the demand of the population. By itinerant measures, with portable sensors and a specific protocol taking into account the specificities of each territory then integrating that data into a GIS, the geographer can reinforce its participation in this multidisciplinary problem. Geographer is also able to consider the issue of interlocking scales of analysis and to clarify the living areas frequented by individuals, which helps to assess the pollution inhaled in the short, medium and long term.

Keywords

spot measures, PM, multidisciplinary study, pollution exposure, applied Geography

I. INTRODUCTION

Les conséquences sur la santé des individus de la pollution de l'air sont des préoccupations anciennes : en Angleterre, dès le XIII^e siècle, la Couronne a dû prendre des mesures pour restreindre l'emploi du charbon dans les maisons en raison de la fumée et de l'odeur dégagées... (Cambers, 1968). Durant la deuxième moitié XIX^e siècle, les pollutions atmosphériques se sont multipliées de façon mas-

sive dans les régions industrielles européennes et nord-américaines, avec l'utilisation croissante du charbon. Les épisodes de pollution de la vallée de la Meuse, à proximité de Liège, en décembre 1930 (Nemery *et al.*, 2001), de Donora en Pennsylvanie, en octobre 1948, et de Londres, en décembre 1952 (Bell & Davis, 2001), en sont les exemples emblématiques aux conséquences humaines dramatiques. D'origine industrielle, ces épisodes correspondaient à de mauvaises conditions de dispersion des rejets

industriels dans la troposphère, en raison de l'installation de puissantes cellules anticycloniques au-dessus de régions industrielles émettrices de polluants, notamment du dioxyde de soufre et de ses dérivés comme l'acide sulfurique. Depuis, le législateur a pris un certain nombre de mesures pour tenter de réduire les émissions et par ailleurs la nature de la pollution a beaucoup changé, au moins en Europe et en Amérique du Nord, où les émissions industrielles et du chauffage ont diminué. Des normes de rejets ont été imposées aux industriels, dont l'activité a diminué dans cette partie du Monde et la pollution acido-particulaire est plus rare. En revanche, avec l'accroissement du parc automobile et malgré l'imposition de normes (carburant, pot catalytique), les sources mobiles se sont multipliées.

En parallèle, la recherche scientifique a évolué et l'on sait distinguer aujourd'hui plusieurs dizaines de polluants dans l'air, qui peuvent se combiner entre eux et se transformer. Parmi ces polluants, il y a les PM (*Particulate Matter* en anglais), dont le taux très variable dans le temps et dans l'espace, est assez souvent à l'origine de bulletins d'alerte destinés à informer la population. Depuis une dizaine d'années, la recherche médicale précise mieux le rôle néfaste de ces PM sur la santé et leur implication dans des pathologies chroniques respiratoires et cardiovasculaires (AFSSET, 2009). Mais, malgré le nombre relativement important d'études (Dab *et al.*, 2001 ; Pope & Dockery, 2006...), ce domaine de la recherche souffre toujours, d'une part, d'une insuffisance de l'évaluation des niveaux d'exposition subis par chaque individu (volumes inhalés sur de longues périodes en particulier) et, d'autre part, d'un manque de connaissance sur les effets sanitaires, surtout à moyen et long terme, des divers types de PM.

Le numéro spécial de la revue *Pollution Atmosphérique* publié en novembre 2012 par l'Association Pour la Protection de l'Air (APPA, 2012), sur le thème « *pollution par les particules, impacts sur la santé, l'air et le climat* » avec plus de 30 articles rédigés par des scientifiques d'horizons disciplinaires différents est révélateur de la diversité des recherches. Bon nombre d'études concernent les effets à court terme (exposition du jour et de la veille à des pics de pollution) ou à moyen terme (exposition cumulée sur quelques dizaines de jours précédents l'admission). Les études sur les cons -

quences à plus long terme sont balbutiantes car ce type d'effet est connu seulement depuis quelques années (manque de recul) et il n'existe pas de données sur les taux de PM inhalés sur le long terme pour évaluer l'exposition.

Dans cette vaste problématique, le géographe pourra renforcer sa place à l'interface entre les sciences « exactes » (chimie, physique...) et médicales ( pid miologie...) pour mieux caractériser la relation entre la présence de PM dans l'air et l'apparition de problèmes sanitaires chez les individus qui sont soumis à des taux très variables de PM tout au long de leur vie.

Après un rappel sur l'origine, la variabilité spatiale et les spécificités de cette forme de pollution (rôle de l'environnement autour des capteurs de mesure, du site et des conditions atmosphériques...) et après avoir montré les enjeux et les limites de la recherche actuelle dans ce domaine émergeant, l'objectif va être de mettre en évidence ce que pourrait être le rôle du géographe dans ce type d'études pluridisciplinaires. La problématique de la répartition des expositions environnementales en fonction des catégories socio-économiques est un autre axe de la recherche qui interpelle aussi les géographes mais ici, faute de place, ce thème n'est pas abordé.

II. DES PARTICULES NOMBREUSES, COMPLEXES ET VARIÉES

Les émissions de PM peuvent être naturelles (sel de mer, érosion éolienne des sols par le vent, feux de végétation, éruption volcanique...) ou anthropiques (transport, chauffage, industrie, incinération, extraction minière...). Si la plupart des émissions se produisent à l'extérieur des habitations (rue, habitacle des véhicules...), certaines peuvent provenir de l'intérieur des locaux de travail ou de résidence (produits de ménage, utilisation d'appareils de chauffage, animaux domestiques, bricolage, matériaux de construction ou mobilier...).

Les particules totales en suspension (TSP pour *Total Suspended Particulate Matter*) correspondent à l'ensemble de celles qui flottent dans l'air ; elles ont presque toujours moins de 40  m de diamètre et très souvent beaucoup moins. On y distingue de manière classique : les « plus grossières » (les PM10), qui ont un diamètre aérodynamique inférieur ou égal

à 10 μm ; les « fines » (PM_{2.5}) de taille inférieure ou égale à 2.5 μm et les « ultrafines » de taille inférieure ou égale à 1 μm (PM₁). Les PM₁₀ incluent les particules fines, très fines et ultrafines et ainsi de suite pour les autres classes. Ces particules vont entrer plus ou moins profondément dans l'appareil respiratoire selon leur taille. Lorsque les particules ont un diamètre aérodynamique compris entre 10 et 3 μm , elles se déposent au niveau de la trachée et des bronches. À moins de 3 μm , elles peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et les ultrafines peuvent passer dans le sang.

Les particules peuvent être classées selon trois catégories :

- les particules primaires : émises directement dans l'atmosphère par un nombre élevé de sources anthropiques et naturelles ;
- les particules secondaires : issues de réactions physico-chimiques à partir d'autres polluants appelés précurseurs ;
- les particules remises en suspension : une fois déposées en surface, ces particules peuvent être remises en suspension sous l'action du vent, du trafic routier, des travaux des champs...

La quantité et la nature des PM, dans un volume et à un instant donné, vont donc dépendre des sources et de la nature de divers polluants en présence ainsi que des variables environnementales qui peuvent faciliter la remise en suspension (nature du sol, taux d'humidité, présence de vent...).

A. De nombreuses sources d'émission à inventorier dans l'espace comme dans le temps

La combustion de combustibles fossiles sur les espaces dédiés aux transports (axes routiers, certaines gares ferroviaires, ports, aéroports...) ou l'évacuation des fumées du chauffage domestique, émettent des PM dans des lieux proches de ceux généralement très fréquentés par les individus. D'autres sources émises par les activités industrielles (sidérurgie, secteur minier, cimenterie, fabrication de céramique et de briques, filière bois...) par l'agriculture (érosion des sols, labours, moissons, épandages de produits phytosanitaires...) mais aussi par d'autres sources, comme l'érosion des chaussées sous l'effet de la circulation routière et l'abrasion des pneus et des freins... peuvent également injecter des PM dans l'air et donc impacter la santé des personnes qui fréquentent ces lieux (poli-

ciers, agriculteurs...). Les PM peuvent contenir des métaux lourds (cadmium, nickel, chrome...), celles d'origine automobile, souvent fines ou ultrafines sont composées d'éléments carbonés, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques et de sulfates et ces éléments peuvent amplifier les conséquences néfastes sur la santé des seules PM (Brunekreef & Holgate, 2002).

La pollution de l'air à l'intérieur des locaux est tout aussi importante. Dans les pays développés, les individus passent, en moyenne, environ 85 % de leur temps dans des environnements fermés où il y a de multiples polluants émis par le bâtiment, les équipements et la décoration (revêtements muraux et de sol, meubles...). Les PM peuvent aussi venir de l'extérieur immédiat comme du type d'activité des occupants (Figure 1).

L'analyse géographique doit être réalisée en collaboration avec les chimistes et physiciens capables de concevoir les instruments permettant de quantifier les taux de PM à l'intérieur comme à l'extérieur des habitations. Pour ce volet de l'étude consacré au cadastre des émissions, le géographe a un rôle expert pour définir les points et les périodes de mesure en fonction de la configuration des lieux, qu'ils soient intérieurs ou extérieurs (ventilation des locaux, exposition aux conditions météorologiques d'un instant donné...).

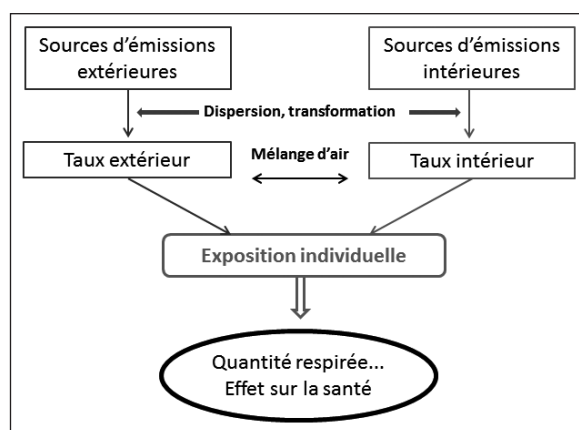


Figure 1. Schéma d'évaluation de l'exposition au risque sanitaire d'un polluant

B. Une concentration atmosphérique en PM dépendante des conditions atmosphériques et environnementales

La dispersion augmente avec l'intensité du vent et, à l'opposé, la présence de substrats humides

(après un épisode pluvieux ou un arrosage du sol par exemple) limite la qualité de PM : par exemple, Duché (2013) montre l'influence de l'humidité du sol sur le taux de PM d'origine terrigène dans les allées du jardin des Tuileries   Paris. Les fonds de vallée sont des milieux particulièrement sensibles à la pollution parce qu'ils concentrent, dans un espace plus étroit qu'en plaine, de nombreuses activités humaines et les émissions qui en résultent (industries, chauffage, trafic routier...). Les mesures réalisées en 2010 dans la vallée de l'Arve (Savoie), pour le compte de l'association AIR-APS (2011), sur un site encaissé favorable à l'accumulation des polluants en situation météorologique stable, montre que les valeurs sont élevées en hiver avec un dépassement régulier du seuil limite lors de ces  v nements météorologiques. Le bois-énergie contribue sensiblement à ces dépassements. En France, premier consommateur européen de bois-énergie, Aymoz *et al.* (2007) ont révélé une contribution des combustions de biomasse de l'ordre de 10 à 40 % sur les concentrations de PM10 hivernales dans plusieurs grandes agglomérations (Lille, Paris, Grenoble, Strasbourg par ex.)

Les campagnes de mesures permettant d'évaluer la zone d'influence d'un polluant sont rares car les appareillages sont lourds et onéreux et la variabilité spatiale et temporelle est telle que l'exercice n'incite pas toujours à les multiplier. Le choix du protocole pour les campagnes de mesures itinérantes, pour lesquelles les géographes ont une certaine expérience, est alors très utile (choix des itinéraires, des périodes de mesures...). Outre la localisation des sources de PM, ces choix demandent au préalable une bonne compréhension des mécanismes aérologiques en particulier ceux des brises thermiques qui vont déplacer les particules (les vents forts dispersent sur de vastes surfaces et le taux par unité de volume est donc plus faible). Ainsi, Michelot (2014)   l'aide de plusieurs appareils de mesures de la brise et du taux de PM, implantés de manière fixe et itinérante, en plusieurs endroits du sud-ouest du département des Alpes Maritimes, montre l'influence majeure des topoclimats sur la concentration en particules. Le régime alterné des brises thermiques transporte, dans un sens puis dans l'autre, les particules émises dans l'agglomération littorale. La nuit et le matin, la brise d'amont (brise de terre-montagne)  vacue les particules au front des Préalpes.   l'inverse le jour, les brises d'aval (brise de mer-vallée) transportent cette fois vers

l'amont et jusque sur les reliefs préalpins, les particules émises au sein de l'espace urbanisé côtier. La concentration des PM varie aussi de manière cyclique – quotidienne, saisonnière – en lien avec le trafic routier (migrations pendulaires) et le chauffage (saison).

L'évaluation des concentrations, dans le temps et l'espace, ne peut se résumer à une interpolation à partir de quelques stations de mesures dans une agglomération et l'approche par la simulation numérique ne peut apporter la précision parfois nécessaire, même si cette méthode reste indispensable (la question de la modélisation numérique n'est pas abordée ici).

C. Des conséquences majeures sur la santé : une relation à préciser à l'échelle individuelle

Les impacts les mieux document s sur la santé respiratoire portent manifestement sur les symptômes et l'hospitalisation chez les personnes asthmatiques et sur celles atteintes de broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO). D'autres effets, comme le développement de l'asthme chez les enfants, sont aussi étudiés (Woolcock & Peat, 1997) mais la diversité des sources polluantes (intérieures et extérieures aux batiments), la taille des PM (qui détermine leur aptitude à pénétrer dans le système respiratoire) comme la nature des particules (qui conditionne leur effet sur l'organisme) compliquent bien évidemment la tâche du chercheur. Celui-ci peut-être amené à avoir à choisir entre (1) un point ou quelques points de mesures « fixes » mais avec un protocole très rigoureux et des mesures plus précises (taille, nature) mais peut-être peu représentatif d'un espace fréquenté par des individus ou (2) un nombre plus important de points de mesures mais avec moins de précisions sur le polluant mesuré. Dans ce dernier cas, il est fait appel à des mesures itinérantes qui permettent d'obtenir des taux de polluants sur plusieurs points le long d'un itinéraire, l'observateur se déplaçant de l'un vers l'autre afin de réaliser un circuit dans un temps défini, ce qui peut être complémentaire d'une modélisation numérique (Khlaifi *et al.*, 2008).

Nerhagen *et al.* (2008) montrent clairement pour une étude de cas concernant Stockholm que le c t de la pollution aux PM est lié à l'exposition de la population. La combustion due à la circulation routière et au chauffage résidentiel donne lieu à

un coût sanitaire plus élevé que les centrales électriques car les émissions du trafic et du chauffage sont diffusées à proximité du lieu de résidence des personnes. Finalement la question prioritaire qui est posée au géographe est celle de l'évaluation de l'exposition individuelle en fonction des modes de vie et des lieux fréquentés par des individus sur un intervalle de temps donné.

Les associations observées entre PM et santé restent donc difficiles à préciser même si un lien net existe entre ces deux variables (Kelly & Fussell, 2012). Belleudi *et al.* (2010) confirment à partir de données sur la mortalité et les hospitalisations à Rome (entre 2001 et 2005) pour causes cardiorespiratoires, que ce sont bien ces particules fines et ultrafines qui ont les effets les plus nocifs sur la santé. Plusieurs publications montrent que l'impact sur la santé publique de la pollution atmosphérique liée aux particules, est plus influencé par les concentrations moyennes à long terme que par les épisodes ponctuels de «pics» de pollution. Par ailleurs, cette pollution, n'est qu'un facteur parmi d'autres qui contribue à l'apparition d'une maladie, même si très schématiquement le nombre de personnes affectées diminue avec la croissance de la gravité (Figure 2).

La recherche se heurte aujourd'hui à bon nombre de questions dont plusieurs concernent le géographe. Quels sont les composants et les zones source des PM responsables des effets sur la santé ? Jusqu'à quelle distance un axe routier peut impacter la santé à court ou moyen terme en fonction du trafic, de la morphologie urbaine à l'échelle de la rue (le « canyon urbain », défini par la hauteur des bâtiments, la largeur et la longueur de la rue), des conditions micro-météorologiques ? Autant de notions qui renvoient à la problématique des emboitements d'échelles d'analyse ou à celle des lieux de vie fréquentés par les individus, notions auxquelles les géographes sont familiers.

III. L'EXIGENCE D'UNE APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE

Si les études sur la relation entre l'exposition aux polluants atmosphériques et la santé existent depuis quelques décennies (Lave & Sesking, 1970), celles spécifiques à la pollution aux PM sont plus récentes et elles restent essentiellement mono-disciplinaires (Filleul & *al.*, 2003 ; Englert, 2004...).

La relation entre les deux est très délicate à mettre en évidence et les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas une quantification précise ou un classement des composés les plus à risque et « *les associations observées avec la santé peuvent résulter de composants multiples agissant sur différents mécanismes physiologiques* » (Mauderly & Chow, 2008). Cela est d'autant plus évident que les PM constituent un mélange hétérogène et complexe qui évolue dans le temps et dans l'espace et ces particules peuvent être constituées d'une multitude de composants chimiques, dont beaucoup sont potentiellement toxiques (Rückerl *et al.*, 2011). Les études récentes ont cependant montré l'impact majeur de la pollution au PM et le besoin de développer ce domaine de recherche. Le programme européen Aphekom, portant sur 25 villes de l'Union européenne (totalisant 39 millions d'hab.), dont 9 françaises (12 millions d'hab.), conclut à une espérance de vie à 30 ans, réduite de plusieurs mois selon les villes (Pascal & Medina, 2012). Si les concentrations moyennes annuelles de PM_{2,5} respectaient la valeur guide de l'OMS (10 µg/m³), l'espérance de vie à 30 ans augmenterait dans une fourchette allant de 22 mois à Bucarest à 0.4 mois à Dublin.

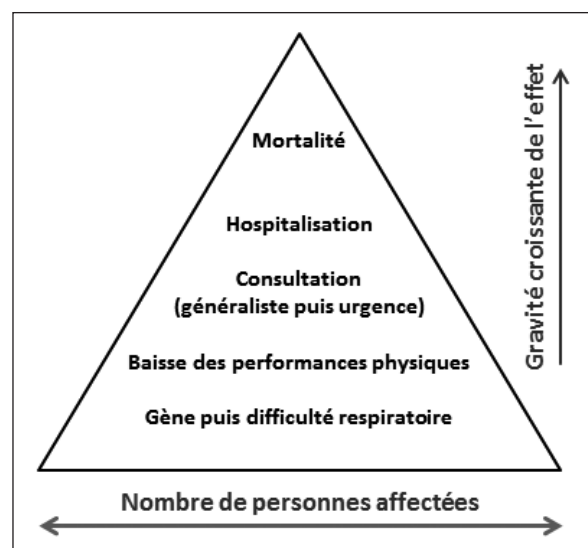


Figure 2. Hiérarchie des effets de la pollution sur la santé et nombre de personnes affectées

A. L'évaluation de l'exposition dans le temps et l'espace : une problématique géographique

En étant conscient de ces difficultés d'ordre méthodologique, le géographe peut s'insérer dans un groupe de travail entre, d'une part, les chimistes et

les ingénieurs capables de concevoir les capteurs de mesure ainsi que les modélisateur capables d'élaborer des simulations de la pollution à l'échelle de la rue ou du quartier et, d'autre part, les  pidemiologistes capables d'établir des relations de cause à effet basées sur des cohortes de population.

Si les mesures *in situ* sont parfois perçues comme une tâche ingrate, elles n'en restent pas moins essentielles à plus d'un titre. En milieu urbain, par exemple, les taux de PM sont souvent élevés et très variables dans l'espace sous l'effet de la forme de la ville, des matériaux qui modifient les bilans d'énergie et donc la circulation des brises. C'est aussi le cas dans les transports en commun, surtout dans les parcours souterrains où les taux sont plus élevés que sur les lignes dont le parcours est aérien. Ainsi, d'après Delaunay *et al.* (2010), à Paris, lors d'une campagne de mesures sur le RER A et sur les lignes 1 et 14 du Métro, les teneurs médianes en PM_{2,5} étaient comprises entre 119 et 155 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et les maxima atteignaient respectivement 311 et 264 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette pollution résulte pour une large part d'émissions internes dont l'origine principale est le système de freinage du matériel roulant. Duché (2013) montre, à partir de mesures itinérantes sur des itinéraires de plusieurs modes de transport parisiens, que le taux de PM est en général plus élevé dans le métro que sur des pistes cyclables ou les trottoirs.   travers ces quelques exemples, on comprend bien que, pour établir un protocole de mesures, il est nécessaire de choisir minutieusement les lieux et périodes de mesures.

B. Le rôle de l'aérologie locale et ses relations avec les taux de PM : une approche à plusieurs échelles

L'analyse des conditions aérologiques locales est tout autant importante car les taux sont étroitement dépendants des flux atmosphériques au-dessus de la surface mais ils dépendent aussi des activités humaines et donc des heures de la journée. Mich lot et Carrega (2011) montrent une étroite relation entre la présence d'une brise de versant et le taux de polluants dans la couche limite. Sur leur site d'étude dans une vallée de l'arrière-pays niçois, quand la brise d'amont (brise de terre-montagne) souffle, elle assure principalement la ventilation. Lorsqu'elle s'estompe (temps calme dans la matinée), les conditions sont favorables à l'accumulation des PM émises localement (cimenterie dans le cas de l'étude). Puis, en début de nuit, lorsque la

brise se réinstalle, les taux de PM baissent à nouveau... Le même type de constat est montré pour l'agglomération de Sfax en Tunisie où la pollution d'origine automobile a un rythme diff rent de celle d'origine industrielle qui, dans cette ville littorale, est fortement liée aux brises littorales (Dahech *et al.*, 2007). Ce type d'études, réalisé grâce à la mise en place de protocoles de mesures choisis en fonction du site (topographie de la vallée par exemple mais aussi des enjeux (habitations) et des variables atmosphériques les plus pertinentes (ici les brises thermiques), montre l'utilité des observations de terrain qui peuvent donner des informations plus précises (et même différentes dans certains cas) que celles obtenues par modélisation numérique car cette dernière ne peut pas prendre en compte toute la complexité d'un territoire, même si elle reste très utile pour simuler les taux dans l'espace.

La difficulté du choix des protocoles de mesures vient :

- d'une part, de la définition des catégories d'individus en fonction de leur activité professionnelle, de leur lieu et type de résidence, autant de facteurs qui imposent une bonne connaissance des modes de vie afin d'en dégager des tendances. Mais la variabilité interindividuelle est aussi un facteur qui complique les études, la déposition particulaire dans les poumons est sensiblement plus marquée chez les individus atteints de pathologies obstructives telles que l'asthme et la bronchopathie pulmonaire obstructive (Kim & Kang, 1997) ;
- d'autre part, de l'évaluation de l'exposition passée de ces individus sur des périodes de temps nettement plus longues que les seules campagnes de mesure. Ce type d'étude est traité prioritairement par enquête auprès de la population mais elle reste délicate à conduire d'autant plus que la nature des PM a changé au fil des années (moins de PM d'origine industrielle, plus de PM dues au trafic automobile) et que l'évolution rapide de la technologie et de la précision des échantillonneurs d'air sont telles que les données de l'état de l'environnement atmosphérique du passé ne sont pas comparables avec celles mesurées ces dernières années.

IV. CONCLUSIONS

La recherche sur les relations entre la pollution aux

PM et la santé nécessite d'identifier précisément les sources et les composants qui ont les effets les plus importants sur l'organisme humain. Il faut donc collecter des données sur les taux d'exposition inhalés et extrapoler au mieux ces données pour diverses échelles de temps et d'espace en fonction des modes de vie des individus sur le long terme. L'objectif de ces études pluridisciplinaires en étroite collaboration avec, d'une part, les chimistes et les concepteurs des instruments de mesure et, d'autre part, les chercheurs dans le domaine de la santé est donc de mieux définir cette exposition ainsi que la fenêtre de sensibilité des populations vulnérables. La modélisation numérique utilisée afin de mieux préciser la répartition spatio-temporelle des polluants est un autre domaine de recherche auquel les géographes peuvent apporter leurs compétences, que ce soit pour caractériser la forme et l'occupation de la surface ou pour valider, à partir de mesures *in situ*, la fiabilité des modèles qui simulent la répartition dans l'espace. Dans cette vaste problématique, le géographe a les outils pour renforcer sa place à l'interface entre les sciences dites exactes et médicales afin de caractériser les niveaux d'exposition des catégories de populations qui sont soumises à des taux très variables sur le moyen et long terme. Par le choix de protocoles de mesures en des lieux préalablement définis en fonction des activités humaines mais aussi de la morphologie et des conditions de ventilation du site d'étude, il peut apporter des précisions importantes et par là même montrer que l'exposition est fortement dépendante des conditions de mesures.

Dans le contexte actuel d'une croissance de la demande sociale d'une partie de la population, il faut probablement aussi s'attendre à une demande de conseils plus personnalisés (par niveau de vulnérabilité de la population, par type de temps, par type d'activité, par localisation dans une ville...). Ces études devront aussi s'insérer dans des projets plus vastes portant sur les nuisances environnementales vécues et perçues par les individus et elles devront être appréhendées de manière plus globale (intégrant la propreté, les odeurs, la visibilité...) ce qui soulève la thématique beaucoup plus globale de la ville durable du futur.

BIBLIOGRAPHIE

- AFSSET (2009). *Pollution par les particules dans l'air ambiant. Synthèse des éléments sanitaires en vue d'un appui à l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public pour les particules dans l'air ambiant*. Rapport d'expertise collective, 96 p. + annexes. URL : <http://www.afsset.fr/index.php>
- AIR-APS (2011). Suivi des polluants réglementés dans la vallée de l'Arve, 43 p. Rapport en ligne : <http://www.air-rhonealpes.fr/>
- AIRPARIF (2008). Les différents polluants et leur évolution. Récupéré du site <http://www.airparif.asso.fr/pollution/differents-polluants>
- APPA (Association Pour la Protection de l'Air) (2012). « Pollution par les particules, impact sur la santé, l'air et le climat », Numéro spécial, 231 p. <http://www.appa.asso.fr/national/Pages/article.php?art=754>
- Aymoz, G., Jaffrezo, J.L., Chapuis, D. *et al.* (2007). Seasonal variation of PM10 main constituents in two valleys of the French Alps. 1: EC/OC fractions, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 661-75.
- Bell, M.-L. & Davis, D.L. (2001). Reassessment of the lethal London fog of 1952: novel indicators of acute and chronic consequences of acute exposure to air pollution. *Environ Health Perspect*, 109, 389-94.
- Belleudi, V., Faustini, A., Stafoggia, M., Cattani, G., Marconi, A., Perucci, C.A. *et al.* (2010). Impact of fine and ultrafine particles on emergency hospital admissions for cardiac and respiratory diseases. *Epidemiology*, 21(3), 414-23.
- Brunekreef, B. & Holgate, S.T. (2002). Air pollution and Health. *The Lancet*, 360, 1233-1242.
- Chambers, L.A. (1968). *Classification and extent of air pollution problems*. In A.C. STERN - Air Pollution, New York: Academic Press, 1-21.
- Dab, W., Ségala, C., Dor, F., Festy, B., Lameloise, P., Le Moullec, Y. *et al.* (2001). Air pollution and health : correlation or causality? The case of the relationship between exposure to particules and cardiopulmonary mortality. *J. Air Waste Manag Assoc*, 51, 220-35.
- Dahech, S., Daoud, A. & Beltrando, G. (2011). Les inégalités spatiales de la qualité de l'air dans l'agglomération de Sfax et ses environs : Le cas des températures, de la brise, du CO et SO₂. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature,

- Paysage, document 557, URL : <http://cybergeo.revues.org/24701>
- Delaunay, C., Goupil, G., Ravelomanantsoa, H., Person, A., Mazoue, S. & Moranwski, F. (2010).  valuation de l'exposition des citoyens aux polluants atmosphériques au cours de leurs déplacements dans l'agglomération parisienne. Rapport PRIMEQUQL 2 : PRÉDIT. 132p. Récupéré sur le site <http://www.primequal.developpement-durable.gouv.fr/files/doc/6cc1893ee8048073.pdf>
- Duché, S. (2013). *La pollution de l'air en région parisienne : exposition et perception sur les sites touristiques*, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-Diderot, juin, 227 p. + annexes.
- Englert, N. (2004). Fine particles and human health - a review of epidemiological studies. *Toxicol Lett*, 149, 235-42.
- Filleul, L., Medina, S. & Cassadou, S. (2003). La pollution atmosphérique particulaire urbaine : de l'épidémiologie à l'impact sanitaire en santé publique. *Rev. Epidemiol. de Santé Publique*, 51, 527-42.
- INSEE (2010). *La pollution de l'air par les transports*. Récupéré sur le site : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/361/1228/pollution-lair-transports.html>
- Kelly, F.J. & Fussell, I. (2012). Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmospheric Environment*, 60, 504-526.
- Khlaifi, A., Dahech, S. & Beltrando, G. (2008). Study of the SO₂ dispersion with the Gaussian model according to the atmospheric circulation in a coastal city : Sfax (Tunisia). *Meteorol. Appl.*, 15 (4), 513-522.
- Kim, C.S. & Kang, T.C. (1997). Comparative measurement of lung deposition of inhaled fine particles in normal subjects and patients with obstructive airway disease. *Am J respir Crit Care Med*, 15, 899-905.
- Lave, L.B. & Seskin, E.P. (1970). Air pollution and Human Health, *Sciences*, 169, 723-733.
- Mauderly, J.L. & Chow, J.C. (2008). Health effects of organic aerosols. *Inhal Toxicol.* 20 (3), 257-88.
- Michelot N. (2014). *L'influence des topoclimats sur la pollution de l'air aux particules dans le sud-ouest des Alpes Maritimes*. Thèse de Doctorat de l'Université de Nice Sophia-Antipolis, 357 p. + annexes.
- Nemery, B., Hoet, P.H. & Nemmar, A. (2001). The Meuse Valley fog of 1930 : an air pollution disaster. *Lancet*, 357, 704-708.
- Nerhagen, L., Bergström, R., Forsberg, B., Johansson, C. & Eneroth, C. (2008). *The mortality cost of particulate matter due to emissions in the Stockholm area - an investigation into harmfulness, sources and the geographical dimension of their impact*. VTI rapport 635A, 36 p. Rapports du VTI (Suède). Consulté sur le site www.vti.se/sv/publikationer/pdf/
- Pascal, M. & Medina, S. (2012). *Résumé des résultats du projet Aphekom 2008-2011. Des clefs pour mieux comprendre les impacts de la pollution atmosphérique urbaine sur la santé en Europe*. Saint-Maurice : Institut National de Veille Sanitaire. 6 p. Récupéré du site : <http://www.invs.sante.fr>
- Pope, C.A. & Dockery, D.W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J. Air Waste Manag Assoc.* 56, 709-42.
- R ckerl, R., Schneider, A., Breitner, S., Cyrus, J. & Peters A. (2011). Health effects of particulate air pollution: A review of epidemiological evidence. *Inhal Toxicol.*, 23 (10), 555-92.
- Woolcock, A.J. & Peat, J.K., (1997). Evidence for the increase in asthma worldwide. *Ciba Found Symp*, 206, 122-134.

Coordonnées de l'auteur :

Gérard BELTRANDO
 Université Paris-Diderot
 UMR 8586 du CNRS (PRODIG)
 c. c. 7001
 F-75205 Paris Cedex 13
 beltrando@univ-paris-diderot.fr