

Pollution atmosphérique de proximité liée au trafic : expositions et effets sanitaires

Sabine Host et Edouard Chatignoux, sous la direction d'Isabelle Grémy, directrice de l'ORS

Au cours des vingt dernières années, un nombre important d'études épidémiologiques a permis de mettre en évidence les liens à court et à long terme entre les niveaux de pollution atmosphérique couramment observés dans les zones urbaines et la survenue de différents problèmes de santé, notamment en Ile-de-France dans le cadre du programme Erpurs (Évaluation des risques de la pollution urbaine sur la santé) piloté par l'ORS.

La grande majorité de ces études a utilisé les niveaux de pollution de fond afin d'estimer l'exposition des populations. Ces niveaux correspondent aux concentrations en polluants mesurées à l'écart de toute source de pollution (industrielle ou automobile) et résultent à la fois de la pollution naturelle, des transferts de pollution à longue distance et de la dispersion des polluants émis localement (industries, chauffage, trafic routier...). Ils caractérisent ainsi la qualité générale de l'atmosphère d'une zone donnée, et représentent le niveau d'exposition minimal ressenti par l'ensemble de la population de la zone. La mise en corrélation des variations temporelles (d'un jour à l'autre) ou spatiales (d'une zone à l'autre) de ces expositions avec les variations de l'état de santé des populations a ainsi permis de quantifier les risques sanitaires, à court et à long terme, dus à la pollution générale de l'atmosphère.

En revanche, ces études n'ont pas permis de statuer sur les risques liés aux expositions au voisinage des sources d'émissions, fixes (incinérateurs, usines) ou mobiles (trafic routier, maritime, aérien). Or, cette pollution représente un enjeu de santé publique

spécifique. D'une part, les niveaux d'exposition à proximité des sources sont généralement plus élevés qu'en situation de fond, et sont donc susceptibles d'entraîner des effets sanitaires plus importants. D'autre part, la composition chimique, et donc la toxicité, de la pollution de proximité peut être sensiblement différente de celle de la pollution de fond (Schlesinger et al., 2006).

En Ile-de-France, la question de la pollution de proximité porte en majeure partie sur les sources liées au trafic routier. En effet, la région est caractérisée par la présence d'autoroutes urbaines (dont le périphérique) et autres axes de circulation importante qui côtoient étroitement des zones densément peuplées. Ainsi, une part non négligeable de la population est susceptible d'être exposée à cette pollution. Par ailleurs, davantage perceptible que la pollution de fond, elle fait l'objet d'inquiétudes de plus en plus prégnantes de la part du public (cf. encadré).

La proximité au trafic accentue la perception des risques liées à la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique constitue en Ile-de-France une préoccupation de santé publique importante. 58 %¹ des Franciliens déclarent avoir déjà ressenti les effets de la pollution atmosphérique sur leur santé ou celle de leur entourage proche. Cette perception des risques est significativement ($p < 0,01$) renforcée pour les Franciliens qui déclarent résider à proximité d'une autoroute ou d'une voie à grande circulation (soit 2 Franciliens sur 5), avec des effets ressentis pour 67 % d'entre eux.

¹ Ces résultats sont issus de l'exploitation ORS Ile-de-France du Baromètre santé environnement de l'Inpes (Inpes, 2008).

Nous adressons nos remerciements aux membres du comité scientifique du programme Erpurs qui ont accompagné ce travail et relu attentivement ce document.

De ce fait, cette synthèse traite uniquement de la question du trafic routier, qui constitue un véritable enjeu pour la région, dans une perspective non seulement sanitaire, mais aussi de développement durable et de réduction des inégalités environnementales (Frère et al., 2005). Afin de cerner ces enjeux, une meilleure connaissance de cette problématique, notamment en termes d'exposition de la population et d'effets potentiels sur la santé, s'avère nécessaire.

L'étude des effets sanitaires de la pollution de proximité liée au trafic routier se heurte cependant à de nombreuses difficultés méthodologiques, en premier lieu d'ordre métrologique. La caractérisation et la mesure de l'exposition des populations aux émissions de proximité sont en effet difficiles à établir (Reungoat et al., 2004). Les études épidémiologiques sur le sujet ont ainsi souvent eu

recours à des méthodes indirectes pour rendre compte de ces expositions, et si elles sont parvenues à mettre en évidence des fréquences plus élevées de maladies et symptômes respiratoires, ainsi que des risques de décès plus élevés en lien avec la pollution atmosphérique de proximité liée au trafic (Brunekreef & Sunyer, 2003 ; Bayer-Oglesby et al., 2006 ; Hoek et al., 2002 ; Gauderman et al., 2007), il reste difficile de comparer les résultats obtenus et de les appliquer à d'autres situations.

L'objectif de cette synthèse est de fournir un état des connaissances de la problématique, d'identifier les spécificités de la pollution de proximité liée au trafic routier, en particulier en termes d'expositions, d'effets sanitaires et de populations à risque, afin d'en tirer des enseignements quant à la situation francilienne.

Définition et surveillance de la pollution de proximité liée au trafic routier

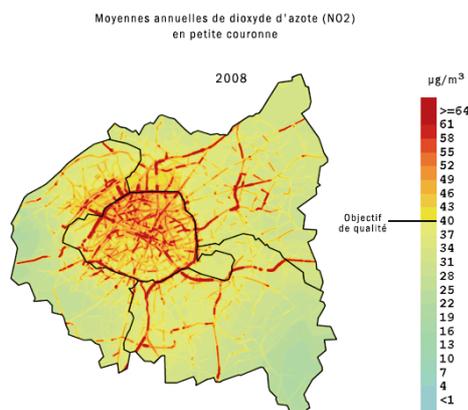
La pollution de proximité, telle qu'envisagée dans cette note, résulte de la conjugaison de la pollution dite de fond et de l'impact local du trafic routier. Lors des périodes de faible trafic, les niveaux de polluants sont équivalents à l'ambiance générale du quartier où l'axe se situe. En revanche, lorsque la circulation routière est importante, à cette ambiance générale s'ajoute la pollution directement induite par le trafic de l'axe, générant des niveaux de polluants localement majorés, avec une exposition potentielle des individus maximale au niveau de l'axe.

En Ile-de-France, les concentrations de polluants à proximité immédiate des axes de circulation font l'objet d'une surveillance de la part d'Airparif, les mesures continues des stations fixes étant renforcées par des campagnes de mesures ponctuelles. Alors que la configuration des axes routiers et leur fréquentation diffèrent d'une voie de circulation à l'autre, influençant directement les niveaux de pollution retrouvés en bordure d'axe, ces mesures seules ne permettent pas de caractériser l'ensemble des axes. La modélisation permet alors pour certains polluants d'approcher ces valeurs pour la majeure partie du réseau routier de la zone agglomérée de la région, soit 10 650 km de voies (Airparif, 2005). Toutefois, en l'absence d'une connaissance suffisamment aboutie des phénomènes de dispersion des polluants à l'échelle de la rue et du quartier, ces méthodes ne permettent pas de déterminer avec précision des profils de décroissance des niveaux de

pollution à partir des axes et de délimiter la zone sous influence directe du trafic routier.

Malgré les incertitudes attachées à ces modélisations, en particulier s'agissant des particules (cf. encadré ci-contre), des cartes des niveaux annuels de dioxyde d'azote (NO₂) (cf. figure 1), de benzène et de particules PM₁₀ sont établies en tout point de la région Ile-de-France, en intégrant la pollution le long des axes routiers. Ces cartes fournissent une bonne indication de la répartition des moyennes annuelles des niveaux de pollution sur l'ensemble du territoire et permettent de suivre leur évolution d'une année sur l'autre. Elles permettent également d'évaluer la population soumise à des dépassements des valeurs limites des niveaux de pollution sur leur lieu de résidence.

Figure 1 : Moyennes pour l'année 2008 des niveaux de NO₂ à Paris et proche couronne (source : Airparif)



Modélisation de la pollution atmosphérique de proximité et incertitudes

Les modèles sont aujourd'hui un outil incontournable à l'étude de la pollution atmosphérique. Cependant, la modélisation de la pollution à proximité des axes routiers reste un exercice complexe, compte-tenu des nombreux facteurs à prendre en considération à cette échelle : émissions locales générées par le trafic, dépendant elles-mêmes des conditions de trafic et de la composition du parc routier ; paramètres influençant la dispersion des polluants (météorologie locale, configuration des voiries) ; niveaux de fond des zones environnantes (Airparif, 2008c). Plusieurs modèles existent et sont utilisés par les associations de surveillance de la qualité de l'air (Street, ADMS-Urban, Sirane...) mais ils comportent encore de nombreuses incertitudes, en particulier s'agissant des particules, étant donnés les processus physico-chimiques complexes et variés mis en jeu dans leur formation. Par ailleurs, concernant ces dernières (particules primaires et précurseurs des espèces secondaires), les facteurs d'émissions ne sont pas tous bien connus ; de même les phénomènes de remise en suspension (par le trafic ou le vent) sont encore mal pris en compte. Enfin, une meilleure connaissance de l'aérosol en termes de granulométrie, composition chimique, concentrations en nombre... serait nécessaire pour alimenter et caler ces modèles.

Spécificité de la pollution atmosphérique à proximité du trafic

Tableau 1 : Niveaux moyens en situation de fond et à proximité du trafic, ratio pour l'année 2008 et contribution du trafic routier (source : Airparif)

Polluants	2008		Facteur multiplicatif	Inventaire 2005
	Moyenne stations trafic (µg/m ³)	Moyenne stations fond (µg/m ³)		Contribution du trafic routier
NOx	262	57	4,6	53 %
NO ₂	84	39	2,2	non disponible
PM ₁₀	46	24	1,9	28 %
PM _{2,5}	30	16	1,9	non disponible
CO	4700	700	6,7	78 %*
HAM	29,5	10,3	2,9	19 %**
HAP	27x10 ⁻³	12,1x10 ⁻³	2,2	non disponible

* inventaire 2000

** tout composé organique volatil non méthanique (HAM inclus)

CO : monoxyde de carbone

HAM / HAP : hydrocarbures aromatiques monocycliques / polycycliques

Des niveaux de pollution plus élevés à proximité directe du trafic qu'en situation de fond

Les oxydes d'azote (NOx), comme le benzène, sont des polluants primaires directement émis par le trafic routier ; ils constituent de ce fait de bons traceurs de cette source de polluants. Les mesures réalisées par Airparif indiquent que les niveaux moyens annuels de NOx et de benzène à proximité d'axes routiers importants peuvent atteindre de deux à quatre fois les niveaux observés en situation de fond (cf. tableau 1). Pour l'ensemble des autres polluants, hormis l'ozone², des niveaux plus élevés qu'en situation de fond sont également retrouvés à proximité du trafic. Ainsi, et alors que les niveaux de pollution respectent généralement les normes et les objectifs de qualité en situation de fond, des dépassements sont toujours constatés en situation de proximité, en particulier dans le cœur dense de l'agglomération. Selon Airparif, environ 2 millions de Franciliens ont été potentiellement exposés à leur domicile au

² L'ozone est un polluant secondaire qui n'est pas mesuré par les stations trafic car ses concentrations sont très faibles en situation de proximité du fait de sa destruction par le monoxyde d'azote (NO).

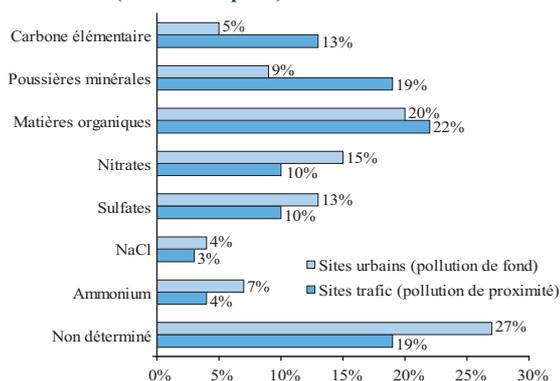
dépassement des valeurs limites en NO₂ en 2008 et 1,3 millions pour les PM₁₀ et le benzène.

Une composition spécifique de la « soupe » de polluants

Tel qu'indiqué dans le tableau 1, la contribution du trafic routier aux émissions globales des différents polluants est relativement importante. Cependant, elle diffère selon le polluant considéré. Ainsi, il est présagé une composition différente de la « soupe » de polluants dans les zones directement sous influence du trafic routier par rapport à la situation de fond.

Par ailleurs, les particules, à la différence des polluants gazeux, ne constituent pas une espèce chimique unique et homogène. Ainsi, si on relève des niveaux de particules plus élevés à proximité du trafic qu'en situation de fond, on observe également des différences de composition, avec une plus grande proportion de carbone élémentaire pour les particules prélevées sur les sites trafic, comme indiqué à la figure 2 (Airparif, 2008c). De plus, il semblerait qu'en situation de proximité, les niveaux de particules, d'un site trafic à l'autre, présentent une variabilité moindre que ceux de polluants gazeux tels

Figure 2 : Composition des PM₁₀ selon le type de station de mesures (source : Airparif)



que les NOx plus directement liés aux conditions de trafic routier. Ceci confirme la plus grande multiplicité et complexité des sources de particules au-delà des émissions des pots d'échappement. En effet, les particules d'import régional contribueraient entre 60 % et 90 % aux niveaux mesurés sur sites urbains et trafic (EMEP, 2007), le trafic routier contribuant à environ 28 % des émissions³ de PM₁₀ et PM_{2,5} dans la région (Inventaire 2005).

Ainsi, l'exposition aux polluants primaires tels que le monoxyde de carbone, le benzène ou bien le carbone élémentaire en situation de proximité est en général majorée par rapport à la situation de fond, contrairement à l'exposition aux polluants secondaires tels que les particules secondaires ou bien l'ozone (OMS, 2005).

Une connaissance de la dispersion des polluants encore imparfaite

Si les niveaux de polluants à proximité immédiate du trafic routier font l'objet d'une surveillance et sont bien caractérisés grâce au réseau fixe de mesures d'Airparif, aux campagnes de mesures ponctuelles et à la modélisation, telles qu'évoquées précédemment, les phénomènes de dispersion des polluants, et en particulier des particules, à l'échelle de la rue et du quartier, ne sont pas encore parfaitement connus. Cependant, grâce aux campagnes de mesures réalisées par Airparif à proximité de voies importantes de circulation, et en particulier autour de l'échangeur autoroutier de Bagnole et de la porte de Gentilly, l'évolution des niveaux de polluants depuis la proximité des axes routiers jusqu'au niveau de fond a pu être précisée, ainsi que l'influence des obstacles et de la configuration des infrastructures.

Ainsi, l'étude de qualité de l'air effectuée autour de la porte de Gentilly a montré une baisse rapide des niveaux de NO₂ dès que l'on s'éloigne de l'axe de circulation, d'environ 35 % à une vingtaine de mètres. La diminution des niveaux s'observe ensuite de manière plus progressive, l'influence du trafic étant encore perceptible à 160 mètres. Concernant le benzène, l'influence locale du trafic routier est plus marquée avec une diminution plus rapide des teneurs à une distance de 20 mètres de la source (d'environ 45 %) et un niveau de fond pratiquement atteint à 150 mètres (Airparif, 2008b). Cependant, il faut souligner que les niveaux et les profils de diminution sont largement influencés par les conditions de

Phénomène des « rues canyon »

Les rues encaissées, dites « rues canyon », dont la hauteur du bâti est importante par rapport à la largeur de la rue, sont propices à l'accumulation de polluants. En effet, les polluants émis au fond d'une rue canyon se retrouvent piégés dans un volume d'air réduit, confiné entre deux barrières de bâti. Ainsi, pour des trafics identiques et des mêmes conditions météorologiques, plus le bâti est élevé et dense, plus les concentrations locales de polluants sont fortes (Maignant, 2005).

dispersion et en particulier le régime des vents. Les conditions d'urbanisme influencent également la dispersion des polluants, avec des profils de décroissance moins marqués en situation d'environnement urbain dense, avec le cas extrême des « rues canyon » (cf. encadré).

Les locaux à proximité du trafic sont-ils plus pollués ?

Etant donné que les individus passent la majorité de leur temps à l'intérieur des locaux, il est important de s'interroger sur le transfert des polluants du milieu extérieur vers l'intérieur et ainsi sur l'influence de la pollution de proximité sur la qualité de l'air intérieur. Cette dernière est elle-même influencée par nombre de facteurs. Outre la plus ou moins bonne qualité de l'air extérieur, dont l'apport est contrôlé par la ventilation, la présence de sources intérieures, l'activité des occupants ainsi que les caractéristiques des locaux conditionnent les niveaux de polluants retrouvés à l'intérieur. Paradoxalement, si la ventilation offre une voie d'entrée aux polluants de l'extérieur, elle garantit aussi le fait que les polluants émis à l'intérieur ne s'y accumulent pas et participe globalement à l'abaissement des niveaux. Le transfert des polluants de l'air extérieur vers le milieu intérieur en lui-même est conditionné en grande partie par le dispositif de ventilation, toutefois, selon le polluant considéré, les capacités de pénétration à travers le bâti diffèrent, de même que les comportements à l'intérieur (réactivité, capacité de déposition et de remise en suspension). L'étude des relations entre les niveaux extérieurs et intérieurs n'est pas simple et a fait l'objet de nombreux travaux en France et à l'étranger. Dans une étude française portant sur des écoles, en l'absence de sources intérieures, les ratios intérieur/extérieur (I/E) variaient entre 0 et 0,45 pour l'O₃, entre 0,5 et 1 pour

³ Ces émissions sont liées à la fois à la combustion de carburant, à l'abrasion des véhicules (freins, pneus) et des routes ainsi qu'aux phénomènes de remise en suspension.

le NO, et entre 0,88 et 1 pour le NO₂ (Blondeau et al., 2004). D'un point de vue physique, il n'existe pas d'argument pouvant expliquer que, pour un même bâtiment, la ventilation introduise plus d'un polluant ou d'un autre. Ces différences sont plus vraisemblablement dues à des processus physico-chimiques qui contribuent à transformer ou éliminer une partie des molécules de gaz qui pénètrent dans les bâtiments. En situation de proximité au trafic, ces ratios I/E sont-ils du même ordre de grandeur? Les mesures effectuées en milieu intérieur dans le cadre de la campagne menée par Airparif autour de la porte de Gentilly permettent d'apporter des éléments de réponse. Pour les polluants considérés il n'y avait pas de sources intérieures connues. Concernant le NO, il a été observé des ratios I/E proches de 1, dénotant une grande stabilité de ce gaz à l'intérieur des locaux proches des voies de circulation du fait de l'absence d'ozone. De même, les niveaux de benzène retrouvés à l'intérieur étaient similaires aux niveaux mesurés en façade, avec une décroissance des niveaux extérieurs aux étages élevés. Pour le NO₂, les ratios I/E allaient de 0,2 à 0,9, l'abattement le plus fort ayant été observé pour un local mal ventilée.

S'agissant des particules, il a été montré dans différents travaux que les ratios sont notamment fonction de la granulométrie. En particulier, Blondeau et al. ont observé des ratios proches de l'unité pour les particules fines, et ce quel que soit le type de bâti ou encore l'efficacité de la ventilation. En revanche, pour les particules plus grosses, dont le diamètre dépasse environ 2 µm, les niveaux intérieurs sont faiblement corrélés aux niveaux extérieurs. En effet, pour ces particules, d'une part le bâti peut jouer un rôle de filtre, d'autre part, elles se déposent rapidement sur les surfaces.

De la caractérisation de la pollution de proximité liée au trafic à l'exposition de la population

La mesure de l'exposition des populations à la pollution de proximité est un exercice délicat. D'une part, il n'existe pas de traceur spécifique de la pollution de proximité liée au trafic (cf. encadré page suivante). D'autre part, les populations fréquentent quotidiennement de multiples micro-environnements (domicile, rue, transport, lieu de travail...) plus ou moins impactés par ce type de pollution. L'exposition globale résulte du temps passé dans ces différents lieux de vie et des niveaux de pollution qui les caractérisent, ces derniers étant, comme précédemment évoqué, difficiles à mesurer. Comme

En ce qui concerne les particules ultrafines (de 0,01 µm à 1 µm), il semblerait que les ratios I/E soit moins élevés que pour les particules fines. Dans une étude réalisée à Athènes (Diapouli et al., 2007), des ratios I/E de l'ordre de 0,5 (concentrations mesurées en nombre) ont été observés. Les phénomènes physico-chimiques expliquant ces comportements différents restent à explorer (Cyrus et al., 2004).

L'ensemble de ces résultats indiquent que les polluants atmosphériques, et en particulier ceux émis par le trafic, pénètrent à l'intérieur des locaux, et ce même lorsque le bâti offre une certaine imperméabilité, et contribuent de manière relativement importante aux niveaux intérieurs de polluants, d'autant plus que leur réactivité est faible. A titre d'illustration, dans une étude menée à Helsinki et Amsterdam (Yli-Tuomi et al., 2008), il a été estimé que de 70 % à 84 % des PM_{2,5} mesurées à l'intérieur provenaient de l'extérieur (la source intérieure liée au tabagisme étant absente dans cette étude).

Les locaux à proximité du trafic sont donc susceptibles d'être plus pollués que ceux situés dans un environnement moins directement influencé par les sources de pollution. Toutefois, comme il l'a été rappelé précédemment, les niveaux intérieurs ne sont pas uniquement déterminés par l'éloignement des locaux par rapport à la source. Les conditions de ventilation ainsi que l'environnement intérieur rentrent également en ligne de compte. Par ailleurs, il a été observé que les niveaux extérieurs relevés « côté cour » subissent un abattement, l'immeuble jouant un rôle d'écran par rapport à la source de polluants (Airparif, 2008b). L'orientation du logement est ainsi également susceptible d'influer sur les niveaux intérieurs.

il est également difficile d'effectuer des mesures individuelles en continu à l'aide de capteurs portatifs, l'exposition est souvent évaluée de manière indirecte. Ainsi, différentes méthodes, ont été développées dans les études épidémiologiques afin d'estimer l'exposition de la population à la pollution atmosphérique de proximité. Puisqu'il est rare de disposer de données précises concernant les habitudes des individus, ces méthodes ne permettent pas de quantifier leur exposition réelle. Toutefois, elles permettent d'approcher des contrastes d'exposition au sein-même d'une agglomération.

Les indicateurs d'exposition à la pollution de proximité liée au trafic : une évaluation indirecte

Les indicateurs d'exposition sont basés soit sur des estimations relativement simples telles que la distance du lieu de vie à l'axe routier (modèle de proximité), soit sur des estimations plus élaborées basées sur la modélisation des niveaux de polluants (modèles d'interpolation, de dispersion ou de régression...) au lieu de vie (Reungoat et al., 2004). Le première méthode prend donc en compte uniquement la distance séparant le lieu de vie (plus généralement le domicile mais aussi l'école pour les enfants) de l'axe routier ou bien l'intensité du trafic sur cet axe, avec la possibilité de combiner les deux critères. A défaut de valeur numérique d'intensité du trafic (comptages), une classification sommaire des axes routiers peut également être utilisée. Il peut aussi être défini un périmètre autour du lieu de résidence dans lequel sont inventoriés tous les axes routiers pour construire un indicateur combinant longueurs de voies rapportées au nombre de véhicules. Ces méthodes, relativement faciles à mettre en œuvre, ne fournissent bien évidemment qu'une estimation grossière de l'exposition à la pollution atmosphérique de proximité.

Les autres approches consistent à cartographier les niveaux d'un polluant afin d'obtenir une estimation en une localisation. Pour ce faire, différents modèles existent :

- des modèles d'interpolation spatiale qui utilisent des mesures ponctuelles et dispersées de concentrations de polluants pour estimer les niveaux en tout point d'une grille régulière par des méthodes d'interpolation, l'algorithme le plus utilisé étant le « krigage ». Ces modèles nécessitent un nombre important de points de mesure répartis sur le territoire.

- des modèles de régression qui intègrent à la fois les niveaux de polluants atmosphériques et de multiples facteurs de terrain tels que la configuration topographique, le degré d'urbanisation, le volume de trafic...

- des modèles physiques de dispersion qui utilisent les données d'émission des polluants (automobiles, industrielles et résidentielles) ainsi que les facteurs influençant leur dispersion tels que les données météorologiques (température, vitesse et direction du vent) ou encore la configuration des voies. Différents modèles ont ainsi été développés et adaptés pour mieux prendre en compte les conditions locales et certains phénomènes spécifiques tels que celui des

Existe-t-il un marqueur spécifique du trafic routier ?

Un bon marqueur de la pollution liée au trafic routier devrait permettre de suivre sans ambiguïté ce type de pollution. Les polluants émis majoritairement par le trafic routier, tels que ceux évoqués précédemment (NOx, CO, benzène, fumées noires...) reflètent bien la pollution liée à cette source. Ainsi, ils sont considérés comme de bons « traceurs » de la pollution liées au trafic routier et, à ce titre, ils sont inclus dans les dispositifs de surveillance de la qualité de l'air. Cependant, ils ne sont pas exclusivement émis par le trafic et trouvent d'autres sources, notamment à l'intérieur des locaux. Ainsi, en termes d'évaluation des expositions, ils s'avèrent manquer de spécificité. Ils sont cependant souvent utilisés comme indicateur d'exposition dans les études épidémiologiques.

« rues canyons ». Certains intègrent les réactions physico-chimiques se produisant dans l'atmosphère, d'autres non. Un modèle de transfert des polluants de l'extérieur vers l'intérieur peut également être adjoint, autrement, les niveaux de polluants sont estimés en façade des bâtiments.

Différents indicateurs sont ainsi utilisés dans les études épidémiologiques, estimant de manière plus ou moins précise l'exposition à la pollution atmosphérique, selon le type de modèle, les hypothèses ou encore les données d'entrée. Quoiqu'il en soit, ces indicateurs constituent une évaluation indirecte de l'exposition à la pollution de proximité. En effet, celle-ci ne se résume pas uniquement au fait de « vivre à proximité » d'une source de pollution. Ainsi, afin d'estimer l'exposition globale à la pollution atmosphérique de proximité, il serait nécessaire d'évaluer le temps passé dans les différents lieux de vie ainsi que les niveaux de pollution rencontrés dans ces différents micro-environnements, notamment lors des déplacements.

Contribution des déplacements à l'exposition globale à la pollution de proximité liées au trafic

Dans une étude réalisée à Vancouver, il a été mis en évidence que les différences de niveaux d'exposition au NO₂ était liées principalement au lieu de résidence (Setton et al., 2008). Cependant, au sein d'un même quartier, les expositions individuelles pouvaient varier jusqu'à 30 %, cette variabilité étant liée à l'exposition sur le lieu de travail. Dans le cadre de cette étude, la contribution des trajets domicile travail

à l'exposition a été estimée comme négligeable compte-tenu du faible temps passé dans les transports. Ces résultats ne sont pas extrapolables à la région Ile-de-France dont la structure urbaine, ainsi que les modes et habitudes de déplacements sont différents. En effet, il n'est pas exclu que l'exposition au cours des déplacements puisse contribuer de manière importante à l'exposition globale à la pollution atmosphérique de proximité pour une part de la population. A ce titre, plusieurs travaux ont montré que les automobilistes étaient plus exposés à la pollution liée au trafic que les piétons, avec des niveaux de polluants retrouvés à l'intérieur des habitacles des véhicules bien supérieurs à ceux mesurés par les stations trafic (Airparif, 2009). Ainsi, selon la durée et la fréquence des trajets, de même que les conditions de trafic sur les axes fréquentés, l'exposition liée à ce mode de déplacement peut

contribuer majoritairement à l'exposition globale à la pollution de proximité. Ceci a pu être observé dans une étude exploratoire menée par Airparif visant à caractériser l'exposition personnelle d'un échantillon de Franciliens sur une journée ouvrée type. Au sein d'un panel de 150 individus, il a été mis en évidence des niveaux moyens d'exposition contrastés, dont la variabilité s'explique en partie par le mode de déplacement, avec des niveaux d'exposition au benzène et au NO₂ les plus élevés relevés pour des personnes se déplaçant en voiture (Airparif, 2008a). La contribution des expositions durant les temps de transport à l'exposition globale n'a cependant pas pu être estimée de manière détaillée. Ainsi, en l'absence d'évaluations complémentaires, les situations à risque ainsi que les populations les plus exposées à la pollution atmosphérique de proximité ne peuvent être identifiées clairement.

Pollution atmosphérique de proximité liée au trafic et effets sanitaires

Des indicateurs et des méthodes contrastées

Nombres d'études épidémiologiques, mettant en œuvre les différentes méthodes d'estimation des expositions décrites précédemment, se sont intéressées aux effets de la pollution atmosphérique de proximité liée au trafic routier sur la santé.

Dans ces études, deux types d'approches pour estimer l'exposition à cette pollution peuvent être décrites :

- l'une basée sur la distance du domicile (ou école) aux voies de circulation principales, pondérée ou non par l'intensité du trafic.

- l'autre basée sur les niveaux, au domicile, de polluants traceurs du trafic routier (le plus souvent le NO₂, mais aussi, le benzène, les fumées noires ou encore les particules ultrafines).

Ainsi, dans le premier cas, l'état sanitaire des populations à proximité et celui des populations à distance sont comparés pour estimer un éventuel risque accru de développer telle ou telle pathologie. Un des enjeux est de définir la distance jusqu'à laquelle il est considéré que les personnes sont à proximité du trafic (Zhou, 2007). Dans le deuxième cas, ce risque est estimé pour une augmentation du niveau d'exposition des différentes populations à l'indicateur. Deux types de résultats sont ainsi retrouvés dans la littérature et ne peuvent pas être directement comparés.

Si le volet « estimation des expositions » constitue un réel enjeu de ces études, le choix des indicateurs sanitaires et la temporalité des effets en est un autre.

Concernant la temporalité, ce sont, la plupart du temps, des effets à long terme qui sont étudiés, faisant suite à une exposition chronique sur plusieurs années. Or, les symptômes et les expositions sont souvent recueillis de manière transversale⁴, avec des expositions passées parfois approchées par les niveaux de pollution actuels. Concernant les indicateurs sanitaires, ils sont nombreux et disparates comme cela est détaillé ci-après, la santé respiratoire des enfants constituant toutefois un terrain d'enquête privilégié.

Principaux effets et ordres de grandeur

La plupart des études ont mis en évidence des liens entre d'une part, le fait de résider à proximité du trafic et/ou d'être plus exposés aux polluants liés au trafic à son domicile et d'autre part, une atteinte du système respiratoire (asthme, altération de la fonction respiratoire...) ou cardio-vasculaire (infarctus du myocarde, troubles du rythme...). Celle-ci peut se traduire par de simples symptômes ou bien des événements plus graves, tels qu'une hospitalisation, voire la survenue du décès (Brugge et al., 2007). D'autres atteintes telles que cancers (Nyberg et al., 2000) ou troubles de la reproduction ont également été mises en relation avec la pollution de proximité liées au trafic (Wilhelm et Ritz, 2003 ; Slama et al., 2007).

Ces études prennent en compte les éventuels biais liés aux facteurs de risque individuels, en particulier le statut tabagique, ainsi que la situation

⁴ Le recueil des données a lieu sur une période de courte durée, fournissant une image instantanée, à un moment donné, d'un phénomène de santé.

socioéconomique, et parfois certains facteurs liés à l'environnement intérieur. En revanche, les expositions potentielles liées aux déplacements ne sont pas prises en compte, qu'il s'agisse d'expositions aux polluants du trafic ou d'autres types (cf. niveaux élevés de particules rencontrés dans le métro). De même, l'exposition au bruit lié au trafic n'est la plupart du temps pas relevée. Or des effets sanitaires reliés au bruit, tels qu'affections du système cardio-vasculaires, sont également rapportés. Une étude néerlandaise prenant en compte conjointement les expositions au bruit et à la pollution de proximité fournit cependant des premiers éléments de réponse (Beelen et al., 2009). Un lien

entre une intensité importante du trafic à proximité du domicile et une élévation du risque de décès pour cause cardio-vasculaire a été mis en évidence, et ce lien n'était pas modifié par la prise en compte de l'exposition au bruit.

Les principaux résultats de ces études sont présentés ci-après en distinguant les deux approches d'estimation des expositions décrites précédemment. La plupart d'entre eux sont issus d'enquêtes transversales, sauf précisé, et sont donc à interpréter en tant que tels (cf. réserve évoquée concernant la temporalité). Ces travaux ont été sélectionnés afin d'illustrer au mieux la problématique ; seules les études les plus récentes ont été retenues.

Tableau 2 : Liens entre vivre à proximité du trafic routier et santé respiratoire des enfants

Age (ans)	Indicateur sanitaire	Indicateur d'exposition (seuil de distance)	OR ³ [IC95 %] ⁴	Type d'étude	Source
6-7	asthme	indice=fonction(distance < 50 m, intensité) (d)	2,0 [1,3– 3,1] (a)	transversale	(Carbajal-Arroyo et al., 2007)
4-14	asthme	indice=intensité/distance (e/d)	1,3 [1,0 – 1,6] (a)	cas témoin	(Zmirou et al., 2004)
14-17	asthme	distance autoroute (d)	1,9 [1,2–3,0] (a)	transversale	(Gauderman et al., 2005)
6-7	symptômes d'asthme	indice=f(distance < 50 m, intensité) (e/d)	1,8 [1,3–2,6] (a)	transversale	(Carbajal-Arroyo et al., 2007)
13-14	symptômes d'asthme	indice=f(distance < 50 m, intensité) (d)	1,3 [0,9–1,8] (a)	transversale	(Carbajal-Arroyo et al., 2007)
14-17	symptômes d'asthme	distance autoroute (d)	1,6 [1,1–2,4] (a)	transversale	(Gauderman et al., 2005)
6-7	crise d'asthme	indice=f(distance < 50 m, intensité) (d)	2,0 [1,4–2,9] (a)	transversale	(Carbajal-Arroyo et al., 2007)
0-1	hospitalisation pour bronchiolite	distance < 150 m autoroute (d)	1,2 [1-1,4]	cas témoin	(Karr et al., 2009)

(a) pour un indice fort comparé à un indice faible (d) domicile (e) école

1) Résultats basés sur la distance du lieu de vie par rapport aux axes à fort trafic

Il a été mis en évidence, un risque plus élevé de développer un asthme et de manifester des symptômes respiratoires tels qu'exacerbation de l'asthme, infections, etc. chez les enfants vivant à proximité d'axes routiers à fort trafic, ou au sein d'un réseau routier dense, tel que détaillé dans le tableau 2. Un accroissement de risque allant de 20 à 100 % a été mis en évidence, selon l'indicateur sanitaire, l'indice d'exposition et la population étudiés. Certains auteurs soulignent que les toutes premières années de vie pourraient constituer une fenêtre critique d'exposition aux polluants atmosphériques, avec une implication dans la genèse de l'asthme (Zmirou et al., 2004). Ces différents résultats illustrent par ailleurs la diversité des indicateurs d'exposition construits à partir de l'éloignement et/ou de l'intensité du trafic routier. A ce titre, les niveaux de risques obtenus ne peuvent pas être comparés directement. Cependant, l'ensemble de ces résultats (les études présentées ici ne prétendent pas être exhaustives) indique qu'une exposition chronique aux polluants liés au trafic est susceptible d'avoir des conséquences néfastes sur la santé respiratoire des enfants dont les poumons sont

en pleine maturation. A ce titre, il a été mis en évidence, dans une cohorte prospective, une altération de la maturation de la fonction respiratoire entre l'âge 10 et 18 ans pour des enfants résidant à moins de 500 mètres d'une autoroute (Gauderman et al., 2007).

Concernant les adultes, des altérations du système respiratoire ont également été mises en évidence en lien avec la proximité au trafic routier. Ainsi, Lindgren et al. (2009) ont noté un risque accru de 40 % d'asthme [IC95 % 4-89 %] et de 64 % de broncho-pneumopathie obstructive chronique [IC95 % 11-240 %] chez des adultes résidant à moins de 100 mètres d'un axe routier avec une intensité de trafic supérieure à 10 véhicules par minute. Meng et al. (2007) ont mis en évidence des risques accrus de manifester des symptômes d'asthme de 211 % [IC95 % 138–323 %] chez des adultes résidant dans une zone à fort trafic (> 200 000 véhicules/jour dans un rayon de 15 mètres) par rapport à une zone à plus faible trafic (20 000 véhicules/jour). De même, Bayer-Oglesby et al. (2006) ont relevé des risques accrus de dyspnée de 13 % [IC95 % 3-24 %] pour une augmentation d'une longueur de 500 mètres de voies dans un rayon de 200 mètres autour du

³ L'odds ratio (OR) mesure l'augmentation du risque de connaître un événement sanitaire lorsque l'on est exposé. Un OR de 2 peut s'interpréter ici comme un risque multiplié par 2 chez les sujets résidant à proximité du trafic.

⁴ Un intervalle de confiance à 95 % (IC95%) signifie que la « vraie » valeur du risque a 95 % de chance de se situer dans cet intervalle.

domicile ainsi que des risques accrus de difficultés respiratoires de 34 % [IC95 % 0-78 %] chez des adultes résidant à moins de 20 mètres d'un axe routier important.

Des augmentations de risques de maladies cardiovasculaires en lien avec la pollution de proximité liée au trafic ont également été mises en évidence. Dans une étude de cohorte prospective allemande, une élévation du risque de maladies cardiaques de 85 % [IC95 % 21-84 %] a été notée pour des individus vivant à moins de 150 mètres d'un axe routier important (Hoffmann et al., 2006). Dans une étude américaine, un risque accru d'infarctus du myocarde de 4 % [IC95 % 2-7 %] en lien avec une augmentation de l'intensité de trafic (écart interquartile⁵) dans un rayon de 100 mètres autour du domicile a été mis en évidence et de 5 % [IC95 % 3-6 %] en lien avec une diminution de la distance de 1 km entre le domicile et la proximité d'une voie de

circulation importante (Tonne et al., 2007).

Enfin, plusieurs études ont mis en évidence des risques accrus de décès en lien avec le fait de résider à proximité de sources importantes de trafic routier. A ce titre, Gehring et al. (2006) ont relevé une augmentation du risque de mortalité pour cause cardio-pulmonaire de 70 % [IC95 % 2-181 %] pour des individus vivant à moins de 50 mètres d'une voie à fort trafic routier. Hoek et al. (2002), dans une étude réalisée aux Pays-Bas, ont noté un risque de décès cardio-pulmonaire accru de 95 % [IC95 % 9-252 %] dans les populations résidant à moins de 50 mètres d'un axe routier principal ou de 100 mètres d'une autoroute. Enfin, dans une étude anglaise, un risque de mortalité par attaque cardiaque de +5 % [IC95 % 4-7 %] a été estimé chez les individus vivant à moins de 200 mètres d'une voie importante de circulation comparé à ceux vivant à plus d'1 km (Maheswaran et Elliott, 2003).

Tableau 3 : Liens entre exposition à la pollution atmosphérique de proximité liée au trafic et santé respiratoire des enfants

Age (ans)	Indicateur sanitaire	Indicateur d'exposition (élévation du niveau de polluant)	OR ou RR [IC95 %] ⁶	Type d'étude	Source
0-18	asthme	11,3 µg/m ³ NO ₂ * (d)	1,3 [1,1-1,6] (RR)	cohorte	(Jerrett et al., 2008)
4	asthme	0,84 µg/m ³ suies** (d)	1,3 [1,0-1,7] (OR)	cohorte	(Brauer et al., 2007)
14-17	asthme	10,4 µg/m ³ NO ₂ * (d)	1,8 [1,0-3,2] (OR)	transversale	(Gauderman et al., 2005)
14-17	asthme	1,2 µg/m ³ NO ₂ ** (d) (tr)	2,2 [1,4-3,6] (OR)	transversale	(Gauderman et al., 2005)
0-18	hospitalisation pour asthme	7,3 µg/m ³ NO ₂ ** (d)	1,1 [1,0-1,2] (RR)	transversale	(Delfino et al., 2009)
0-18	symptômes d'asthme	6,5 µg/m ³ NO ₂ * (e)	1 [1,0-1,1] (OR)	transversale	(Kim et al., 2004)
4	symptômes d'asthme	0,84 µg/m ³ suies** (d)	1,2 [1,0-1,4] (OR)	cohorte	(Brauer et al., 2007)
14-17	symptômes d'asthme	10,4 µg/m ³ NO ₂ * (d)	1,7 [1,1-2,8] (OR)	transversale	(Gauderman et al., 2005)
14-17	symptômes d'asthme	1,2 µg/m ³ NO ₂ ** (d)	1,7 [1,1-2,6] (OR)	transversale	(Gauderman et al., 2005)
0-18	bronchite	6,5 µg/m ³ NO ₂ * (e)	1,0 [1,0-1,1] (OR)	transversale	(Kim et al., 2004)
4	infection ORL	0,84 µg/m ³ suies** (d)	1,2 [1,0-1,3] (OR)	cohorte	(Brauer et al., 2007)
4	grippe	0,84 µg/m ³ suies** (d)	1,2 [1,0-1,4] (OR)	cohorte	(Brauer et al., 2007)
0-1	symptômes respiratoires	1,5 µg/m ³ PM _{2,5} ** (d)	1,3 [1,1-1,6] (OR)	cohorte	(Gehring, 2002)
0-1	symptômes respiratoires	8,5 µg/m ³ NO ₂ ** (d)	1,4 [1,1-1,8] (OR)	cohorte	(Gehring, 2002)

*mesuré **modélisé (d) domicile (e) école (tr) pollution autoroutière uniquement

2) Résultats basés sur les niveaux de polluants

Les effets sanitaires décrits précédemment ont également pu être reliés aux indicateurs d'exposition basés sur les contrastes intra-urbains de niveaux de polluant. Ces niveaux sont issus de la modélisation et/ou de la mesure, les résultats des deux approches étant comparés dans certaines études. Les polluants retenus étant émis majoritairement par le trafic routier, par hypothèse, les auteurs considèrent que ces contrastes sont le reflet localement d'une surexposition à la pollution de proximité liée au trafic et donc que les effets étudiés y sont reliés. Pour ce qui concerne la santé respiratoire des enfants, les résultats des différentes études sont présentés

dans le tableau 3. Les risques ont été estimés pour une augmentation du niveau équivalent à l'intervalle interquartile de la distribution des concentrations de polluants, qui peuvent varier d'une étude à l'autre. Des risques accrus allant de 3 à 120 % ont été mis en évidence selon l'indicateur sanitaire, l'indice d'exposition et la population étudiés.

Des liens entre cancer du poumon et pollution de proximité liée au trafic, chez les adultes, ont aussi été estimés avec cette approche. Dans une enquête menée à Stockholm, Nyberg et al. (2000) ont mis en évidence une élévation du risque de cancer du poumon de 40 % [IC95 % 0-100 %] en lien avec une exposition rétrospective sur 10 années, 20 ans avant

⁵ L'intervalle interquartile est la différence entre le premier et le troisième quartile de la distribution des niveaux de polluants.

⁶ Un OR peut s'interpréter ici comme un risque relatif (RR) : un OR ou un RR de 1,3 signifie que le risque est multiplié par 1,3 chez les sujets exposés à une élévation d'un certain niveau de l'indicateur.

l'apparition du cancer, à des niveaux élevés de NOx/NO₂ (> 29 µg/m³). Cette étude, outre le lien entre cancer du poumon et pollution liée au trafic, a mis en évidence un temps de latence important (> 20 ans) entre l'exposition et l'apparition du cancer.

Enfin, concernant la mortalité, dans une étude nord-américaine, des risques accrus de décès toutes causes et pour maladies circulatoires respectivement de 17 % [IC95 % 0–36 %] et de 45 % [IC95 % 10–92 %] ont été estimés pour une augmentation des niveaux de NO₂ de 7,3 µg/m³ (Jerrett et al., 2009). Dans cette même étude, aucun lien n'a pu être mis en évidence avec des indicateurs basés sur la distance.

Conclusions et perspectives concernant les études épidémiologiques

Au final, qu'ils soient basés sur des contrastes de distance ou bien de niveaux de pollution, l'ensemble de ces résultats semble indiquer un risque accru de pathologies cardio-respiratoires ou de décès pour les populations résidant à proximité de sources importantes de trafic routier. Pour ce qui concerne l'exacerbation de symptômes d'asthme, la relation causale est plus particulièrement étayée (HEI, 2009). Si, en termes de physiopathologie, les effets de la pollution liée au trafic sont similaires à ceux reliés à la pollution de fond, en termes de niveaux, les risques estimés apparaissent plus élevés. En effet, les augmentations de risque de mortalité toutes causes liés à une exposition chronique à long terme aux particules (pour une élévation des niveaux moyens annuels de 10 µg/m³) sont plutôt de l'ordre de 5 % (Pope et al., 2002 ; Kunzli et al., 2000) alors que Jerrett et al. (2009) rapportent des élévation de risque plus de trois fois supérieures. Ceci pourrait s'expliquer en partie par une plus grande toxicité des polluants émis par le trafic routier comparée à celles

des polluants émis par d'autres sources. En l'occurrence, les particules liées au trafic sont particulièrement riches en métaux et HAP, composés aux propriétés mutagènes et cancérigènes très marquées (Schlesinger et al., 2006 ; de Kok et al., 2006). Ces résultats peuvent également s'expliquer par les méthodes mises en œuvre qui fournissent une plus grande précision dans l'évaluation de l'exposition individuelle (Jerrett et al., 2009). En effet, ici, l'exposition est estimée à l'échelle intra-urbaine alors que dans les études portant sur la pollution de fond, l'exposition individuelle est la plupart du temps rapportée au niveau moyen de pollution d'une ville entière.

Enfin, si les effets sanitaires reliés à la pollution atmosphérique de proximité sont étayés par une littérature internationale conséquente, peu de travaux français ont été menés jusqu'ici. Toutefois, des travaux sont actuellement en cours, au niveau national, dans le cadre du Programme air et santé de l'InVS (cohorte Gazel⁶), et au niveau régional (cohorte de nouveau-nés mise en place par la Mairie de Paris ; cohorte Record⁷, suivie par une équipe de l'Inserm). Ceux-ci devraient permettre d'améliorer la connaissance des effets sanitaires d'une exposition chronique à la pollution atmosphérique, en prenant en compte des contrastes locaux d'exposition. Ces travaux nécessitent des moyens importants, ainsi qu'un suivi sur de nombreuses années. Ils devraient fournir une estimation des risques plus en adéquation avec les modes de vie locaux.

Parallèlement à ces différentes démarches, la réflexion initiée actuellement au niveau européen, telle que décrite dans l'encadré ci-dessous, devrait permettre de mettre en cohérence les différents travaux menés jusqu'ici.

Des relations exposition-risque à l'évaluation de l'impact sanitaire

A l'heure actuelle, il n'existe pas d'indicateurs standardisés pour évaluer les effets de la pollution atmosphérique de proximité liée au trafic routier. Ainsi, les études épidémiologiques ont mis en œuvre des méthodologies très contrastées. Une plus grande cohérence des différentes approches serait nécessaire pour une meilleure visibilité des résultats et pour permettre d'évaluer les impacts sanitaires attribuables à cette pollution proprement dite. En effet, ces évaluations ne sont possibles aujourd'hui que pour la pollution de fond, grâce à une méthodologie validée au niveau national (InVS, 2008) et européen, et pourraient sous-estimer l'impact réel de la pollution atmosphérique (Kunzli, 2008). Afin de pallier ce manque, une réflexion est en cours au niveau européen dans le cadre du projet APHEKOM⁸ auquel l'ORS Ile-de-France contribue. L'objectif de ce travail est de définir un protocole (construction des indicateurs, sélection des zones d'étude et choix des relations exposition-risque...) permettant d'évaluer l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique de proximité liée au trafic dans les grandes agglomérations européennes.

⁶ <http://www.gazel.inserm.fr/>

⁷ Residential Environment and CORonary heart Disease <http://www.u707.jussieu.fr/ds3/Recherche.htm#Record>

⁸ Impoving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe <http://www.aphekom.org/>

Conclusion

Alors que la pollution atmosphérique de fond bénéficie d'outils et méthodes, tant pour la surveillance des niveaux que des effets, permettant de bien l'appréhender, la pollution de proximité, liée en particulier au trafic est plus difficile à caractériser. En effet, cette pollution est susceptible d'impacter l'air de multiples micro-environnements tels que les trottoirs, l'habitable des véhicules, le domicile, les salles de classe, les bureaux... Or, les profils de décroissance des niveaux de pollution depuis les routes, de même que les phénomènes de transfert du milieu extérieur vers le milieu intérieur sont mal connus. Ainsi, des incertitudes persistent concernant les niveaux des polluants liés au trafic retrouvés dans ces environnements. Par ailleurs, il est difficile de prendre en compte le temps passé dans ces différents lieux pour estimer une exposition globale. La pollution atmosphérique de proximité fait aujourd'hui l'objet de plus en plus d'attention. Les campagnes de mesures réalisées par Airparif ont mis en évidence une spécificité de cette pollution en terme de niveaux et de composition. L'enjeu, aujourd'hui, consiste à mieux caractériser ses zones d'influence et les modes d'exposition majoritaires afin d'identifier les populations les plus exposées, ou susceptibles de l'être.

En ce qui concerne l'étude des effets sanitaires, une littérature abondante a vu le jour au cours de la dernière décennie. Bien que la plupart des indicateurs d'exposition utilisés dans les études épidémiologiques ne prennent en compte que partiellement l'exposition à ce type de pollution, et parfois même de manière grossière, ils permettent d'approcher des contrastes d'exposition bien réels qui se manifestent par un état de santé plus dégradé des populations résidant à proximité des sources de trafic routier.

Les résultats de ces études ne peuvent pas être directement transposés à l'Ile-de-France qui présente des spécificités en termes de bâti, d'urbanisation, de parc automobile et d'habitudes de vie (notamment les modes de déplacement). Toutefois, ils fournissent des premiers éléments permettant de guider l'action publique en termes de gestion de la qualité de l'air. En effet, s'il est évident qu'une action sur les sources permettant de limiter les émissions de polluants est nécessaire, en particulier concernant le trafic routier, des actions sur les aménagements urbains pourraient aussi permettre de limiter la surexposition de certaines populations. En effet, les choix de l'implantation des bâtiments ainsi que des aménagements routiers devraient être pensés afin de minimiser l'impact de la circulation routière sur l'air des espaces fréquentés par la population. En l'occurrence, ces considérations font l'objet de recommandations dans le cadre du Plan régional pour la qualité de l'air révisée en 2009 (Région Ile-de-France, 2009). Par ailleurs, une attention particulière devrait être portée aux infrastructures accueillant les populations les plus fragiles, notamment les enfants ou les personnes âgées. Plus concrètement, il n'existe pas de réglementation, ni de préconisations. Cependant, les récents travaux d'Airparif peuvent fournir des orientations. En effet, le rôle d'écran joué par le bâti pourrait être mis à contribution pour limiter l'influence du trafic sur la qualité de l'air intérieur. Cependant, ces considérations rentrent dans une réflexion plus globale sur la ventilation des bâtiments et le rôle de l'implantation des ouvrants (fenêtres, portes...) qui dépasse le cadre de cette synthèse.

Enfin, une meilleure connaissance de cette problématique permettrait de mieux prendre en compte l'impact de la pollution de proximité sur la production d'inégalités d'expositions environnementales et d'inégalités de santé. Un certain nombre de travaux ont en effet montré que les populations les plus défavorisées étaient d'une part le plus exposées à la pollution atmosphérique (Declercq et al., 2007), et qu'elles présentaient d'autre part une susceptibilité plus accrue à ses effets (Jerrett et al., 2004).

Références

- Airparif. Evaluation de la qualité de l'air en situation de proximité du trafic routier en Ile-de-France. Concentrations moyennes pour l'année 2004. 2005, 62 p.
- Airparif. Exposition des automobilistes franciliens à la pollution atmosphérique liée au trafic routier : trajet domicile-travail. 2009, 103 p.
- Airparif. Caractérisation de l'exposition personnelle d'un échantillon de Franciliens : Rapport final relatif aux résultats des deux campagnes de mesure. 2008a, 101 p.
- Airparif. Caractérisation de la qualité de l'air à proximité des voies à grande circulation : Premier volet - Campagne de mesure portant sur le Boulevard périphérique au niveau de la porte de Gentilly. 2008b, 96 p.
- Airparif. Synthèse des connaissances sur les particules en suspension dans l'air et des travaux d'Airparif sur ces polluants. 2008c, 99 p.
- Bayer-Oglesby L, Schindler C, Hazenkamp-von Arx ME, Braun-Fahrländer C, Keidel D, Rapp R, Kunzli N, Braendli O, Burdet L, Sally Liu L, Leuenberger P, Ackermann-Lieblich U. Living near main streets and respiratory symptoms in adults: the Swiss Cohort Study on Air Pollution and Lung Diseases in Adults. *Am J Epidemiol*, 2006; 164: 1190-8.
- Beelen R, Hoek G, Houthuijs D, van den Brandt PA, Goldbohm RA, Fischer P, Schouten LJ, Armstrong B, Brunekreef B. The joint association of air pollution and noise from road traffic with cardiovascular mortality in a cohort study. *Occup Environ Med*, 2009; 66: 243-50.
- Blondeau P, Iordache V, Poupard O, Genin D et Allard F. Relationship between outdoor and indoor air quality in eight french schools. *Indoor Air*, 2004 ; 15 : 2-12.
- Brauer M, Hoek G, Smit HA, de Jongste JC, Gerritsen J, Postma DS, Kerkhof M, Brunekreef B. Air pollution and development of asthma, allergy and infections in a birth cohort. *Eur Respir J*, 2007; 29: 879-88.
- Brugge D, Durant JL, Rioux C. Near-highway pollutants in motor vehicle exhaust: a review of epidemiologic evidence of cardiac and pulmonary health risks. *Environ Health*, 2007; 6: 23.
- Brunekreef B, Sunyer J. Asthma, rhinitis and air pollution: is traffic to blame?. *Eur Respir J*, 2003; 21: 913-5.

- Carbajal-Arroyo L, Barraza-Villarreal A, Durand-Pardo R, Moreno-Macias H, Espinoza-Lain R, Chiarella-Ortigosa P, Romieu I. Impact of traffic flow on the asthma prevalence among school children in Lima, Peru. *J Asthma*, 2007; 44: 197-202.
- Cyrus J, Pitz M, Bischof W, Wichmann H, Heinrich J. Relationship between indoor and outdoor levels of fine particle mass, particle number concentrations and black smoke under different ventilation conditions. *J Expo Anal Environ Epidemiol*, 2004; 14: 275-83.
- Declercq C, Prouvost H. Inégalités sociales d'exposition au NO₂ ambiant sur le territoire de Lille Métropole Communauté Urbaine. *ORS Nord -Pas-de-Calais*, 2007, 31 p.
- Delfino RJ, Chang J, Wu J, Ren C, Tjoa T, Nickerson B, Cooper D et Gillen DL. Repeated hospital encounters for asthma in children and exposure to traffic-related air pollution near the home. *Ann. Allergy Asthma Immunol.*, 2009 ; 102 : 138-44.
- Diapouli E, Chaloulakou A, Spyrellis N. Levels of ultrafine particles in different microenvironments—implications to children exposure. *Sci Total Environ*, 2007; 388: 128-36.
- EMEP. Transboundary particulate matter in Europe. Status Report 4-2007. Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air Pollutants in Europe. 2007, 372 p.
- Frère S, Roussel I, Blanchet A. Les pollutions atmosphériques urbaines de proximité à l'heure du Développement Durable. Développement durable et territoires [En ligne], Dossier 4 : La ville et l'enjeu du Développement Durable, mis en ligne le 06 juin 2005. <http://developpementdurable.revues.org/index758.html>
- Gauderman WJ, Avol E, Lurmann F, Kuenzli N, Gilliland F, Peters J, McConnell R. Childhood asthma and exposure to traffic and nitrogen dioxide. *Epidemiology*, 2005; 16: 737-43.
- Gauderman WJ, Vora H, McConnell R, Berhane K, Gilliland F, Thomas D, Lurmann F, Avol E, Kunzli N, Jerrett M, Peters J. Effect of exposure to traffic on lung development from 10 to 18 years of age: a cohort study. *Lancet*, 2007; 369: 571-7.
- Gehring U, Cyrus J, Sedlmeier G, Brunekreef B, Bellander T, Fischer P, Bauer CP, Reinhardt D, Wichmann HE et Heinrich J. Traffic-related air pollution and respiratory health during the first 2 yrs of life. *Eur. Respir. J.*, 2002 ; 19 : 690-8.
- Gehring U, Heinrich J, Kramer U, Grote V, Hochadel M, Sugiri D, Kraft M, Rauchfuss K, Eberwein HG, Wichmann H. Long-term exposure to ambient air pollution and cardiopulmonary mortality in women. *Epidemiology*, 2006; 17: 545-51.
- HEI. Traffic-related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects. 2009, 394 p.
- Hoek G, Brunekreef B, Goldbohm S, Fischer P, van den Brandt PA. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *Lancet*, 2002; 360: 1203-9.
- Hoffmann B, Moebus S, Stang A, Beck E, Dragano N, Mohlenkamp S, Schermund A, Memmesheimer M, Mann K, Erbel R, Jockel K. Residence close to high traffic and prevalence of coronary heart disease. *Eur Heart J*, 2006; 27: 2696-702.
- INPES. Baromètre santé environnement 2007. 2008, 405 p.
- InVS. Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine. Concepts et méthodes. 2008. 35 p.
- Jerrett M, Finkelstein MM, Brook JR, Arain MA, Kanaroglou P, Stieb DM, Gilbert NL, Verma D, Finkelstein N, Chapman KR, Sears MR. A cohort study of traffic-related air pollution and mortality in Toronto, Ontario, Canada. *Environ Health Perspect*, 2009; 117: 772-7.
- Jerrett M, Shankardass K, Berhane K, Gauderman WJ, Kunzli N, Avol E, Gilliland F, Lurmann F, Molitor JN, Molitor JT, Thomas DC, Peters J, McConnell R. Traffic-related air pollution and asthma onset in children: a prospective cohort study with individual exposure measurement. *Environ Health Perspect*, 2008; 116: 1433-8.
- Jerrett M, Burnett RT, Brook J, Kanaroglou P, Giovis C, Finkelstein N, Hutchison B. Do socioeconomic characteristics modify the short term association between air pollution and mortality? Evidence from a zonal time series in Hamilton, Canada. *J Epidemiol Community Health*. 2004 Jan;58(1):31-40.
- Karr C, Rudra C, Miller K, Gould T, Larson T, Sathyanarayana S, Koenig J. Infant exposure to fine particulate matter and traffic and risk of hospitalization for RSV bronchiolitis in a region with lower ambient air pollution. *Environ Res*, 2009; 109 : 321-327.
- Kim JJ, Smorodinsky S, Lipsitt M, Singer BC, Hodgson AT et Ostro B. Traffic-related air pollution near busy roads: the east bay children's respiratory health study. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 2004 ; 170 : 520-6.
- de Kok TMC, Driessens HAL, Hogervorst JGF, Briede JJ. Toxicological assessment of ambient and traffic-related particulate matter: a review of recent studies. *Mutat Res*, 2006; 613: 103-22.
- Kunzli N, Kaiser R, Medina S, Studnicka M, Chanel O, Filliger P, Herry M, Horak FJ, Puybonnieux-Texier V, Quenel P, Schneider J, Seethaler R, Vergnaud JC, Sommer H. Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet*, 2000; 356: 795-801.
- Kunzli N, Perez L, Lurmann F, Hricko A, Penfold B et McConnell R. An attributable risk model for exposures assumed to cause both chronic disease and its exacerbations. *Epidemiology*, 2008 ; 19 : 179-185.
- Lindgren A, Stroh E, Montnemery P, Nihlen U, Jakobsson K, Axmon A. Traffic-related air pollution associated with prevalence of asthma and COPD/chronic bronchitis. A cross-sectional study in Southern Sweden. *Int J Health Geogr*, 2009; 8: 2.
- Maheswaran R, Elliott P. Stroke mortality associated with living near main roads in England and Wales: a geographical study. *Stroke*, 2003; 34: 2776-80.
- Maignant G [en ligne]. <http://www.umrespace.org/Etudes/ModelSimulSpat/MaignantG/MaignantG.pdf>. 2005.
- Meng Y, Wilhelm M, Rull RP, English P, Ritz B. Traffic and outdoor air pollution levels near residences and poorly controlled asthma in adults. *Ann Allergy Asthma Immunol*, 2007; 98: 455-63.
- Nyberg F, Gustavsson P, Jarup L, Bellander T, Berglund N, Jakobsson R, Pershagen G. Urban air pollution and lung cancer in Stockholm. *Epidemiology*, 2000; 11(5): 487-95.
- OMS. Health effects of transport-related air pollution. 2005, 274 p.
- Pope CA3, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, Thurston GD. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 2002; 287: 1132-41.
- Region Ile-de-France. Plan régional pour la qualité de l'air - projet. 2009, 41 p.
- Reungoat, Chiron, Momas. Evaluation de l'exposition à la pollution atmosphérique liée au trafic routier dans les études épidémiologiques : une revue de la littérature. *Rev Epidemiol Sante Publique*, 2004; 52: 271-96.
- Schlesinger RB, Kunzli N, Hidy GM, Gotschi T, Jerrett M. The health relevance of ambient particulate matter characteristics: coherence of toxicological and epidemiological inferences. *Inhal Toxicol*, 2006; 18: 95-125.
- Setton EM, Keller CP, Cloutier-Fisher D, Hystad PW. Spatial variations in estimated chronic exposure to traffic-related air pollution in working populations: a simulation. *Int J Health Geogr*, 2008; 7: 39.
- Slama R, Morgenstern V, Cyrus J, Zutavem A, Herbarth O, Wichmann H, Heinrich J. Traffic-related atmospheric pollutants levels during pregnancy and offspring's term birth weight: a study relying on a land-use regression exposure model. *Environ Health Perspect*, 2007; 115: 1283-92.
- Tonne C, Melly S, Mittleman M, Coull B, Goldberg R, Schwartz J. A case-control analysis of exposure to traffic and acute myocardial infarction. *Environ Health Perspect*, 2007; 115: 53-7.
- Wilhelm M, Ritz B. Residential proximity to traffic and adverse birth outcomes in Los Angeles county, California, 1994-1996. *Environ Health Perspect*, 2003; 111: 207-16.
- Yli-Tuomi T, Lanki T, Hoek G, Brunekreef B, Pekkanen J. Determination of the sources of indoor PM_{2.5} in Amsterdam and Helsinki. *Environ Sci Technol*, 2008; 42: 4440-6.
- Zmirou D, Gauvin S, Pin I, Momas I, Sahraoui F, Just J, Le Moullec Y, Bremont F, Cassadou S, Reungoat P, Albertini M, Lauvergne N, Chiron M, Labbe A. Traffic related air pollution and incidence of childhood asthma: results of the Vesta case-control study. *J Epidemiol Community Health*, 2004; 58: 18-23.
- Zhou Y, Levy JI. Factors influencing the spatial extent of mobile source air pollution impacts: a meta-analysis. *BMC Public Health*. 2007 May 22;7:89. Review.