



HAL
open science

La mobilité quotidienne conduit-elle les Parisiens à respirer un air plus ou moins pollué ?

Laurent Proulhac, Alexis Poulhès

► **To cite this version:**

Laurent Proulhac, Alexis Poulhès. La mobilité quotidienne conduit-elle les Parisiens à respirer un air plus ou moins pollué ?. *VertigO : La Revue Électronique en Sciences de l'Environnement*, 2021, 21 (3), 10.4000/vertigo.34546 . hal-04491640

HAL Id: hal-04491640

<https://hal.science/hal-04491640>

Submitted on 6 Mar 2024

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

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

Copyright

La mobilité quotidienne conduit-elle les Parisiens à respirer un air plus ou moins pollué ?

Introduction

La pollution atmosphérique est devenue une préoccupation majeure en raison de ses conséquences graves sur l'environnement et la santé humaine (OMS, 2018, 2015). Il est avéré que la mauvaise qualité de l'air favorise à court ou long terme les nausées, les irritations, les crises d'asthme, les difficultés respiratoires ainsi que les maladies cardiovasculaires et les cancers. Elle est responsable de plusieurs millions de décès prématurés par an dans le monde : 7 millions selon l'Organisation Mondiale de la Santé, dont 0,5 en Europe, et 9 millions selon Landrigan et al. (2018, p. 9). En France, 40 000 décès sont attribuables chaque année à l'exposition aux particules fines (PM_{2,5}) et 7 000 au dioxyde d'azote (NO₂) d'après Santé publique France (Medina S., 2021, p.33). Les effets néfastes de la pollution de l'air ambiant concernent d'abord la population urbaine du fait de la concentration en ville des principales sources de pollution atmosphérique. Face à cette situation préoccupante, l'Union européenne fixe des objectifs de réduction des émissions de polluants aboutissant à la mise en œuvre de dispositifs par les pouvoirs publics nationaux et locaux (Host et Duchesne, 2012). Pourtant, malgré une tendance générale à l'amélioration de la qualité de l'air – pour partie liée aux progrès technologiques des véhicules à moteur thermique – et à la baisse du nombre d'individus concernés par un dépassement des valeurs limites de polluants, la plupart des métropoles européennes et françaises dépassent toujours les seuils réglementaires et les recommandations de concentration de polluants fixés par la Commission européenne (Guerreiro et al., 2014 ; Le Moullec, 2018).

Dans ce contexte, l'évaluation précise de l'exposition à la pollution au NO_x et aux particules des résidents en ville constitue un véritable enjeu de santé publique et de prévention des risques sanitaires liés à l'environnement. De très nombreux travaux en épidémiologie s'intéressent à l'influence de l'environnement atmosphérique immédiat sur la santé des individus à court et long terme (Beelen et al., 2014, 2008 ; Hoek et al., 2013 ; Künzli et al., 2000 ; Pope et al., 2002). D'un point de vue méthodologique, la plupart des travaux étudient les effets sur la santé et le bien-être de l'exposition à la pollution en localisant les individus au niveau de leur unité spatiale de référence, c'est-à-dire leur lieu de résidence. La superposition des données spatialisées de localisation résidentielle des individus et des concentrations de polluants permet alors d'appréhender le niveau d'exposition à la pollution atmosphérique. Ce faisant, ces travaux supposent de manière implicite que la population est constante dans l'espace et dans le temps. Or, elle n'est pas, ou rarement, égale à la population mesurée à la résidence (Terrier, 2011). En effet, le domicile n'est pas l'unique espace de vie des individus. Ceux-ci passent une partie de leur journée en dehors de leur logement et même de plus en plus souvent loin de leur quartier de résidence : le travail, les études, les achats, les loisirs, et *cetera*, sont des activités aujourd'hui souvent accomplies au-delà de l'espace de proximité du domicile. L'amélioration des conditions de mobilité de ces dernières décennies, liée au développement des réseaux de transport et de la motorisation, permet aux individus de s'affranchir facilement, au quotidien, des distances et les amène à se déplacer plus loin. Aussi, la mobilité « facilitée » (Wiel, 1999), en élargissant le choix de localisation résidentielle, favorise leur installation à distance des espaces les plus denses des grandes villes. C'est le cas précisément des actifs occupés toujours plus nombreux à habiter les espaces périphériques tout en disposant d'un emploi dans le centre. L'extension urbaine conjointe aux changements des conditions de mobilité favorise *in fine* l'allongement des distances parcourues par les individus, et en particulier de la distance domicile-travail (François, 2010). La fréquentation de lieux d'activités de plus en plus lointains est alors susceptible

d'amener les individus dans des environnements atmosphériques différents de leur environnement résidentiel.

Dès lors, les activités et les déplacements sont de plus en plus souvent pris en compte dans les travaux épidémiologiques cherchant à évaluer au plus près l'exposition personnelle à la pollution atmosphérique. L'intégration de la distribution spatio-temporelle des individus relève d'une approche dynamique à la différence d'une approche statique, souvent basée sur les enquêtes du recensement, qui les considère uniquement à la résidence (Perchoux et al., 2013). Cette approche fait l'objet d'une attention émergente dans la littérature scientifique (Beckx et al., 2009 ; Dhondt et al., 2012 ; Dons et al., 2011 ; Hatzopoulou et al., 2011 ; Li et al., 2021 ; Ramacher et Karl, 2020 ; Setton et al., 2011 ; Singh et al., 2020 ; Vallamsundar et al., 2016 ; Steinle et al., 2013 ; Tchepel et Dias, 2011 ;). Dans le prolongement de ces travaux, l'objectif de l'article est d'évaluer l'exposition individuelle à la pollution au NO₂ des résidents de la région urbaine de Paris en considérant la variabilité spatio-temporelle des polluants et des individus. L'hypothèse est que la mobilité quotidienne conduit les résidents à passer du temps dans des espaces où les niveaux de pollution sont significativement différents de ceux de leur espace de résidence. L'article cherche alors à répondre à la question suivante : la mobilité quotidienne – entendue comme l'ensemble des déplacements et des activités à destination dans différents espaces et selon différentes temporalités – conduit-elle les individus à respirer un air plus ou moins pollué ? D'un côté, à l'échelle métropolitaine, le niveau de pollution au NO₂ en situation de fond suivant un gradient centre-périphérie étaye l'hypothèse que l'exposition des résidents est renforcée par leur mobilité. En effet, l'étalement urbain et la spécialisation fonctionnelle des espaces induisent une dépendance au centre des résidents des espaces périphériques, et tout particulièrement des actifs occupés (Baccaïni, 1997). Le déséquilibre entre la concentration des emplois, des aménités et des ressources dans le centre et la localisation plus diffuse des résidents dans les périphéries les conduit a priori à être exposés à un air plus pollué pendant leurs activités. En outre, les résidents des périphéries peuvent être davantage exposés à la pollution pendant leurs déplacements du fait d'un usage plus élevé de l'automobile (Proulhac, 2019). D'un autre côté, la mobilité de certains résidents peut laisser supposer que leur exposition aux polluants est atténuée. En effet, à l'échelle locale (quartier, rue), la qualité atmosphérique en NO₂ est très variable selon la distance au trafic routier, mais aussi la morphologie urbaine dont le rôle est décisif dans la dispersion des polluants (Honoré et al., 2013 ; Host, 2013 ; Maignant, 2007). Ainsi, certains résidents, tout particulièrement ceux des centres-ville, sont susceptibles de respirer un air moins pollué en quittant leur domicile au cours de la journée, et ce même en ayant une mobilité restreinte spatialement.

Pour tester cette hypothèse, l'article propose d'abord une revue de la littérature sur l'apport en épidémiologie de l'approche dynamique pour l'estimation de l'exposition individuelle à la pollution de l'air. Le terrain de recherche de la région de Paris, les données et la méthodologie sont ensuite exposés en détail. La présentation des résultats constitue la dernière partie avant la conclusion.

Revue de littérature

De plus en plus de travaux de recherche remettent en cause la pertinence de l'utilisation du lieu de résidence comme seul déterminant spatial pour évaluer l'exposition humaine à la pollution atmosphérique (Beckx et al., 2009 ; Chaix B. et al., 2012 ; Diez Roux, 2007 ; Kornartit et al., 2010 ; Perchoux et al., 2013 ; Sarnat et al., 2006). Perchoux et al. (2013) soulignent que ce choix repose plus sur la disponibilité de l'information, renseignée à partir de l'adresse des participants aux enquêtes ou issue du recensement de la population, que sur un véritable fondement théorique des effets environnementaux de voisinage. Les auteurs notent plusieurs limites conceptuelles et méthodologiques liées à l'approche statique. D'abord, elle attribue un niveau d'exposition similaire à tous les individus d'une même unité spatiale sans tenir compte de leur localisation précise, ce qui peut conduire à des erreurs significatives sur les estimations d'exposition à certaines échelles spatiales d'analyse (Kwan, 2018 ; Tenailleau et al., 2015). Ensuite, elle ne tient pas compte du niveau d'exposition dans les unités spatiales voisines qui peut affecter la santé des habitants résidant dans une autre unité. Enfin, les auteurs notent que le lieu résidentiel n'est pas l'unique espace de

vie des individus même s'ils y passent une grande partie de leur temps. Les auteurs indiquent que leurs pratiques spatiales hétérogènes les amènent à être exposés à des environnements physiques différents. Face à l'inadéquation de la mesure de l'exposition environnementale des individus uniquement à partir du lieu de résidence, Perchoux et al. (2013) s'intéressent à l'apport de la mobilité quotidienne pour la recherche en épidémiologie. Les auteurs soulignent que la connaissance des schémas individuels d'activités dans l'espace et dans le temps constitue un apport décisif pour évaluer au plus près l'exposition à la pollution des résidents en ville. La mobilité autorise la prise en compte de tous les environnements auxquels sont exposés les individus pendant leurs activités. Les auteurs précisent l'intérêt pour les travaux en épidémiologie, dans la lignée de ceux dans le champ du transport et de la mobilité quotidienne, de mobiliser le travail fondateur d'Hägerstrand (1970) sur la géographie du temps. Comme Rainham et al. (2010) et Steinle et al. (2013), ils expliquent comment ce cadre conceptuel basé sur l'étude de l'articulation spatio-temporelle des activités peut être utile pour chercher à mieux estimer la manière dont les multiples espaces de vie affectent la santé humaine.

Depuis quelques années, l'apparition de nouvelles méthodes et d'outils a permis des avancées significatives pour recueillir des informations sur la localisation spatio-temporelle des lieux d'activités des individus (Perchoux et al., 2019). Une méthode souvent développée relève de la modélisation temps-activité du comportement des personnes en matière de transport et d'activités (Beckx et al., 2009 ; Dhondt et al., 2012 ; Hatzopoulou et al., 2011 ; Ramacher et Karl, 2020 ; Soares et al., 2014 ; Vallamsundar et al., 2016). Malgré les limites liées à la calibration des modèles et à leur pouvoir prédictif, les résultats autorisent l'estimation et la caractérisation sociodémographique de la population présente à une échelle fine, mais aussi de son évolution pendant la journée et des modes de transports utilisés. D'autres recherches construisent une méthode d'estimation de la distribution spatio-temporelle de la population dans les environnements atmosphériques en se basant sur les enquêtes ménages de mobilité (Setton et al., 2011 ; Singh et al., 2020). Aussi, une autre méthode repose sur des outils techniques portés par les individus pendant leurs activités. Dès les années 1980, Wallace et Ott (1982) mentionnent les nouvelles perspectives offertes par l'apparition de ces outils innovants pour évaluer l'exposition individuelle à la pollution. Plus récemment, Steinle et al. (2013) présentent un modèle conceptuel intégrant différentes méthodes (agendas d'activité et questionnaires) et les derniers outils mobiles personnels de mesure et de géolocalisation en temps réel (microcapteurs portatifs et GPS). Même si les auteurs notent certaines limites et difficultés méthodologiques autant liées à la technologie qu'aux participants, ils signalent le potentiel de ces outils pour recueillir des données fiables, détaillées et robustes. C'est pourquoi de nombreux travaux s'appuient aujourd'hui dessus pour évaluer l'exposition environnementale des individus¹ (Chaix B. et al., 2013 ; Dias et Tchepel, 2014 ; Dons et al., 2011 ; Duché, 2015 ; Kornartit et al., 2010 ; Li et al., 2021 ; Nethery et al., 2008 ; Physick et al., 2011 ;).

À partir de ce cadre méthodologique, des recherches récentes confirment l'apport scientifique d'une approche considérant aussi les lieux d'activités non résidentiels. Elles montrent des biais significatifs dans les estimations d'exposition en ignorant les pratiques spatio-temporelles des individus. Les résultats de Setton et al. (2011) sur les actifs de Vancouver et les habitants de la Californie du Sud témoignent du biais de l'estimation lié à l'évaluation à la résidence et ce d'autant plus que la distance et le temps passé loin du domicile augmentent. De même, Li et al. (2021) observent que l'exposition aux PM_{2.5} des habitants des banlieues de Changsha est sous-estimée, plus particulièrement pour les actifs qui y vivent et qui travaillent dans le centre. Ils constatent aussi que près de deux fois plus de personnes dépassent le seuil réglementaire que selon l'approche d'évaluation à la résidence. A Londres, Singh et al. (2020) notent que l'exposition aux PM_{2.5} liée au travail et au transport est sensiblement plus élevée (environ 20%) par rapport à celle estimée à la résidence. En Belgique, Dons et al. (2011) indiquent que des individus vivant dans le même logement peuvent avoir une exposition personnelle au noir de carbone très différente selon les lieux d'activités et le temps passé dans les transports. De même, les résultats de Dhondt et al. (2012) indiquent que les niveaux d'exposition au NO₂ dans les Flandres et à Bruxelles sont plus élevés en intégrant les activités. C'est le cas en particulier des résidents des espaces ruraux. Les auteurs notent aussi que les différences d'exposition sont plus importantes à l'échelle locale qu'à l'échelle régionale. De même, à Hambourg, Ramacher et Karl (2020) font état d'une exposition totale au NO₂ supérieure de 12% avec l'approche dynamique. Aussi,

Beckx et al. (2009) montrent qu'à Utrecht le nombre d'heures totales quotidiennes passées par les habitants au-dessus des valeurs réglementaires de concentrations de particules est significativement plus élevé en incluant les lieux d'activités. A Bâle, Ragetti et al. (2015) soulignent l'importance d'inclure les lieux de travail/étude dans les estimations d'exposition et les déplacements domicile-travail, en particulier pour de longs trajets. A Lyon, Maury et al. (2016) indiquent que les quartiers attractifs concentrent le plus de pollution aux particules PM₁₀ de sorte que 43% de la population présente dans la commune entre 10 et 11 heures est exposée au dépassement de seuil réglementaire. Ils notent que les personnes exposées sont surtout des Lyonnais qui vivent et travaillent dans le centre et à proximité des grandes voies de circulation. En revanche, Golay et al. (2014) concluent, toujours à Lyon, que l'exposition de la population au NO₂ et au PM₁₀ est peu modifiée par la mobilité, au moins à l'échelle métropolitaine, même s'ils indiquent que les niveaux d'exposition peuvent être largement impactés à l'échelle du quartier. Enfin, Duché (2015) montre la grande variabilité spatiale et temporelle d'exposition à l'ozone de touristes sur différents sites à Paris, mais aussi sur un même site, celui de la Tour Eiffel, selon la proximité des sources d'émission et la morphologie urbaine.

Aussi, une partie de ce champ de recherche en épidémiologie s'intéresse de manière spécifique à l'exposition à la pollution atmosphérique pendant les déplacements. Une littérature abondante, internationale et française, cherche à comprendre les effets des multiples environnements atmosphériques traversés sur la santé des individus en fonction du mode de transport, de l'itinéraire, du temps de déplacement, de l'heure de déplacement ou encore de l'activité physique exercée pendant qu'ils se déplacent (Airparif, 2012 ; Cepeda et al., 2017 ; Coursimault et al., 1998 ; Delaunay et al., 2012 ; Good et al., 2015 ; Gouriou F. et al., 2004 ; Maignant et Dutozia, 2011 ; Morin et al., 2009 ; Poom et al., 2021 ; Rank et al., 2001 ; Sarnat et al., 2014 ; van Wijnen et al., 1995). Ces travaux, qui s'appuient sur des choix et des dispositifs méthodologiques variés, soulignent que l'exposition individuelle aux polluants atmosphériques (particules et oxydes d'azote) est le plus souvent supérieure, toutes choses égales par ailleurs, pendant les déplacements en voiture, en deux-roues motorisés et en bus.

Terrain de recherche, données et méthodologie

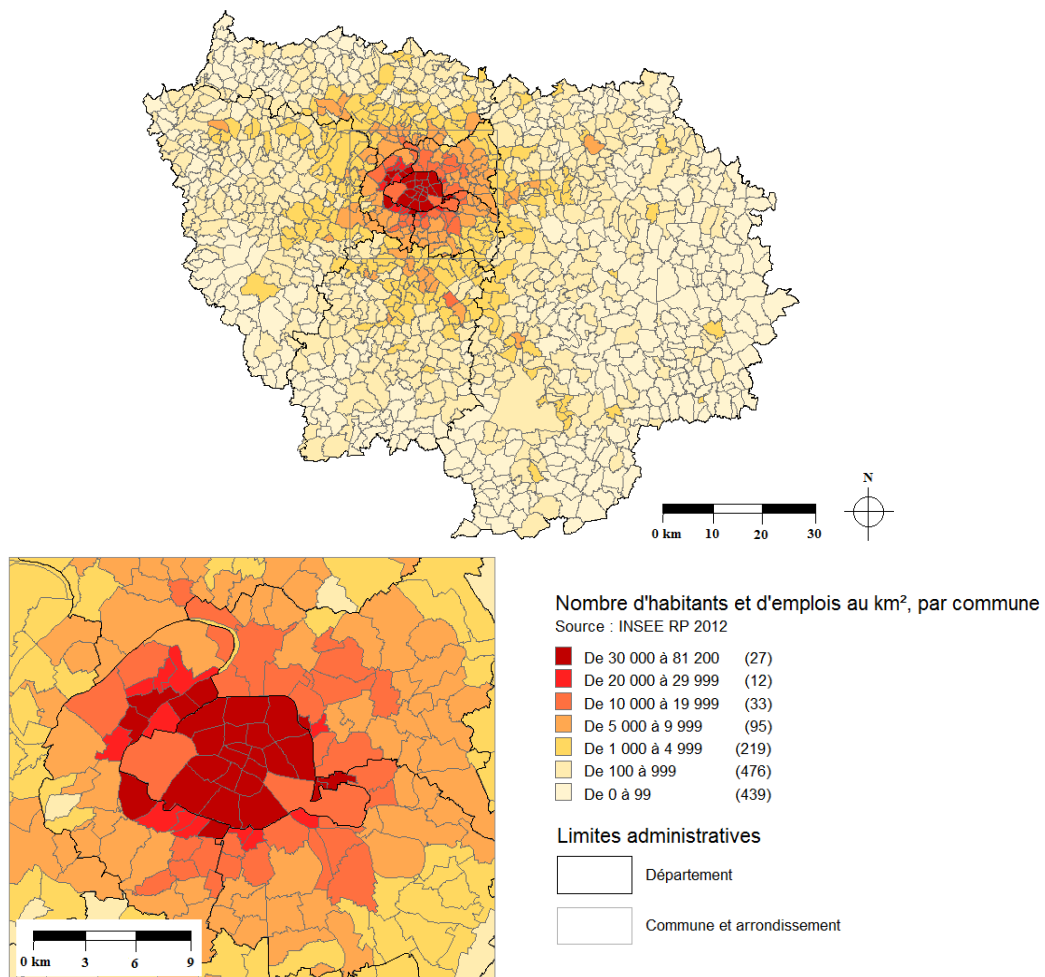
Cette section présente d'abord le terrain d'étude, le polluant – le dioxyde d'azote – auquel est exposée la population et les données mobilisées, puis explicite la méthodologie qui repose sur l'appariement de données modélisées de pollution et de données déclaratives de mobilité quotidienne d'un échantillon représentatif d'individus.

La région urbaine de Paris comme terrain de recherche

La région urbaine de Paris, au sens de région d'Île-de-France, constitue un terrain de recherche intéressant pour interroger l'exposition à la pollution par une approche spatio-temporelle. En effet, la qualité de l'air reste problématique en raison de la densité des activités humaines et du trafic automobile, et constitue toujours un enjeu majeur de santé publique. Malgré la baisse tendancielle des niveaux de polluants depuis les années 1990, les objectifs réglementaires de qualité de l'air pour la protection de la santé n'y sont pas toujours respectés, en particulier dans le centre et à proximité des voies les plus chargées. Les concentrations annuelles d'ozone continuent de croître alors que les dépassements des niveaux annuels et journaliers définis par les normes françaises pour les particules PM₁₀ et le dioxyde d'azote (NO₂) sont nombreux (Airparif, 2018). En 2017, 100 000 habitants sont potentiellement touchés par un dépassement du seuil limite journalier pour les PM₁₀ (35 jours à plus de 50 µg/m³), 1.3 million à un dépassement du seuil limite annuel pour le NO₂ (40 µg/m³) et la totalité à un dépassement de l'objectif de qualité de l'ozone (120 µg/m³ sur 8 heures).

Par ailleurs, la variation de la population présente dans l'espace et dans le temps, en plus de celle des niveaux des concentrations de polluants, rend ce terrain pertinent à la mise en œuvre d'une approche dynamique (Dhondt et al., 2012). La région urbaine se caractérise en effet par l'inégale répartition spatiale de la population (11,9 millions d'habitants¹), des actifs (5,4 millions), des emplois (5,7 millions), des commerces, des équipements et des services : elle se structure² autour de Paris qui accueille 19% des habitants, 20% des actifs occupés et 32% des emplois sur 1% de la superficie et d'une couronne intérieure qui compte 38% des habitants, 37% des actifs occupés et 35% des emplois sur 5% de sa superficie (Figure 1). La concentration des emplois à Paris et dans les pôles secondaires de la couronne intérieure, et la dispersion des résidences, notamment dans la couronne extérieure située entre 10 et 100 km du centre, se traduit par une spécialisation fonctionnelle des espaces. Les lieux de résidence sont plus éloignés du centre que les lieux d'emploi : la distance de la population au centre de Paris est en moyenne de 17.2 km, alors que celle de l'emploi est de 13.5 km. Une telle organisation urbaine, et en particulier le déséquilibre du ratio entre le nombre d'emplois et d'actifs, est favorable à une forte variation du nombre de personnes présentes en journée dans ces espaces.

Figure 1 : Densité humaine (population et emploi) par commune en Île-de-France / Human density (population and employment) by municipality in the Paris region



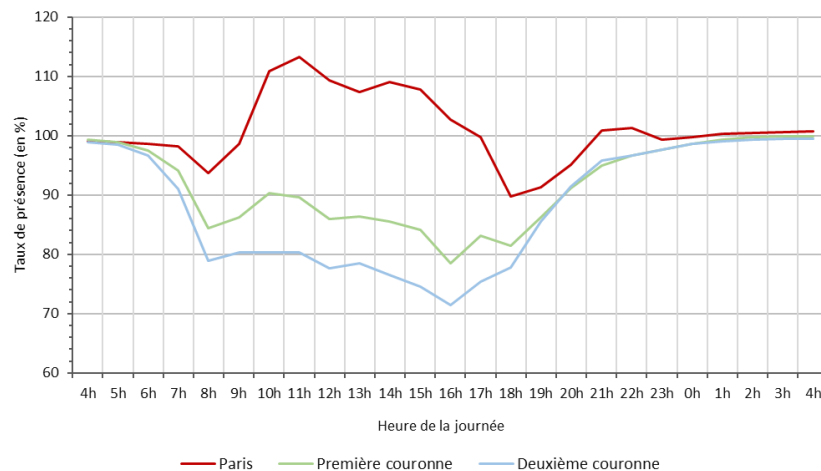
Source : Recensement de la population (INSEE, 2012). Calculs des auteurs. Conception et réalisation : auteurs.

¹ Les calculs de la population, des actifs et des emplois sont des auteurs (Source : recensement, INSEE 2012).

² La région se compose de Paris, d'une première couronne (départements des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne), et d'une deuxième couronne (départements de Seine-et-Marne, des Yvelines, de l'Essonne et du Val-d'Oise).

Entre 7h et 21h, la population présente dans les espaces, exprimée en taux de présence, s'éloigne de la population dénombrée à la résidence (Figure 2). Dans chaque espace, ce taux est le résultat de la population résidente qui y reste, de celle qui en part et de celle qui y arrive. À Paris, la population présente est supérieure en journée à la population municipale. La ville-centre est un espace attractif pour les résidents des couronnes : le nombre d'individus qui y viennent est plus élevé que le nombre d'individus qui en partent. Le gain de population témoigne en particulier de la polarisation exercée par Paris sur les actifs des couronnes : 28% de ceux de première couronne y travaillent et 16% de ceux de deuxième couronne. À l'inverse, le déficit de population en première couronne et surtout en deuxième s'exprime par un taux de présence négatif toute la journée : les départs sont plus nombreux que les arrivées. Entre 8h et 18h, la population est inférieure de 10% à 20% à la population résidente en première couronne et de 20% à 30% en deuxième couronne. Pour autant, cela ne signifie pas que les Parisiens ne se rendent pas dans les autres espaces ou encore que les résidents de la première couronne ne fréquentent pas la deuxième couronne.

Figure 2 : Taux de présence de la population en journée selon les espaces / Presence rate of the population during the day according to spaces



Source : Enquête globale transport 2010 (Île-de-France Mobilités-OMNIL-DRIEA). Calcul des auteurs.

Note : Le taux de présence est le rapport entre le nombre de personnes présentes dans un espace et le nombre de résidents. Un taux positif (>100%) indique un espace attractif et un taux négatif (<100%) un espace répulsif. Les personnes en déplacement ne sont pas prises en compte.

L'attractivité différenciée des espaces se traduit au niveau individuel dans la répartition spatiale des usages du temps journalier (Bertrand et al., 2008). Les habitants des couronnes passent du temps à Paris, en particulier les actifs et les étudiants, alors que les Parisiens en passent surtout en première couronne, en particulier dans les Hauts-de-Seine (Tableau 1). Malgré tout, les habitants de la région restent l'essentiel du temps dans leur couronne de résidence, et spécifiquement à leur domicile (70% du temps quotidien). Aussi, ils consacrent plus d'une heure trente par jour à se déplacer (6% du temps quotidien), ce temps étant stable selon la couronne de résidence. Le transport public et la voiture sont les modes de transport les plus chronophages. Les Parisiens passent du temps en transport public et à pied et les résidents des couronnes passent du temps en voiture, surtout ceux de la deuxième couronne.

Tableau 1 : Répartition des usages du temps quotidien (minutes) selon la résidence / Daily time use (minutes) by residence

| | Paris | Première couronne | Deuxième couronne | Ensemble |
|-------------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Espaces d'activités | | | | |
| Paris | 1 244 (86%) | 80 (6%) | 45 (3%) | 289 (20%) |
| Petite Couronne | 80 (6%) | 1 240 (86%) | 53 (4%) | 503 (35%) |
| Grande Couronne | 21 (1%) | 28 (2%) | 1 250 (87%) | 556 (39%) |
| <i>dont au domicile</i> | <i>984 (68%)</i> | <i>1 007 (70%)</i> | <i>1 006 (70%)</i> | <i>1 002 (70%)</i> |
| Transports | | | | |
| Transport public | 51 (4%) | 40 (3%) | 31 (2%) | 38 (3%) |
| Voiture | 13 (1%) | 30 (2%) | 44 (3%) | 33 (2%) |
| Deux-roues motorisées | 2 (0%) | 1 (0%) | 1 (0%) | 1 (0%) |
| Vélo | 2 (0%) | 1 (0%) | 1 (0%) | 1 (0%) |
| Marche | 26 (2%) | 20 (1%) | 15 (1%) | 19 (1%) |
| Autres modes | 1 (0%) | 0 (0%) | 0 (0%) | 0 (0%) |
| Total | 1 440 (100%) | 1 440 (100%) | 1 440 (100%) | 1 440 (100%) |

Source : Enquête globale transport 2010 (Île-de-France Mobilités-OMNIL-DRIEA). Calculs des auteurs.

La mobilité quotidienne est une dimension structurante de la vie des Franciliens. La dispersion et la multiplication de leurs espaces d'activités les amènent à se déplacer. Un jour moyen de semaine, 93% des résidents sont mobiles³, 67% sortent de leur commune ou arrondissement de résidence, 62% parcourent plus de 5 kilomètres, 47% plus de 10 kilomètres et 29% plus de 20 kilomètres – la distance moyenne parcourue par chaque résident chaque jour étant de 17.5 kilomètres. Les actifs occupés sont les plus mobiles : 86% quittent leur commune ou arrondissement de résidence pour se rendre au travail, leur lieu de travail est distant en moyenne de 10,6 kilomètres de leur résidence, 45% d'entre eux parcourent plus de 20 kilomètres et 19% plus de 40 kilomètres. Pour leur mobilité quotidienne, les résidents s'appuient sur le maillage dense du réseau routier à Paris et en première couronne. De grandes voies rapides et autoroutes autour de Paris, dont le périphérique et l'A1, l'A4, l'A6 et l'A86 supportent un trafic très élevé. Des tronçons détiennent même les records européens de trafic, et les grandes voies à l'intérieur de Paris et de la première couronne sont encombrées toute la journée voire toute l'année (Bouleau, 2013). Des infrastructures ferroviaires (RER et trains de banlieue) sous la forme d'un réseau étoilé depuis Paris complètent l'offre de transport. Enfin, la ville-centre et les communes immédiates de la première couronne s'appuient sur un réseau dense de métros, de tramways et de bus.

Évaluations statique et dynamique de l'exposition individuelle au dioxyde d'azote

La recherche s'intéresse à l'exposition de la population au dioxyde d'azote (NO₂) dont l'origine est principalement, en ville, le transport automobile. Deux facteurs expliquent ce choix :

(i) D'un point de vue sanitaire, le seuil réglementaire des concentrations en NO₂ est régulièrement dépassé dans la région de Paris. En dépit de l'amélioration régulière de la qualité des niveaux moyens, les concentrations peuvent être deux fois supérieures à la valeur limite moyenne dans le centre et à proximité des voies avec le plus de trafic (Airparif, 2018). Sa concentration élevée dans l'air suscite des effets néfastes sur la santé (Corso et al., 2019 ; Khomenko et al., 2021). Selon Khomenko et al. (2021), la mortalité liée à l'exposition au NO₂ à Paris s'élève à 2 575 habitants par an, ce qui la place parmi les villes européennes les plus impactées.

(ii) D'un point de vue méthodologique, les concentrations en NO₂ sont relativement stables par rapport aux particules fines. La faible volatilité de ce gaz autour des sources de pollution, dont les grandes voies de circulation, rend son exposition liée aux espaces d'activités et au mode de transport. Dès lors, il apparaît

³ Tous les calculs sur la mobilité quotidienne sont des auteurs (Source : Enquête globale Transport 2010, Île-de-France Mobilité-OMNIL-DRIEA).

comme bien adapté à une approche spatio-temporelle d'estimation de l'exposition à la pollution atmosphérique.

Deux valeurs moyennes d'exposition journalières au NO₂ sont estimées pour chaque individu :

- L'exposition moyenne journalière calculée à la résidence. Cette valeur correspond au niveau d'exposition mesurée pendant 24 heures au domicile des individus. Elle est considérée comme la valeur de référence.
- L'exposition moyenne journalière calculée en tenant compte des activités et des déplacements des individus. Elle est déterminée par les valeurs d'exposition en NO₂ dans les environnements atmosphériques de la journée, pondérées par les temps passés.

D'une part, une comparaison de ces valeurs moyennes permet de déterminer si la mobilité quotidienne conduit les individus à renforcer ou abaisser leur niveau d'exposition. D'autre part, la mise en perspective de ces valeurs avec le seuil d'exposition annuel fixé par la directive européenne 2008/50/CE, suivant les recommandations de l'OMS⁴⁵ (transposée dans la réglementation française), de 40 µg/m³ permet de savoir si la mobilité quotidienne amène les individus à passer au-dessus ou en dessous de celui-ci. Il convient cependant de garder à l'esprit que cette norme a pour référence temporelle l'année civile alors que celle de l'enquête de mobilité est le jour moyen ouvrable de semaine. Elle oblige alors à considérer la valeur limite annuelle moyenne comme la valeur limite journalière moyenne à ne pas dépasser. Ce procédé d'analyse apparaît acceptable même s'il néglige les jours de forte et de faible pollution.

Aussi, il convient de signaler dès à présent que si l'exposition aux polluants atmosphériques – dont le NO₂ – n'a pas d'effets sanitaires immédiats, elle en a en revanche à court terme dans les jours suivants (moins de 5 jours) et à long terme (plusieurs années). Les effets à court terme concernent en particulier les symptômes respiratoires, une aggravation des pathologies respiratoires ou cardiaques et une augmentation de la mortalité prématurée. Les effets à long terme, pouvant être liés à la récurrence des effets à court terme, se rapportent spécialement à la diminution de la capacité respiratoire, et à l'augmentation de la morbidité et de la mortalité (Caillaud et al., 2019 ; Cassadou et al., 2003).

Les données de concentrations de NO₂ modélisées par Airparif

L'estimation des niveaux de pollution de l'air ambiant réalisée par l'agence agréée de surveillance de la qualité de l'air Airparif⁶ s'appuie sur un réseau de mesures et sur des outils de modélisation tenant compte des émissions locales et régionales de polluants, des conditions météorologiques, des phénomènes de transport de polluants, des réactions chimiques dans l'atmosphère, de la morphologie urbaine et de la topographie (Airparif, 2018). Les données modélisées fournissent chaque jour une information sur l'évolution spatiale et temporelle des niveaux des concentrations d'ozone, de dioxyde d'azote et de particules fines. Une information fine des concentrations dans l'espace (carroyage spatial de 12,5 mètres de côté à Paris, 25 mètres en première couronne et 50 mètres en deuxième couronne) et dans le temps (intervalle d'une heure) est disponible. Dans cette recherche, la cartographie au NO₂ utilisée est celle du mardi 9 janvier 2018, correspondant selon Airparif à un jour moyen sans faibles ni fortes concentrations.

Les cartes soulignent l'importante variabilité spatiale des niveaux de concentration en NO₂. Une première opposition se déploie en situation de fond suivant un gradient centre-périphérie (Figure 3). Le niveau moyen à Paris atteint 40 µg/m³ tandis que le niveau de fond moyen régional est proche de 20 µg/m³. La

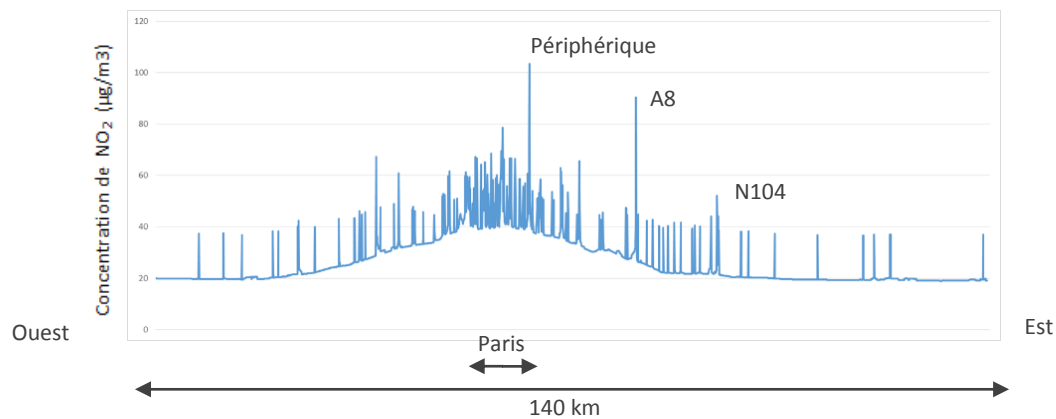
⁴ Une autre norme réglementaire définit un seuil limite horaire moyen (200 µg/m³) à ne pas dépasser plus de 18 fois par an. Par ailleurs, il n'est pas certain qu'il existe de valeur limite en deçà de laquelle il n'y aurait aucun effet sur la santé humaine (Brunekreef et Holgate, 2002). Une qualité de l'air en deçà de la valeur guide peut malgré tout être néfaste à la santé de population à risque.

⁵ Depuis septembre 2021, l'OMS a ramené le seuil d'exposition annuel moyen à 10 µg/m³. Comme les résultats sont antérieurs à cette nouvelle norme, dans ce travail le seuil réglementaire défini est toujours fixé à 40 µg/m³.

⁶ Airparif assure la surveillance et la prévision de la qualité de l'air en Île-de-France. Sa mission relève du suivi de la qualité de l'air à partir de stations de mesure et d'outils de modélisation, de l'information aux résidents, autorités et décideurs, de la compréhension des phénomènes et de l'évaluation des politiques de lutte contre la pollution de l'air (ZFE, circulation alternée, réduction de la vitesse, etc.).

concentration dans les communes de la première couronne proches de Paris est plus faible, entre 30 et 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et encore plus faible dans les communes plus éloignées, entre 20 et 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Si certaines de ces communes ont un fort trafic routier, elles ont malgré tout une concentration moyenne journalière plutôt basse à cause d'un niveau de fond faible. Sur les franges de la deuxième couronne, la concentration moyenne journalière dans les forêts de Fontainebleau et de Rambouillet s'établit autour de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces différents niveaux de concentration en NO_2 du jour étudié apparaissent relativement conformes à ceux moyens annuels (Airparif, 2018.). Une deuxième opposition s'observe selon la distance aux grands axes routiers⁷ (Host, 2013). Les plus fortes concentrations s'observent à proximité immédiate du périphérique et des autoroutes du fait de l'intensité du trafic et de la vitesse de circulation (Honoré et al., 2013). Elles sont souvent plus de deux fois plus élevées que celles voisines en situation de fond⁸. Ces concentrations s'atténuent progressivement avec l'éloignement aux axes à fort trafic, leur distance d'influence étant comprise entre 100 et 200 mètres (Airparif Actualité, 2012). D'autres oppositions dans la distribution des niveaux de concentration en NO_2 apparaissent, à une échelle plus locale, liées à la morphologie urbaine (hauteur des bâtiments, largeur de la rue, etc.) modifiant sa dispersion (Maignant, 2007 ; Maignant et Dutozia, 2011).

Figure 3 : Transect de la variabilité spatiale des concentrations en NO_2 entre 8h et 9h / Transect of the spatial variability of NO_2 between 8 and 9 a.m.



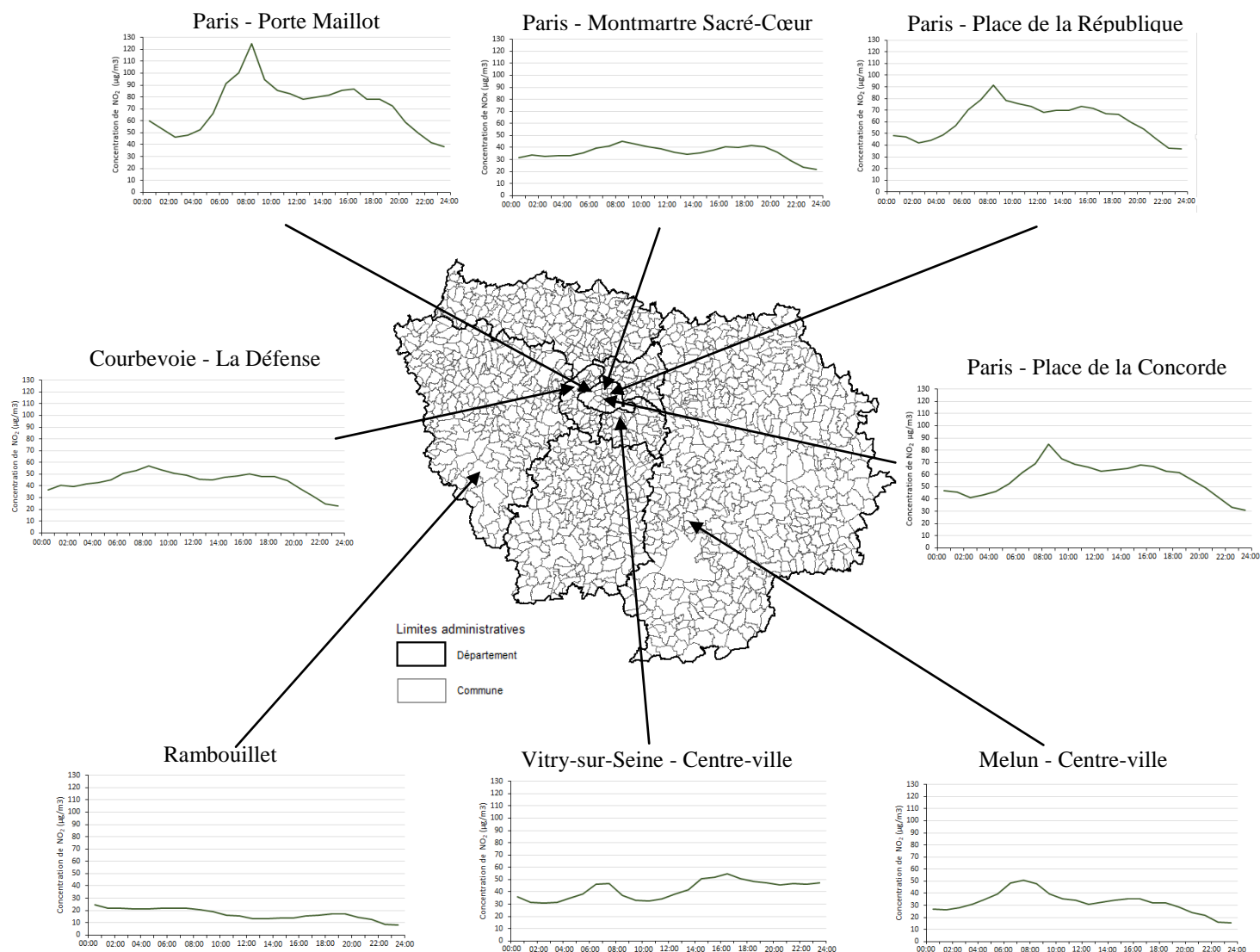
Source : Airparif. Réalisation : auteurs.

Aussi, les données témoignent de la variabilité temporelle des niveaux de concentration en NO_2 . Elle est concomitante à l'évolution horaire du trafic routier. Dans les espaces urbains denses, la concentration en NO_2 en journée est significativement supérieure à celle la nuit (Figure 4). Entre 7h et 21h, l'évolution horaire indique souvent un profil à deux pointes reliées par un plateau. La pointe du matin, entre 7h et 10h, est plus marquée que celle de l'après-midi, entre 16h et 20h : elle témoigne d'une circulation plus concentrée en début de journée. Le maintien entre 10h et 16h de niveaux élevés de concentration reflète les besoins diurnes de mobilité automobile. À l'inverse, dans les espaces plus périphériques, le profil des niveaux de concentration en NO_2 demeure plus constant tout au long de la journée, avec des périodes de pointe moins marquées.

⁷ La distance d'influence du NO_2 au voisinage des axes est de l'ordre de 100 mètres pour les grands axes, de 150 à 200 mètres pour le Périphérique, de 100 à 150 mètres pour les autoroutes urbaines, de 50 à 100 mètres pour les petits axes, et de 400 mètres pour les grands carrefours et échangeurs (Airparif Actualité, 2012).

⁸ À Paris, la concentration à proximité du trafic s'élève en moyenne à 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2017 et à 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en situation de fond (Airparif, 2018).

Figure 4 : Variabilité temporelle des concentrations en NO₂ / Temporal variability of NO₂ concentrations



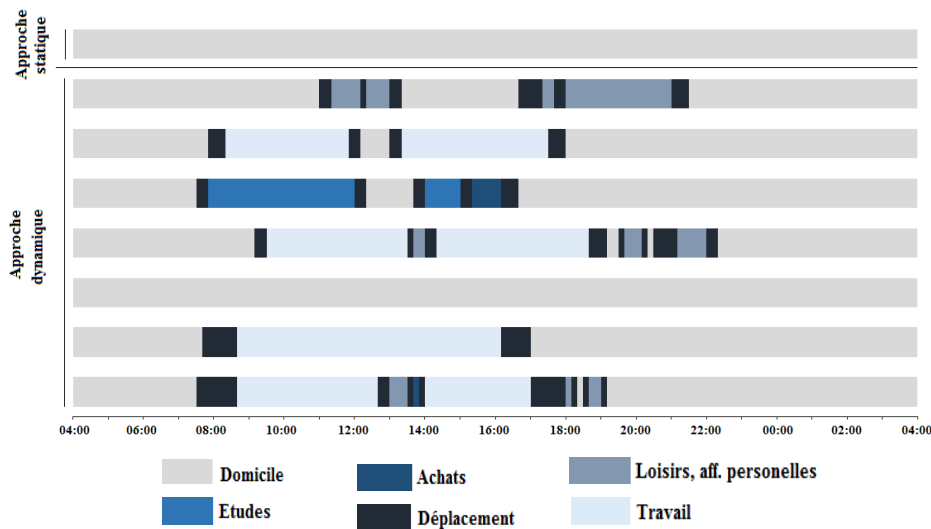
Source : Airparif. Réalisation : auteurs.

Les données de mobilité quotidienne de l'Enquête globale transport

La difficulté à évaluer l'exposition à la pollution de l'air lors des activités non résidentielles peut être levée en s'appuyant sur les enquêtes ménages déplacements. L'Enquête globale transport (Île-de-France Mobilités-OMNIL-DRIEA) renseigne les déplacements locaux un jour ouvrable moyen de semaine d'un échantillon représentatif de la population de 5 ans et plus d'Île-de-France. Les origines et destinations des déplacements (spatialisées au carreau de 100 mètres de côté), les modes de transport, les heures de départ et d'arrivée, les motifs, les durées et les portées de chaque déplacement réalisé la veille du jour de l'enquête sont recensés. Les caractéristiques socio-démographiques et spatiales des enquêtés et de leur ménage d'appartenance sont aussi précisées. Dans cette recherche, l'échantillon considère uniquement les individus n'ayant pas quitté la région de manière à pouvoir estimer leur exposition sur 24 heures. Il s'élève à 31 687 individus qui comptabilisent 122 393 déplacements. La population pondérée de 10,46 millions d'individus constitue un sous-échantillon de la population totale.

À partir des données d'enquête, il est possible de connaître l'exposition à la pollution atmosphérique pendant les déplacements, mais aussi les activités stationnaires de chaque individu. Les informations horaires et spatiales des déplacements autorisent en effet la reconstitution des programmes spatio-temporels d'activités (Thévenin et al., 2007). Le couplage des informations relatives aux déplacements n et $n+1$ permet de déduire les horaires et les durées dans chaque espace d'activité (Figure 5). Il convient de préciser que l'affectation spatiale des individus ne s'étant pas déplacés de la journée est par définition leur domicile.

Figure 5 : Illustration des programmes d'activités individuels (actogramme) / Illustration of individual activity programs



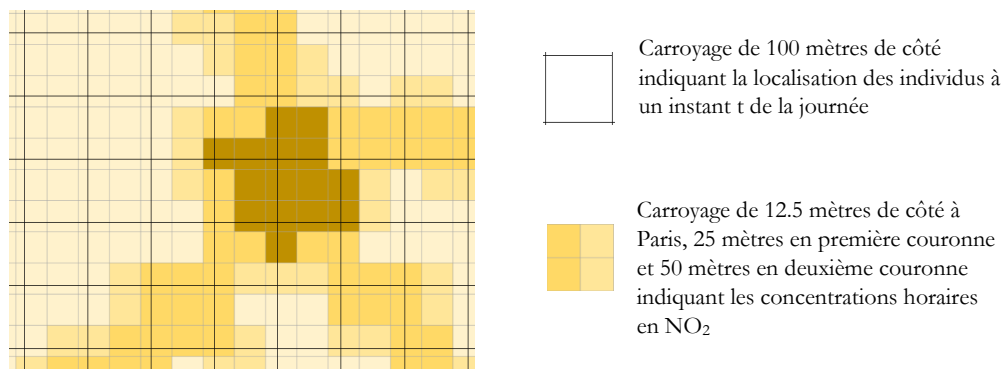
Source : Enquête globale transport 2010 (Île-de-France Mobilités-OMNIL-DRIEA). Réalisation : auteurs.

Évaluation de l'exposition à la pollution dans chaque espace d'activité

L'exposition à la pollution au NO₂ dans un espace d'activité dépend du niveau de concentration pondéré par le temps passé. Le niveau d'exposition pendant une activité est calculé en associant les données carroyées (dans des mailles spatiales hétérogènes) de pollution et de population. Le principe repose sur la superposition des deux couches spatiales dans un Système d'Information Géographique (SIG) (Figure 6). L'appariement s'appuie sur les centroïdes des carreaux de polluants contenus à l'intérieur des carreaux de population. Étant donné que plusieurs carreaux de la couche de polluants ont leur centroïde dans un même carreau de population, la valeur d'exposition de la population présente dans le carreau est la valeur moyenne des carreaux.

Un exemple simple permet d'illustrer la méthode. L'estimation de la valeur d'exposition au NO₂ pendant une activité qui se déroule entre 9h12 et 11h23 est construite à partir des niveaux de concentration dans le carreau de présence entre 9h et 10h (40 µg/m³), 10h et 11h (35 µg/m³), 11h et 12h (30 µg/m³), et du temps passé dans chaque tranche horaire (respectivement 48, 60 et 23 minutes). Le niveau moyen d'exposition est la somme des niveaux de concentration selon le temps passé et rapporté au temps total passé dans le carreau (131 minutes), soit 35.9 µg/m³. La procédure itérative mise au point permet de déterminer la valeur moyenne d'exposition individuelle dans tous les espaces d'activités quotidiens.

Figure 6 : Superposition spatiale des données carroyées de pollution et de population / Spatial overlay of pollution and population gridded data



Source : Enquête globale transport 2010 (Île-de-France Mobilités-OMNIL-DRIEA). Réalisation : auteurs.

Évaluation de l'exposition à la pollution pendant les déplacements

La différenciation de l'exposition au NO₂ pendant les déplacements selon le mode de transport rend nécessaire un travail méthodologique spécifique. À partir du mode principal⁹ de chaque déplacement sont également considérées l'heure de départ et d'arrivée, la durée, l'origine et la destination du déplacement :

- (i) Pour les modes motorisés individuels, le principe méthodologique repose sur la reconstitution la plus précise possible des itinéraires routiers empruntés¹⁰. Une procédure d'affectation des déplacements en voiture (conducteur et passager) (représentant 38% de l'ensemble des déplacements) et en deux-roues motorisés (1%) sur les multiples tronçons du réseau routier est développée. Elle s'appuie sur le modèle de trafic MODUS de la DRIEA¹¹. L'affectation sur le réseau permet alors d'estimer le niveau d'exposition en considérant pour chaque tronçon de l'itinéraire le niveau de NO₂ et le temps passé. Cependant, il convient de préciser que, malgré la précision de la modélisation, le niveau d'exposition calculé sous-estime le niveau réel de polluant inhalé par les automobilistes dans leur habitacle et les motards : la pollution atmosphérique est supérieure dans le micro-environnement du véhicule du fait de l'infiltration des polluants émis par le trafic routier qu'au niveau des stations de mesure situées en bord de route (Airparif, 2009 ; Morin et al., 2009).
- (ii) Pour les déplacements à pied (39% des déplacements totaux) et en vélo (2%), l'estimation de l'exposition ne tient pas compte de l'itinéraire emprunté, la modélisation de ces déplacements étant trop complexe. Elle est calculée en prenant uniquement en considération le début (carreau d'origine et heure de départ) et la fin (carreau de destination et heure de fin) du déplacement. Le niveau d'exposition estimé est égal à la moyenne de ces deux valeurs. Si ce principe méthodologique est simplificateur, il demeure acceptable puisque les déplacements avec ces modes sont souvent circonscrits dans l'espace (0.4 kilomètre en moyenne à pied et 2.0 en vélo) et dans le temps (12 minutes en moyenne à pied, 18 minutes en vélo), rendant moins probable l'expérience d'environnements atmosphériques très différents.

⁹ Par convention dans les enquêtes transport, le mode principal d'un déplacement est défini suivant la hiérarchie suivante : transport collectif > voiture > deux-roues > marche.

¹⁰ Cette information n'est pas renseignée dans les enquêtes transport qui n'indiquent que les lieux d'origine et de destination.

¹¹ Direction régionale et interdépartementale de l'équipement et de l'aménagement d'Île-de-France.

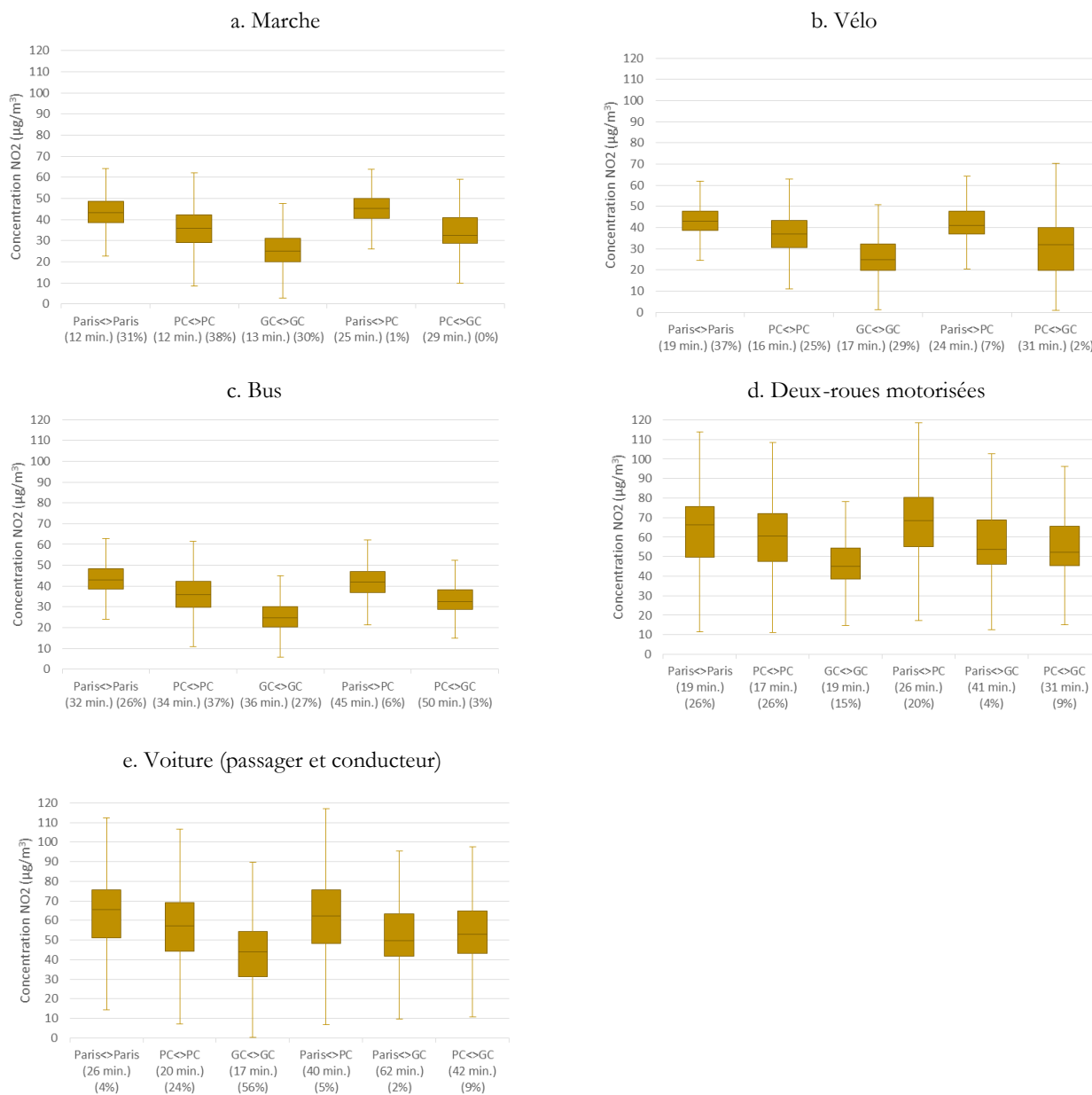
- (iii) Pour les déplacements sur la voirie en bus et tramway (5%), l'estimation de l'exposition s'appuie aussi seulement sur les extrémités des déplacements. Là encore, le principe méthodologique sous-estime certainement le niveau réel d'exposition de ces usagers du transport public, car ne tenant pas compte des plus fortes concentrations dans les véhicules (Delaunay et al., 2012).
- (iv) Pour les déplacements en métro, RER et trains de banlieue (15%), l'estimation du niveau d'exposition apparaît compliquée. En effet, la pollution au NO₂ dans les espaces souterrains (couloirs, quais) et les rames est essentiellement liée à la pollution de l'air en extérieur (Airparif Actualité, 2011 ; Grange et Host, 2012). Plusieurs facteurs interviennent tels que la profondeur des stations, la situation des bouches d'aération par rapport au trafic automobile ou encore la ventilation dans les stations rendant difficiles l'affectation de valeurs d'exposition. Les mesures du réseau Squales¹² de la Régie autonome des transports parisiens (RATP) dans les stations témoins estiment, en 2018, les niveaux moyens en NO₂ inférieurs à 40 µg/m³ à la station de métro Châtelet (ligne 4), et supérieurs aux stations Roosevelt (ligne 1) et Auber (RER A). Aussi, ces mesures révèlent la forte variabilité des niveaux moyens horaires et journaliers à Châtelet, parfois au-dessus et parfois en dessous de la valeur réglementaire. Devant ces nombreuses incertitudes, le choix méthodologique est de ne pas affecter de valeur d'exposition pendant les déplacements dans ces modes. Ainsi, le temps qui y est passé par les résidents (25% de l'échantillon) est soustrait au temps global de la journée (1440 minutes).

Les niveaux d'exposition pendant les déplacements sont synthétisés dans la Figure 7. Avec cette méthode, les résultats sont relativement conformes à ceux décrits dans la littérature, même si les niveaux sont globalement sous-estimés du fait des données : les automobilistes et motards sont davantage exposés pendant leurs déplacements au NO₂. L'exposition médiane dans ces modes est toujours supérieure à la norme réglementaire, et ce quelque soit la géographie de ces déplacements. Les niveaux d'exposition les plus élevés des automobilistes sont mesurés pendant les déplacements dans Paris, pour moitié entre 51 et 76 µg/m³, et ceux des motards entre Paris et la première couronne, pour moitié entre 55 et 80 µg/m³. À l'opposé, les niveaux d'exposition sont faibles pendant les déplacements en deuxième couronne – la valeur médiane étant de 44 µg/m³ pour les automobilistes – en raison du trafic routier plus faible et du niveau de fond plus bas (Airparif, 2009). Par ailleurs, en lien avec la méthodologie, les niveaux d'exposition du piéton, du cycliste et de l'utilisateur du bus sont proches¹³. Dans ces modes, le niveau médian d'exposition est supérieur à la valeur réglementaire pour les déplacements dans Paris, et entre Paris et la première couronne. Aussi, le niveau d'exposition au NO₂ fluctue significativement selon l'heure de la journée. Pour les déplacements internes à Paris, il est toujours supérieur, de 10% à 20%, pendant les heures de pointe (Figure 8).

¹² Réseau de surveillance de la qualité de l'air dans l'environnement souterrain de la RATP. Cette dernière s'est engagée dans des actions d'amélioration de la qualité de l'air dans les espaces souterrains, telle que le dispositif de traitement de l'air « IP'AIR ». Les données de qualité de l'air sont disponibles à l'adresse suivante : www.iseo.fr/ratp/RATP.php

¹³ D'après Delaunay et al. (2012), le piéton est moins exposé à la pollution, et pour Airparif Actualité (2011), le cycliste est exposé à un niveau intermédiaire entre le piéton et l'automobiliste.

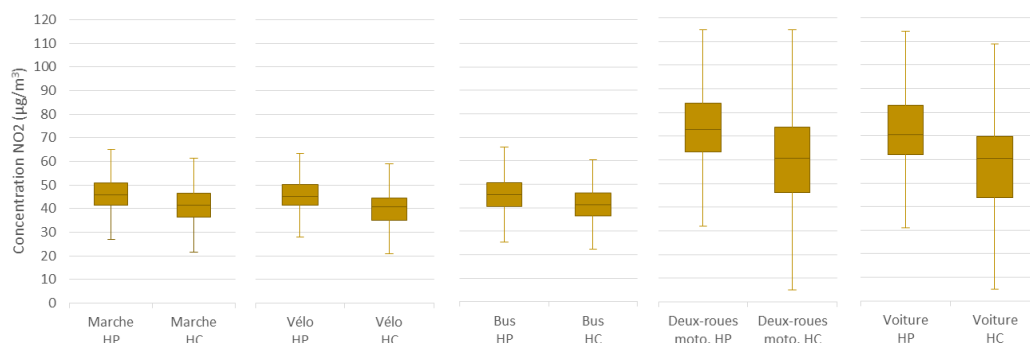
Figure 7 : Comparaison des niveaux d'exposition au NO₂ selon les modes et les liaisons / Comparison of NO₂ exposure level across modes and linkages



Lecture : PC : première couronne ; GC : deuxième couronne. Les déplacements à pied, en vélo et en bus entre Paris et la deuxième couronne ne sont pas significatifs. La durée moyenne des déplacements et la part des liaisons par modes de transport sont indiquées.

Sources : Enquête globale transport 2010 (Île-de-France Mobilités-OMNIL-DRIEA), Airparif. Calculs des auteurs.

Figure 8 : Comparaison des niveaux d'exposition au NO₂ selon les heures et les modes pendant les déplacements dans Paris / Comparison of NO₂ exposure levels by time and modes in Paris



Sources : Enquête globale transport 2010 (Île-de-France Mobilités-OMNIL-DRIEA), Airparif. Heures de pointe (HP) : 7h-9h30 et 16h-19h30 ; Heures creuses (HC). Calculs des auteurs.

Résultats

La mobilité quotidienne accroît l'exposition individuelle à la pollution

La mobilité quotidienne conduit les résidents de la région de Paris à respirer un air plus pollué. Elle accroît la valeur moyenne journalière d'exposition au NO₂ de chaque individu de 1,1 µg/m³ (+ 4%) à 32,1 µg/m³, contre 31,0 µg/m³ à la résidence (Tableau 2). Plus précisément, la mobilité quotidienne de 63% des résidents les amène à être exposés, chaque jour, à un environnement atmosphérique plus dégradé que celui à leur résidence¹⁴. Pour ces résidents, leur exposition moyenne s'établit à 31,6 µg/m³, soit une hausse de 10% (+ 2,9 µg/m³). À l'opposé, la mobilité quotidienne atténue l'exposition à la pollution pour 30% des résidents¹⁵. Pour eux, le niveau d'exposition décroît en moyenne de 2,3 µg/m³ (- 6%) pour s'élever à 33,7 µg/m³. Aussi, l'exposition des résidents ne quittant pas leur logement (7% d'immobiles) s'établit à 28,0 µg/m³.

La hausse de l'exposition moyenne individuelle accentue le nombre de résidents concernés par le dépassement du seuil réglementaire limite. L'approche dynamique indique qu'ils sont 1,72 million à être exposés en moyenne à plus de 40 µg/m³ de NO₂ par jour, soit 16,5% de la population, alors qu'ils sont 1,59 million avec l'approche statique, soit 15,2% de la population¹⁶. Cette hausse traduit la différence entre le nombre de résidents pour lesquels la mobilité quotidienne les conduit à une exposition moyenne journalière au-dessus du seuil réglementaire (+ 0,48 million) et ceux pour lesquels elle les amène à une exposition en dessous de ce seuil (- 0,35 million). Plus généralement, la mobilité quotidienne renforce la part de la population exposée à plus de 20 µg/m³ (92% contre 87%), à plus de 30 µg/m³ (61% contre 56%), et à plus de 40 µg/m³, mais atténue aussi celle exposée à plus de 45 µg/m³ (5% contre 6%) et à plus de 50 µg/m³ (1% contre 2%).

¹⁴ La hausse est supérieure à 5% pour 54% d'entre eux, à 10% pour 35% et à 20% pour 18%.

¹⁵ La baisse est supérieure à 5% pour 42% d'entre eux, à 10% pour 21% et à 20% pour 4%.

¹⁶ Ce chiffre est relativement conforme à celui d'Airparif (2018) qui évalue la population annuelle dépassant le seuil à 1,3 millions.

Tableau 2 : Niveau d'exposition au NO₂ suivant les catégories de résidents / Level of exposure to NO₂ according to categories of residents

| | Part (%) | Niveau d'exposition moyen (µg/m ³) (IC à 95%) | Niveau d'exposition médian (µg/m ³) | Différence du niveau d'exposition moyen suivant les approches (µg/m ³) | Part (%) de la population exposée > 40 µg/m ³ (IC à 95%) | Différence de la part de la population exposée suivant les approches (points) |
|----------------------------------|----------|---|---|--|---|---|
| Couronne résidence | | | | | | |
| Paris | 19 | (39,5) 39,6 (39,8) | 39,2 | - 0,1 | (42,6) 44,1 (45,6) | 0,0 |
| Première couronne | 38 | (34,5) 34,6 (34,7) | 34,3 | + 1,0 | (17,5) 18,2 (18,9) | + 16,7 |
| Deuxième couronne | 43 | (26,5) 26,6 (25,7) | 25,8 | + 1,8 | (2,5) 2,7 (3,0) | + 28,6 |
| Statut d'occupation | | | | | | |
| Actifs occupés | 48 | (32,7) 32,8 (32,9) | 33,2 | + 1,8 | (17,2) 17,8 (18,4) | + 13,4 |
| Elèves | 19 | (30,2) 30,4 (30,6) | 30,6 | + 0,3 | (11,6) 12,3 (13,1) | 0,0 |
| Etudiants | 4 | (33,8) 34,2 (34,6) | 34,9 | + 1,0 | (19,1) 21,5 (23,9) | + 1,0 |
| Chômeurs | 6 | (32,4) 32,8 (33,2) | 33,1 | + 0,7 | (17,5) 19,5 (21,7) | + 3,7 |
| Retraités | 16 | (31,2) 31,4 (31,6) | 31,9 | + 0,7 | (13,9) 14,9 (15,9) | + 6,4 |
| Autres inactifs | 7 | (31,3) 31,8 (32,3) | 32,0 | + 0,4 | (14,1) 16,3 (18,7) | 0,0 |
| Revenu (par UC) | | | | | | |
| 1 ^{er} quintile (bas) | 20 | (31,7) 32,0 (32,2) | 32,3 | + 0,6 | (15,2) 16,1 (17,1) | + 1,3 |
| 2 ^{ème} quintile | 20 | (31,4) 31,6 (31,8) | 32,0 | + 0,9 | (13,3) 14,2 (15,1) | + 6,0 |
| 3 ^{ème} quintile | 18 | (31,1) 31,3 (31,5) | 31,5 | + 1,2 | (13,5) 14,4 (15,3) | + 6,7 |
| 4 ^{ème} quintile | 19 | (31,8) 32,1 (32,3) | 32,5 | + 1,5 | (15,2) 16,2 (17,2) | + 15,7 |
| 5 ^{ème} quintile (haut) | 23 | (33,4) 33,6 (33,8) | 34,1 | + 1,5 | (19,4) 20,4 (21,4) | + 10,3 |
| Catégories socioprof. | | | | | | |
| Artisans, comm., CE | 2 | (32,9) 33,7 (34,4) | 34,3 | + 2,2 | (18,1) 21,7 (25,8) | + 21,2 |
| Cadres | 15 | (34,5) 34,7 (34,9) | 35,2 | + 1,7 | (22,7) 23,9 (25,2) | + 13,3 |
| Prof. intermédiaires | 15 | (32,3) 32,6 (32,7) | 32,7 | + 1,9 | (15,4) 16,4 (17,5) | + 10,1 |
| Employés | 16 | (31,8) 32,0 (32,2) | 32,4 | + 1,5 | (14,7) 15,7 (16,8) | + 12,9 |
| Ouvriers | 9 | (30,7) 31,1 (31,4) | 31,0 | + 1,2 | (11,9) 13,2 (14,6) | + 6,5 |
| Autres | 43 | (31,1) 31,2 (31,4) | 31,7 | + 0,5 | (13,7) 14,3 (14,9) | + 2,9 |
| Sexe | | | | | | |
| Homme | 47 | (32,1) 32,2 (32,3) | 32,7 | + 1,3 | (16,3) 16,9 (17,5) | + 10,5 |
| Femme | 53 | (31,9) 32,0 (32,1) | 32,5 | + 0,9 | (15,5) 16,1 (16,7) | + 5,9 |
| Classe d'âge | | | | | | |
| 5 à 24 ans | 26 | (30,8) 31,0 (31,2) | 31,3 | + 0,6 | (13,0) 13,7 (14,4) | + 0,7 |
| 25 à 54 ans | 49 | (32,7) 32,8 (32,9) | 33,2 | + 1,5 | (16,3) 16,9 (17,5) | + 3,7 |
| 55 à 74 ans | 19 | (31,7) 31,9 (32,1) | 32,3 | + 1,1 | (15,5) 16,4 (17,4) | + 11,6 |
| 75 ans et plus | 6 | (31,6) 32,0 (32,4) | 32,6 | + 0,4 | (14,0) 15,8 (17,8) | + 3,9 |
| Occupation logement | | | | | | |
| Propriétaire | 32 | (31,2) 31,3 (31,5) | 31,7 | + 1,3 | (13,8) 14,5 (15,2) | + 9,0 |
| Accédant | 20 | (30,2) 30,3 (30,5) | 32,5 | + 1,8 | (10,9) 11,6 (12,4) | + 24,7 |
| Locataire | 48 | (33,2) 33,3 (33,5) | 33,9 | + 0,7 | (19,2) 19,8 (20,5) | + 4,8 |
| Type de logement | | | | | | |
| Individuel | 32 | (27,5) 27,6 (27,8) | 27,2 | + 1,8 | (4,0) 4,4 (4,8) | + 22,2 |
| Collectif | 68 | (34,1) 34,2 (34,3) | 34,7 | + 0,8 | (21,5) 22,1 (22,7) | + 6,8 |
| Ensemble | 100 | (32,0) 32,1 (32,2) | 32,6 | + 1,1 | (16,1) 16,5 (16,9) | + 7,8 |

Lecture : IC : intervalle de confiance. UC = unité de consommation.

Sources : Enquête globale transport 2010 (Île-de-France Mobilités-OMNIL-DRIEA), Airparif. Calculs des auteurs.

Aussi, des statistiques descriptives indiquent une variation très inégale de l'exposition moyenne au NO₂ par la mobilité quotidienne selon les caractéristiques socio-démographiques des habitants. Suivant la localisation résidentielle, l'exposition moyenne à la pollution se renforce pour les habitants de la deuxième couronne (+ 1,8 µg/m³), même si elle demeure toujours largement inférieure (26,6 µg/m³). Elle concerne aussi bien ceux résidant à proximité immédiate de la première couronne que ceux des franges plus

éloignées. Avec l'approche dynamique, 2,7% des résidents de deuxième couronne sont concernés par un dépassement de seuil réglementaire. De même, la mobilité quotidienne des résidents de première couronne les conduit à intensifier leur exposition au NO₂. Parmi ces habitants, ceux des communes les plus lointaines sont plus affectés que ceux des communes voisines de Paris par la détérioration de la qualité de l'air. Malgré tout, l'exposition moyenne journalière des habitants éloignés de la première couronne reste inférieure (souvent entre 25 et 30 µg/m³) à celle des habitants proches de Paris (souvent entre 34 et 42 µg/m³). En revanche, la mobilité quotidienne des Parisiens modifie peu leur exposition moyenne à la pollution de l'air. Elle occasionne cependant une légère réduction de l'exposition des résidents des arrondissements de la rive droite, plus polluée à cause de la présence des principales voies de circulation parisiennes (Airparif, 2018). Leur exposition diminue de - 0,3 µg/m³ pour s'établir à 40,6 µg/m³, alors que celle des résidents de la rive gauche croît de + 0,4 µg/m³ à 37,6 µg/m³. Par statut d'occupation, la mobilité renforce surtout le niveau d'exposition moyen journalier des actifs occupés (+ 1,8 µg/m³) et des étudiants (+ 1,0 µg/m³), pour lesquels celui-ci est déjà le plus élevé à la résidence. L'exposition des inactifs au foyer et des élèves, parmi les plus faibles à la résidence, est par contre peu modifiée par leurs pratiques de déplacements. Aussi, l'exposition moyenne au NO₂ des 25-54 ans, essentiellement des étudiants et des actifs occupés, est renforcée par leur mobilité quotidienne (+ 1,5 µg/m³), à la différence des autres catégories d'âge, souvent des inactifs, peu concernées. C'est le cas surtout des 75 ans et plus (+ 0,4 µg/m³). Parmi les actifs, les artisans, commerçants et chefs d'entreprise sont ceux dont la mobilité quotidienne génère la plus forte dégradation de la qualité de l'air respirée (+ 2,2 µg/m³). Ils sont plus nombreux à dépasser le seuil réglementaire limite que ne le laisse supposer l'approche statique (21,7%). Aussi, la mobilité dégrade significativement l'exposition à la pollution au NO₂ des professions intermédiaires (+1,9 µg/m³) et des cadres (+ 1,7 µg/m³). Pour ces derniers, la hausse de l'exposition liée à leur mobilité quotidienne se superpose avec un niveau élevé à la résidence lié à leur localisation plus souvent centrale (Préteceille, 2003), de sorte qu'ils sont exposés en moyenne à un air extrêmement détérioré (34,7 µg/m³). Ils sont d'ailleurs la catégorie socioprofessionnelle la plus souvent exposée au-dessus de la valeur réglementaire limite (23,9%). Suivant le revenu, la mobilité quotidienne aggrave davantage, en moyenne, l'exposition au NO₂ des individus les plus aisés (+ 1,5 µg/m³). Ceux du cinquième quintile sont ainsi plus d'un sur cinq à dépasser chaque jour la valeur réglementaire limite. À l'inverse, la mobilité détériore moins la qualité de l'air des individus les plus modestes économiquement. Aussi, elle dégrade un peu plus l'exposition à la pollution atmosphérique des hommes (+ 1,3 µg/m³). Enfin, selon l'occupation et le type de logement, catégories très liées à la couronne de résidence, la mobilité quotidienne renforce l'exposition des accédants à la propriété et celle des résidents en logement individuel (+ 1,8 µg/m³). Les résultats de l'approche dynamique soulignent aussi que ces catégories sont beaucoup plus exposées au dépassement de la valeur réglementaire que ce que révèle l'approche à la résidence. Malgré tout, leur exposition journalière au NO₂ reste inférieure en lien avec une localisation résidentielle plus souvent en deuxième couronne.

Passer du temps en voiture et fréquenter Paris expliquent la hausse de l'exposition à la pollution

Il s'agit dès lors de comprendre quelles pratiques de mobilité quotidienne contribuent à la hausse du niveau d'exposition individuelle à la pollution atmosphérique. Pour cela, une régression logistique mesure, toutes choses égales par ailleurs, l'association entre la probabilité d'être significativement plus exposé et les facteurs de mobilité susceptibles d'expliquer cette hausse de l'exposition (5% et plus) qui concerne 34% des résidents. Les facteurs sont le temps passé en voiture, en deux-roues motorisés, à pied, en vélo et en bus – classé selon 5 modalités d'intensité d'usage (nulle, faible, moyenne, forte, très forte) – ainsi que la couronne principale d'activité qui est définie comme l'espace où l'individu passe le plus de temps pour ses activités non résidentielles. Le tableau 3 ordonne les facteurs les plus significatifs par ordre décroissant et renseigne le coefficient, la significativité, les odds-ratio et l'écart de probabilité par rapport à la situation de référence.

Tableau 3 : Facteurs explicatifs de mobilité sur la probabilité d'être plus exposé au NO₂ /
Explanatory factors of mobility on the probability of being more exposed to NO₂

| Variabes et modalités | Coefficient | Significativité | Odds ratio | Ecart de probabilité (points) |
|---|-------------|-----------------|------------|-------------------------------|
| Constante | - 1,1901 | *** | | |
| Temps en voiture | | | | |
| Aucun | Réf. | | | |
| Moins de 20 minutes | 0,2424 | *** | 1,274 | + 4,6 |
| De 20 à 39 minutes | 0,2658 | *** | 1,304 | + 5,1 |
| De 40 à 59 minutes | 0,8281 | *** | 2,289 | + 17,7 |
| 60 minutes et plus | 1,4980 | *** | 4,473 | + 34,3 |
| Couronne principale d'activité | | | | |
| Paris | 0,9494 | *** | 2,584 | + 20,7 |
| Première couronne | 0,2425 | *** | 1,274 | + 4,6 |
| Deuxième couronne | Réf. | | | |
| Temps à pied | | | | |
| Aucun | Réf. | | | |
| Moins de 20 minutes | - 0,2539 | *** | 0,776 | - 4,2 |
| De 20 à 39 minutes | - 0,4569 | *** | 0,633 | - 7,2 |
| De 40 à 59 minutes | - 0,5665 | *** | 0,568 | - 8,6 |
| 60 minutes et plus | -0,4123 | *** | 0,662 | - 6,6 |
| Temps en deux-roues motorisées | | | | |
| Aucun | Réf. | | | |
| Moins de 20 minutes | - 0,1968 | n.s. | | |
| De 20 à 39 minutes | - 0,0478 | n.s. | | |
| De 40 à 59 minutes | 0,8659 | *** | 2,377 | +18,6 |
| 60 minutes et plus | 1,1351 | *** | 3,112 | +25,3 |
| Temps en vélo | | | | |
| Aucun | Réf. | | | |
| Moins de 20 minutes | 0,0213 | n.s. | | |
| De 20 à 39 minutes | - 0,5526 | *** | 0,575 | - 8,4 |
| De 40 à 59 minutes | 0,0043 | n.s. | | |
| 60 minutes et plus | 0,1817 | n.s. | | |
| Concordance entre les valeurs prédites et les valeurs observées : 69,2 | | | | |
| Taille de l'échantillon : 29642 | | | | |
| Significativité : * seuil de 10% ; ** seuil de 5% ; *** seuil de 1% ; n.s. non significatif | | | | |

Sources : Enquête globale transport 2010 (Île-de-France Mobilités-OMNIL-DRIEA), Airparif. Calculs des auteurs.

Le temps passé en voiture a un effet significatif très positif sur la hausse de l'exposition au NO₂ : plus les individus consacrent du temps à leur mobilité automobile et plus leur probabilité de respirer un air de mauvaise qualité se renforce. Cette probabilité s'accroît largement au-delà de 40 minutes par jour en voiture. Aussi, la couronne principale d'activité est déterminante dans la hausse de l'exposition individuelle à la pollution atmosphérique. Passer la majorité du temps d'activité à Paris, mais aussi en première couronne, renforce très significativement la possibilité de respirer un air de plus mauvaise qualité. Comme pour l'automobile, l'usage prolongé des deux-roues motorisés (40 minutes et plus) accroît la propension à respirer un air plus dégradé. À l'inverse, le recours à la marche pour se déplacer réduit significativement la probabilité d'être exposé à un air plus dégradé.

Une exposition à la hausse ou à la baisse différenciée

Les résultats économétriques cherchent maintenant à déterminer les facteurs individuels pouvant expliquer l'évolution à la hausse ou à la baisse de l'exposition à la pollution atmosphérique par rapport à celle de référence à la résidence. Une modélisation statistique basée sur une régression logistique multinomiale mesure, toutes choses égales par ailleurs, la probabilité de chaque individu de respirer un air plus ou moins pollué. Ce type de régression présente l'intérêt de modéliser la probabilité relative de connaître une évolution de l'exposition individuelle par rapport aux autres évolutions possibles. Trois alternatives sont possibles pour chaque individu : accroître significativement son exposition (hausse de 5% ou plus) (34% de la population), réduire significativement son exposition (baisse de 5% ou plus) (13%), et connaître une évolution modérée de son exposition (entre -5% et +5%) (53%). Celle-ci est retenue comme alternative de référence, car elle est la plus fréquente. Les variables individuelles explicatives sont la couronne de résidence, le sexe, l'âge, la catégorie socio-professionnelle, le revenu du ménage, le statut d'occupation du logement et le type d'habitation. Le tableau 4 renseigne le coefficient et les odds-ratio de chaque modalité des variables les plus significatives classées par ordre d'importance. Les résultats indiquent la probabilité de chaque individu d'être significativement plus ou moins exposé à la pollution de l'air par rapport à la probabilité de connaître une évolution mesurée de l'exposition du fait de la mobilité quotidienne.

Tableau 4 : Facteurs explicatifs individuels de la variation de l'exposition au NO₂ (Référence : variation comprise entre -5% et +5% (n=14 123)) / Individual explanatory factors for variation in NO₂ exposure

| | Baisse de l'exposition individuelle (> -5%) (n=3 809) | | | Hausse de l'exposition individuelle (> +5%) (n=11 514) | | |
|--------------------------------|--|-----------------------------------|----------------|---|-----------------------------------|----------------|
| | Part (%) | Coefficient et significativité | Odds- ratio | Part (%) | Coefficient et significativité | Odds- ratio |
| Constante | | - 1,2002*** | | | - 0,6726*** | |
| Catégorie socioprofessionnelle | | | | | | |
| Artisans, commerçants, CE | 12 | - 0,2870* | 0,750 | 47 | 0,5415*** | 1,719 |
| Cadres | 19 | 0,0123 | 1,012 | 45 | 0,6010*** | 1,824 |
| Professions intermédiaires | 13 | - 0,1973* | 0,821 | 46 | 0,5495*** | 1,732 |
| Employés | 12 | - 0,3401*** | 0,712 | 39 | 0,3952*** | 1,485 |
| Ouvriers | 17 | 0,1212 | 1,129 | 39 | 0,4375*** | 1,549 |
| Elèves | 3 | Réf. | | 22 | - | |
| Etudiants | 18 | 0,2023** | 1,224 | 37 | 0,7060*** | 2,026 |
| Retraités | 16 | - 2,0396*** | 0,130 | 27 | - 0,6176*** | 0,539 |
| Autres inactifs | 3 | - 1,9878*** | 0,137 | 14 | - 1,0600*** | 0,346 |
| Espace de résidence | | | | | | |
| Paris | 21 | 0,4047*** | 1,499 | 23 | - 0,7560*** | 0,470 |
| Première couronne | 11 | - 0,0930** | 0,911 | 31 | - 0,3978*** | 0,672 |
| Deuxième couronne | 10 | Réf. | | 41 | - | |
| Revenu (par UC) | | | | | | |
| 1 ^{er} quintile | 11 | - 0,4031*** | 0,668 | 24 | - 0,4077*** | 0,665 |
| 2 ^{ème} quintile | 12 | - 0,1448** | 0,865 | 30 | - 0,1583*** | 0,854 |
| 3 ^{ème} quintile | 12 | Réf. | | 36 | - | |
| 4 ^{ème} quintile | 14 | 0,2079*** | 1,231 | 39 | 0,1029** | 1,108 |
| 5 ^{ème} quintile | 15 | 0,3980*** | 1,489 | 40 | 0,3229*** | 1,381 |
| Type de logement | | | | | | |
| Collectif | 14 | Réf. | | 30 | - | |
| Individuel | 8 | - 0,3095*** | 0,734 | 42 | 0,1442*** | 1,155 |
| Age | | | | | | |
| 5-24 ans | 16 | Réf. | | 28 | - | |
| 25-54 ans | 14 | 0,1794* | 1,197 | 41 | 0,3018*** | 1,352 |
| 55-74 ans | 8 | 0,0373 | 1,038 | 31 | 0,1692** | 1,184 |
| 75 ans et plus | 2 | - 0,6026*** | 0,547 | 14 | - 0,4212*** | 0,656 |
| Sexe | | | | | | |
| Homme | 14 | 0,1344*** | 1,144 | 37 | 0,1506*** | 1,162 |
| Femme | 11 | Réf. | | 31 | - | |
| Ensemble | 13 | | | 34 | | |

Lecture : Les résultats proviennent d'une régression logistique multinomiale. Les variables sélectionnées sont classées par ordre décroissant de significativité.

Lecture : 12% des artisans, commerçants et chefs d'entreprise réduisent leur exposition à la pollution, et 47% l'augmentent.

Significativité : * seuil de 10% ; ** seuil de 5% ; *** seuil de 1%.

Sources : Enquête globale transport 2010 (Île-de-France Mobilités-OMNIL-DRIEA), Airparif. Calculs des auteurs.

Le principal facteur individuel explicatif à la variation du niveau d'exposition au NO₂ est la catégorie socio-professionnelle. Les actifs et les étudiants ont une plus forte probabilité d'accroître leur exposition à la pollution par rapport aux élèves (coefficient de régression positif). Pour les actifs, l'explication réside dans leur usage intensif, et plus souvent en heures de pointe, de la voiture (45 minutes en moyenne) et des deux-roues motorisés (Proulhac, 2019), et dans l'attractivité exercée par Paris et la première couronne pour leurs activités quotidiennes non résidentielles (respectivement 127 et 152 minutes en moyenne). À travers un exemple qualitatif, la Figure 9-1 illustre l'effet du temps passé en automobile et à Paris pour des activités non résidentielles sur l'exposition à la pollution d'un actif. La mobilité automobile (270 minutes) de cet ouvrier de première couronne le conduit à dépasser le seuil réglementaire moyen d'exposition, à 41,4 µg/m³, contre 35,2 µg/m³ à la résidence. Lors de son premier déplacement entre 12h à 13h, de son domicile à destination du 10^e arrondissement de Paris, le niveau moyen d'exposition sur la route s'élève à 56,7 µg/m³. Il est de 42,3 µg/m³ et 43,1 µg/m³ durant les deux heures d'activité, soit des niveaux supérieurs à ceux mesurés au même instant à son domicile. Pendant son deuxième déplacement vers le 18^e arrondissement, entre 15h et 18h, il est exposé pendant près d'une heure à des niveaux de concentration de NO₂ compris entre 91,8 et 96,3 µg/m³, puis entre 64,3 et 87,5 µg/m³. L'exposition pendant son activité de 30 minutes à 42,9 µg/m³ est supérieure à celle à son logement. Lors du retour au domicile, entre 18h30 à 19h, la concentration sur la route décroît progressivement en s'éloignant de Paris, passant d'environ 70 µg/m³ les premières minutes à 60 µg/m³ puis à 57 µg/m³ à destination.

Parmi les actifs, l'important recours à la voiture des artisans, commerçants et chefs d'entreprise (85 minutes) et le temps passé à Paris (132 minutes) expliquent leur forte propension à respirer un air plus pollué (47% d'entre eux augmentent significativement leur exposition à la pollution par leur mobilité quotidienne). Pour les cadres, les professions intermédiaires et les employés, la dégradation de la qualité de l'air respiré repose surtout sur le temps passé à Paris et en première couronne pour leurs activités non résidentielles, principalement professionnelles, leur usage de la voiture étant plus mesuré. Par exemple, les cadres fréquentent ces espaces durant en moyenne respectivement 177 et 178 minutes. À l'inverse, la forte propension des ouvriers à respirer un air dégradé s'explique davantage par leur forte mobilité automobile (57 minutes) que par le temps passé dans la ville-centre (75 minutes). Par ailleurs, la mobilité tend également à dégrader significativement la qualité de l'air respiré par les étudiants. Cela s'explique par le temps passé à Paris (198 minutes) pour motif étude, loisirs, visites à des amis, et *cetera*. et non pas par l'usage de la voiture (14 minutes). En revanche, les retraités et les inactifs au foyer ont une plus faible probabilité d'accroître leur exposition à la pollution (coefficient négatif). Elle traduit leur faible temps passé à Paris (38 minutes) et en première couronne (36 minutes) pour leurs activités non résidentielles et leur recours plutôt réduit à la voiture (28 minutes). En outre, les retraités et les autres inactifs se caractérisent aussi par une moindre propension à respirer un air moins pollué (coefficient négatif), de sorte que la qualité de l'air à laquelle ils sont exposés est moins souvent modifiée par leur mobilité quotidienne. Leur plus faible variation à la baisse et à la hausse de l'exposition au NO₂ traduit une faible mobilité automobile – leur mobilité étant souvent réduite spatialement (11,0 km en moyenne pour les retraités et 8,6 pour les inactifs au foyer) – et plus souvent en heures creuses ainsi qu'un temps imposant à leur domicile (respectivement 1236 et 1271 minutes, soit 86% et 88% du temps journalier). L'évolution plus souvent modérée de l'exposition à la pollution de l'air de ces inactifs est illustrée dans la Figure 9-2. Cette retraitée du 11^e arrondissement de Paris a une mobilité quotidienne restreinte dans son quartier de résidence – elle parcourt à pied 1,3 km en 25 minutes – de sorte que l'environnement atmosphérique immédiat fréquenté lors de ses activités non résidentielles (visites à des amis et restauration) et pendant ses déplacements pédestres modifie peu son exposition moyenne à la pollution par rapport à celle estimée à son domicile. Elle diminue sur l'ensemble de la journée de 5% pour s'établir à 40,3 µg/m³.

À l'inverse des retraités et des autres inactifs, les étudiants ont non seulement, comme déjà indiquée, une plus forte probabilité d'accroître significativement leur exposition au polluant par leurs pratiques de déplacements, mais également une plus grande probabilité de la réduire (coefficient positif). Ainsi, leur mobilité tend à les éloigner de leur espace résidentiel plus souvent pollué du fait d'une localisation plus

souvent à Paris et dans les communes voisines, et à proximité du trafic automobile. L'exemple de l'étudiant de la Figure 9-3 éclaire la baisse majeure de la mobilité sur l'exposition individuelle au NO₂ lorsqu'elle conduit dans un environnement atmosphérique dissemblable. Il se rend en transport public depuis son domicile du 16^e arrondissement parisien sur son lieu d'étude en deuxième couronne, à Rocquencourt, où il reste de 9h00 à 18h30, avant de rentrer. Durant cette tranche horaire, son niveau moyen d'exposition s'élève à 20,8 µg/m³ contre 53,5 µg/m³ à sa résidence. Sa mobilité lui permet de réduire son niveau moyen d'exposition journalier à 34,6 µg/m³ contre 48,4 µg/m³ s'il était resté à son domicile, et ainsi de passer sous la norme réglementaire limite. Enfin, les résultats indiquent que les employés, les artisans et les professions intermédiaires ont aussi une moindre probabilité de respirer un air plus pur (coefficient négatif). Concernant les artisans, commerçants et chefs d'entreprise, une hypothèse plausible est liée à leur usage particulièrement intense de l'automobile qui peut être rédhitoire pour faire baisser significativement leur exposition atmosphérique moyenne journalière. Pour les employés et les professions intermédiaires, une autre hypothèse peut être envisagée : la localisation de leur emploi souvent dans Paris et les communes voisines de première couronne suggère une exposition à un environnement généralement plus dégradé pendant leur temps d'activité professionnelle.

De même, le lieu de résidence influe significativement sur la variation de l'exposition à la pollution. La probabilité des habitants de Paris et de la première couronne de respirer un air plus dégradé est inférieure à celle des habitants de la deuxième couronne (coefficient négatif). L'intense mobilité automobile de ces derniers (44 minutes en moyenne) les amène à passer du temps dans des espaces lointains où l'environnement atmosphérique est fortement pollué (45 minutes à Paris en moyenne et 53 minutes en première couronne). La Figure 9-4 illustre le cas exemplaire d'une résidente de deuxième couronne pour laquelle la qualité de l'air est considérablement dégradée du fait d'une activité professionnelle prolongée dans le centre de la région. Le niveau d'exposition à la pollution atmosphérique de cette active de la commune de Bièvres pendant la durée de son travail (495 minutes) dans le 13^e arrondissement de Paris s'élève à 66,7 µg/m³, alors qu'il s'établit dans le même temps à 18,3 µg/m³ à sa résidence. Sur la journée, son niveau moyen d'exposition au NO₂ est de 37,7 µg/m³ contre 19,9 µg/m³ à son domicile. Par ailleurs, les résultats soulignent la plus grande probabilité des Parisiens de réduire leur exposition à la pollution que les autres résidents. Elle s'explique par la fréquentation d'environnements atmosphériques moins pollués en première et deuxième couronne (respectivement 80 et 21 minutes en moyenne), en particulier pendant leur activité professionnelle (Aguiléra et al., 2009), et un temps restreint en voiture (13 minutes).

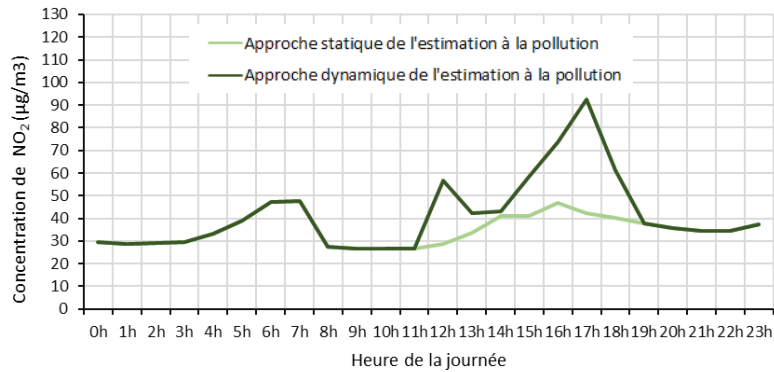
Par ailleurs, le revenu a aussi un effet significatif sur la propension des individus à respirer un air plus ou moins pollué. Les plus bas revenus sont moins souvent amenés à être exposés à un environnement atmosphérique différent, à la hausse comme à la baisse, de celui de leur résidence (coefficient négatif). Ce résultat traduit d'une part un temps passé à leur domicile plus long et d'autre part une mobilité moins souvent automobile – la motorisation est pour partie liée au capital économique – et plus souvent circonscrite dans le quartier de résidence. Les individus du premier quintile de revenu ne consacrent ainsi, en moyenne, que 19 minutes par jour à leur mobilité automobile, ne passent que 61 minutes à Paris pour leurs activités non résidentielles et restent à leur domicile 1067 minutes (74% du temps journalier). À l'inverse, les hauts revenus ont une propension significative à modifier leur exposition à la pollution qui reflète une mobilité étendue spatialement (20,3 kilomètres par jour en moyenne) et un temps réduit au domicile (953 minutes, soit 66% du temps journalier). D'un côté, la dégradation de leur exposition témoigne d'un usage intense de l'automobile (40 minutes en moyenne) et du temps passé en activités non résidentielles à Paris (139 minutes) et de l'autre côté l'amélioration de leur exposition souligne la fréquentation d'espaces moins centraux ou moins denses que leur lieu de résidence.

Parmi les autres facteurs individuels, le type de logement est significatif pour expliquer la variation de l'exposition à la pollution. Les résidents en logement individuel ont une plus forte probabilité de renforcer leur exposition (coefficient positif) et une moindre probabilité de la réduire (coefficient négatif). Deux explications peuvent être avancées : d'une part, les logements individuels sont davantage à l'écart des espaces les plus pollués de sorte que la mobilité de leurs résidents les amène plus souvent à accroître leur exposition à la pollution, et d'autre part ils ont davantage recours à la voiture que les résidents des logements collectifs (47 minutes en moyenne contre 26 minutes) du fait d'un plus grand éloignement aux aménités urbaines et d'une plus faible accessibilité au réseau de transport public. Aussi, les individus de 25 à 54 ans ont une probabilité significative d'accroître et de réduire leur exposition à la pollution de l'air

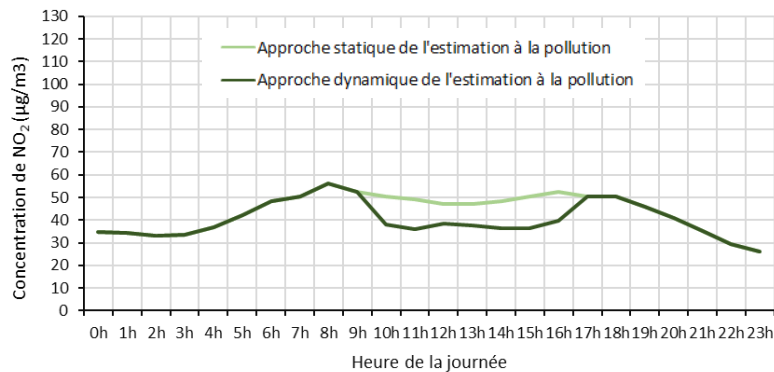
(coefficient positif), et inversement ceux de 75 ans et plus ont une probabilité significative de peu modifier leur exposition (coefficient négatif). Pour ces derniers, cela s'explique par une faible mobilité automobile (16 minutes en moyenne) ainsi que par le temps passé au domicile (1290 minutes, soit 90% du temps journalier) et dans le quartier de résidence. Enfin, le sexe a également un effet sur la variation de l'exposition à la pollution. La propension des hommes à respirer un air plus détérioré est supérieure, tout comme celle d'en respirer un moins pollué (coefficient positif). Cela traduit la fréquentation d'environnements atmosphériques plus souvent dissemblables de celui à la résidence (966 minutes au domicile pour les hommes contre 1034 minutes pour les femmes) en lien avec une mobilité plus étendue spatialement (19,9 kilomètres contre 14,3 kilomètres pour les femmes). Aussi, l'usage accru de l'automobile (41 minutes en moyenne contre 26 minutes pour les femmes) explique la probabilité des hommes à respirer un air plus détérioré.

Figure 9 : Illustrations des effets de la mobilité quotidienne sur l'estimation de l'exposition individuelle au NO₂ à partir de 4 profils de mobilité / Illustrations of the effects of daily mobility on the estimation of personal exposure to NO₂ through 4 mobility profiles

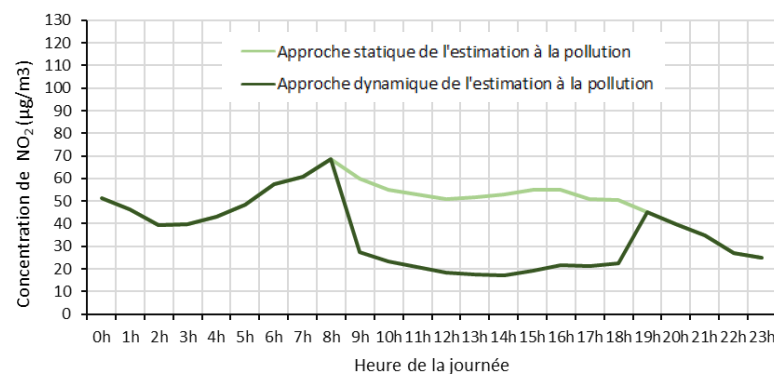
1) 1^{er} profil de mobilité : actif en activité non-résidentielle dans Paris et déplacements automobiles



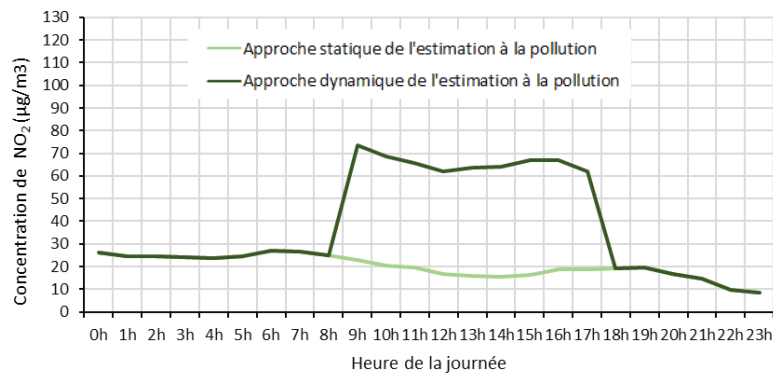
2) 2^{ème} profil de mobilité : retraitée parisienne dans son quartier de résidence



3) 3^{ème} profil de mobilité : élève de Paris en couronne



4) 4^{ème} profil de mobilité : active de couronne à Paris



Sources : Enquête globale transport 2010 (Île-de-France Mobilités-OMNIL-DRIEA), Airparif. Calculs des auteurs.

Conclusion

La mobilité quotidienne renforce le niveau d'exposition moyen à la pollution au NO₂ des résidents de la région de Paris. Les résultats indiquent que l'exposition moyenne individuelle est sous-estimée de 4% en n'intégrant pas les pratiques spatio-temporelles de mobilité. Par rapport au niveau d'exposition de référence au domicile, plus de six habitants sur dix sont concernés, un jour moyen de semaine, par une dégradation de la qualité de l'air respiré. Les résultats révèlent aussi que le nombre de résidents exposés au-dessus du seuil limite réglementaire est plus élevé en tenant compte de leurs espaces d'activités non résidentielles et de leurs déplacements. Par ailleurs, ils soulignent que l'écart du niveau d'exposition au NO₂ entre les approches résidentielle et dynamique est variable parmi la population. Cela traduit des pratiques différenciées de mobilité quotidienne entre les résidents. Les temps passés en voiture, dans Paris et dans la première couronne pour les activités non résidentielles expliquent la dégradation de la qualité de l'air d'une majorité de résidents. Ainsi, les actifs, les étudiants, les résidents de la deuxième couronne, les hauts revenus, les hommes et les résidents en logement individuel accroissent leur exposition journalière moyenne au NO₂. À l'inverse, les élèves, les retraités, les inactifs, les Parisiens, les individus avec un capital économique modeste, les femmes, les résidents de 75 ans et plus et ceux en logement collectif enregistrent une plus faible dégradation de leur exposition au NO₂. Ces résultats prolongent de précédents travaux internationaux qui soulignent la sous-estimation globale du niveau d'exposition à la pollution atmosphérique des habitants de métropoles et l'importance décisive de la mobilité (Li et al., 2021 ; Singh et al., 2020 ; Ramacher et Karl, 2020 ; Dhondt et al., 2012 ; Setton et al., 2011 ; Tchepel et Dias, 2011 ; Hatzopoulou et al., 2011 ; Beckx et al., 2009).

Par ailleurs, ce travail sur l'exposition environnementale intégrant la dynamique spatio-temporelle de la pollution et de la population urbaine s'inscrit dans un champ de recherche encore émergent. Malgré les avancées méthodologiques dans l'intégration des données de mobilité et de pollution, il convient aussi d'en noter les biais et manques. (i) Le premier concerne le recours à des données d'un jour moyen de semaine qui ne sont pas significatives sur un pas de temps plus large. Si les données de pollution de chaque jour sont disponibles dans les grandes villes, il n'existe pas en France, à notre connaissance, d'enquête à grande échelle renseignant sur un temps plus long la mobilité quotidienne des individus. Cette limite pourrait être levée en mettant en place un dispositif d'enquête sur des périodes prolongées (une semaine, un mois, et *cetera*) d'un échantillon significatif de résidents intégrant les enfants de moins de 5 ans. En reproduisant la méthodologie de ce travail, ce type d'enquête en continu permettrait d'améliorer l'estimation du niveau d'exposition individuelle en milieu urbain. (ii) Un deuxième manque tient à la non-prise en considération du niveau d'exposition dans le métro, le RER et le train en raison des incertitudes liées à la forte variabilité des concentrations de NO₂ et à leur méconnaissance scientifique dans la région de Paris. Si des hypothèses simples peuvent sans doute être construites pour approximer l'exposition en train, une telle démarche apparaît plus incertaine dans le cas de transports publics souterrains. Malgré ce

manque, une recherche conclut que l'environnement du transport public contribue modestement à l'exposition annuelle au NO₂ dans les transports (Ramacher et Karl, 2020). À partir du cas de Hambourg où la part modale du transport collectif est élevée, les auteurs indiquent que l'exposition dans le bus, le métro et le train de banlieue représente moins de 10% de l'exposition au NO₂ dans les transports, contre 40% pour l'environnement de la voiture et 26% pour l'environnement de la marche. Dès lors, les travaux futurs tenant compte de l'exposition pendant les déplacements devront en priorité s'atteler à améliorer l'estimation de l'exposition au NO₂ en voiture et à pied. (iii) En effet, une troisième approximation est liée à la sous-estimation de l'exposition en voiture. Les concentrations mesurées dans le micro-environnement du véhicule sont sans conteste supérieures à celles utilisées dans cette recherche. Afin de corriger cette erreur, une possibilité méthodologique simple serait d'appliquer un coefficient multiplicateur à l'exposition en voiture, et différenciée selon les caractéristiques du déplacement (origine/destination, heure de départ et d'arrivée), afin d'approcher les niveaux obtenus en situation réelle. La mise en place de cette correction aggravera l'exposition moyenne journalière des utilisateurs de l'automobile (40% de la population), et particulièrement des principaux utilisateurs, c'est-à-dire d'abord les résidents de deuxième couronne et les actifs. (iv) Un quatrième biais tient à la localisation des individus pendant leurs activités. L'information n'est disponible qu'à l'échelle de carreaux de 100 mètres de côté. Or, le niveau de pollution varie à une échelle très fine en particulier en fonction de la proximité au trafic et de la morphologie urbaine (Maignant, 2007). La résolution spatiale de l'enquête transport n'autorise donc qu'une approximation du niveau réel d'exposition. (v) Aussi au moins deux autres manques doivent être soulignés. Le premier concerne l'absence de considération pour les variations d'exposition entre l'air extérieur et l'air intérieur des locaux. Les données de concentrations sont celles de l'air extérieur alors qu'une majorité des activités sont réalisées en intérieur. Le second se rapporte à la non-prise en considération de la localisation des individus dans les locaux (gradient vertical d'exposition) alors que l'exposition à la pollution de l'air se réduit significativement au-delà du deuxième étage (Airparif Actualité, 2012 ; Evangelopoulos et al., 2020 ; Singh et al., 2020). Si les données de l'enquête transport pourraient permettre la construction d'une méthodologie tenant compte de type d'activité en extérieur ou intérieur (en ayant recours à une pondération d'exposition), elles ne permettent pas en revanche de surmonter le second biais. Cependant, il convient de noter que ces deux manques ne sont pas propres à ce travail puisqu'ils se retrouvent dans les études des organismes officiels de santé et dans les autres travaux de recherche. Ces différentes limites méthodologiques expliquent que les estimations des niveaux d'exposition au NO₂ dans la recherche doivent être considérées avec précaution, davantage comme un potentiel approximatif d'exposition que comme une mesure exacte.

Plus généralement, l'amélioration de l'estimation du niveau individuel d'exposition à la pollution, et plus largement la compréhension du rôle de la mobilité sur l'exposition et ses effets sur la santé et le bien-être des habitants, nécessite l'expertise pluridisciplinaire de chercheurs en épidémiologie, en environnement, en transport et mobilité ou encore en géographie et géomatique. Les progrès méthodologiques et scientifiques dans ce domaine de recherche ont des implications potentielles déterminantes pour définir, et évaluer les politiques publiques. Ainsi, ils présentent un intérêt pour les politiques de santé publique et de prévention des risques sanitaires en lien avec l'environnement. D'ailleurs, celles-ci s'appuient depuis peu sur le concept d'exposome, qui cherche à identifier l'ensemble des expositions environnementales subies par un être humain tout au long de sa vie, et dans lequel s'inscrit pleinement l'approche dynamique de l'exposition à la pollution de l'air (Rappaport, 2011 ; Tissier-Raffin et al., 2020). Aussi, ces progrès sont utiles pour les politiques de transport cherchant à améliorer la qualité de l'air (Host et al., 2020 ; Poulhès et Proulhac, 2021), et plus généralement les politiques de planification urbaine de lutte contre la pollution de l'air et en faveur de l'habitabilité urbaine durable.

Remerciements

Les auteurs remercient Airparif pour leur avoir donné accès aux données de concentrations en NO₂, et la direction régionale et interdépartementale de l'environnement, de l'aménagement et des transports (DRIEAT Île-de-France) pour le modèle MODUS.

Bibliographie

Aguiléra, A., Wenglenski, S., Proulhac, L., 2009, Employment suburbanisation, reverse commuting and travel behaviour by residents of the central city in the Paris metropolitan area, *Transportation Research Part A*, 43, 7, pp. 685-691

Airparif, 2009, *Exposition des automobilistes franciliens à la pollution atmosphérique liée au trafic routier*, Rapport Airparif, octobre, 104 p.

Airparif Actualité, 2011, Quelle pollution tout au long de la journée, 37, novembre, 8 p.

Airparif Actualité, 2012, *La pollution près du trafic*, 39, décembre, 8 p.

Airparif, 2018, *Bilan de la qualité de l'air. Année 2017*, Rapport Airparif, mars, 110 p.

Baccaïni, B., 1997, Les navettes des périurbains d'Île-de-France, *Population*, 52, pp. 327-364. DOI : [10.2307/1534290](https://doi.org/10.2307/1534290)

Beckx, C., Panis, L.I., Arentze, T., Janssens, D., et al., 2009, A dynamic activity-based population modelling approach to evaluate exposure to air pollution: methods and application to a Dutch urban area, *Environmental Impact Assessment Review*, 29, 3, pp. 179-185

Beelen, R., Hoek, G., van Den Brandt, P.A., Goldbohm, A., et al., 2008, Long-term effects of traffic-related air pollution on mortality in a Dutch cohort (NLCS-AIR study), *Environmental health perspectives*, 116, 2, pp. 196-202

Beelen, R., Raaschou-Nielsen, O., Stafoggia, M., Andersen, Z.J., et al., 2014, Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project, *The Lancet*, 383, 9919, pp. 785-795

Bertrand, F., Couderc, C., Ladegaillerie, E., 2008, La dynamique des activités en Île-de-France, *Les Cahiers de l'Enquête Globale de Transport*, 12 p.

Bouleau, M., 2013, *La circulation routière en Île-de-France en 2010*, Rapport Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Île-de-France, mars, 104 p.

Brunekreef, B., Holgate, S., 2002, Air pollution and health, *The Lancet*, 360, pp. 1233-1242. DOI : [10.1016/S0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11274-8)

Caillaud, D., Annesi-Maesano, I., Bourin, A., Chinet, T., et al., 2019, La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire en France. Document d'experts du Groupe Pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques de la Société de pneumologie de langue française, *Revue des Maladies Respiratoires*, 36, pp. 1150-1183. DOI : [10.1016/j.rmr.2019.10.004](https://doi.org/10.1016/j.rmr.2019.10.004)

Cassadou, S., Declercq, C., Eilstein, D., Fabre P. et al., 2003, Surveillance des effets de la pollution atmosphérique en milieu urbain sur la santé : le programme français PSAS-9, *Vertigo – la revue électronique en science de l'environnement* [En ligne], 4, 1, URL : <https://journals.openedition.org/vertigo/4595> DOI : [10.4000/vertigo.4595](https://doi.org/10.4000/vertigo.4595)

Cepeda, M., Schoufour, J., Freak-Poli, R., Koolhaas, C.M., et al., 2017, Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic review, *The Lancet Public Health*, 2, 1, pp. 23-34

Chaix, B., Kestens, Y., Perchoux, C., Karusisi, N., et al., 2012, An interactive mapping tool to assess individual mobility patterns in neighborhood studies, *American Journal of Preventive Medicine*, 43, pp. 440-450. DOI : [10.1016/j.amepre.2012.06.026](https://doi.org/10.1016/j.amepre.2012.06.026)

Chaix, B., Méline, J., Duncan, S., Merrien, N., et al., 2013, GPS tracking in neighborhood and health studies: a step forward for environmental exposure assessment, A step backward for causal inference? *Health & Place*, 21, pp. 46-51. DOI : [10.1016/j.healthplace.2013.01.003](https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2013.01.003)

Corso, M., Blanchard, M., Wagner, V., 2019, *Impact à court terme du dioxyde d'azote (NO₂) sur la mortalité dans 18 agglomérations françaises, 2010-2014*, Rapport Santé Publique France, 38 p.

Coursimault, A., Delaunay, C., Goupil, G., Laurent, A.M., et al., 1998, *Évaluation de l'exposition des citoyens aux polluants d'origine automobile au cours de leurs déplacements dans l'agglomération parisienne*, Laboratoire Central de la Préfecture de Police et Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris, 7 p.

Delaunay, C., Goupil, G., Ravelomanantsoa, H., Person, A., et al., 2012, Évaluation de l'exposition des citoyens aux polluants atmosphériques au cours de leurs déplacements dans l'agglomération parisienne, *Pollution Atmosphérique*, 215, pp. 247-258. DOI : [10.4267/pollution-atmosphérique.158](https://doi.org/10.4267/pollution-atmosphérique.158)

Dhondt, S., Beckx, C., Degraeuwe, B., Lefebvre, W., et al., 2012. Health impact assessment of air pollution using a dynamic exposure profile: Implications for exposure and health impact estimates, *Environmental Impact Assessment. Review*, 36, pp. 42-51, DOI : [10.1016/j.eiar.2012.03.004](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.03.004)

Dias, D., Tchepel, O., 2014, Modelling of human exposure to air pollution in the urban environment: a GPS-based approach, *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 5, pp. 3558-3571. DOI : [10.1007/s11356-013-2277-6](https://doi.org/10.1007/s11356-013-2277-6)

Diez Roux, A.V., 2007, Neighborhoods and health: where are we and where do we go from here? *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, 55, 1, pp. 13-21. DOI : [10.1111/j.1749-6632.2009.05333.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05333.x)

Dons, E., Panis, L.I., Van Poppel, M., Theunis, J., et al., 2011, Impact of time-activity patterns on personal exposure to black carbon, *Atmospheric Environment*, 45, 21, pp. 3594-3602. DOI : [10.1016/j.atmosenv.2011.03.064](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.03.064)

Duché, S., 2015, *Exposition à la pollution atmosphérique et perception par les touristes*. In: Mattei, M.F., Pumain, D., Données Urbaines, 7, Paris, Economica, pp. 321-329

Evangelopoulos, D., Katsouyanni, K., Keogh, R.H., Samoli, E., et al., 2020, PM_{2.5} and NO₂ exposure errors using proxy measures, including derived personal exposure from outdoor sources: A systematic review and meta-analysis, *Environment International*, 137, 105500. DOI : [10.1016/j.envint.2020.105500](https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105500)

François, D., 2010, *Se rendre au travail : distances et temps de transport s'allongent*. In: La mobilité des Français. Panorama issu de l'ENTD 2008, Rapport Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, pp. 83-98

Golay, F., Curt, N., Olney, X., Vittoz, T., et al., 2014, Influence of mobility on population exposure to air pollutants, *Transportation Research Area Conference (TRA) 5th Conference*, Paris

Good, N., Mölter, A., Ackerson, C., Bachand, A., et al., 2015, The Fort Collins commuter study: impact of route type and transport mode on personal exposure to multiple air pollutants, *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 26, 4, pp. 397-404

- Gouriou, F., Morin, J.P., Weill, M.E., 2004, On-road measurements of particle number concentrations and size distributions in urban and tunnel environments, *Atmospheric Environment*, 38, pp. 2831-284
- Grange, D., Host, S., 2012, *Pollution de l'air dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire et santé*, Rapport Observatoire régional de santé Île-de-France, Paris, 16 p.
- Guerreiro, C.B., Foltescu, V., De Leeuw, F., 2014, Air quality status and trends in Europe, *Atmospheric environment*, 98, pp. 376-384. DOI : [10.1016/j.atmosenv.2014.09.017](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.09.017)
- Hägerstrand, T., 1970, What people un regional, *9th European Congress of the Regional Science Association Papers*, Vol. XXIV, pp. 7-21
- Hatzopoulou, M., Hao, J.Y., Miller, E. J., 2011, Simulating the impacts of household travel on greenhouse gas emissions, urban air quality, and population exposure, *Transportation*, 38, 6, pp. 871-887
- Hoek, G., Krishnan, R.M, Beelen, R., Peters, A., et al., 2013, Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review, *Environmental Health*, 12, 1, pp. 1-16
- Honoré, C., Dugay, F., Pernot, P., 2013, Proximité au trafic routier et pollution de l'air en Île-de-France, *VertigO – la revue électronique en science de l'environnement* [En ligne], Hors-série 15. URL : <https://journals.openedition.org/vertigo/12805>
- Host, S., Duchesne, L., 2012, Quantification de l'impact sanitaire des mesures de réduction de la pollution atmosphérique : apport de la littérature scientifique, *Pollution atmosphérique*, 235. DOI : [10.4267/pollution-atmospherique.6366](https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.6366)
- Host, S., 2013, Exposition à la pollution atmosphérique liée au trafic routier et risques sanitaires, *VertigO – la revue électronique en science de l'environnement* [En ligne], Hors-série 15, URL : <https://journals.openedition.org/vertigo/12816> , DOI : [10.4000/vertigo.12816](https://doi.org/10.4000/vertigo.12816)
- Host S., Honoré C., Joly F., Saunal A., Le Tertre A., et Medina, S., 2020, Implementation of various hypothetical low emission zone scenarios in Greater Paris: Assessment of fine-scale reduction in exposure and expected health benefits, *Environmental Research*, 185, 109405. DOI : [10.1016/j.envres.2020.109405](https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109405)
- Khomenko, S., Cirach, M., Pereira-Barboza, E., Mueller, N., et al., 2021, Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment, *The Lancet Planetary Health*, pp. 121-134. DOI : [10.1016/S2542-5196\(20\)30272-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30272-2)
- Kornartit, C., Sokhi, R.S., Burton, M.A., Ravindra, K., 2010, Activity pattern and personal exposure to nitrogen dioxide in indoor and outdoor microenvironments, *Environment international*, 36, 1, pp. 36-45. DOI : [10.1016/j.envint.2009.09.004](https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.09.004)
- Künzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka M. et al., 2000, Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment, *The Lancet*, 356, 9232, pp. 795-801
- Kwan, M.-P., 2018, The limits of the neighborhood effect: contextual uncertainties in geographic, environmental health, and social science research, *Annals of the American Association of Geographers*, 108, pp. 1482-1490. DOI : [10.1080/24694452.2018.1453777](https://doi.org/10.1080/24694452.2018.1453777)
- Landrigan, P. et al., 2018, The Lancet Commission on pollution and health, *The Lancet*, 391, pp. 462-512. DOI : [10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0)
- Le Moulec, A., 2018, *Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2017*, Rapport Commissariat Général au Développement Durable, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 36 p.

Li, X., Yang, T., Zeng, Z., Li, X. et al., 2021, Underestimated or overestimated? Dynamic assessment of hourly PM2.5 exposure in the metropolitan area based on heatmap and micro-air monitoring stations, *Science of The Total Environment*, 779, 146283. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2021.146283](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146283)

Maignant, G., 2007, Dispersion de polluants et morphologie urbaine, *L'Espace géographique*, 36, 2, pp. 141-151. DOI : [10.3917/eg.362.0141](https://doi.org/10.3917/eg.362.0141)

Maignant, G., Dutozia, J., 2011, Air pollution and urban morphology: a complex relation or how to optimize the pedestrian movement in town. InTech; Moldoveanu A.M. Advanced Topics in environmental health and air pollution case studies, pp. 197-208

Maury, S., Gilbert, A., Badin, A.L., Olny, X., 2016, Prendre en compte la mobilité des Lyonnais pour mieux évaluer leur exposition à la pollution atmosphérique, *Insee Analyses Auvergne-Rhône-Alpes*, 26, 4 p.

Medina, S., Adélaïde, L., Wagner, V., de Crouy Chanel, P., et al., 2021, *Impacts de la pollution de l'air ambiant sur la mortalité en France métropolitaine. Réduction en lien avec le confinement du printemps 2020 et nouvelles données sur le poids total pour la période 2016-2019*, Rapport Santé publique France, 63 p.

Morin, J.P., Gouriou, F., Preterre, D., Bobbia, M., et al., 2009, Évaluation de l'exposition aux polluants atmosphériques des conducteurs de véhicules automobiles par la mise en œuvre de mesures dynamiques dans l'habitacle du véhicule, *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 70, 2, pp. 184-192. DOI : [10.1016/j.admp.2008.10.024](https://doi.org/10.1016/j.admp.2008.10.024)

Nethery, E., Leckie, S.E., Teschke, K., Brauer, M., 2008, From measures to models: an evaluation of air pollution exposure assessment for epidemiological studies of pregnant women, *Occupational and environmental medicine*, 65, 9, pp. 579-586

Organisation mondiale de la Santé (OMS), 2015, *Santé et environnement : agir face aux conséquences sanitaires de la pollution de l'air*, 68^e assemblée mondiale de la santé, mai

Organisation mondiale de la Santé (OMS), 2018, *First WHO Global Conference on Air Pollution and Health. Improving air quality, combating climate change*, 30 octobre - 1 novembre

Perchoux, C., Chaix, B., Cummins, S., Kestens, Y., 2013, Conceptualization and measurement of environmental exposure in epidemiology: accounting for activity space related to daily mobility, *Health & Place*, 21, pp. 86-93. DOI : [10.1016/j.healthplace.2013.01.005](https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2013.01.005)

Perchoux, C., Chaix, B., Kestens, Y., 2019, Activity spaces in place and health research: novel exposure measures, data collection tools, and designs, *Health & Place*, 58, 102130, DOI : [10.1016/j.healthplace.2019.05.008](https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2019.05.008)

Physick, W., Powell, J., Cope, M., Boast, K. et al., 2011, Measurements of personal exposure to NO2 and modelling using ambient concentrations and activity data, *Atmospheric environment*, 45, 12, pp. 2095-2102. DOI : [10.1016/j.atmosenv.2011.01.063](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.063)

Poom, A., Willberg, E., Toivonen, T., 2021, Environmental exposure during travel: A research review and suggestions forward, *Health & Place*, 70, 102584. DOI : [10.1016/j.healthplace.2021.102584](https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2021.102584)

Pope, C.A. 3rd, Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., et al., 2002, Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution, *Jama*, 287, 9, pp. 1132-1141

Poulhès, A., Proulhac, L., 2021, The Paris region low emission zone, a benefit shared with residents outside the zone, *Transportation Research Part D*, 98, 102977. DOI : [10.1016/j.trd.2021.102977](https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102977)

Préteceille, E., 2003, *La division sociale de l'espace francilien*, Rapport OSC, Paris, 150 p.

Proulhac, L., 2019, Qui se cache derrière la baisse de la mobilité automobile en Île-de-France ? Une analyse typologique des pratiques modales des actifs occupés franciliens, *Cybergeo : European Journal of Geography* [en ligne], URL : <https://journals.openedition.org/cybergeo/32010>
DOI : [10.4000/cybergeo.32010](https://doi.org/10.4000/cybergeo.32010)

Ragettli, M.S., Phuleria, H.C., Tsai, M.Y., Schindler, C. et al., 2015, The relevance of commuter and work/school exposure in an epidemiological study on traffic-related air pollution, *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 25, pp. 474-481. DOI : [10.1038/jes.2014.83](https://doi.org/10.1038/jes.2014.83)

Rainham, D., McDowell, I., Krewski, D., Sawada, M., 2010, Conceptualizing the healthscape: contributions of time geography, location technologies and spatial ecology to place and health research, *Social science & medicine*, 70, 5, pp. 668-676. DOI : [10.1016/j.socscimed.2009.10.035](https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2009.10.035)

Ramacher, M.O.P., Karl, M., 2020, Integrating modes of transport in a dynamic modelling approach to evaluate population exposure to ambient NO₂ and PM_{2,5} pollution in urban areas, *International journal of environmental research and public health*, 17,6, 2019. DOI : [10.3390/ijerph17062099](https://doi.org/10.3390/ijerph17062099)

Rank, J., Folke, J., Jespersen, P.H., 2001, Differences in cyclists and car drivers exposure to air pollution from traffic in the city of Copenhagen, *Science of the Total Environment*, 279, 1, pp. 131-136. DOI : [10.1016/S0048-9697\(01\)00758-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00758-6)

Rappaport, S., 2011, Implications of the exposome for exposure science, *Journal of Exposure Science & environmental epidemiology*, 21, 5-9. DOI : [10.1038/jes.2010.50](https://doi.org/10.1038/jes.2010.50)

Sarnat, S.E., Coull, B.A., Schwartz, J., Gold, D.R. et al., 2006, Factors affecting the association between ambient concentrations and personal exposures to particles and gases, *Environmental health perspectives*, 114, 5, pp. 649-654. DOI : [10.1289/ehp.8422](https://doi.org/10.1289/ehp.8422)

Sarnat, J.A., Golan, R., Greenwald, R., Raysoni, A.U., et al., 2014, Exposure to traffic pollution, acute inflammation and automatic response in a panel of car commuters, *Environmental research*, 133, pp. 66-76

Setton, E., Marshall, J.D., Brauer, M., Lundquist, K.R., et al., 2011, The impact of daily-mobility on exposure to traffic-related air pollution and health effect estimates, *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 21, 1, pp. 42-48. DOI : [10.1038/jes.2010.14](https://doi.org/10.1038/jes.2010.14)

Singh, V., Sokhi, R.S., Kukkonen, J., 2020, An approach to predict population exposure to ambient air PM_{2.5} concentrations and its dependence on population activity for the megacity London, *Environmental Pollution*, 257, 113623. DOI : [10.1016/j.envpol.2019.113623](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113623)

Soares, J., Koussa, A., Kukkonen, J., Matilainen, L., et al., 2014, Refinement of a model for evaluating the population exposure in an urban area, *Geoscientific Model Development*, 7, 5, pp. 1855-1872

Steinle, S., Reis, S., Sabel, C.E., 2013, Quantifying human exposure to air pollution. Moving from static monitoring to spatio-temporally resolved personal exposure assessment, *Science of the Total Environment*, 443, pp. 184-193

Tchepel, O., Dias, D., 2011, Quantification of health benefits related with reduction of atmospheric PM₁₀ levels: implementation of population mobility approach, *International Journal of Environmental Health Research*, 21, 3, pp. 189-200

- Tenaillon, Q.M., Mauny, F., Joly, D., François, S., et al., 2015, Air pollution in moderately polluted urban areas : How does the definition of “neighbourhood” impact exposure assessment ?, *Environmental Pollution*, 206, pp. 437-448. DOI : [10.1016/j.envpol.2015.07.021](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.021)
- Terrier, C., 2011, Aménagement des territoires et géographie de la population présente, *Population & Avenir*, 5, 705, pp. 4-8. DOI : [10.3917/popav.705.0004](https://doi.org/10.3917/popav.705.0004)
- Tissier-Raffin, M., Morin, D., Galey, L., Garrigou, A., 2020, Rendre effectif le droit à un environnement sain : les défis scientifiques et juridiques soulevés par le concept d'exposome, *Revue juridique de l'environnement*, 20, pp. 39-80
- Thévenin, T., Chardonnel, S., Cochet, E., 2007, Explorer les temporalités urbaines de l'agglomération de Dijon. Une analyse de l'Enquête-Ménage-Déplacement par les programmes d'activités, *Espace Populations Sociétés*, 2-3, pp. 179-190. DOI : [10.4000/eps.2069](https://doi.org/10.4000/eps.2069)
- Vallamsundar, S., Lin, J., Konduri, K., Zhou, X., et al., 2016, A comprehensive modeling framework for transportation-induced population exposure assessment, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, pp. 94–113. DOI : [10.1016/j.trd.2016.03.009](https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.009)
- Van Wijnen, J.H., Verhoeff, A.P., Jans, H.W., van Bruggen, M., 1995, The exposure of cyclists, car drivers and pedestrians to traffic-related air pollutants, *International archives of occupational and environmental health*, 67, 3, pp. 187-193
- Wallace, L.A., Ott, W.R., 1982, Personal monitors: a state-of-the-art survey, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 32, 6, pp. 601-610
- Wiel, M., 1999, Mobilité, système d'interactions sociales et dynamiques territoriales, *Espace, Populations, Sociétés*, 2, pp. 187-194. DOI : [10.3406/espos.1999.1884](https://doi.org/10.3406/espos.1999.1884)