

Note technique

Travaux financés par le ministère chargé de l'environnement

EXPOSITION DYNAMIQUE DE LA POPULATION A LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Revue des méthodes et comparaison avec l'estimation statique de l'exposition

Elsa Real (INERIS), Laure Malherbe (INERIS)

SYNTHESE

Le calcul de l'exposition de la population à la pollution atmosphérique est nécessaire à des fins réglementaires, mais également pour alimenter des études d'impact sanitaire ou simplement pour mieux caractériser l'impact de la pollution sur l'homme. Dans la très grande majorité des études, l'exposition est estimée en croisant concentrations et population statique, c'est-à-dire comptabilisée au lieu de résidence. De récentes études ont estimé cette même exposition mais en tenant compte de l'aspect dynamique de la population qui se déplace et travaille parfois loin des zones d'habitation. Cette présente étude fait la synthèse des méthodes permettant un calcul dynamique de l'exposition et fait le tour des travaux scientifiques ayant comparé l'exposition estimée par ce type de calcul avec l'exposition estimée par une méthode statique. En fin de document, d'autres sources d'incertitude pesant sur le calcul de l'exposition sont brièvement abordées, ainsi que des recommandations concernant le calcul de l'exposition.

1. INTRODUCTION

Plusieurs études ont montré l'impact direct de la pollution atmosphérique sur la santé humaine en estimant par exemple le nombre de décès prématurés imputés à la dégradation de la qualité de l'air (OMS Europe, 2016). Ces études d'impact sanitaire se fondent sur des données de concentrations de polluants, croisées avec des données de population, afin d'estimer l'exposition des populations à certains dépassements de seuils de pollution. De manière générale, la question de l'exposition de la population plutôt que des concentrations elles-mêmes est aujourd'hui au centre de l'attention politique, avec des politiques publiques visant à réduire la population exposée plutôt que les concentrations elles-mêmes (Plan de Protection de l'Atmosphère, etc.).

En général, la population utilisée dans ces études est une population « statique » : la population est comptabilisée sur son lieu de résidence principale. Les trajets effectués dans la journée, le temps passé sur le lieu de travail ou à l'école, ne sont ainsi pas utilisés pour estimer l'exposition des populations. Selon diverses études, françaises en particulier (Schadkowski (2003), Dumontier (1999), etc.), le temps passé en moyenne par la population active à l'intérieur du lieu de résidence est de 60 à 70%, le temps passé dans les transports de 4 à 5% et le temps passé sur le lieu de travail de 25 à 36%. En journée, où la pollution est en générale supérieure au niveau nocturne, et la majorité des individus se trouve ainsi hors du lieu de résidence (en semaine). Etant donné que la majorité des transports du lieu de résidence au lieu de travail se fait des zones périurbaines ou rurales vers des zones plus urbaines, et donc possiblement plus polluées, l'exposition de la population aurait tendance à augmenter avec une analyse « dynamique » de l'exposition. A cela s'ajoute le temps passé dans les transports, environnement particulièrement pollué, en particulier lors de trajets le long de zones de trafic dense.

Pour cette raison, plusieurs études ont été menées afin d'élaborer des méthodologies permettant d'estimer l'exposition de la population de manière « dynamique », en prenant en compte la localisation des populations au fil de la journée. Cette note vise à faire la synthèse de ces études afin de mettre en lumière les méthodologies adoptées ainsi que les impacts estimés de l'utilisation d'une méthodologie « dynamique » par rapport à la méthodologie statique classique.

2. METHODES POUR ESTIMER L'EXPOSITION « DYNAMIQUE » DE LA POPULATION

Toute la difficulté d'une approche dynamique de l'exposition de la population est d'estimer la localisation heure par heure de chacune des personnes de la zone d'étude, et de connaître les concentrations de polluants en cette même localisation. Suivant l'objectif de l'étude, la méthodologie employée sera différente. Le graphique ci-dessous résume les principales méthodes d'estimation de l'exposition des individus à la pollution atmosphérique suivant que l'étude vise à estimer l'exposition individuelle ou l'exposition totale de la population d'une zone.

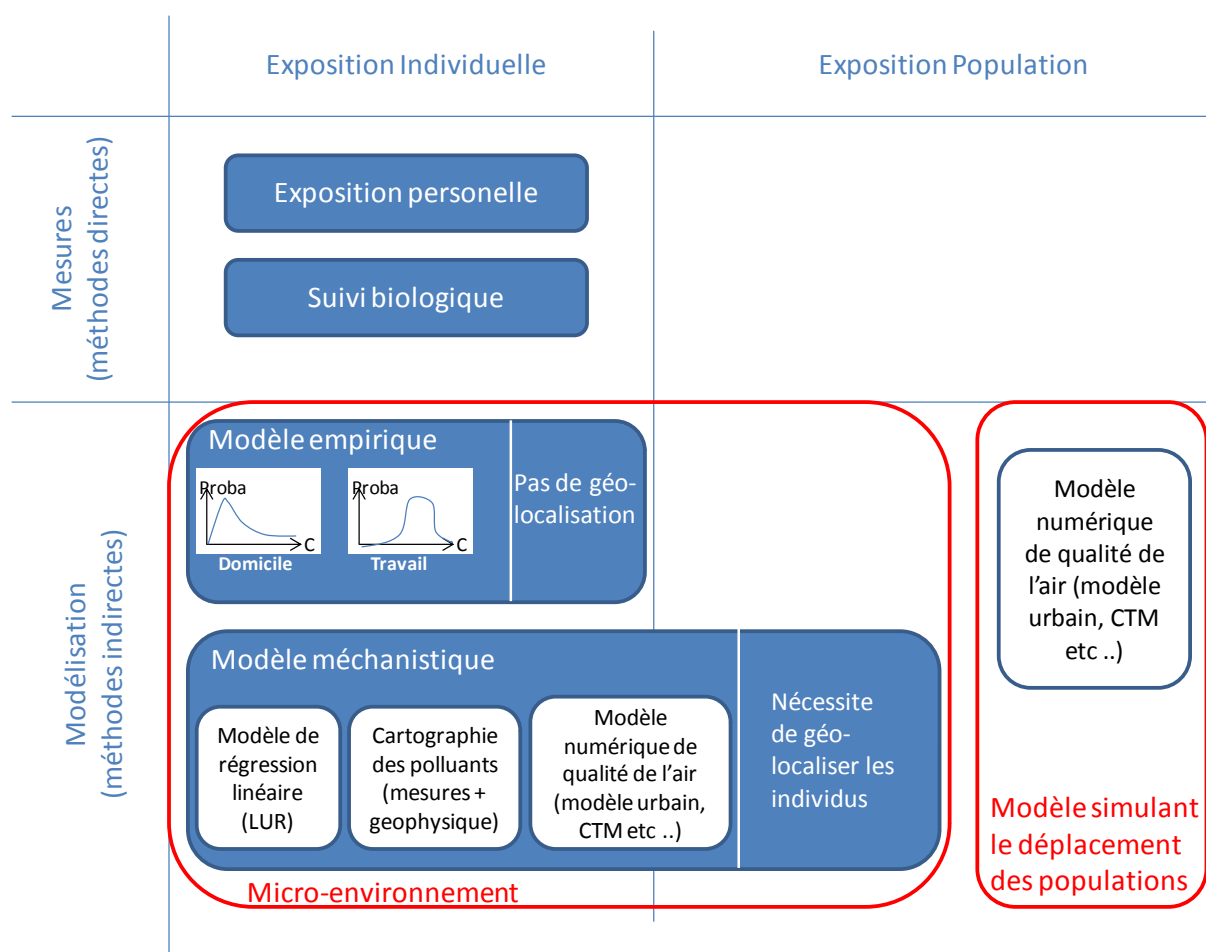


Figure 1: Principales méthodes d'estimation de l'exposition dynamique des individus à la pollution atmosphérique. Les méthodes directes permettent de connaître l'exposition individuelle d'un nombre restreint d'individus. Quant aux méthodes indirectes, elles sont basées sur des modèles et peuvent permettre d'estimer l'exposition totale de la population.

2.1 Exposition individuelle

Les études sur l'**exposition personnelle**, où les sujets sont généralement équipés de moyens de mesures mobiles et dont les trajets ainsi que les concentrations associées sont enregistrés, sont particulièrement utiles pour comprendre certains processus (estimer par exemple l'impact des concentrations à l'air ambiant sur celles en environnement intérieur) ou pour mener des études épidémiologiques précises. Cependant ce genre d'étude est pour l'instant encore très coûteux et toujours limité à un nombre restreint de sujets. L'alternative consiste alors à modéliser la localisation des individus et les concentrations associées en se basant sur les activités journalières des individus, c'est ce que l'on appelle des **modèles d'exposition basés sur les activités** (« activity-based model »).

2.2 Modèles d'exposition basés sur les activités

2.2.1 Concept de microenvironnement

Dans cette optique, plusieurs études utilisent le concept de « **microenvironnement** » : le parcours journalier d'un individu est décomposé en plusieurs environnements (domicile, lieu de travail, école, transport etc.) dans lesquels les concentrations sont considérées comme homogènes. L'exposition totale E d'un individu donné est donc la somme des expositions subies dans chaque microenvironnement i traversé :

$E = \sum_i^N f_i C_i$ avec f_i le temps passé dans le microenvironnement i, C_i la concentration dans le microenvironnement i et N le nombre total de microenvironnements. L'exposition s'exprime donc en une unité de concentration*temps (par exemple des $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{heures}$).

Pour cette méthode il est donc nécessaire d'estimer 1) les types de microenvironnements décrits 2) le temps journalier passé dans chaque type d'environnement (en moyenne ou par classe d'individus) 3) les concentrations dans ces environnements.

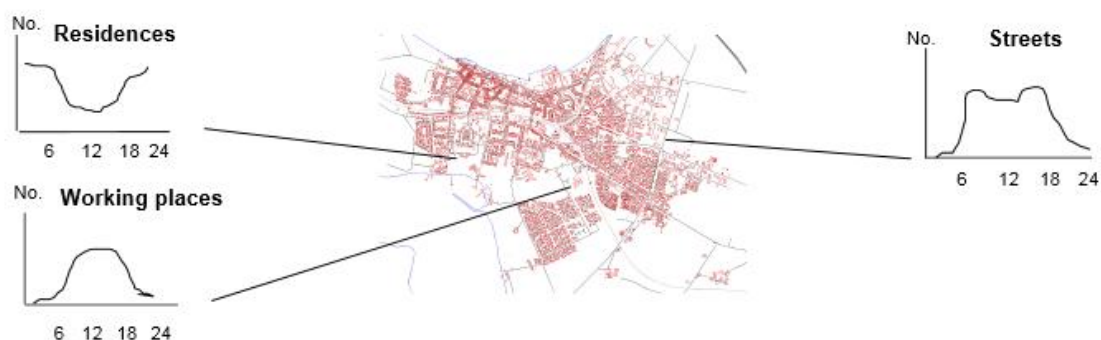


Figure 2 : Illustration du concept de microenvironnement (Jensen et al., 1999) : le temps journalier passé dans 3 environnements (domicile, travail et transport) est décrit.

Sur ce principe, les modèles **d'exposition empirique** sont établis sur la base des distributions statistiques des concentrations dans un nombre généralement important de microenvironnements (Jantunen et al., 1999 ; WHO/IPCS, 2005): domicile à l'intérieur, domicile à l'extérieur, travail à l'intérieur, travail à l'extérieur, transport, école etc ... Ces modèles empiriques sont établis à partir de données mesurées ou de distributions de probabilité, afin d'estimer les concentrations dans chaque microenvironnement. Il n'y a pas réellement dans ce cas de dimension spatiale de l'exposition. Ils ne peuvent donc pas être utilisés pour estimer, par exemple, l'exposition de la population d'une zone entière.

Dès lors que l'on veut estimer l'exposition de toute la population d'une zone donnée, il est nécessaire de **géo-localiser les individus dans chaque microenvironnement** et de leur associer une concentration variant dans l'espace et dans le temps (modèle mécanistique d'exposition). Les différentes étapes de ce type d'étude sont décrites ici :

- 1) Types d'environnement : au moins 2 microenvironnements sont décrits: domicile et travail. Un environnement « trajet » est parfois rajouté et pour les modélisations les plus complexes, des microenvironnements tenant compte de la pollution de l'air intérieur sont définis (domicile – à l'intérieur, domicile – à l'extérieur, travail – à l'intérieur, travail - à l'extérieur etc.).

- 2) Temps journalier passé dans chaque environnement : les déplacements journaliers et la localisation heure par heure d'un panel d'individus peuvent être connus via des enquêtes (questionnaires), éventuellement par tranche d'âge et/ou catégorie socio-professionnelle. Si le panel est suffisamment représentatif, les chiffres peuvent être étendus à l'ensemble de la population. Pour l'étude EXPOLIS (Jantunen et al, 1999), les temps passés à la maison, dans les transports et au travail ont été comparés pour plusieurs villes européennes avec peu de différences entre ces villes (villes moyennes et grandes villes). Si l'on considère l'ensemble de la population (active, inactive, enfants etc.), le temps passé hors du domicile varie entre 25 et 35% en Europe suivant les pays (EC, 2004). Des chiffres représentatifs de la zone d'étude peuvent être obtenus via, par exemple, des enquêtes ménage-déplacement menées par les villes.

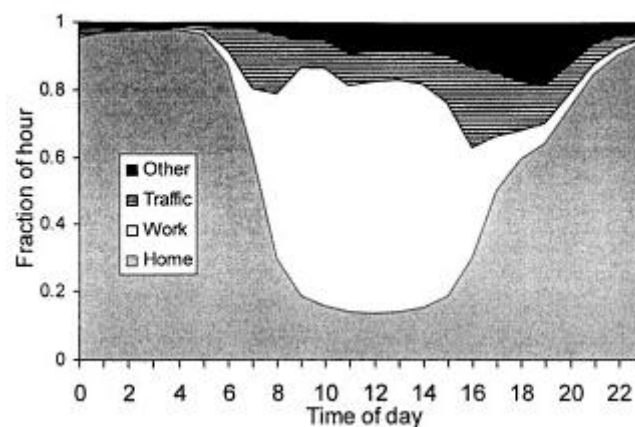


Figure 3: Exemple de variation des activités de la population de Helsinki (Kousa et al., 2002)

- 3) Localisation des individus dans leurs différents microenvironnements : les lieux de résidence sont en général issus des données du recensement, ou autres données nationales (base MAJIC en France par exemple). La connaissance du lieu de travail est en général plus complexe. Les données du recensement permettent de connaître la commune du lieu de travail. Cette donnée peut aussi être obtenue à partir d'enquêtes spécifiques comme les enquêtes cordons par exemple (interview des passagers sur leur lieu de destination). Il est ainsi possible de connaître pour chaque commune le nombre de personnes qui y habitent mais aussi qui en sortent pour travailler, ainsi que le nombre de personnes entrantes. Un bilan journalier de population peut ainsi être établi à l'échelle de la commune. Les personnes répertoriées comme travaillant dans une commune sont ensuite réparties sur les lieux de travail. Si les transports sont aussi pris en compte comme microenvironnement, les données peuvent être issues, soit de données statistiques, soit de modélisation du trafic. Parfois il est considéré que les écoles sont situées à proximité des lieux d'habitation afin de ne pas complexifier la méthode et attribuer le microenvironnement « domicile » à l'ensemble des écoliers (Jensen, 1999).

- 4) **Concentration** : il est nécessaire de connaître les concentrations des polluants au lieu de présence des populations, autrement dit de connaître la variabilité spatio-temporelle des concentrations sur le lieu de l'étude. Ces concentrations sont parfois estimées par la combinaison de mesures et de méthode géostatistiques, en particulier en utilisant des modèles de régression basés sur l'utilisation du sol (LUR). Cependant, l'utilisation de modèles numériques de qualité de l'air dans ce domaine est de plus en plus courante, ceux-ci permettant une description spatiale fine des concentrations de plusieurs polluants dont les polluants secondaires, et la possibilité de faire des études prospectives sur l'exposition future des populations. Suivant le domaine d'étude, ces modèles peuvent être régionaux (avec des mailles pouvant aller jusqu'à 3km), locaux (à l'échelle urbaine), voir même des modèles de rues. A noter que dans cette note, les concentrations associées aux individus sont celles de l'air extérieur quel que soit le microenvironnement considéré (domicile, travail ou extérieur). La question de la pollution de l'air intérieur sera abordée en fin de document.

L'exposition ainsi calculée, aussi appelée exposition totale ou exposition intégrée, correspond à la somme, sur toute les personnes présentes dans la zone d'étude, de l'exposition individuelle de chacune (par exemple en $\mu\text{g.m}^{-3}.\text{heures.personnes}$). D'autres types d'exposition sont parfois utilisés, comme l'exposition moyenne, pour laquelle l'exposition totale est pondérée par le nombre de personnes ainsi que la durée de calcul de l'exposition. Une mesure du nombre d'heures pendant lesquelles des personnes sont soumises à des seuils de concentrations donnés est également parfois calculée, généralement en personne-heures (« personhours » en anglais).

2.2.2 Modèle de simulation des déplacements des populations

Afin de s'affranchir du concept de microenvironnement, d'autres études recourent à des **modèles de déplacement des populations basés sur les activités** (Beckx et al., 2009 ; Hatzopoulou et al., 2010). De tels modèles permettent de simuler à tout moment de la journée les activités (géo-localisées) de tous les individus présents dans la zone d'étude, ainsi que leurs déplacements pour se rendre d'une activité à une autre. Ils sont basés sur des « agendas » individuels décrivant les activités des individus en prenant en compte leurs possibles interactions. L'avantage de tels modèles est qu'ils peuvent également permettre d'estimer les émissions dues au trafic (puisque les déplacements, ainsi que le mode de déplacement sont connus). Ainsi, une réelle modélisation intégrée de l'exposition de la population peut être mise en œuvre (en couplant modèle de population, d'émission et de qualité de l'air), permettant de tester divers scénarios de transport depuis les émissions jusqu'à l'exposition (Hatzopoulou et al., 2010).

Dans le même esprit, à la place d'une modélisation de la population, une analyse des données des téléphones portables pourrait permettre de tracer individuellement tous les individus équipés sur une zone géographique et, éventuellement, de pouvoir estimer l'exposition de la population voire même de calculer les émissions liées au transport routier (Liu et al., 2013). Bien que très prometteuses, de nombreuses incertitudes pèsent encore sur ce type d'études : représentativité des données téléphonique provenant généralement d'un seul opérateur, localisation des téléphones uniquement lorsqu'ils sont actifs (appel ou sms reçu ou donné, ou connexion à internet), détermination du type de transport (en fonction du type de trajet) etc ... Garriazio et al., 2015 ont utilisé de telles données afin d'estimer l'exposition de la population à la pollution sur la ville de Rome, mais les méthodes d'analyse de ce type de données sont encore à l'état de recherche.

L'estimation de l'exposition dynamique de la population est principalement basée sur le concept de microenvironnement. Cela suppose de connaître à minima la localisation des populations à leurs domiciles et sur leurs lieux de travail, le temps passé dans chaque microenvironnement, ainsi que les concentrations qui leurs sont associées. Ces dernières sont de plus en plus issues de modélisation numérique de la qualité de l'air. Les méthodes basées sur la modélisation des déplacements de populations sont particulièrement intéressantes mais ces modèles sont de nature plus complexe.

3. COMPARAISON ENTRE EXPOSITION DYNAMIQUE ET STATIQUE

Cette partie résume les résultats des études visant à comparer l'exposition de la population à la pollution atmosphérique suivant que l'aspect « dynamique » de la population est pris en compte ou non. Ces études portent sur des groupes d'individus (exposition individuelle) ou sur l'ensemble de la population d'une zone (exposition totale, en général une commune ou une zone-intercommunale). Il est important de noter que le type de phénomènes étudiés dépend de la façon de comparer les expositions. Certaines études suivent un ensemble d'individus, ensemble réduit pour des études d'estimation d'exposition individuelle ou plus large pour des études d'exposition totale de la population. Dans ces cas, la comparaison de l'exposition statique et dynamique permet d'estimer les différences liées uniquement au changement d'environnement des individus. D'autres études se concentrent plutôt sur une zone géographique et estiment la différence entre une exposition statique, où seuls les individus habitants dans la zone voient leur exposition calculée à leur domicile, et une exposition dynamique où l'exposition journalière calculée est celle de toutes les personnes travaillant dans le domaine. Si le flux de travailleurs en journée est important, les différences d'exposition peuvent être importantes mais relèvent plus de la prise en compte du flux journalier que d'un changement de localisation (domicile versus travail). Comme expliqué précédemment, suivant les études ce peut être l'exposition totale, l'exposition moyenne ou encore le nombre de personnes soumises à un seuil qui sont comparés.

Dans une étude sur la ville d'Oslo, Barrett et al (2008) ont établi 19 scénarios de « surexposition » (par rapport à une exposition n'incluant que le lieu de résidence) en estimant 19 trajets fictifs, représentatifs des mouvements journaliers dans la ville d'Oslo. Individuellement, l'exposition se trouve modifiée de -12 à +160%. Ces résultats sont exportés à l'ensemble de la population en estimant que la population active est soumise à une exposition 50% supérieure à l'exposition statique pendant les horaires de travail. 50% représente une moyenne des résultats de l'ensemble des 19 scénarios. Dans l'ensemble (actifs et non-actifs), Barrett et al estiment que la population soumise à des concentrations en PM_{2,5} supérieures à 20 µg.m⁻³ augmente ainsi de 12 à 14%. Ces chiffres sont importants mais la méthode utilisée est discutable, les différences d'exposition estimées pour 19 cas individuels étant extrapolées à l'ensemble des habitants d'Oslo sous forme de scénario. Plusieurs études ont alors été menées pour approfondir ces résultats (Barrett et al, 2010) sur les villes de Londres et Athènes et sur la région Moravia-Silesia en république Tchèque. Ces trois études sont basées sur le concept de microenvironnement (2 dans ce cas : travail et domicile) en utilisant des données statistiques (recensement etc ..) des villes ou des régions étudiées et des modèles de qualité de l'air pour estimer les concentrations. Dans les trois cas, l'impact de la prise en compte des déplacements journaliers est moindre que pour l'étude d'Oslo.

Sur le Grand Londres, la prise en compte des déplacements journaliers induit une augmentation de l'exposition et des morts prématurées associées de 5.4%. L'étude montre bien que suivant le périmètre géographique de l'étude, ces chiffres peuvent être très différents (voir Figure 4):

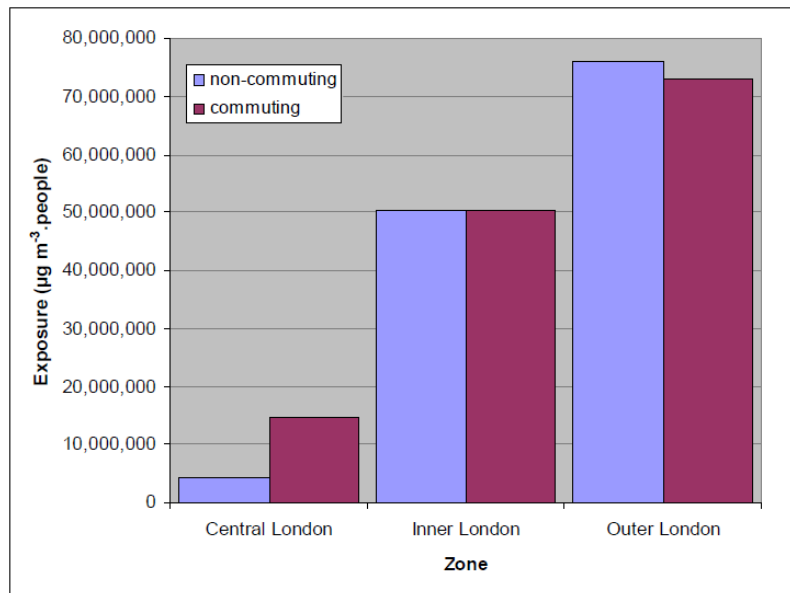


Figure 4: Comparaison de l'exposition totale des populations suivant que l'estimation est dynamique (commuting : les travailleurs habitant hors de la zone sont pris en compte) ou statique (non-commuting : seuls les habitants sont pris en compte). 3 zones sont comparées : l'hyper centre de Londres, Londres et Londres plus sa périphérie.

Lorsque la zone géographique est limitée à l'hyper centre de Londres (« Central London »), les différences d'exposition sont très importantes (de plus d'un facteur 3) mais reflètent principalement l'augmentation de population par la prise en compte du flux de travailleurs extérieurs à la zone. Les auteurs proposent alors de « corriger » l'exposition en la pondérant par les différences entre personnes résidentes et flux de travailleurs habitant hors de la zone: $Exposition_{dynamique_corrige\acute{e}} = Exposition_{dynamique} * Population_{r\acute{e}sidente} / (Population_{active} * Hours_{day} + Population_{r\acute{e}sidente} * Hours_{nigh}) / 24$; où Hours est le nombre d'heures pendant lesquelles la population active (_{day}) ou résidente (_{nigh}) est appliquée.

Dans l'exemple de la Figure 4, le coefficient pour l'hyper centre de Londres est d'environ 0.36, réduisant les différences avec l'exposition statique de 240% (comme sur la figure) à 23%, différence qui reflète alors bien un effet lié à la variabilité spatiale et temporelle des concentrations respirées, et non plus à la simple prise en compte de personnes en plus. Pour la zone initiale de l'étude (le Grand Londres), la différence avec l'exposition statique est réduite de 5.4% à 2.5%, ainsi que l'estimation du nombre de morts prématurés.

Les résultats pour la région de Moravia-Silesia montrent un impact très faible. Cependant, cela est dû à l'évolution journalière très particulière des niveaux de PM₁₀, apparemment typique de cette région. Ceux-ci sont plus élevés pendant la nuit, alors que c'est généralement l'inverse qui se produit. Ainsi, les concentrations les plus élevées sont observées lorsque les populations actives sont dans leur lieu de résidence, ce qui explique le faible impact de la prise en compte des déplacements journaliers. L'étude sur l'exposition de la population du grand Athènes montre quant à elle une augmentation de l'exposition de la population d'environ 3%, et une augmentation de la mortalité de 4% par rapport à un calcul statique. Aucune correction tenant compte du flux de travailleurs n'est appliquée ici mais les auteurs soulignent que la plupart des déplacements journaliers se font à l'intérieur du périmètre géographique. A noter que ces 3 dernières études portent sur l'exposition aux PM₁₀ et ne tiennent pas compte spécifiquement des concentrations lors des déplacements (seuls 2 microenvironnements sont étudiés ; domicile et travail).

L'étude de Walsh et al (2011) se base sur une carte dynamique de la population de Melbourne permettant de connaître les déplacements de la population à toute heure de la journée. Cette carte a été établie à partir de l'analyse des données d'une étude pour laquelle 17400 habitants de Melbourne et ses environs ont retranscrit leurs activités journalières ; ces données ont été étendues à l'ensemble des habitants en utilisant des données de recensement par classe d'âge. Cette étude ne fait donc pas réellement usage d'un modèle de population dynamique mais les données établies sont similaires. L'exposition des individus est ensuite estimée le long de leur trajet en interpolant des données de concentration issues d'un modèle de qualité de l'air. L'étude a permis de montrer que l'impact est différent suivant le polluant considéré : pour les polluants primaires, tels que le carbone élémentaire, l'impact est plus important (6.4% de plus en exposition « dynamique ») que pour le nitrate par exemple (+1.3%), qui est formé plus loin des sources (c'est-à-dire principalement les centres villes dans le périmètre étudié). Pour l'O₃, la prise en compte des déplacements journaliers de population tend même à diminuer l'exposition. Cela est dû au fait que l'O₃ se forme loin des sources d'émissions primaires et est même détruit par titration dans les centres villes. Au total, l'exposition dynamique tend à augmenter l'exposition aux particules PM₂₅ de 4% environ. Ces résultats sont donnés pour une exposition totale, c'est-à-dire à des concentrations sans seuil. Dès lors que l'on estime l'exposition à des concentrations au-dessus d'un seuil et que ce seuil est important (par exemple les pics de concentration), les différences sont plus importantes (voir Figure 5 pour l'exemple du SO₂), en revanche cela concerne moins de personnes.

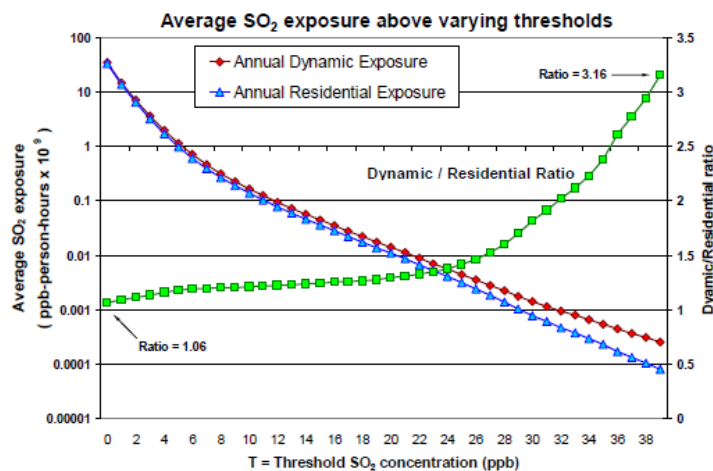


Figure 5: Comparaison de l'exposition annuelle aux concentrations de SO₂ entre une méthode dynamique et statique, suivant le seuil du polluant considéré. Extrait de Walsh et al., 2011.

L'étude note également que l'exposition de la population est presque doublée en considérant l'approche dynamique, si l'on se concentre uniquement sur l'hyper centre de Melbourne. A nouveau, c'est ici principalement le flux de travailleurs qui explique ces différences importantes, l'étude n'introduisant pas de coefficient correctif pour l'augmentation journalière de la population, comme cela est fait dans le cas de Londres.

Dans une étude de 2009, Beckx et al. utilisent un modèle de population basé sur les activités journalières, couplé à un modèle de qualité de l'air. Cette méthode permet une description fine des concentrations le long des déplacements et des localisations des populations à l'intérieur d'un périmètre donné, ici le centre ville d'Utrecht aux Pays-Bas. L'exposition totale de la population (aux PM_{10} et $PM_{2.5}$) estimée avec ou sans simulation dynamique de la population est comparée. De grandes différences sont observées dans la journée, avec environ 45% d'exposition journalière en plus avec l'approche dynamique (jusqu'à 180% aux pires heures de la journée), principalement représentatives de l'import de population dans la zone d'étude (centre ville) en journée. L'exposition totale de la population au dessus de certains niveaux de pollution est également évaluée. Dans ce cas, les différences entre population statique et dynamique ne sont pas si grandes mais restent importantes (augmentation de 13% et 40% du nombre d'heures passées au dessus de $40\mu g.m^{-3}$ de PM_{10} et $20\mu g.m^{-3}$ de PM_{25}).

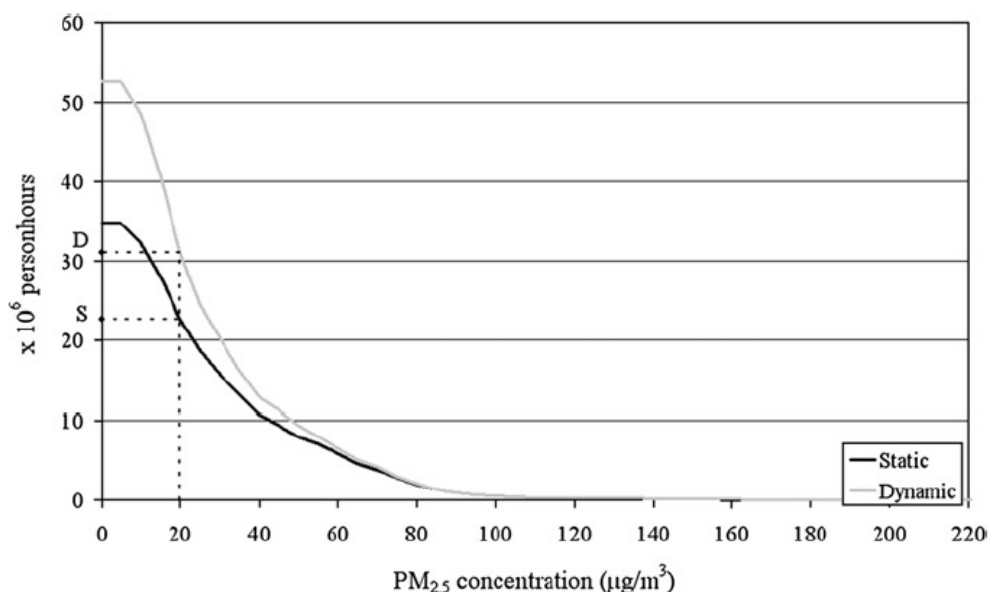


Figure 6: Comparaison de l'exposition journalière aux $PM_{2.5}$ entre une méthode dynamique et statique (Beckx et al., 2009)

Là encore, les différences sont a priori principalement dues à « l'import de population » dans la zone d'étude. Il est à noter que ces résultats semblent en contradiction avec ceux de l'étude de Walsh et al (2011), qui observent de plus grandes différences sur l'exposition moyenne à des seuils élevés que sur l'exposition sans seuil. Ces différences peuvent provenir de la zone géographique étudiée (large zone autour de Melbourne contre l'hyper centre ville d'Utrecht), de la durée sur laquelle l'exposition est estimée (journalière vs annuelle) et de la variable même qui est comparée : dans l'étude de Beckx et al., c'est le nombre de personnes soumises à des concentrations supérieures à un seuil qui est comparé (en personne.heure) et non l'exposition en terme de concentrations moyennes.

Dans une étude de 2010, Hatzopoulou et al. utilisent également un modèle de simulation des déplacements de la population, basé sur les activités, mais qu'ils combinent directement à des modèles d'émissions et de qualité de l'air. Une plateforme intégrée est ainsi créée, depuis les émissions à l'exposition de la population, en passant par les concentrations. Dans cette étude, les auteurs comparent l'exposition totale de la population au NO₂ avec et sans approche dynamique pour le grand Toronto (large zone couvrant Toronto et ses banlieues). La distribution de l'exposition journalière individuelle au NO₂, avec ou sans approche dynamique, est représentée Figure 7. Les différences de distributions sont assez faibles entre les deux méthodes. Pour les personnes habitant dans des lieux à faibles concentrations, la prise en compte de l'aspect dynamique de l'exposition aura tendance à augmenter un peu cette exposition (puisque statistiquement, la personne se déplacera dans des zones à plus fortes concentrations) et inversement, les habitants de zones très polluées verront en moyenne leur exposition baissée. Ainsi, si on considère un seuil de NO₂ à 40 µg.m⁻³, les différences seront plus importantes (jusqu'à 20% de différence mais ne s'appliquant qu'à une faible partie de la population soumise à des concentrations supérieures à 40 µg.m⁻³) que si on compare l'exposition totale de la population. A noter que les expositions journalières maximales sont plus importantes avec l'aspect dynamique, car certaines personnes vont cumuler les concentrations fortes en étant dans des zones à fortes concentrations tout au long de la journée.

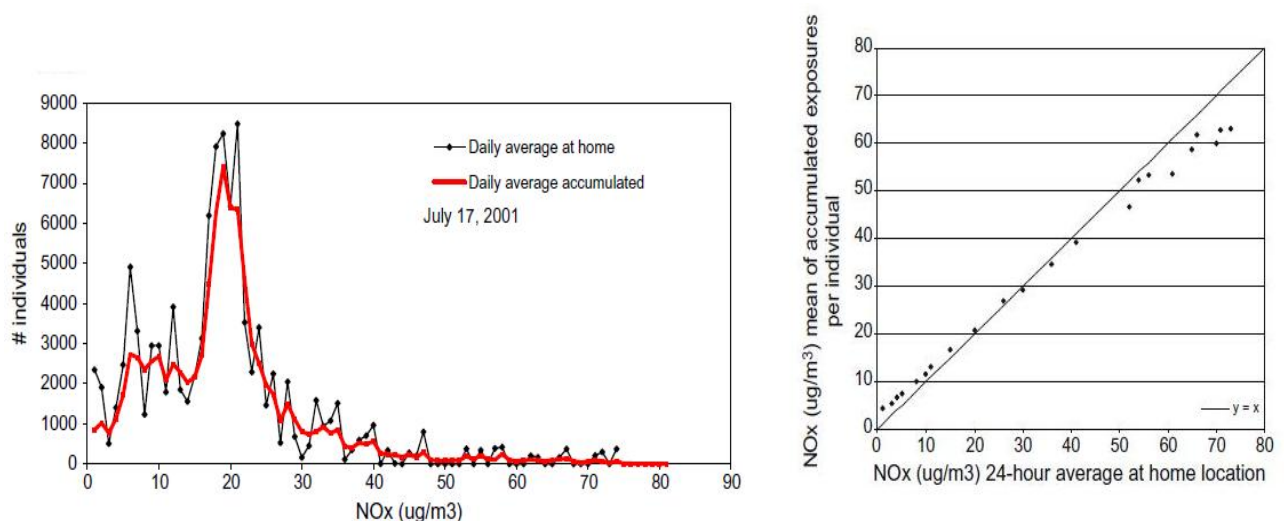


Figure 7: Comparaison de l'exposition individuelle journalière au NOx avec (« accumulated », ligne rouge sur la figure de gauche) ou sans (« at home location », ligne noire sur la figure de gauche) prise en compte de l'aspect dynamique.

Ces études montrent que les différences entre les deux méthodes de calcul de l'exposition (population statique et population dynamique) dépendent principalement de la zone géographique sur laquelle s'effectue l'étude. Dès lors que l'étude se cantonne aux centres villes, les différences sont notables (par exemple +50% sur l'exposition totale pour le centre ville d'Utrecht ou +300% pour l'hyper centre de Londres) du fait de l'import de population active en journée (« Commuting effect » en anglais). En revanche lorsque les études couvrent des zones larges englobant la majorité des déplacements journaliers des individus, ces différences sont moindres, de l'ordre de 3 à 5% pour l'exposition totale (PM₁₀, NO_x).

Ces différences semblent également plus importantes lorsque l'exposition à des seuils est comparée (jusqu'à +20%, même sur des zones larges), mais alors cela concerne un nombre plus restreint de personnes.

Enfin, ces différences ne sont pas les mêmes pour tous les polluants : les différences sont moins importantes pour les polluants secondaires.

4. AUTRES SOURCES D'INCERTITUDES CONCERNANT L'ESTIMATION DE LA POPULATION EXPOSEE

4.1 Flux touristiques

Un autre phénomène n'est généralement pas pris en compte dans l'estimation de l'exposition, il s'agit des mouvements « annualisés » de population, liés pour la plupart au tourisme. Dans les études précitées, les seules pouvant éventuellement prendre en compte cet aspect sont celles qui reposent sur des enquêtes cordons, pour lesquelles le nombre d'entrants et de sortants du périmètre géographique fixé est connu. Les études basées sur les données téléphoniques incluent également cet aspect puisque toute personne téléphonant sur le territoire est, en principe, comptabilisée.

Dans certaines régions ou certaines villes, ces mouvements de population ne sont pas négligeables. Terrier et al (2006a) illustrent l'évolution du nombre de personnes présentes sur deux territoires : la Savoie et la ville de Paris (Figure 8). En Savoie, la population présente est presque toujours supérieure à la population résidente avec 2 pics : en hiver, où la population est presque doublée, et en été. A Paris, la population présente est en général supérieure à la population résidente à cause du tourisme, sauf en été où la ville devient largement émettrice de touristes vers la province et l'étranger. La population est par exemple réduite de près de 30% en aout. De telles évolutions de population pourraient avoir un impact important sur l'exposition de la population à la pollution. Il faut cependant garder en tête que les touristes ne seront pas exposés de manière chronique à la pollution sur leur lieu de vacances, l'exposition ne sera que de court terme. Nous n'avons pas trouvé d'étude estimant l'impact des flux touristiques sur l'exposition.

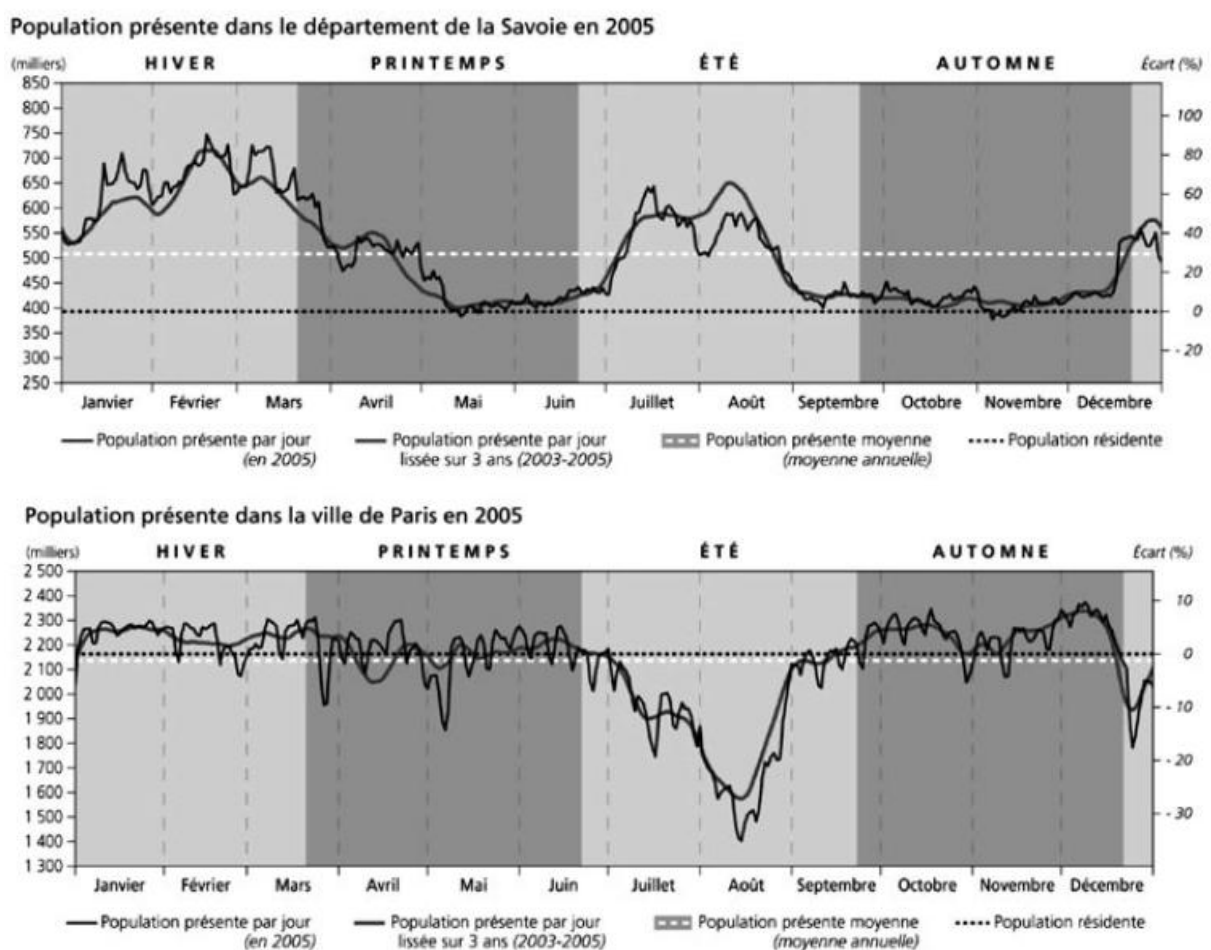


Figure 8: fluctuation de la population dans le département de la Savoie et dans la ville de Paris en 2005 (Terrier et al., 2006a)

4.2 Qualité de l'air intérieur

Parmi toutes les études précitées au paragraphe « *comparaisons entre exposition dynamique et statique* », aucune ne différencie air intérieur et air extérieur. Que ce soit au domicile ou sur le lieu de travail, les concentrations associées sont toujours celles de l'air extérieur. Or la plupart des individus passent la majeure partie de leur journée à l'intérieur, que ce soit au travail ou à leur domicile. Il serait éventuellement possible de prendre en compte la pollution de l'air intérieur sur l'exposition en modifiant le calcul de la concentration. En général, on considère qu'en intérieur une partie (%_{ext}) de l'air extérieur (ayant une concentration $C_{\text{exterieur}}$) s'infiltré dans le bâtiment, fraction à laquelle est rajoutée une concentration propre aux sources de pollution internes au bâtiment (Q_{int}). La concentration à laquelle l'individu est soumis en intérieur devient donc :

$$C = \%_{\text{ext}} * C_{\text{exterieur}} + Q_{\text{int}}$$

Les sources internes de pollution de l'air intérieur sont multiples : cuisson, chauffage, tabagisme ; quant à l'infiltration de l'air extérieur dans les bâtiments, celle-ci dépend en partie du système de ventilation des bâtiments (filtration naturelle, climatisation etc ..). Dockery and Spengler (1981) estiment par exemple des taux d'infiltration de l'air extérieur variant de 30% à 70%.

Les comportements varient ensuite suivant les polluants. Concernant les concentrations de particules, plusieurs études datant des années 1990 ne suggéraient que peu de corrélation entre les concentrations extérieures et intérieures. Ceci était souvent le fait de la présence de fumeurs dans les bâtiments. Des études plus récentes, excluant les activités de tabagisme, suggèrent en revanche que l'exposition des individus (mesurée par des moyens de mesure portatifs), les concentrations à l'intérieur des bâtiments et celles à l'extérieur sont bien corrélées. Ceci est d'autant plus vrai pour les particules fines (Monn, 2001), telles que les particules soufrées ou les particules carbonées, et moins vrai pour la partie la plus grossière des $PM_{2.5}$ (Janssen et al., 2005). Le coefficient entre les concentrations intérieures et extérieures (I/O) varie suivant les études, mais pour des études avec peu d'activité à l'intérieur des bâtiments (pas de fumeurs, peu de mouvements, peu de cuisson, etc ...), ces coefficients sont en général entre 0.5 et 0.8 pour $PM_{2.5}$ et PM_{10} avec d'assez bonnes corrélations entre concentration extérieure et exposition personnelle (corrélation plus élevée pour les $PM_{2.5}$ en général) (Janssen et al., 2005, Mohn et al., 1997, Tung et al., 1999). Lorsque l'activité à l'intérieur des bâtiments est importante, spécialement les activités de combustion, la corrélation entre air extérieur et intérieur diminue largement (Tu and Knutson (1988)) et le coefficient I/O est généralement supérieure à 1. Concernant le NO_2 , les valeurs de coefficient I/O estimées en l'absence de source interne importante (appareils à gaz) sont généralement comprises entre 0.4 et 0.8 : 0.76 en moyenne pour l'étude EXPOLIS, de 0.88 à 1 dans diverses écoles françaises (Blondeau et al., 2004) avec à nouveau de bonnes corrélations. A noter que pour l' O_3 , les coefficients I/O sont généralement plus faibles (Bernard et al., 1999 ; Sauges, 2008).

L'approche utilisée pour estimer les concentrations dans les bâtiments peut aussi être appliquée pour estimer les concentrations dans les transports (voiture, bus, etc ...) en estimant qu'une partie seulement de l'air extérieur pénètre dans le véhicule, auquel il faut ajouter des sources internes de pollution (par exemple les particules émises lors du freinage dans le métro). L'étude inter-modal (Fraboulet et al., 2009) a ainsi mis en avant les différences importantes d'exposition (aux particules en particulier) suivant un parcours à pied, en voiture ou en métro/RER.

5. CONCLUSION

L'impact de la prise en compte des déplacements de population dans l'évaluation de l'exposition a été étudié en recensant 1) les méthodes existantes pour estimer cette exposition « dynamique » et 2) les études la comparant à l'exposition dite « statique » où les individus sont localisés à leur domicile.

L'exposition de la population à la pollution estimée avec une approche dynamique et statique a été comparée dans diverses études. Toutes ces études utilisent un modèle de qualité de l'air pour estimer les concentrations de polluants mais la représentation du déplacement de la population varie. Ces études montrent que les différences entre les deux méthodes dépendent principalement de la zone géographique sur laquelle s'effectue l'étude. Si cette zone est restreinte au seul hyper-centre d'une ville, les différences seront importantes et proportionnelles à l'import de population depuis l'extérieur de la zone (individu travaillant à l'intérieur de la zone mais n'y habitant pas). Si la zone est suffisamment large pour englober la majorité des déplacements journaliers de la population associée à la ville étudiée, les expositions totales estimées sont alors assez comparables. Ces différences sont possiblement plus marquées lorsque l'exposition à des seuils de concentration est étudiée ; cela concerne alors un nombre plus réduit d'individus.

Les méthodes recensées pour étudier cette exposition dynamique sont généralement basées sur le principe de microenvironnement : la journée des individus est séquencée en plusieurs temps pendant lesquels ils sont soumis à des concentrations uniformes dans chaque microenvironnement. Souvent, ces microenvironnements sont réduits au domicile et au travail et le temps passé dans les transports est négligé. Dans ce cas, la principale difficulté pour appliquer ces méthodes nous paraît être la donnée de population travaillant dans la zone étudiée et sa répartition spatiale. Le calcul de l'exposition dynamique peut aussi s'appuyer sur des modèles de déplacement de la population qui consistent à simuler les activités des individus présents dans la zone d'étude.

Enfin, la plupart des études recensées ne tiennent pas compte des flux touristiques ni ne se préoccupent de la qualité de l'air intérieur. Les concentrations au domicile et au travail sont celles de l'air extérieur. La prise en compte de ces environnements intérieurs est encore un autre sujet qui demanderait une analyse plus approfondie mais qui pourrait potentiellement avoir un impact important.

Recommandations pour le calcul de l'exposition à des fins réglementaires :

La législation européenne impose, lors du dépassement d'un objectif environnemental, de déterminer la zone de couverture du dépassement et la population potentiellement exposée. Les textes précisent que les populations concernées sont les personnes résidant sur cette zone de dépassement. En France, l'évaluation des critères de déclenchement des procédures préfectorales d'information et d'alerte nécessite également le calcul de la surface et de la population potentiellement exposées à des dépassements de seuil. Il ne s'agit donc pas du calcul d'une concentration moyenne inhalée ou d'une concentration multipliée par le nombre d'habitants comme il est question dans les études d'exposition ici considérées. Toutefois, pour ces évaluations également, les conclusions de la présente analyse nous permettent de recommander la définition d'un large périmètre d'étude, qui englobe les territoires périphériques (en particulier lorsque l'estimation repose sur des modélisations de la qualité de l'air à l'échelle urbaine). Ainsi, en cas de dépassement relativement étendu, la population calculée comme étant soumise au dépassement devrait être peu sous-estimée par rapport à celle qu'on obtiendrait avec une population dynamique, qui est plus représentative de la situation réelle.

6. REFERENCES

Barrett K., F. de Leeuw, J. S. Fiala, S. Larssen, I. Sundvor, L. Fjellsbø, M. Dusinska, J. Ostatnická, J. Horálek, L. Černíkovský, F. Barmpas, N. Moussipoulos, C. Vlahocostas. (2008). Health impacts and air pollution - An exploration of factors influencing estimates of air pollution impact upon the health of European citizens , ETC/ACC Technical Paper 2008/13

Barrett K., S. López-Aparicio, F. de Leeuw, P. Barmpas , J. Fiala, J. Horálek, A. Kent, P. Kurfurst, S. Larssen, J. Mattai, J. Stedman, C. Vlachokostas (2010), Air quality and health for urban influenced populations Commuting and spatial scale as influences on estimated exposure/health impact, ETC/ACC Technical Paper 2009/17

Beckx, C., Panis, L. I., Arentze, T., Janssens, D., Torfs, R., Broekx, S., & Wets, G. (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), 179-185.

Bernard N., M.J. Gerber, C. Astre, M.J. Saintot (1999). Ozone measurement with passive samplers: validation and use for ozone pollution assessment in Montpellier, France, *Env. Sci. Technol.*, 33, 217-222.

Blondeau P., V. Lordache, O. Poupard, D. Genin, F. Allard (2004). Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools, DOI: 10.1111/j.1600-0668.2004.00263, *International Journal of Indoor Environment and Health*.

Dockery D. W., J.D Spengler, Indoor–outdoor relationship of respirable sulfates and particles, *Atmospheric Environment*, 15 (1981), pp. 335–343

Dumontier F., P. K. Shon (1999). En 13 ans, moins de temps contraints et plus de loisirs. Rep. 675.

European Commission (2004). How Europeans spend their time – Everyday life of women and men, data 1998 – 2002. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.

Fraboulet I., J. Queron, F. Godefroy, G. Jantolek, B. Triart, M. Durif, N. Alsac (2009). INTER'MODAL, Vers une meilleure maitrise de l'exposition individuelle par inhalation des populations à la pollution atmosphérique lors de leurs déplacements urbains, Rapport d'étude INERIS, DRC-09-104243-11651A

Gariazzo, C., Pelliccioni, A., & Bolignano, A. (2016). A dynamic urban air pollution population exposure assessment study using model and population density data derived by mobile phone traffic. *Atmospheric Environment*, 131, 289-300.

Hatzopoulou, M., & Miller, E. J. (2010). Linking an activity-based travel demand model with traffic emission and dispersion models: Transport's contribution to air pollution in Toronto. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(6), 315-325.

Jantunen, M. J., Hänninen, O., Katsouyanni, K., Knöppel, H., Kuenzli, N., Lebret, E., ... & Zmirou, D. (1998). Air pollution exposure in European cities: The "EXPOLIS" study EU Final Report.

Janssen N. A. H., T. Lanki, G. Hoek, M. Vallius, R. Van Grieken, J. Pekkanen and B. Brunekreef (2005). Associations between ambient, personal, and indoor exposure to fine particulate matter constituents in Dutch and Finnish panels of cardiovascular patients, *Occup Environ Med* ; vol 62 pp 868-877.

S.S. Jensen (1999). A geographic approach to modelling human exposure to traffic air pollution using GIS. Ph. D. Thesis. National Environmental Research Institute, Denmark.

Kousa, A., Kukkonen, J., Karppinen, A., Aarnio, P., & Koskentalo, T. (2002). A model for evaluating the population exposure to ambient air pollution in an urban area. *Atmospheric Environment*, 36(13), 2109-2119.

Liu, H. Y., Skjetne, E., & Kobernus, M. (2013). Mobile phone tracking: in support of modelling traffic-related air pollution contribution to individual exposure and its implications for public health impact assessment. *Environmental Health*, 12(1), 93.

Monn Ch.,A. Fuchs,D. Högger,M. Junker,D. Kogelschatz,N. Roth,H.-U. Wanner (1997). Particulate matter less than 10 μm (PM10) and fine particles less than 2.5 μm (PM2.5): relationships between indoor, outdoor and personal concentrations , *Science of the total environment*, Vol 208, pp 15-21.

OMS/Europe (2016): Health risk assessment of air pollution - General principles, World Health Organization, Regional Office for Europe, European Environment and Health Process, ISBN 978 92 890 51316, Copenhagen

C. Terrier (2006a). Mobilité touristique et population présente – Les bases de l'économie pré-sentielle des départements; édition Direction du tourisme.

Tu K., E.O Knutson (1988). Indoor outdoor aerosol measurements for two residential buildings in New Jersey, *Aerosol Science and Technology*, 9, pp. 71–82

Tung T.C.W., C.Y.H Chao, J Burnett (1999). A methodology to investigate the particulate penetration coefficient through building shell, *Atmospheric Environment*, 33, pp. 881–893

M. Sauges (2008), Faisabilité de l'évaluation de l'exposition totale de la population à la pollution de l'air dans le Languedoc-Roussillon, Rapport de stage de l'EHESP effectué à Air Languedoc-Roussillon.

C. Schadkowski (2003). Exposition individuelle au benzène: premiers résultats de l'étude "Sentinelles de l'air" en région Nord-Pas-de-Calais. [25] Rep. Air Pur n° 65.

Walsh, S., Roddis, S., Bannister, M., Stewart, J., Cope, M., & Lee, S. (2011). Movement of People and Air Pollutants: Exposure Assessment Using Dynamic Population Data. In 20th Clean Air Society of Australia and New Zealand Conference, Auckland.

WHO/IPCS (2005) Principles of characterizing and applying human exposure models. Geneva, World Health Organization (IPCS harmonization project document; no. 3).