

ENVIRONNEMENT

SEPTEMBRE 2017

ÉTUDES ET ENQUÊTES

IMPACTS DE L'EXPOSITION CHRONIQUE
AUX PARTICULES FINES
SUR LA MORTALITÉ
DANS LA VALLÉE DE L'ARVE

RÉGION

AUVERGNE RHÔNE-ALPES

Résumé

Les impacts sanitaires de la pollution de l'air extérieure constituent une préoccupation majeure dans la vallée de l'Arve, dans un contexte où la concentration d'activités anthropiques, la topographie et les conditions climatiques favorisent la concentration des polluants.

Une évaluation quantitative des impacts sanitaires (EQIS) a été réalisée pour aider les parties prenantes locales à mesurer les bénéfices attendus d'amélioration de la qualité de l'air sur la mortalité et l'espérance de vie. Pour évaluer les effets de l'exposition chronique, les concentrations annuelles moyennes de particules fines issues d'un modèle environnemental à fine échelle ont été couplées à des données d'occupation des sols pour estimer l'exposition de la population dans les communes concernées par le plan de protection de l'atmosphère. L'étude montre que 8 % de la mortalité de la vallée de l'Arve serait attribuable aux particules fines $PM_{2,5}$, soit 85 décès par an. Réduire les concentrations annuelles moyennes de particules fines ($PM_{2,5}$) de 30 % permettrait de diminuer la mortalité de 4 %, soit 45 décès évités par an, et 967 années de vie gagnées correspondant en moyenne à 5 mois d'espérance de vie gagnée pour la population.

L'analyse qualitative des incertitudes va dans le sens d'une sous-estimation des impacts sanitaires, cette EQIS fournissant un ordre de grandeur *a minima* de l'impact. L'impact de la pollution de l'air dans la vallée de l'Arve se rapprocherait ainsi de celui rencontré dans les agglomérations françaises, sans atteindre la situation des grandes agglomérations les plus polluées.

Au final, cette étude confirme la position portée par Santé publique France dans sa réponse à la saisine de l'ARS en mai 2015, que des actions soient prises sans tarder pour améliorer de manière durable la qualité de l'air dans la vallée de l'Arve.

MOTS CLÉS : MORTALITÉ, POLLUTION DE L'AIR, PARTICULES FINES, ÉVALUATION QUANTITATIVE DES IMPACTS SANITAIRES

Citation suggérée : Pascal M, De Crouy Chanel P, Wagner V, Yvon JM, Saura C. *Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité dans la vallée de l'Arve*. Saint-Maurice : Santé publique France, 2017. 41 p. Disponible à partir de l'URL : www.santepubliquefrance.fr

ISSN : EN COURS / ISBN-NET : 979-10-289-0353-4 / RÉALISÉ PAR LA DIRECTION DE LA COMMUNICATION, SANTÉ PUBLIQUE FRANCE / DÉPÔT LÉGAL : SEPTEMBRE 2017

Abstract

Health impacts of outdoor air pollution are a major concern in the Arve Valley, where the concentration of human activity, topography and climatic conditions favor the concentration of pollutants.

A quantitative health impact assessment (HIA) was conducted to help local stakeholders measure the expected benefits of improving air quality on mortality and life expectancy. In order to evaluate the effects of chronic exposure, annual mean concentrations of fine particles from a fine-scale environmental model were coupled with land-occupancy data to estimate population exposure in the municipalities affected by the atmospheric protection plan. The study shows that 8% of the mortality in the Arve Valley could be attributable to PM_{2.5} fine particles, representing 85 deaths per year. A 30% reduction of average annual concentrations of PM_{2.5} would lead to a 4% decrease in mortality, representing 45 deaths avoided per year, and 967 life-years gained on average, corresponding to 5 months of life expectancy for the population.

The qualitative analysis of uncertainties suggests an underestimation of health impacts, this quantitative HIA having provided a minimum scale of magnitude of the impact. The impact of air pollution in the Arve Valley would thus be similar to the one observed in French metropolitan areas, without reaching the level found in the most polluted urban areas.

Finally, this study confirms the position taken by Santé publique France (the French national public health institute) in its response to the ARS (local health authorities) referral in May 2015, that action should be taken without delay to improve the quality of air in the Arve Valley.

KEY WORDS: MORTALITY, AIR POLLUTION, FINE PARTICLES, QUANTITATIVE HEALTH IMPACT ASSESSMENT

Ont participé à cette étude et à la rédaction de ce rapport

Mathilde Pascal, direction santé environnement, Santé publique France
Perrine De Crouy Chanel, direction santé environnement, Santé publique France
Vérène Wagner, direction santé environnement, Santé publique France
Jean-Marc Yvon, Cire Auvergne Rhône-Alpes, Santé publique France
Christine Saura, Cire Auvergne Rhône-Alpes, Santé publique France

Relecture scientifique

Dr Isabelle Rossi (Office du médecin cantonal de Lausanne)

Sommaire

1. CONTEXTE	7
1.1. Impacts de la pollution de l'air sur la santé en France.....	7
1.2. Situation de la vallée de l'Arve	8
2. MÉTHODE	12
2.1. Choix de la période et de la zone d'étude.....	12
<i>Période d'étude</i>	12
<i>Zone et population d'étude</i>	12
2.2. Choix du couple polluant - effet sanitaire et du risque relatif	12
<i>Couple polluant – effet sanitaire</i>	12
<i>Risque relatif utilisé</i>	13
2.3. Estimation de l'exposition aux particules fines.....	13
<i>Modélisation des concentrations annuelles moyennes de PM_{2,5}</i>	13
<i>Estimation de l'exposition à la commune</i>	14
2.4. Données de mortalité et de population	16
2.5. Calcul de l'impact de la pollution sur la mortalité	16
2.6. Calcul de l'impact de la pollution sur l'espérance de vie	16
2.7. Hypothèses de réduction des concentrations de PM _{2,5}	17
3. RÉSULTATS	18
3.1. Estimation de l'exposition.....	18
3.2. Poids de la pollution sur la mortalité	19
3.3. Bénéfices sanitaires associés à des scénarii d'amélioration de la qualité de l'air.....	20
3.4. Analyses de sensibilité	23
<i>Comparaison des méthodes d'estimation de l'exposition</i>	23
<i>Influence de l'estimation de l'exposition sur les estimations des bénéfices attendus</i>	27
<i>Influence du RR sur l'estimation des décès et perte d'espérance de vie attribuable à la pollution dans la vallée de l'Arve</i>	29
4. DISCUSSION	30
4.1. Synthèse des impacts sanitaires et bénéfices attendus d'une amélioration de la qualité de l'air dans la vallée de l'Arve	30
4.2. Incertitude associée aux résultats.....	30
<i>Incertitude associée à l'estimation de l'exposition</i>	30
<i>Incertitude associée au choix du RR</i>	31
<i>Évaluation globale de l'incertitude</i>	32
<i>Choix de se restreindre à l'analyse de l'exposition chronique aux PM_{2,5} et de la mortalité totale</i> .	32
4.4. Comparaison avec d'autres EQIS.....	34
4.5. Implication en termes de santé publique	35
Références bibliographiques	37
Annexe - Méthode de calcul de l'impact de la pollution sur l'espérance de vie à 30 ans	40

Acronymes et sigles

Aasqa	Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air
ARS	Agence régionale de santé
Cafe	Clean air for Europe
EQIS	Évaluation quantitative d'impact sanitaire
Emep	European Monitoring and Evaluation Programme
GBD	Global Burden of Disease
NO2	Dioxyde d'azote
OMS	Organisation mondiale de la santé
O3	Ozone
PPA	Plan de protection de l'atmosphère
PM_{2,5}	Particule fine de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm
PM₁₀	Particule fine de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm
RR	Risque relatif

1. CONTEXTE

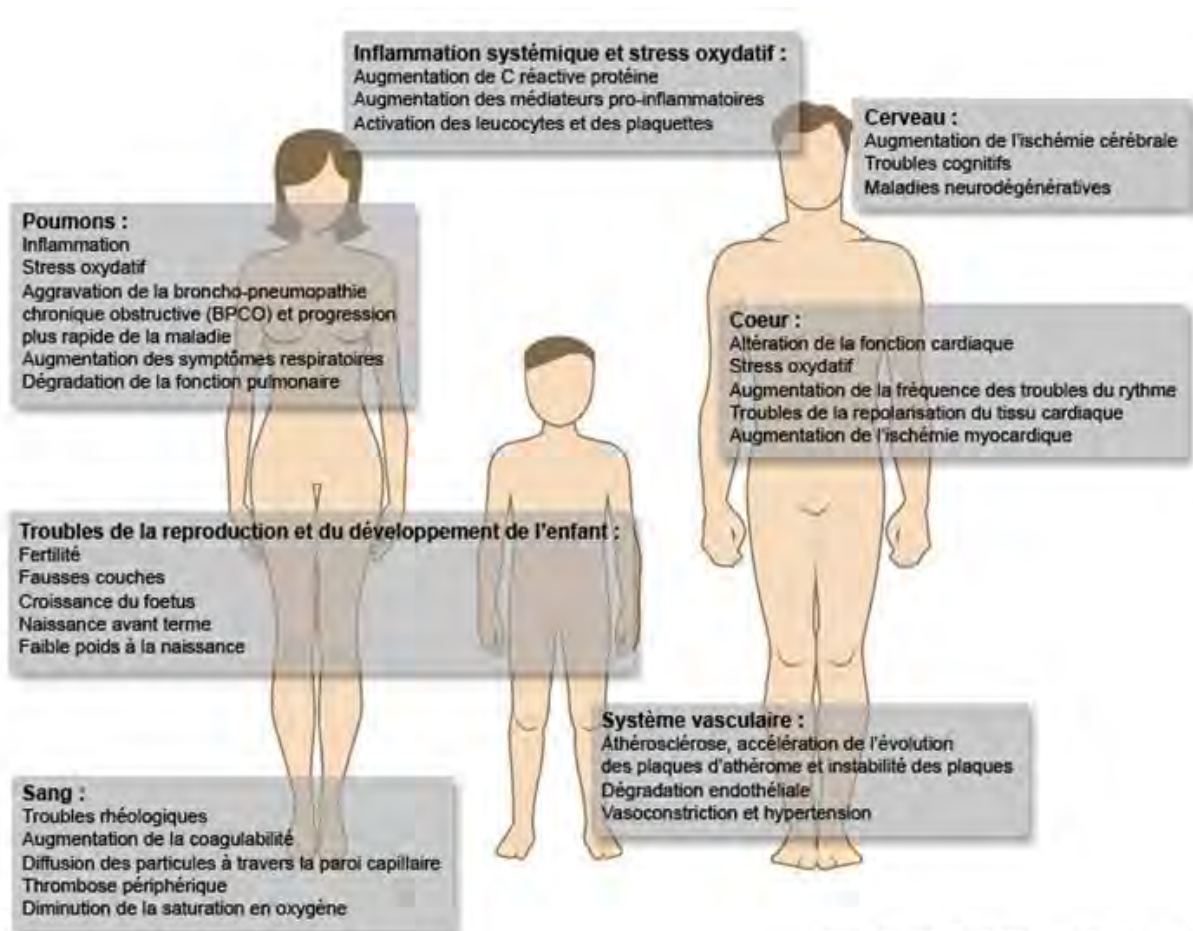
1.1. Impacts de la pollution de l'air sur la santé en France

De nombreuses études épidémiologiques montrent que l'exposition chronique à la pollution de l'air contribue au développement de pathologies chroniques graves ; pathologies cardiovasculaires [1-3], respiratoires [1,4] et cancers [4-6]. D'autres impacts notamment sur la reproduction, les maladies endocriniennes et les maladies neurologiques sont suspectés (Figure 1). La contribution de la pollution de l'air au développement de ces pathologies graves (on parle alors d'effets à long-terme) se traduit par une baisse de la qualité de vie et de l'espérance de vie des populations exposées.

Dans une moindre mesure, l'exposition à la pollution de l'air peut également décompenser des pathologies préexistantes, notamment cardiovasculaires ou respiratoires, et dans les cas les plus graves conduire à des hospitalisations ou à des décès dans les quelques jours suivants l'exposition (on parle alors d'effets à court-terme). Toutefois, les impacts sanitaires à court-terme de la pollution de l'air sont très inférieurs aux impacts à long-terme.

I FIGURE 1 I

Principaux mécanismes d'action de la pollution de l'air sur la santé



Source : Programme de surveillance air et santé, InVS, 2014

Les connaissances épidémiologiques et toxicologiques permettent aujourd'hui de conclure à un lien de causalité entre l'exposition aux particules fines et la mortalité [7, 8]. Les particules fines sont classiquement mesurées selon leur diamètre : les particules fines de diamètre aérodynamique inférieur à 10 μm (PM_{10}), et les particules fines de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$). Les $\text{PM}_{2,5}$ constituent la fraction la plus fine des PM_{10} , et peuvent pénétrer dans les ramifications les plus profondes des voies respiratoires. La réglementation française et européenne fixe des valeurs limites journalières et annuelles pour les PM_{10} , et uniquement annuelles pour les $\text{PM}_{2,5}$. Les études épidémiologiques utilisent le plus souvent les PM_{10} pour étudier les effets à court-terme de la pollution particulaire, et les $\text{PM}_{2,5}$ pour étudier les effets à long-terme [9]. Il s'agit d'une séparation pratique mais non exclusive : il y a notamment de plus en plus d'études des effets à court-terme à partir des $\text{PM}_{2,5}$ [10, 11]. Dans tous les cas, les impacts sanitaires à court-terme sont d'un ordre de grandeur inférieur aux impacts sanitaires à long-terme. Par exemple, le projet européen Aphekom avait montré que dans neuf villes françaises, sur la période 2004-2006, les effets à court-terme représentaient 245 décès par an, 360 hospitalisations pour causes cardiaques et 673 hospitalisations pour causes respiratoires (conséquence du non-respect de la valeur guide de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les PM_{10}). Les effets à long-terme représentaient 2 906 décès par an (conséquence du non-respect de la valeur guide de l'OMS pour les $\text{PM}_{2,5}$) [12].

En France métropolitaine, Santé publique France estime que l'exposition chronique aux $\text{PM}_{2,5}$ contribue à 9 % de la mortalité annuelle totale, soit 48 000 décès prématurés par an, et une perte d'espérance de vie à 30 ans pouvant dépasser deux ans [13].

1.2. Situation de la vallée de l'Arve

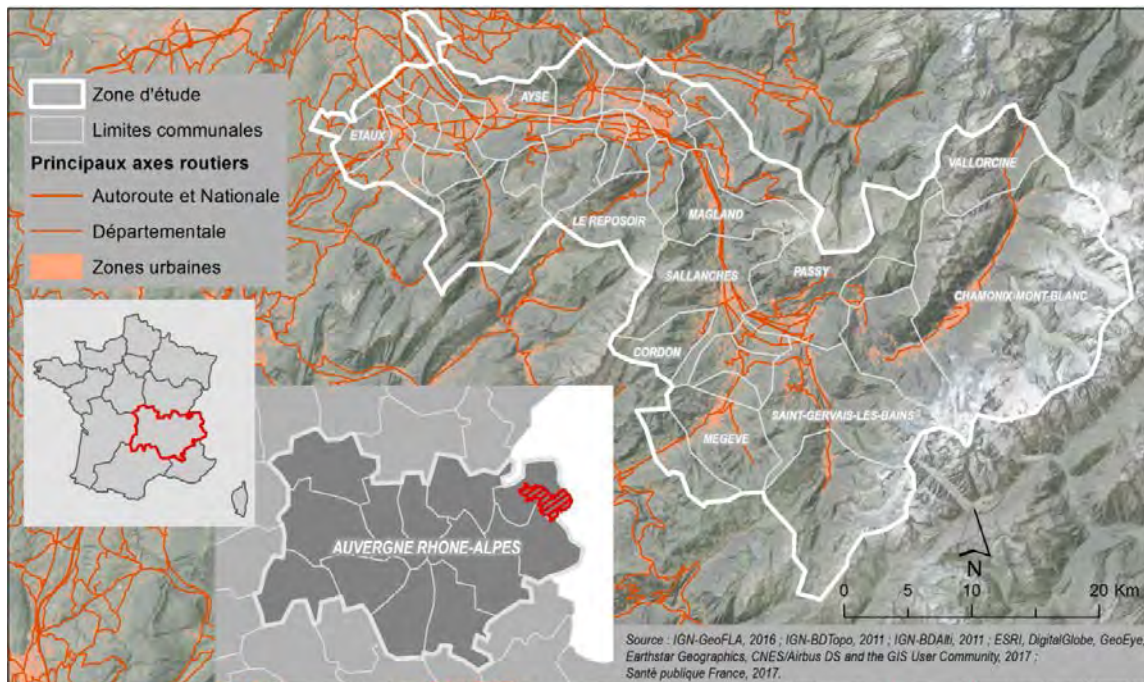
Si la pollution de l'air est le plus souvent identifiée comme concernant les plus grandes agglomérations, l'évaluation quantitative de l'impact sanitaire (EQIS) menée par Santé publique France sur l'ensemble des communes françaises a montré un impact conséquent y compris dans les villes de tailles moyennes, et dans les zones rurales. Cette EQIS a fourni des résultats pour toutes les communes françaises à partir d'un modèle estimant les concentrations de $\text{PM}_{2,5}$ sur une grille de 2*2km. Cette résolution spatiale ne permettait toutefois pas d'explorer finement l'impact de la pollution de l'air dans certaines zones présentant une géographie et une topographie très particulière, comme c'est le cas des vallées encaissées [13].

Certaines de ces vallées peuvent connaître des niveaux de pollution mesurés comparables à ceux mesurés dans de grandes agglomérations françaises. C'est le cas de la vallée de l'Arve (Figure 2), où les niveaux élevés de polluants ont conduit à la mise en place d'un plan de protection de l'atmosphère (PPA) en 2012.

La vallée de l'Arve rassemble plus de 150 000 habitants permanents (Tableau 1). La zone est très diversifiée en termes d'occupation des sols, avec un fond de vallée fortement urbanisé et densément peuplé (Figure 3), concentrant des axes routiers (trafic local et de transit pour l'accès au tunnel du Mont-Blanc), des activités, commerciales, agricoles et industrielles. En altitude, on retrouve des espaces naturels ponctués par un bâti résidentiel diffus, des complexes touristiques, puis des espaces naturels sans activité anthropique [14]. Ces espaces représentent de 37 % à 97 % de la surface des communes de la vallée.

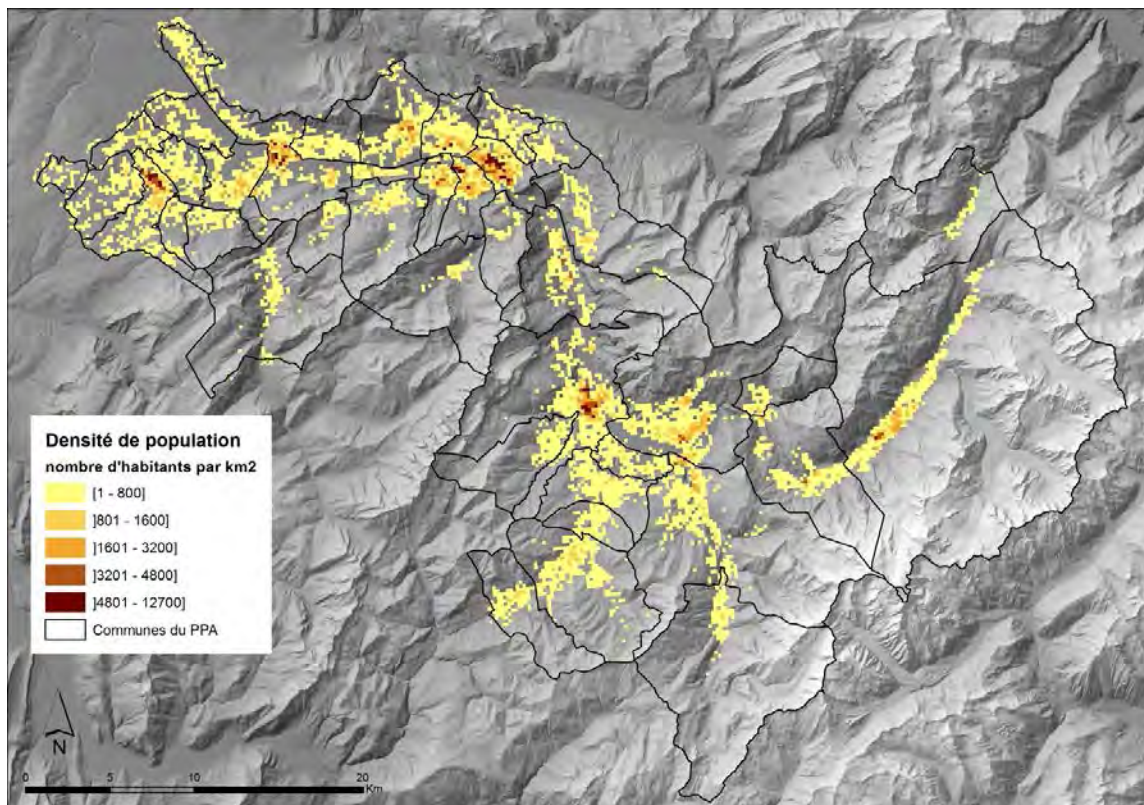
I FIGURE 2 I

Localisation de la zone d'étude



I FIGURE 3 I

Densité de population (habitants par km²) dans la zone d'étude



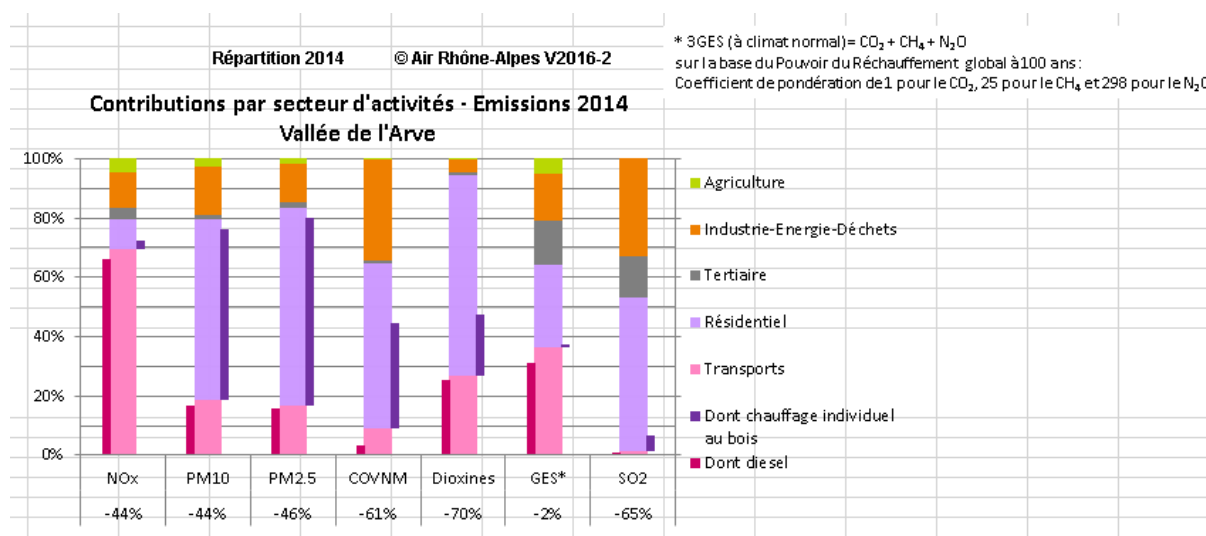
Les sources d'émissions sont également variées, avec une contribution importante du trafic aux émissions d'oxyde d'azote, et du résidentiel aux émissions de particules fines PM₁₀ et PM_{2,5} (Figure 4).

La présence des activités humaines émettrices de polluants dans un espace géographique particulier combinée à des conditions climatiques particulières favorise l'accumulation de polluants dans les basses couches de l'atmosphère. Les inversions de température en fond de vallée, qui provoquent une stagnation de l'air, sont très nombreuses en hiver (décembre – janvier) et concomitantes à l'utilisation du chauffage au bois fortement émetteur de particules fines. Ainsi, les niveaux des polluants, notamment particules fines et oxydes d'azote, sont plus élevés en hiver. À l'inverse, en été et en altitude, le rayonnement solaire favorise la formation d'ozone [14].

Des dépassements des valeurs réglementaires (valeurs limites et valeurs cibles) sont observées pour certains polluants réglementés ; particules fines, benzo-(a)-pyrène, dioxyde d'azote. Concernant les particules fines PM₁₀, la valeur limite annuelle est respectée sur l'ensemble des sites de mesure de la vallée (40 µg/m³), mais des concentrations journalières élevées peuvent être observées, dépassant les seuils d'information et de recommandations (50 µg/m³) et d'alerte (80 µg/m³) lors de pics de pollution marqués, entraînant le déclenchement de procédures préfectorales spécifiques. Ces pics sont observés exclusivement entre novembre et avril.

I FIGURE 4 I

Contribution des secteurs d'activités aux émissions de polluants



Dans ce contexte défavorable à la qualité de l'air, l'agence régionale de santé (ARS) Auvergne-Rhône-Alpes a saisi Santé publique France le 22 avril 2015 pour mettre en place d'une étude épidémiologique démontrant les impacts de la pollution de l'air dans la vallée, et pour préciser ce que l'on pouvait dire alors de « l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique à laquelle est exposée la population vivant dans cette zone ». Dans sa réponse du 12 mai 2015, Santé publique France a précisé que les connaissances scientifiques actuelles indiquaient que la pollution de l'air avait un impact sur la santé, via le développement de pathologies graves et l'exacerbation de pathologies préexistantes, impact qui n'avait pas besoin d'être redémontré par une étude épidémiologique locale dans la vallée de l'Arve. Les données actuelles sont suffisantes pour établir qu'au vu des « connaissances d'ores et déjà établies, il apparaît nécessaire que des actions soient prises sans tarder pour améliorer la

qualité de l'air dans la Vallée de l'Arve et dans les autres zones de la région Rhône-Alpes connaissant des niveaux de pollution élevés ».

Santé publique France a également estimé que si toute la population de la vallée de l'Arve était exposé à des niveaux de pollution du même ordre de grandeur que ceux mesurés dans les grandes agglomérations urbaines de la région Rhône-Alpes, l'impact sanitaire de la pollution y était également du même ordre soit 5 à 7 % en termes de mortalité évitée (soit 40 à 70 décès annuels) ou encore de six mois à un an d'espérance de vie gagnée si la valeur guide de l'OMS (10 µg/m³ en moyenne annuelle) pour les PM_{2,5} était respectée. Toutefois, ces estimations d'impact restaient très grossières. Pour affiner ces estimations, Santé publique France proposait également la réalisation d'une EQIS complémentaire des EQIS déjà réalisées pour la France métropolitaine [13] et pour certaines villes de la région [15], dont Annecy [16], mais prenant en compte les spécificités locales, sous réserve que les données environnementales requises soient disponibles. L'ARS a confirmé l'intérêt local de disposer d'une EQIS sur la Vallée de l'Arve par une saisine de juillet 2015, en rappelant « la très forte attente de données de santé pertinentes et indiscutables en lien avec la pollution de l'air dans la vallée de l'Arve que ce soit de la part des élus comme de la population générale ».

Ce rapport présente la démarche et les résultats de l'EQIS réalisée en réponse à cette saisine de juillet 2015. L'EQIS est un outil initialement développé par l'organisation mondiale de la santé (OMS) afin d'illustrer l'impact que la pollution de l'air fait peser sur la santé publique [17]. Elle permet d'avoir une vision de l'impact sanitaire de la pollution de l'air sur une population, et d'estimer les bénéfices atteignables sous différents scénarios d'amélioration de la qualité de l'air.

La causalité est admise par la communauté scientifique internationale entre l'exposition aux particules fines d'une part, et la mortalité d'autre part. Cela signifie que sur une zone d'étude donnée, pour une période donnée, les niveaux de particules fines, contribuent à la mortalité enregistrée, et que si les concentrations étaient plus faibles, moins de décès seraient observés. Ceci peut s'exprimer en nombre de décès évités, et en mois d'espérance de vie gagnés.

Cette étude présente ainsi une EQIS se concentrant sur l'exposition chronique aux PM_{2,5} et sur la mortalité dans les communes concernées par le PPA de la vallée de l'Arve.

I TABLEAU 1 I

Caractéristiques de la zone d'étude

Caractéristiques	Valeurs	Source
Nombre de communes	41	Plan de protection de l'atmosphère
Superficie	1 224 km ²	Insee (2013)
Dont espaces naturels	1 016 km ²	Insee (2013)
Population	154 718 habitants	Insee (2012-2013)
Population de 30 ans et plus	97 937 habitants	Insee (2012-2013)
Taux de décès des 30 ans et plus	1 030 décès pour 100 000 habitants	Cépidécès (2012-2013)

2. MÉTHODE

La méthode mise en œuvre correspond à une démarche classique d'EQIS contrefactuelle, afin d'estimer l'impact sanitaire attendu d'une baisse de la pollution atmosphérique, toutes choses égales par ailleurs, sans prendre en compte de délais entre la baisse de la pollution et l'apparition des bénéfices sanitaires, et sans considérer d'évolution au sein de la population (structure démographique par exemple) [13, 18].

2.1. Choix de la période et de la zone d'étude

Période d'étude

La réalisation d'une étude nécessite idéalement 2 ou 3 années de données, en évitant les années atypiques, en particulier du point de vue météorologique et atmosphérique.

Compte-tenu de la disponibilité des données sanitaires les plus récentes, les années 2012 et 2013 ont été sélectionnées.

Zone et population d'étude

L'étude porte sur les 41 communes couvertes par le plan de protection de l'atmosphère (PPA) de la vallée de l'Arve. La liste des communes est définie par le code géographique de l'Insee 2013.

Cette zone accueille de nombreux touristes en hiver et en été, ce qui fait augmenter la population pendant ces périodes. Toutefois, cette EQIS ne s'intéresse qu'aux personnes exposées toute l'année à la pollution de l'air de la vallée de l'Arve, c'est à dire aux résidents permanents de la vallée.

2.2. Choix du couple polluant - effet sanitaire et du risque relatif

Couple polluant – effet sanitaire

Le choix a été fait de se concentrer exclusivement sur la contribution de l'exposition chronique aux $PM_{2,5}$ à la mortalité totale, ce couple polluant-effet étant considéré comme celui pour lequel il est possible de réaliser une EQIS avec un minimum d'incertitude compte-tenu des connaissances actuelles [9].

Dans un contexte local où l'attention se concentre sur les pics de pollution et sur les PM_{10} , ce choix des effets chroniques des $PM_{2,5}$ répond à plusieurs considérations :

- les $PM_{2,5}$ représentent la fraction la plus fine et du point de vue sanitaire la plus dangereuse des PM_{10} .
- les pics de pollution sont des situations d'exposition aiguë qui contribuent également à l'exposition chronique et donc aux effets à long-terme.
- les effets à long-terme de la pollution de l'air résultant de l'exposition chronique sont très largement supérieurs aux effets à court-terme résultant d'une exposition aiguë.

- l'OMS recommande d'utiliser les PM_{2,5} pour évaluer l'impact des effets à long-terme de la pollution sur la mortalité totale, ce couple polluant-effet étant celui pour lequel on peut fournir les estimations les plus robustes [9].
- on dispose désormais de données épidémiologiques récentes confirmant sur des populations européennes et françaises l'impact de l'exposition chronique au PM_{2,5} sur la mortalité [13, 19, 20].

L'EQIS sur les PM_{2,5} et la mortalité totale est donc la plus informative et la plus robuste réalisable en l'état actuel des connaissances.

Risque relatif utilisé

Un nombre croissant d'études épidémiologiques, dont récemment plusieurs études européennes [1,6,19,21-23], quantifient le lien entre exposition chronique aux PM_{2,5} et mortalité. Parmi elles, deux études ont travaillé sur des populations françaises ; les cohortes Escape et Gazel-Air.

Escape rassemblait au total 22 cohortes européennes, et a suivi 367 251 participants pendant en moyenne 14 ans [6]. La population française y était représentée par la cohorte E3N, qui suit des femmes résidant à Paris, Grenoble, Lyon et Marseille. Les concentrations moyennes de PM_{2,5} aux adresses des participants de l'ensemble des cohortes d'Escape variaient de 6 à 31 µg/m³ selon la cohorte et le pays. Escape estime un RR d'augmentation de la mortalité de 1,14 [1,04 :1,27] pour une augmentation de 10 µg/m³ de PM_{2,5} [6].

La cohorte Gazel rassemblait 20 327 participants résidant sur tout le territoire métropolitain, dont la moitié vivait dans des agglomérations de plus de 100 000 habitants. Les concentrations annuelles moyennes de PM_{2,5} au code postal des participants de la cohorte variaient de 4 à 29 µg/m³ en 1989, et de 2 à 21 µg/m³ en 2008. L'étude Gazel-Air estime un RR de 1,15 [0,98 :1,35] pour une augmentation de 10 µg/m³ de PM_{2,5} (19).

Nous avons combiné les informations fournies par Escape et Gazel-Air afin de réaliser un compromis entre la représentativité de l'étude française Gazel-Air et la puissance statistique de l'étude européenne Escape incluant des participants français. La méthode consiste à réaliser une méta-analyse des RR issus d'Escape et de Gazel-Air, puis à en dériver un RR recentré pour Gazel-Air. En l'absence d'hétérogénéité entre les résultats observés dans chaque cohorte, le méta-risque et l'estimateur recentré pour Gazel-Air étaient identiques. Le RR correspondant de 1,15 [1,05 :1,25] pour une augmentation de 10 µg/m³ de PM_{2,5}, a donc été retenu. Ce RR a précédemment été utilisé dans l'EQIS France entière réalisée en 2015 [13].

Un RR alternatif a été testé dans une analyse de sensibilité. Il s'agit du RR recommandé par l'OMS, et issu d'une méta-analyse internationale (RR 1,06 [1,04 ;1,08] [1]).

2.3. Estimation de l'exposition aux particules fines

Modélisation des concentrations annuelles moyennes de PM_{2,5}

Les concentrations annuelles de PM_{2,5} sont classiquement estimées par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes à partir d'une chaîne de modélisation combinant des modèles de chimie-transport et des approches géostatistiques. La plateforme à l'échelle régionale intègre le cadastre régional fine échelle des émissions atmosphériques détenu par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (tous secteurs d'émissions), le modèle météorologique WRF (National Center

for Atmospheric Research) et le modèle de chimie transport CHIMERE développé par l'Institut Pierre Simon Laplace, en collaboration avec l'Inéris.

Un traitement géostatistique se basant sur les mesures des sites fixes du réseau Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est ensuite appliqué pour créer la carte régionale.

Dans un second temps, le modèle de dispersion à fine échelle SIRANE est mis en œuvre pour les principales agglomérations et à proximité des routes principales de la région. La cartographie des polluants à fine échelle est alors calculée en combinant ces résultats avec la cartographie à l'échelle régionale (Figure 5).

Estimation de l'exposition à la commune

Le modèle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes fournit une estimation des concentrations annuelles de $PM_{2,5}$ sur une maille de 10m*10m sur l'ensemble de la zone d'étude pour chacune des deux années 2012 et 2013. Ces concentrations sont ensuite agrégées par Santé publique France pour estimer une exposition moyenne à l'échelle de chaque commune de la zone.

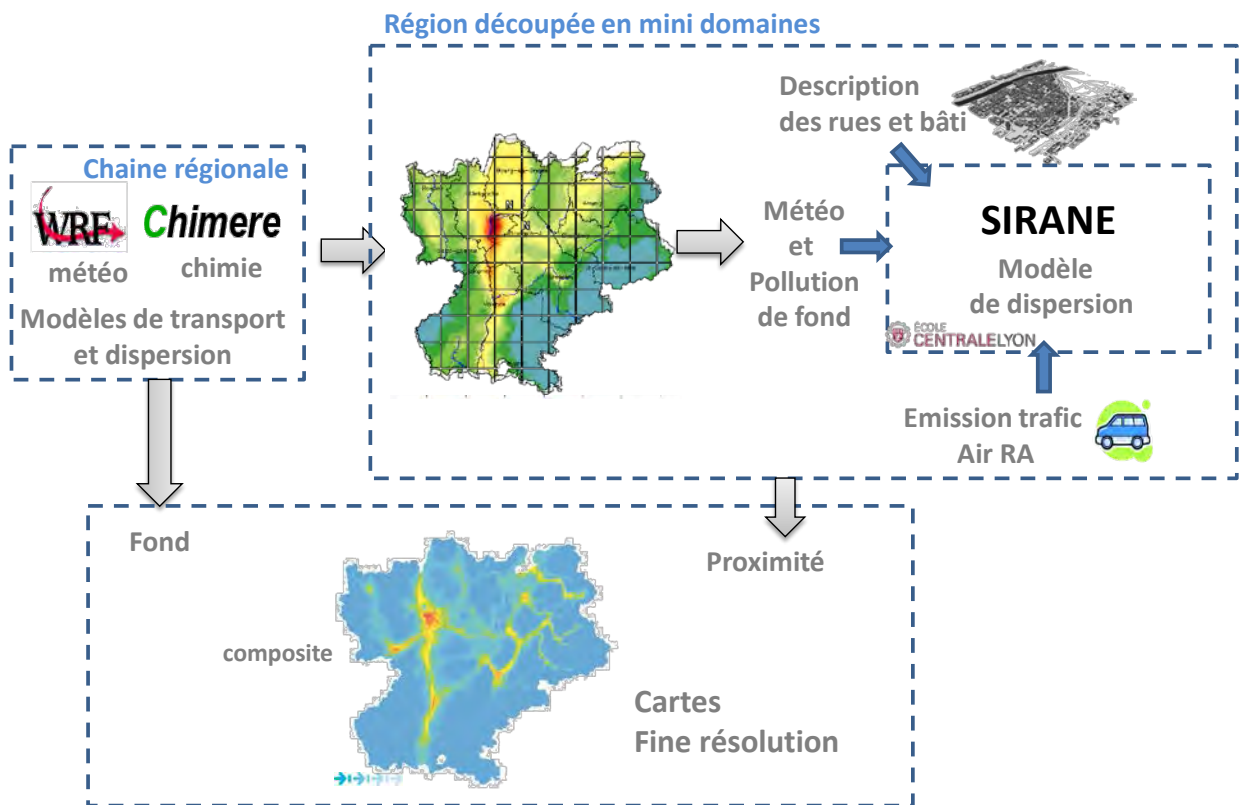
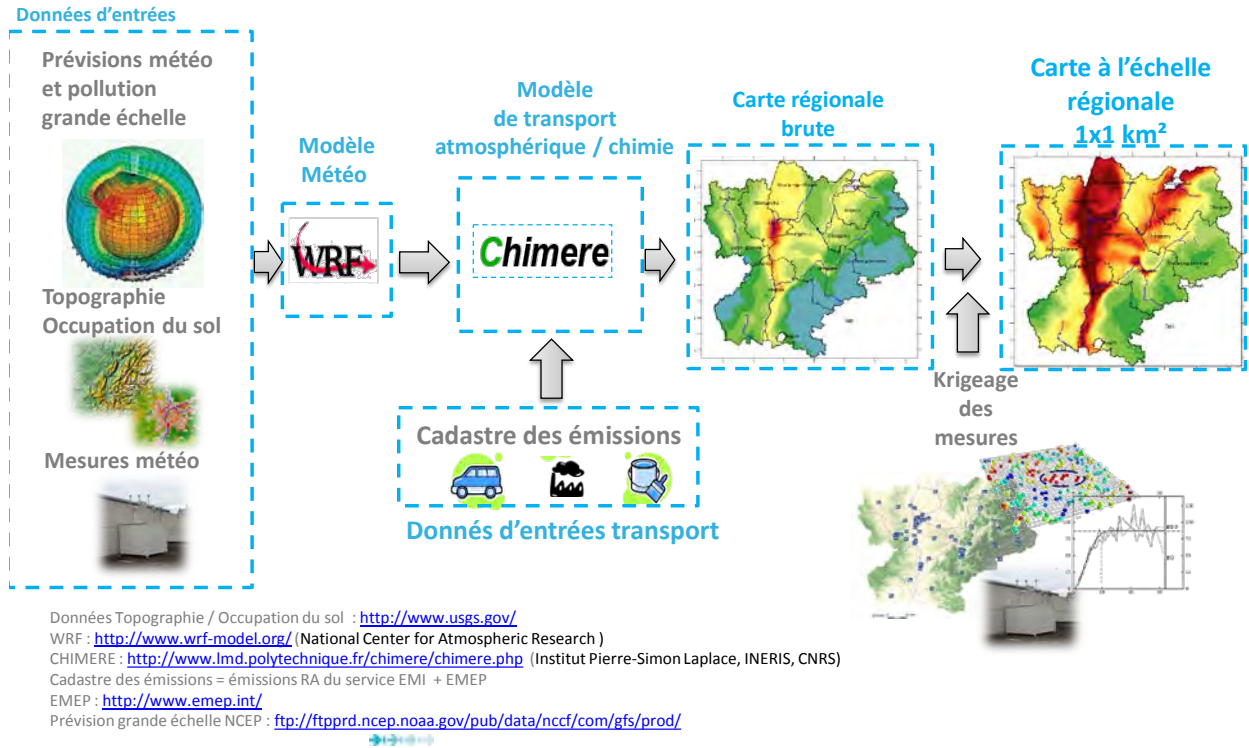
Compte-tenu de la topographie spécifique de la zone, le passage des concentrations à la maille à l'estimation des expositions à la commune a été fait à partir d'une moyenne pondérée sur la surface des mailles des concentrations modélisées uniquement dans les mailles recouvrant les zones habitées de la commune, définies par les données de carroyage de l'Insee à 200 m. Ceci revient à faire l'hypothèse que seules les concentrations modélisées dans les zones habitées contribuent à l'exposition de la population.

Deux méthodes alternatives ont été considérées comme analyses de sensibilité :

- une moyenne pondérée sur la surface des mailles et sur la population des concentrations modélisées uniquement dans les mailles recouvrant les zones habitées de la commune, définies par les données de carroyage de l'Insee à 200 m. Ceci revient à faire l'hypothèse que seules les concentrations modélisées dans les zones habitées contribuent à l'exposition de la population, et que la contribution est fonction de la densité de la population.
- une moyenne pondérée sur la surface des mailles des concentrations modélisées pour l'ensemble des mailles recouvrant une commune. Ceci revient à faire l'hypothèse que les concentrations modélisées en tout point de la commune contribuent à part égale à l'exposition de la population, y compris les concentrations modélisées dans les espaces naturels non-habités.

I FIGURE 5 I

Chaînes de modélisation régionale et à fine échelle utilisée pour estimer les concentrations



2.4. Données de mortalité et de population

Les données de mortalité toutes causes et non-accidentelles et par âge pour les personnes âgées de 30 ans et plus ont été obtenues pour chaque commune auprès du Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès (CépiDC) pour la période 2012-2013.

Les données de population ont été obtenues auprès de l'Insee pour les années 2012 et 2013.

2.5. Calcul de l'impact de la pollution sur la mortalité

La relation PM_{2,5}-mortalité retrouvée aux concentrations observées en Europe est log-linéaire sans seuil. La baisse du nombre de décès Δy associée à une baisse des niveaux de pollution Δx se calcule à partir de l'équation :

$$\Delta y = y_0 (1 - e^{-\beta \Delta x})$$

Où y_0 est le nombre de décès observés dans la population au niveau actuel de pollution x_{obs} .

β est la pente de la relation polluant-logarithme de la mortalité. Pour un RR exprimé pour une augmentation de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de polluant, $\beta = \ln(\text{RR})/10$

Δx représente la baisse de la pollution dont on veut estimer l'impact

Quand on s'intéresse à un scénario y_{sce} utilisant une valeur cible x_{cible}

$$\Delta x = x_{obs} - x_{cible} \text{ si } x_{obs} > x_{cible}$$

$\Delta x = 0$ si $x_{obs} \leq x_{cible}$: la concentration observée étant déjà en dessous de la valeur cible, il n'y a pas de bénéfices sanitaires à atteindre la valeur cible

Δy représente l'écart entre le nombre de décès observés aujourd'hui y_{obs} , et le nombre de décès attendus au niveau de pollution du scénario y_{sce} .

L'intervalle de confiance à 95% de Δy se calcule en utilisant les bornes hautes et basses de l'intervalle de confiance à 95% du β .

Lorsque les concentrations estimées dans la commune sont inférieures à la concentration hypothétique du scénario, le résultat de l'EQIS est nul dans cette commune.

Pour l'analyse des effets à long-terme, les équations sont appliquées sur des données annuelles de mortalité et de pollution, et les résultats sont également exprimés en nombre de décès annuels.

2.6. Calcul de l'impact de la pollution sur l'espérance de vie

Le principe est le même que pour le calcul de la mortalité. Au niveau de pollution observé aujourd'hui, une probabilité de décéder est calculable par classe d'âges (ici, des classes d'âge de 5 ans). Si la pollution baissait de Δx , cette probabilité de décès serait également diminuée d'un facteur $e^{-\beta \Delta x}$. A partir de ces probabilités par classe d'âges, il est possible de calculer l'espérance de vie moyenne à 30 ans. Le gain en espérance de vie à 30 ans est calculé comme la différence entre l'espérance de vie à 30 ans obtenue à partir des données observées, et celle obtenue à partir des données attendues sous la baisse de la pollution envisagée.

Le nombre total d'années de vie gagnées correspondant est calculé comme le produit du gain en espérance de vie à 30 ans par le nombre de personnes de 30 ans concernées.

Le détail des équations est présenté en Annexe 1.

Le calcul de l'espérance de vie nécessite de disposer de tables de mortalité par classe d'âges de cinq ans. Pour 8 communes de la zone d'étude, des décès étaient observés dans toutes les classes d'âges en 2012 et 2013, permettant la construction d'une table de mortalité à la commune. Pour les autres communes, la table de mortalité utilisée a été construite à partir des données de l'ensemble des communes de la zone d'étude.

2.7. Hypothèses de réduction des concentrations de PM_{2,5}

Un premier calcul vise à estimer le poids « absolu » de la pollution liée aux activités anthropiques en termes de mortalité. En l'absence de valeur de référence fixant les niveaux de PM_{2,5} attendus sans activité humaine, une approximation a été faite en prenant le percentile 5 des concentrations annuelles des communes lorsqu'on prend en compte les espaces naturels. Cette approximation est acceptable compte-tenu de la part importante des espaces naturels dans la zone d'étude; dans six communes, plus de 90 % de la surface concerne un espace naturel.

Dans l'optique d'illustrer des scénarios plus réalistes d'amélioration de la qualité de l'air, plusieurs hypothèses alternatives de réduction des niveaux de la pollution particulaire dans la vallée de l'Arve ont été considérées :

- une estimation des bénéfices associés à une baisse relative des concentrations de PM_{2,5}, exprimées en % de la concentration annuelle : une baisse de 10 %, et une baisse de 30 % ;
- une estimation des bénéfices associés au respect de la valeur guide de l'OMS (10 µg/m³ en moyenne annuelle pour les PM_{2,5}) ;

3. RÉSULTATS

En 2012-2013, la zone d'étude rassemblait 154 718 habitants dont 97 937 habitants 30 ans et plus. En moyenne, 1 009 décès de personnes de 30 ans et plus étaient observés dans la zone d'étude, soit un taux de mortalité de 1 030 décès pour 100 000 habitants pour les 30 ans et plus.

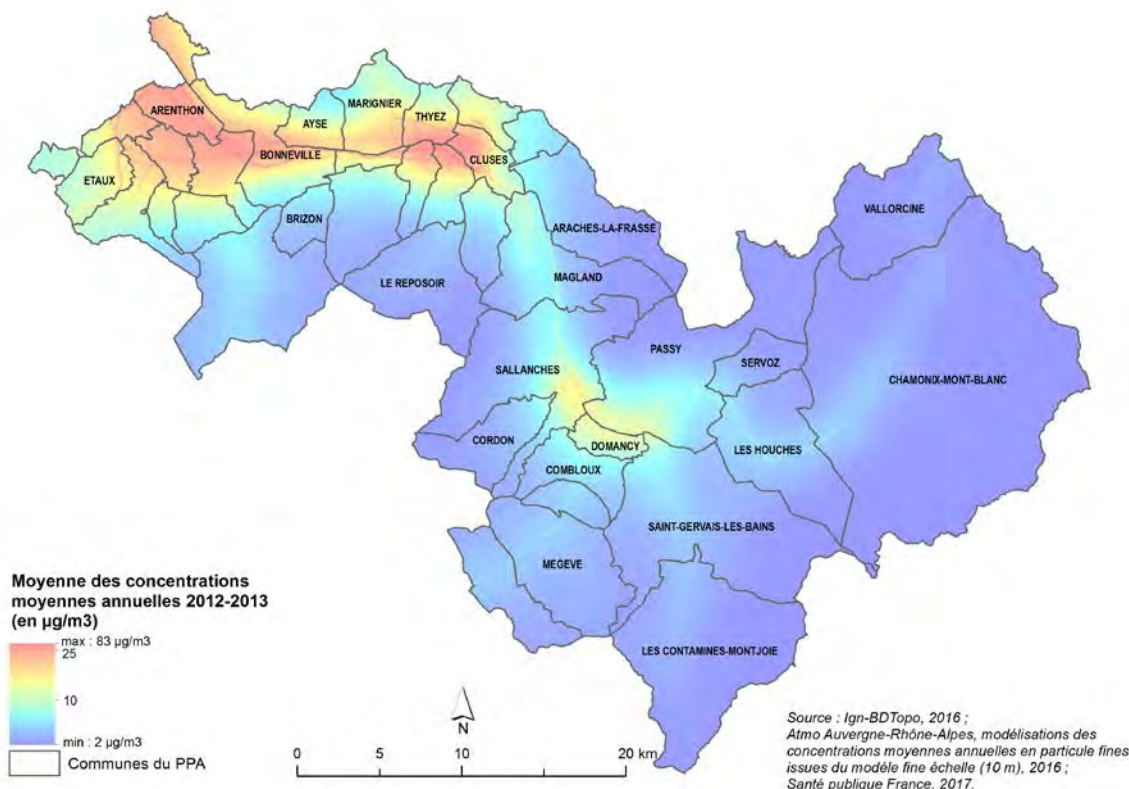
3.1. Estimation de l'exposition

La Figure 6 représente les concentrations annuelles moyennes 2012-2013 modélisées sur les mailles de 10 m. La pollution est plus importante dans les fonds de vallée et dans la partie ouest de la vallée de l'Arve dans l'axe Cluses-Bonneville.

En prenant en compte uniquement les zones habitées, les concentrations annuelles à la commune estimées par la méthode précédemment décrite varient de 4,9 à 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec une moyenne à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figure 7). Sur la base de ces données, 21 communes sur 41 sont exposées à des concentrations dépassant la recommandation de l'OMS (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), soit 106 000 personnes concernées (68 % de la population de la zone d'étude).

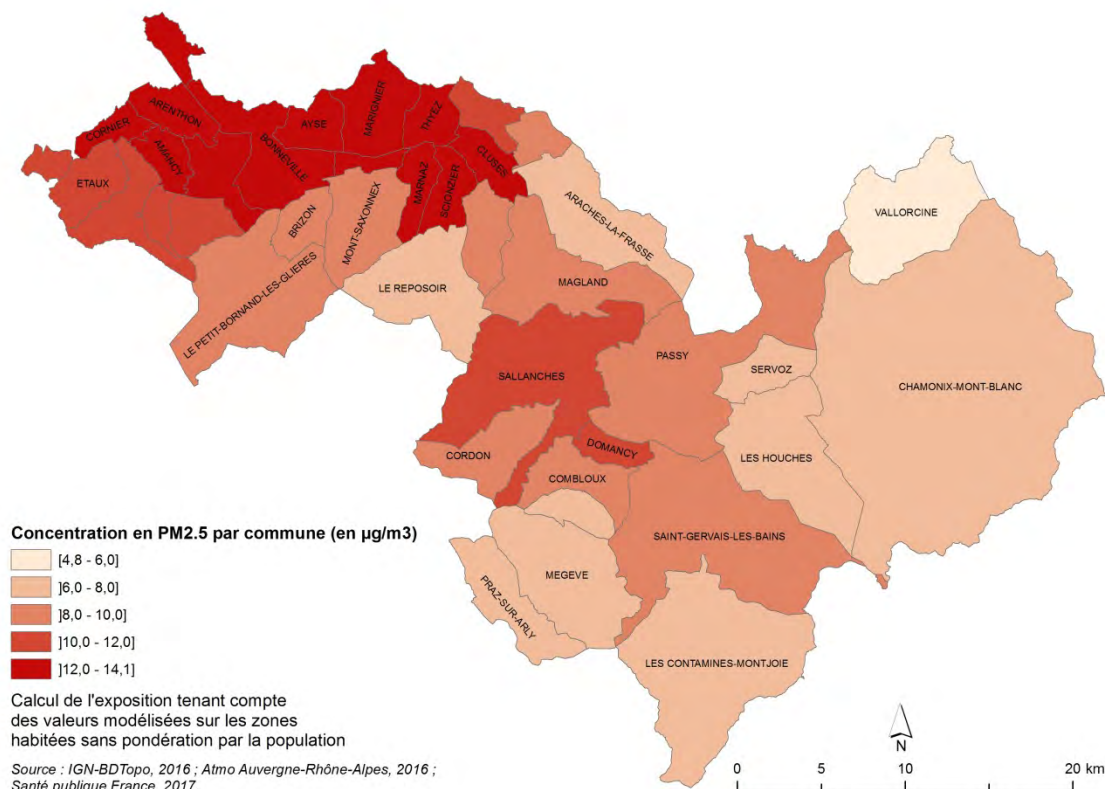
I FIGURE 6 I

Concentrations annuelles moyennes de PM_{2,5} (2012-2013) sur la maille de 10m



I FIGURE 7 I

Exposition annuelle moyenne aux PM_{2,5} (2012-2013) en ne considérant que les zones habitées des communes



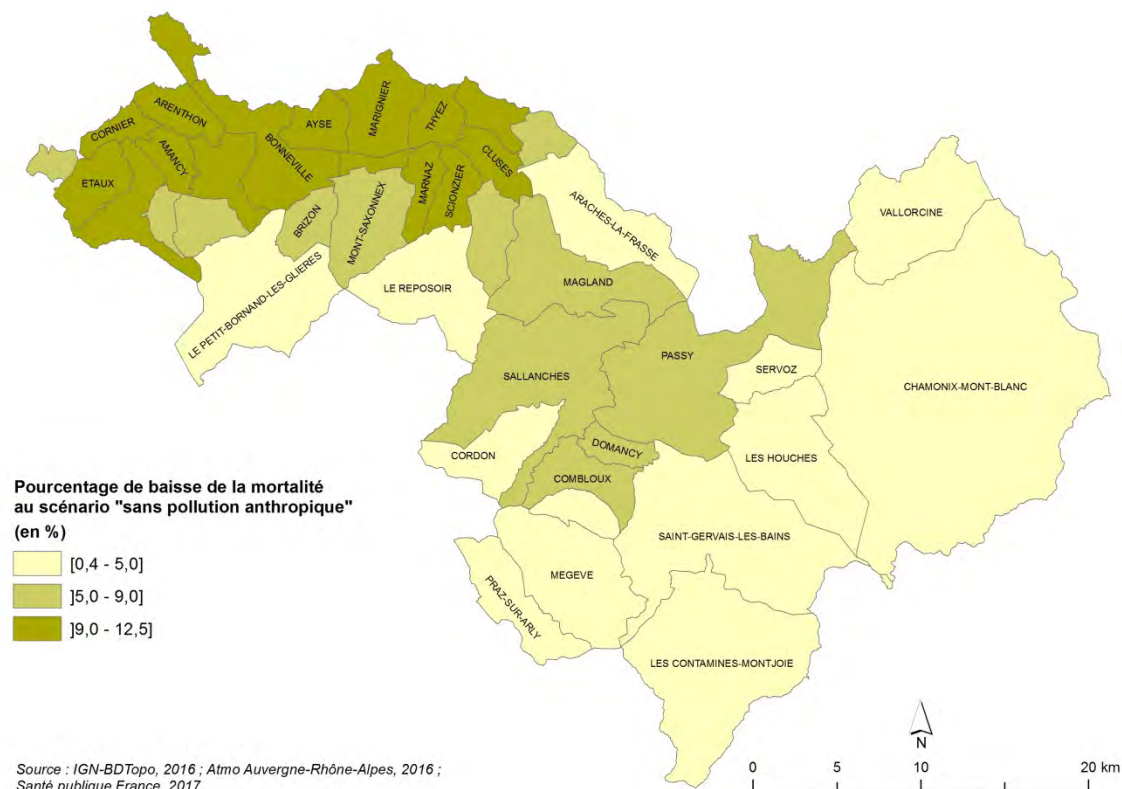
3.2. Poids de la pollution sur la mortalité

À partir de l'exposition sur les zones habitées des communes, et en appliquant le RR dérivé des études européennes Escape et Gazel-air, on estime que la pollution aux particules fines serait responsable de 8 % de la mortalité des adultes de 30 ans et plus dans la vallée de l'Arve, ce qui représente 85 décès par an, et 1 931 années d'espérance de vie perdue.

En moyenne, neuf mois d'espérance de vie à 30 ans seraient perdus par les résidents de la zone d'étude (Tableau 1) à cause de l'exposition chronique aux particules fines. L'impact est plus important dans les communes de l'ouest de la zone d'étude (Figure 8).

I FIGURE 8 I

Contribution des particules fines PM_{2,5} à la mortalité annuelle (%)



3.3. Bénéfices sanitaires associés à des scénarii d'amélioration de la qualité de l'air

Baisser les concentrations de 30 % dans toutes les communes permettrait de réduire la mortalité de 4 %, correspondant à 45 décès évités par an, et 967 années de vie gagnées par an. Le gain médian en espérance de vie à 30 ans serait de cinq mois. Les bénéfices seraient observés dans l'ensemble des communes de la zone d'étude.

Une baisse de 10 % des concentrations apporterait des bénéfices moindres, mais non négligeable, avec une baisse de 2 % de la mortalité (15 décès évités et 321 années de vie gagnées par an).

Le respect de la valeur guide de l'OMS n'apporteraient des bénéfices que pour la population actuellement exposée à des valeurs supérieures, soit 21 décès évités par an, et 492 années de vie gagnées. Ces bénéfices seraient concentrés dans les communes de l'est de la zone d'étude (Figure 9).

Les bénéfices escomptés des différents scénarios sont résumés dans le tableau 2.

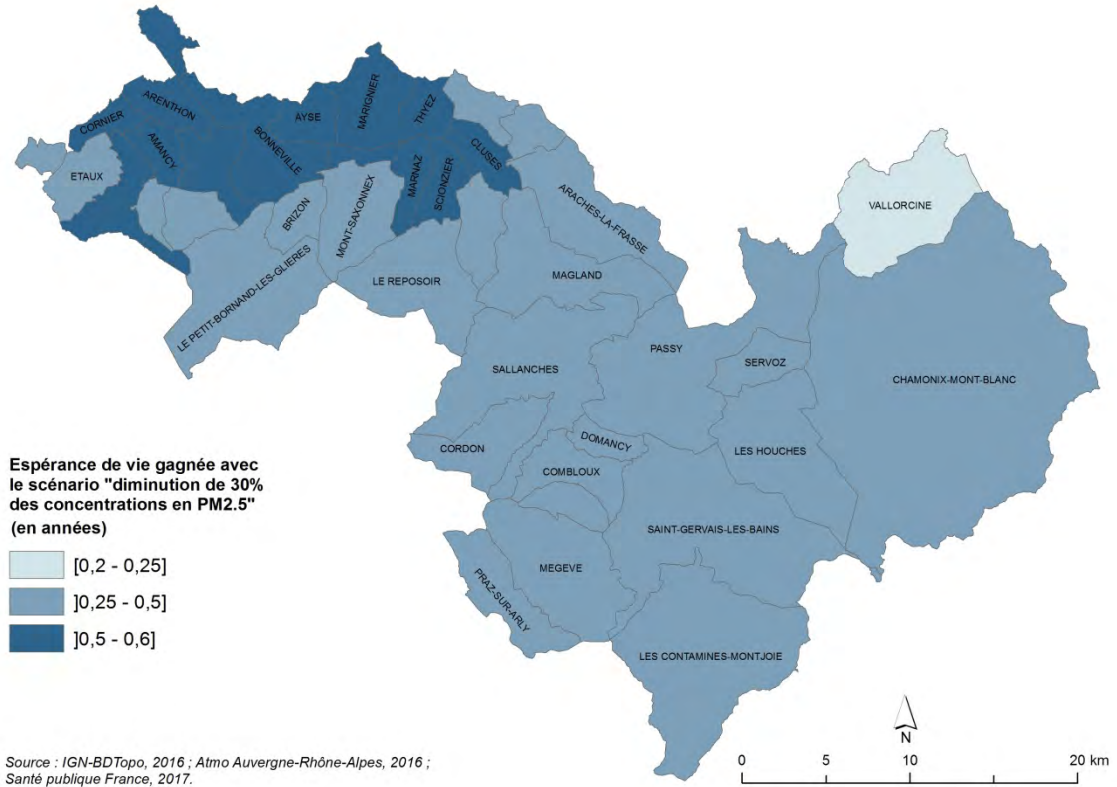
I TABLEAU 2 I

Poids total des PM_{2,5} sur la mortalité et l'espérance de vie, et bénéfices attendus sous différents scénarios d'amélioration de la qualité de l'air, exposition sur les zones habitées de la commune [Intervalle de confiance à 95 %]

	Poids total de la pollution	Bénéfices attendus d'une baisse des concentrations annuelles		
		Scénario baisse de 10 %	Scénario baisse de 30 %	Respect de la valeur guide de l'OMS
Nombre annuel de décès évitables	85 [31 :131]	15 [5 :24]	45 [16 :70]	21 [7 :33]
% de la mortalité annuelle	8,4 %	1,5 %	4,5 %	2,1 %
Gain d'espérance de vie à 30 ans (mois) (médiane)	9 [3 :15]	2 [1:3]	5 [2 :8]	<1
Nombre total d'années de vie gagnées	1 931 [670 :3 104]	321 [112 :514]	967 [337 :1 548]	492 [172 :788]

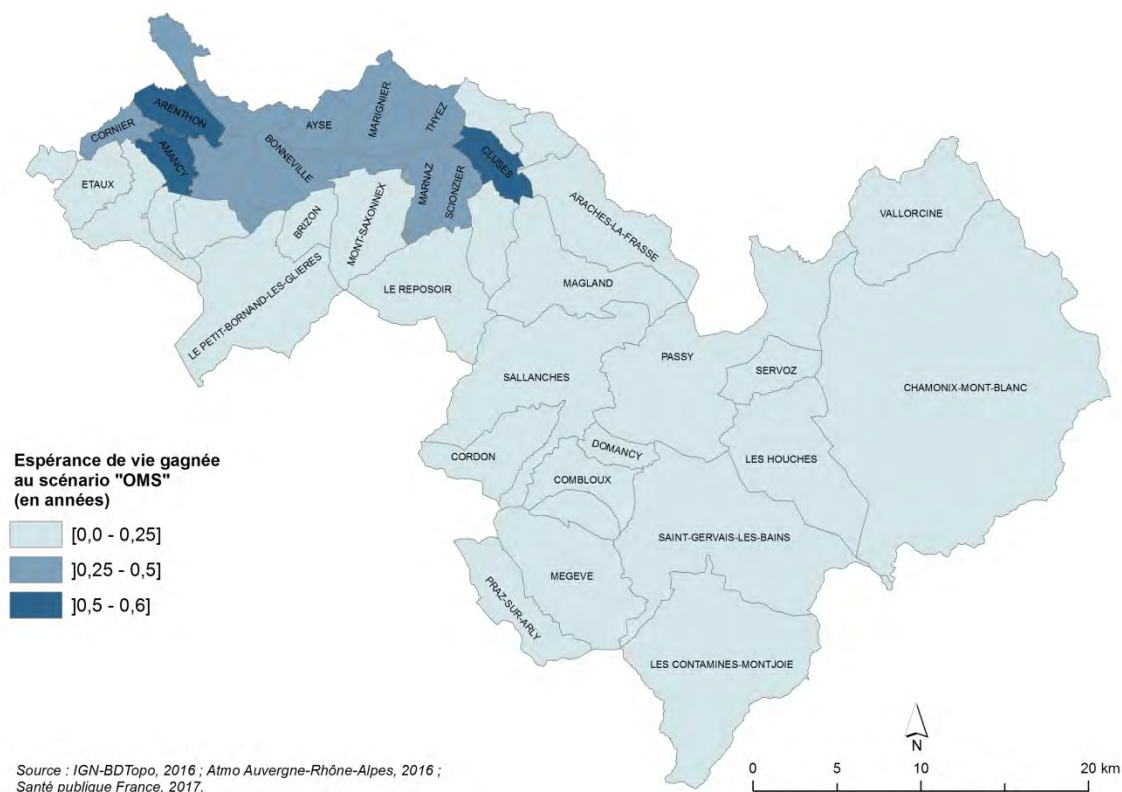
I FIGURE 9 I

Gain en espérance de vie à 30 ans (en années) sous un scénario de baisse de 30 % des concentrations



I FIGURE 10 I

Gain en espérance de vie à 30 ans (en années) sous un scénario de respect de la valeur guide de l'OMS



3.4. Analyses de sensibilité

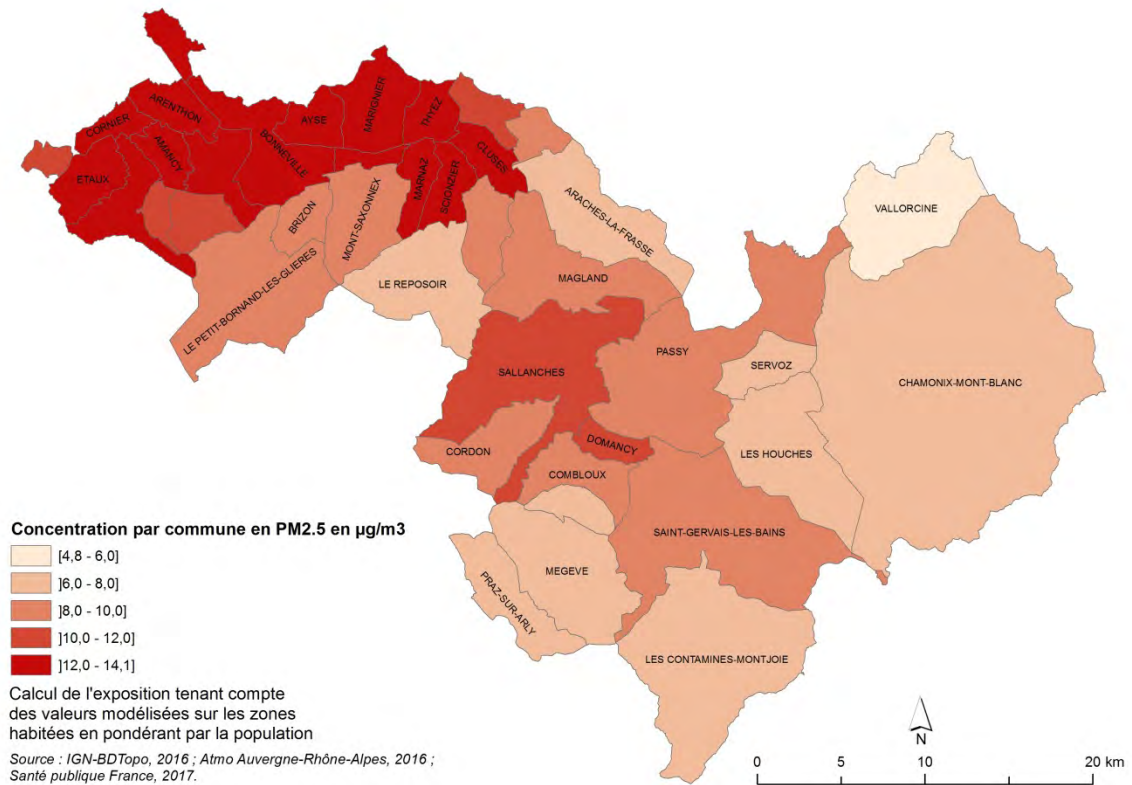
Comparaison des méthodes d'estimation de l'exposition

Malgré la topographie très particulière de la zone d'étude, les différentes méthodes de calcul de l'exposition fournissent globalement des résultats assez proches (Figures 11 à 12). Se concentrer sur les zones habitées, en pondérant ou non par la densité de population, conduit à des estimations très proches avec des écarts par commune pour la plupart compris entre 0 et 5 %. Les écarts deviennent plus nets lorsqu'on inclut les zones non habitées dans l'estimation de l'exposition. En effet, cette méthode d'estimation de l'exposition tient compte aussi bien des zones de fond de vallée où se concentrent les sources que des pentes et des sommets des versants, qui sont nettement moins exposés. La différence avec une estimation de l'exposition concentrée sur les zones habitées est en moyenne de $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, et au maximum de $3,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Elle est plus importante pour les communes de l'est de vallée, ce qui s'explique par l'étendue de ces communes recouvrant des zones naturelles et de sommets montagneux (Figure 13).

Ces différences dans l'estimation de l'exposition se répercutent principalement sur le scénario de comparaison à la valeur guide de l'OMS : en calculant l'exposition sur les zones habitées des communes, 68 % de la population est concernée par ce scénario. En prenant en compte toute la surface des communes, 57 % de la population est exposée à des concentrations moyennes annuelles dépassant $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tableau 3).

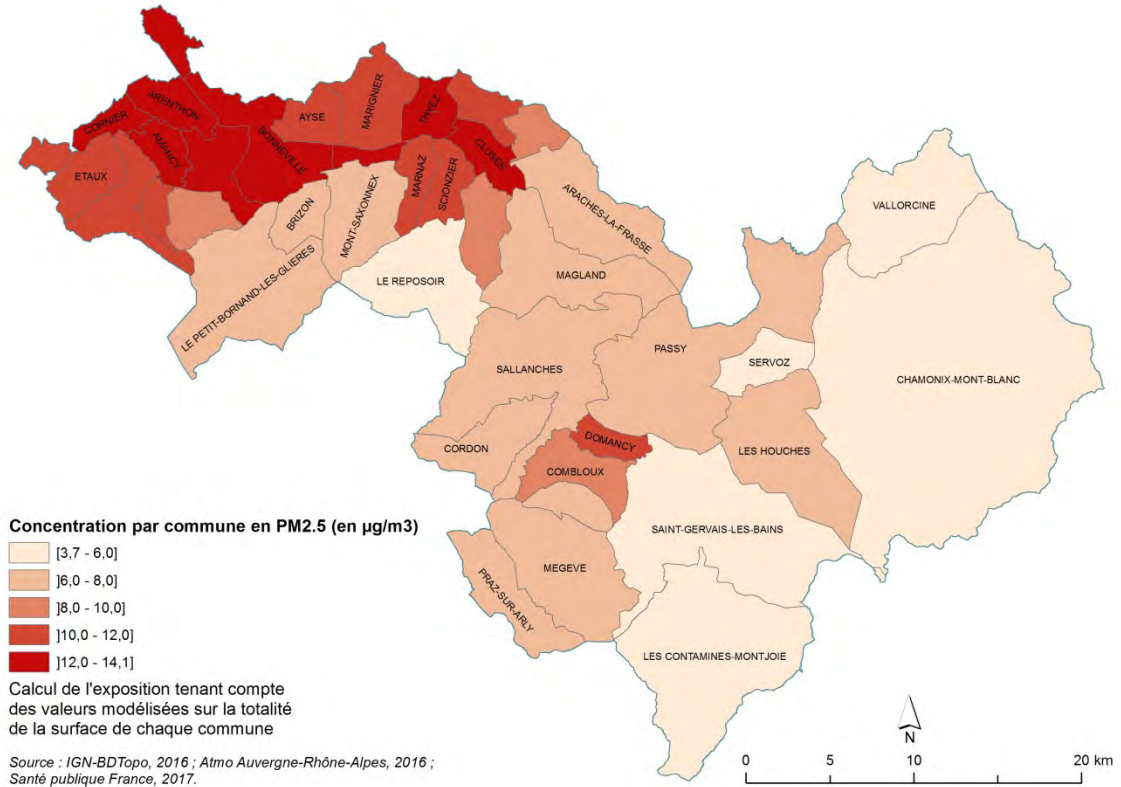
I FIGURE 11 I

Exposition annuelle moyenne aux PM_{2,5} (2012-2013), en pondérant sur la population des zones habitées des communes



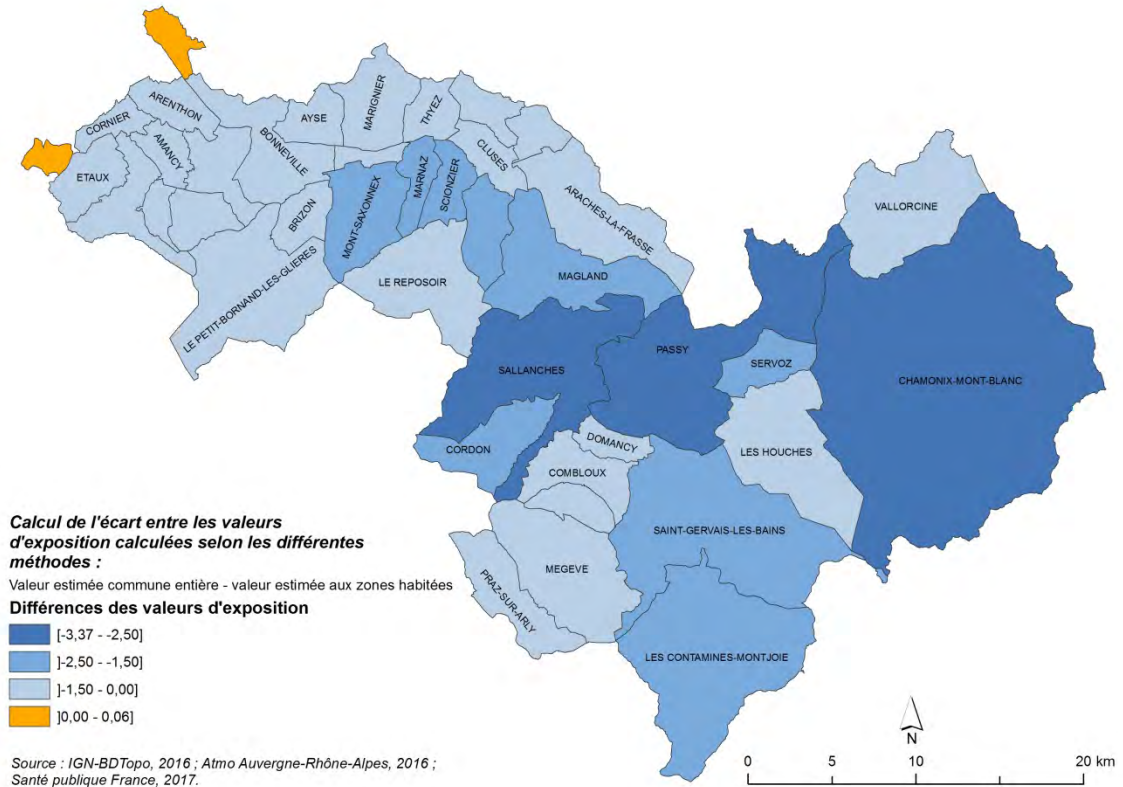
I FIGURE 12 I

Exposition annuelle moyenne aux PM_{2,5} (2012-2013) pour l'ensemble de la commune



I FIGURE 13 I

Différence entre les valeurs estimées d'exposition annuelle moyenne aux $PM_{2,5}$ (2012-2013) en considérant les surfaces habitées de la commune, versus toute la surface de la commune



I TABLEAU 3 I

Description de l'exposition annuelle moyenne aux PM_{2,5} (2012-2013) estimée selon les différentes méthodes de calcul à la commune

	Estimation sur les zones habitées de la commune	Estimation sur les zones habitées pondérées par la population	Estimation sur l'ensemble de la commune
Concentration annuelle moyenne dans la commune la moins exposée (µg/m ³)	4,9	4,9	3,8
Percentile 5 de la distribution des concentrations à la commune (µg/m ³)	6,4	6,6	4,5
Médiane distribution des concentrations à la commune (µg/m ³)	10,2	10,2	9,0
Moyenne des concentrations des communes de la zone (µg/m ³)	10,1	10,3	9,0
Concentration annuelle moyenne dans la commune la plus exposée (µg/m ³)	14,0	14,1	14,0
Nombre de communes avec une concentration annuelle supérieure à 10 µg/m ³	21	21	19
Population vivant dans les communes avec une concentration annuelle supérieure à 10 µg/m ³	105 210	105 210	88 503
% de la population de la zone d'étude vivant dans les communes avec une concentration annuelle supérieure à 10 µg/m ³	68	68	57

Influence de l'estimation de l'exposition sur les estimations des bénéfices attendus

Le poids de la pollution de l'air, et les bénéfices sanitaires attendus d'amélioration de la qualité de l'air sont d'ordres de grandeur comparable lorsqu'on utilise les méthodes alternatives d'estimation de l'exposition. La pondération sur la population des zones habitées conduit à des estimations très proches de celles obtenues en utilisant les zones habitées sans pondération sur la densité de population (Tableau 4).

Le calcul à partir de l'ensemble de la commune estime des bénéfices sanitaires plus faibles, puisque sous cette hypothèse les niveaux d'exposition aux PM_{2,5} sont plus faibles (Tableau 5).

I TABLEAU 4 I

Poids total des PM_{2,5} sur la mortalité et l'espérance de vie, et bénéfices attendus sous différents scénarios d'amélioration de la qualité de l'air, exposition sur les zones habitées de la commune, pondérée par la densité de population [Intervalle de confiance à 95%]

	Poids total de la pollution	Bénéfices attendus d'une baisse des concentrations annuelles		
		Scénario baisse de 10%	Scénario baisse de 30%	Respect de la valeur guide de l'OMS
Nombre annuel de décès évitables	90 [33 :140]	16 [6 :25]	46 [16 :73]	26 [9 :40]
% de la mortalité annuelle	8,9%	1,6%	4,6%	2,6%
Gain d'espérance de vie à 30 ans (mois) (médiane)	10 [3 :16]	2 [1 :3]	5 [2 :8]	<1
Nombre total d'années de vie gagnées	2 060 [714 :3312]	334 [117 :534]	1 005 [350 :1 610]	599 [209 :959]

I TABLEAU 5 I

Poids total des PM_{2,5} sur la mortalité et l'espérance de vie, et bénéfices attendus sous différents scénarios d'amélioration de la qualité de l'air, exposition sur l'ensemble de la commune [Intervalle de confiance à 95%]

	Poids total de la pollution	Bénéfices attendus d'une baisse des concentrations annuelles		
		Scénario baisse de 10%	Scénario baisse de 30%	Respect de la valeur guide de l'OMS
Nombre annuel de décès évitables	64 [23 :99]	13 [5 :20]	38 [13 :60]	14 [5 :22]
% de la mortalité annuelle	6,3%	1,3%	3,8%	1,4%
Gain d'espérance de vie à 30 ans (mois) (médiane)	8 [3 :12]	2 [1 :2]	5 [2 :7]	<1
Nombre total d'années de vie gagnées	1 505 [523 :2416]	278 [97 :445]	837 [291 :1 339]	322 [112 :515]

Influence du RR sur l'estimation des décès et perte d'espérance de vie attribuable à la pollution dans la vallée de l'Arve

L'utilisation du RR recommandé par l'OMS et issu d'une méta-analyse internationale conduit à estimer que 4 % de la mortalité dans la vallée de l'Arve est attribuable aux PM_{2,5}, soit 36 décès par an et 801 années d'espérance de vie perdue (Tableau 6). De la même manière, les bénéfices attendus sous les différents scénarios sont logiquement plus faibles avec le RR recommandé par l'OMS, ce RR étant approximativement deux fois plus faible (Tableau 7).

I TABLEAU 6 I

Influence du RR sur l'estimation des décès et perte d'espérance de vie attribuable à la pollution dans la vallée de l'Arve - Exposition sur les zones habitées de la commune [Intervalle de confiance à 95 %]

	RR 1.15 [1.05 :1.25]	RR 1.06 [1.04 :1.08]
Nombre annuel de décès attribuables à la pollution anthropique	85 [31 :132]	36 [25 :48]
% de la mortalité annuelle	8,4%	3,6 %
Perte d'espérance de vie à 30 ans (mois) (médiane)	9 [3 :15]	4 [3 :5]
Nombre total d'années de vie perdues	1 779 [616 :2 863]	801 [538 :1 059]

I TABLEAU 7 I

Influence du RR sur l'estimation des décès et perte d'espérance de vie évitables sous différents scénarios - Exposition sur les zones habitées de la commune [Intervalle de confiance à 95 %]

	Scénario OMS		Scénario baisse de 30%	
	RR 1.15 [1.05 :1.25]	RR 1.06 [1.04 :1.08]	RR 1.15 [1.05 :1.25]	RR 1.06 [1.04 :1.08]
Nombre annuel de décès évitables	21 [7 :33]	9 [6 :12]	45 [16 :70]	19 [13 :25]
% de la mortalité annuelle	2,1%	0,9%	4,6%	1,9%
Gain d'espérance de vie à 30 ans (mois) (médiane)	<1	<1	5 [2 :8]	2 [1 :3]
Nombre total d'années de vie gagnées	492 [172 :788]	205 [138 :271]	1 005 [350 :1 610]	402 [271 :532]

4. DISCUSSION

4.1. Synthèse des impacts sanitaires et bénéfiques attendus d'une amélioration de la qualité de l'air dans la vallée de l'Arve

L'évaluation quantitative des impacts sanitaires des effets à long-terme de la pollution particulaire, fondée sur des données environnementales à fine échelle, et prenant en compte les spécificités topographiques de la zone d'étude, estime que 8 % de la mortalité de la vallée de l'Arve, soit 85 décès par an, serait attribuable aux particules fines $PM_{2,5}$, et qu'en moyenne 9 mois d'espérance de vie seraient perdues par les habitants de la vallée.

Selon notre étude, on estime que 68 % de la population de la vallée de l'Arve serait exposée à des niveaux dépassant la valeur recommandée par l'OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle). Respecter cette valeur permettrait de diminuer la mortalité annuelle de 2 %, soit 21 décès par an, et de gagner en moyenne 2 mois d'espérance de vie à 30 ans.

Le scénario de respect de la valeur guide de l'OMS présente toutefois plusieurs limites :

- il compare une exposition modélisée, à une valeur absolue. Certaines communes sont probablement classées avec une exposition inférieure à la valeur guide de l'OMS à cause d'une sous-estimation des concentrations de $PM_{2,5}$ par le modèle.
- il ignore que la relation entre $PM_{2,5}$ et mortalité est log-linéaire sans seuil, et que des impacts des particules fines sur la mortalité sont observés à des valeurs inférieures à la valeur guide de l'OMS [10]. Même en-dessous de cette valeur, des bénéfices sanitaires sont donc associés à une amélioration de la qualité de l'air.

Les scénarios consistant à appliquer une baisse relative des niveaux de concentration sont donc plus pertinents, et permettent de quantifier les bénéfices attendus d'une amélioration de la qualité de l'air dans l'ensemble des communes, sans être limités par un seuil arbitraire. Une baisse de 30 % des concentrations annuelles devrait permettre de diminuer la mortalité de 4 %, soit 45 décès évités par an, et 967 années de vie gagnées ou en moyenne 5 mois d'espérance de vie gagnée pour la population.

4.2. Incertitude associée aux résultats

Toute EQIS est soumise à des incertitudes associées aux données environnementales, à l'estimation de l'exposition, et aux choix des RR utilisés. Quand cela était possible, des analyses de sensibilité quantitatives ont été réalisées.

Incertaince associée à l'estimation de l'exposition

L'incertitude sur l'estimation de l'exposition est liée à l'incertitude sur la modélisation des concentrations, et à l'incertitude sur la manière dont les concentrations modélisées sur une maille reflètent l'exposition de la population.

La modélisation de la qualité de l'air dans la vallée de l'Arve est particulièrement complexe à mettre en œuvre en raison du relief très marqué et de la météorologie spécifique des zones alpines. De plus, l'absence de mesures permanentes en $PM_{2,5}$ n'a pas permis de caler les données du modèle aux données mesurées pour 2012 et 2013. Pour ces années, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ne disposait pas encore de points de mesure permanents des $PM_{2,5}$ dans la vallée de l'Arve. Même si les concentrations spatialisées estimées par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes pour les années 2012 et 2013 sont issues de travaux ayant été menés courant

2016, tenant compte de l'amélioration des techniques de modélisation et d'inventorisation des émissions et de la connaissance du territoire acquise depuis ces années d'étude, l'impossibilité de prendre en compte de mesures de terrain introduit une incertitude supplémentaire dans la chaîne de simulation de la qualité de l'air. Cette incertitude peut de plus être variable dans l'espace.

Les estimations des concentrations annuelles de $PM_{2,5}$ utilisées dans cette EQIS sont donc associées à une incertitude qu'il n'a pas été possible de quantifier. A titre indicatif, pour l'année 2016, la concentration annuelle moyenne de $PM_{2,5}$ calculée à partir des mesures journalières de la station de Passy étaient de $16,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour les années 2012-2013, la moyenne des concentrations annuelles modélisées sur l'ensemble des mailles couvrant la commune de Passy était de $6,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $9,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en ne considérant que les zones habitées de la commune. Ces données ne sont pas directement comparables (concentrations mesurées en un point vs concentrations modélisées agrégées sur la commune, et périodes différentes), mais vont dans le sens d'une sous-estimation possible des valeurs modélisées.

Concernant le passage des concentrations à la maille à une exposition à la commune, le choix a été fait de se concentrer sur les zones habitées des communes, en faisant l'hypothèse que les habitants sont majoritairement exposés dans leur commune de résidence, et compte-tenu de la géographie particulière, principalement dans les zones habitées de ces communes et non dans les espaces naturels. Les méthodes alternatives d'estimation de l'exposition montrent que, dans le cas des communes très étendues incluant de larges zones naturelles, l'estimation de l'exposition est plus élevée quand elle n'est calculée que sur les zones habitées plutôt que sur l'ensemble de la commune.

On considère que l'analyse calculant l'exposition sur les zones habitées de la commune est probablement la plus réaliste, bien qu'il ne soit pas possible de mesurer les biais induits par les différentes méthodes d'estimation de l'exposition.

Ainsi, globalement, l'estimation de l'exposition est entachée d'une incertitude qui va probablement dans le sens d'une sous-estimation, en raison de la sous-estimation probable des concentrations modélisées. Cette sous-estimation va dans le sens d'une sous-estimation des impacts sanitaires associés. Les répercussions de la sous-estimation probable des concentrations, et donc des expositions, sont plus importantes dans le cas du scénario OMS qui considère une valeur fixe ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) comme référence. L'influence de la sous-estimation est plus faible dans les autres scénarios qui considèrent des références relatives.

Il faut également souligner que l'incertitude globale associée à l'estimation des concentrations et des expositions est probablement variable dans l'espace, compte-tenu du caractère très hétérogène de la zone d'étude. Notre étude met en évidence une exposition plus importante dans les communes plus urbanisées et plus peuplées que dans les communes recouvrant de larges espaces naturels. Ces différences géographiques se retrouvent également en termes d'impacts. Les différences entre les communes doivent cependant être interprétées avec prudence compte-tenu des incertitudes. L'incertitude la plus importante est ici encore attendue pour le scénario de comparaison des résultats à la valeur guide de l'OMS.

Incertitude associée au choix du RR

Cette EQIS a utilisé un RR issu d'une méta-analyse d'études de cohortes récentes incluant des populations européennes et françaises. Ce RR avait été utilisé pour l'EQIS estimant l'impact de la pollution de l'air en France métropolitaine, et est considéré par Santé publique France comme le meilleur choix actuellement disponible pour mener des EQIS en France [13, 24].

Des RR alternatifs sont possibles, comme par exemple le RR recommandé par l’OMS pour réaliser des EQIS [9]. Ce RR étant approximativement deux fois plus faible, il conduit à des impacts sanitaires également approximativement deux fois plus faibles, ainsi qu’illustré par l’analyse de sensibilité. Le RR recommandé par l’OMS est issu d’une méta-analyse très influencée par des données nord-américaines [1]. L’utilisation d’un RR construit sur des données européennes et françaises apparaît plus pertinente dans le contexte français.

Une deuxième source d’incertitude concernant le RR concerne sa transposabilité à un contexte non-urbain, le RR utilisé découlant d’études épidémiologiques menées sur des zones et pour des populations majoritairement urbaines. Leur transposition au contexte de la vallée de l’Arve introduit donc une incertitude qu’il n’est pas possible de quantifier. Toutefois, la majorité de la population de la vallée se trouve dans des unités urbaines, avec une contribution minoritaire des sources industrielles et agricoles, ce qui les rend globalement comparables aux populations étudiées dans les cohortes fournissant le RR.

Une spécificité locale est la part importante du résidentiel et du chauffage au bois dans la contribution des émissions de $PM_{2,5}$, sans que l’on puisse quantifier l’incertitude que cette spécificité pourrait avoir sur l’estimation du RR. D’après l’OMS, les connaissances existantes ne permettent pas de conclure à l’existence d’une différence entre la toxicité des particules fines issues de combustion de la biomasse et celles de particules issues des autres sources urbaines [10].

Évaluation globale de l’incertitude

Finalement, l’analyse qualitative des incertitudes va plutôt dans le sens d’une sous-estimation des impacts sanitaires, cette EQIS fournissant alors une estimation *a minima* de l’impact. Les résultats doivent être considérés comme des ordres de grandeur des impacts de la pollution de l’air et bénéfiques sanitaires qu’on peut au moins escompter dans le cas d’une amélioration de la qualité de l’air.

Choix de se restreindre à l’analyse de l’exposition chronique aux $PM_{2,5}$ et de la mortalité totale

Le choix de se restreindre aux effets à long-terme résultant d’une exposition chronique aux $PM_{2,5}$ a été motivé par la qualité des relations exposition-risque disponibles pour ce couple polluant-effet, qui est aujourd’hui celui pour lequel les EQIS sont plus robustes [9]. Concernant les impacts à court-terme sur la mortalité, ils sont très inférieurs aux impacts à long-terme, et en partie contenu dans ces impacts à court-terme. En effet, la pollution de l’air peut à la fois contribuer à développer une maladie chronique (effets à long-terme) et décompenser cette maladie (effets à court-terme). La réalisation d’une EQIS sur les effets à court-terme en termes de mortalité n’est donc pas recommandée par l’OMS, compte-tenu du recouvrement partiel avec les effets à long-terme.

Les effets à court-terme peuvent s’estimer en termes de morbidité, notamment d’hospitalisations. Cette option présentait toutefois des limites méthodologiques dans un contexte de pollution très hétérogène comme celui de la vallée de l’Arve, puisqu’il n’était pas possible avec les données disponibles de rattacher une hospitalisation à une commune. Seul un calcul agrégé sur toute la zone aurait été possible, mais peu informatif compte-tenu des variations d’exposition entre les communes.

Concernant d’autres polluants, la possibilité de réaliser une EQIS sur la contribution de l’ozone estivale à la mortalité respiratoire est limitée par le très faible nombre d’études épidémiologiques proposant des risques relatifs. L’OMS ne recommande donc pas cette EQIS [9].

De même, la réalisation d'EQIS étudiant le lien entre exposition chronique au NO₂ et mortalité totale est jugée être associée à une incertitude plus importante que les EQIS portant sur les PM_{2,5}. L'OMS recommande de ne réaliser ces EQIS que pour les concentrations dépassant 20 µg/m³. La figure 14 illustre l'hétérogénéité géographique des concentrations de NO₂ modélisées sur une maille de 10m, pour les années 2012-2013. Les concentrations sont élevées à proximité des axes routiers principaux mais seul 0,3 % de la population est exposée à des valeurs supérieures à 40 µg/m³ qui est la valeur limite réglementaire et aussi la valeur guide de l'OMS. À partir des mailles de 10 m, environ 55 % de la population de la zone d'étude est estimée être exposée à des concentrations supérieures à 20 µg/m³ (dont 50 % entre 20 et 30 µg/m³ et 5 % entre 30 et 40 µg/m³). L'estimation d'une exposition à la commune, nécessaire pour réaliser une EQIS, donnerait des concentrations plus faibles.

Enfin, en l'état actuel des connaissances, l'estimation de l'impact du NO₂ sur la mortalité est associée à une incertitude plus grande que l'estimation de l'impact des PM_{2,5}. Une partie de l'impact attribuable aux PM_{2,5} et également attribuable au NO₂, avec un risque de double comptage pouvant atteindre 33 % [9].

Ainsi, du fait qu'une EQIS ne peut être réalisée que pour des niveaux supérieurs à 20 µg/m³, et du risque de double comptage avec les impacts des PM_{2,5}, le choix a été fait de ne pas réaliser d'EQIS sur le NO₂. Ceci ne signifie pas pour autant que le NO₂ n'a aucun impact sur la santé de la population de la zone d'étude. Compte-tenu des niveaux modélisés (Figure 13) et du RR, on peut qualitativement estimer que cet impact est très inférieur à celui des particules fines.

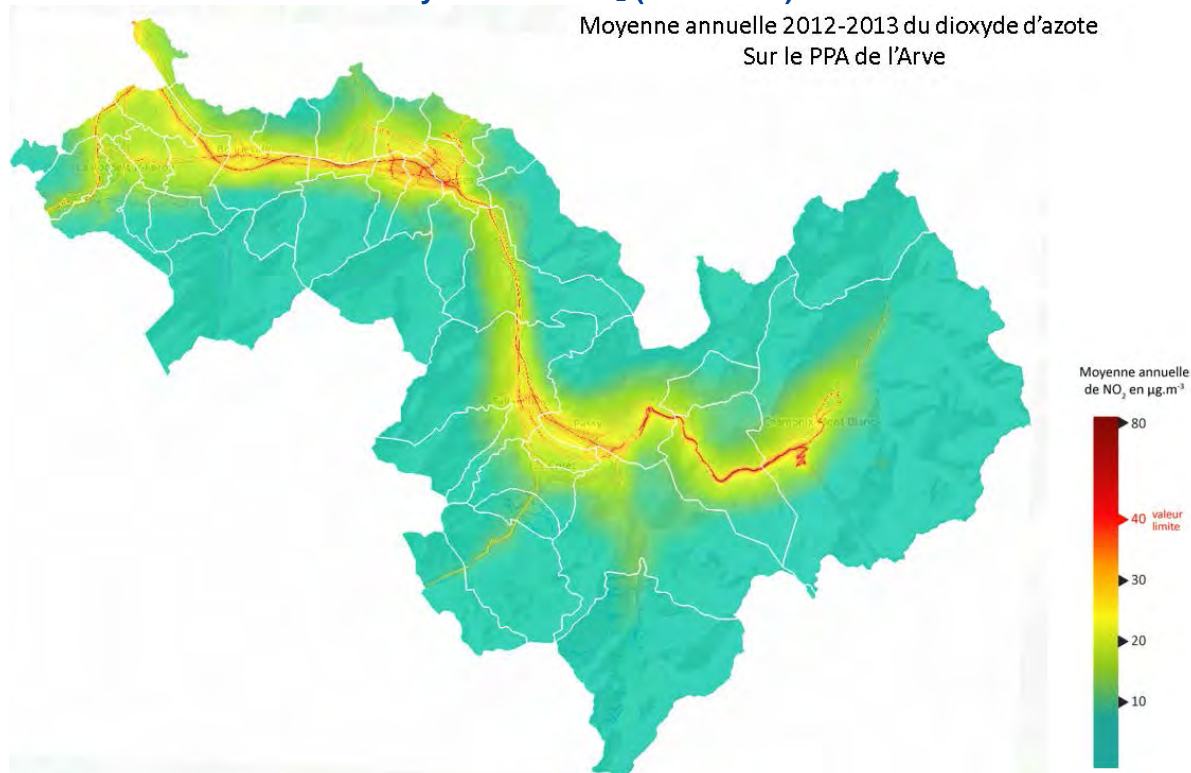
Une EQIS portant sur les impacts de l'exposition chronique au NO₂ aurait donc été entachée d'une incertitude importante, et n'aurait pas modifié l'ordre de grandeur de l'impact associé aux PM_{2,5}.

Des EQIS n'ont pas été réalisées sur d'autres polluants d'intérêt (ex HAP) car les RR nécessaires ne sont pas disponibles à ce jour.

De manière plus globale, les PM_{2,5} étant considérées comme un traceur de la pollution de l'air, il faut une fois encore considérer les estimations de gain en mortalité et espérance de vie donnent des ordres de grandeurs de ce qui est atteignable en améliorant la pollution de l'air dans son ensemble.

I FIGURE 14 I

Concentrations annuelles moyennes de NO₂ (2012-2013) sur la maille de 10m



4.4. Comparaison avec d'autres EQIS

La comparaison des résultats de différents EQIS doit prendre en compte les différences méthodologiques introduites par le type de données environnementales et sanitaires utilisées, le choix du RR, des scénarios, ainsi que la zone et la période d'étude considérée.

L'EQIS menée sur la France continentale est la plus proche méthodologiquement de cette étude spécifique à la vallée de l'Arve, avec toutefois des différences dans les données environnementales utilisées (modèle national sur une maille de 2 km vs modèle régional sur une maille de 10m), dans la méthode d'estimation de l'exposition (restriction aux zones habitées pour la vallée de l'Arve), et pour la période d'étude (2012-2013 vs 2007-2008).

Cette EQIS avait estimé que la pollution de l'air représentait environ 9 % de la mortalité annuelle en France, 7 % dans les communes de moins de 20 000 habitants, 8 % dans les communes de 20 000 à 100 000 habitants, et 13 % dans les communes de plus de 100 000 habitants [13].

L'EQIS de la vallée de l'Arve conclut qu'environ 8 % de la mortalité annuelle est attribuable aux particules fines, un ordre de grandeur cohérent avec l'EQIS nationale. Bien que les différences méthodologiques et les incertitudes limitent la comparaison, les résultats indiquent que l'impact de la pollution de l'air dans la vallée de l'Arve est du même ordre de grandeur que celui retrouvé dans les agglomérations françaises, tout en restant inférieur à ce qui est observé dans les grandes agglomérations les plus polluées de France.

Il faut noter que les résultats des EQIS menées sur les villes de la région, notamment sur Annecy [16], ne peuvent être comparés directement à ceux obtenus pour la vallée de l'Arve, étant donné les importantes différences dans les données environnementales (mesures vs modèle), dans l'estimation de l'exposition (une ou deux stations de mesures agrégées pour estimer l'exposition vs plusieurs mailles de modèle pour une commune), de RR (Méta-RR Escape Gazel-Air/RR recommandé par l'OMS), de scénarios et de périodes d'études. L'EQIS d'Annecy fondée sur des données mesurées concluait que respecter la valeur guide de l'OMS permettrait de diminuer la mortalité de 7 %, soit un bénéfice supérieur à celui estimé dans cette étude. Dans la vallée de l'Arve, l'utilisation de concentrations modélisées conduit probablement à une sous-estimation de l'exposition et des impacts par rapport à ce qui aurait été obtenu en utilisant des données mesurées. De plus, l'hétérogénéité spatio-temporelle de la pollution dans la vallée de l'Arve est également un facteur qui réduit les moyennes annuelles d'exposition dans la zone, contrairement aux agglomérations où la pollution est plus homogène. Il est donc logique de retrouver un impact moindre de la pollution de l'air dans l'EQIS sur la vallée de l'Arve qui porte des concentrations modélisées dans un contexte d'hétérogénéité de la pollution, que dans une EQIS sur une agglomération qui utilise des concentrations mesurées dans un contexte de pollution plus homogène.

4.5. Implication en termes de santé publique

Cette EQIS innovante menée sur la vallée de l'Arve pour répondre aux interrogations des parties prenantes a mis en évidence un impact sanitaire important. L'exposition chronique aux particules fines représenterait ainsi 8 % de la mortalité dans la vallée de l'Arve. L'impact de la pollution de l'air dans la vallée de l'Arve se rapprocherait ainsi de celui rencontré dans les agglomérations françaises, sans atteindre la situation des grandes agglomérations les plus polluées.

Il s'agit là d'un ordre de grandeur, compte-tenu des incertitudes identifiées et notamment associées à la complexité de la modélisation des concentrations dans la vallée et à l'estimation de l'exposition. Ces incertitudes ne remettent pas en cause le fait que la pollution de l'air a un impact significatif sur la santé dans la vallée de l'Arve et que des actions améliorant la qualité de l'air se traduiraient par des bénéfices sanitaires importants. Compte-tenu des hypothèses faites, des incertitudes identifiées, mais également du nombre croissants d'études indiquant divers effets sanitaires de la pollution de l'air, les résultats de cette étude fournissent très probablement une estimation conservatrice et *a minima* de l'impact réel de la pollution de l'air sur la santé des habitants de la vallée de l'Arve. Ces résultats montrent qu'une baisse de 30 % des concentrations annuelles de PM_{2,5} permettrait ainsi de diminuer la mortalité d'au moins 4 %, soit au moins 45 décès évités par an, et 967 années de vie gagnées ou en moyenne 5 mois d'espérance de vie gagnée pour la population.

Cette étude montre également que la pollution de l'air a un impact probablement plus important sur les habitants résidant dans les fonds de la vallée et, tout en restant dans la marge d'incertitude, dans la partie ouest de la vallée de l'Arve dans l'axe Cluses-Bonneville. Ce différentiel peut apparaître logique puisqu'il s'agit des zones les plus urbanisées et les plus peuplées. A contrario, ces résultats ne signifient pas que la pollution de l'air n'a pas d'impact dans les autres communes. D'une part, ces résultats sont à interpréter avec prudence à l'échelle des communes compte tenu de la complexité de la modélisation des concentrations et de l'incertitude qui en découle que l'on ne peut estimer. D'autre part, l'ensemble des études épidémiologiques portant sur les effets à long-terme de l'exposition aux particules fines concluent à une relation log-linéaire sans seuil, i.e. il n'existe pas de concentrations en-deçà de laquelle la pollution de l'air n'aurait pas d'effet. Une amélioration de la qualité de l'air se traduirait donc par des bénéfices sanitaires y compris pour les populations les moins exposées.

La mise en évidence par les données de modélisation disponibles pour 2012-2013 d'une pollution a priori plus importante dans la partie ouest de la vallée peut paraître surprenante par rapport aux dernières données de modélisation des $PM_{2,5}$ et au ressenti de la population qui s'interroge particulièrement sur les niveaux de pollution de la zone centrale de la vallée où est située la station de mesure de Passy. Cette dernière cristallise l'attention lorsque les mesures de PM_{10} dépassent les seuils d'information et de recommandations, et les seuils d'alerte. Elle est à l'origine du déclenchement de procédures préfectorales. Ceci souligne d'une part, la difficulté d'évaluer l'exposition de la population dans une zone très hétérogène dans l'espace et dans le temps et d'autre part, l'intérêt complémentaire de la modélisation qui permet d'estimer l'exposition sur l'ensemble de la zone et pas uniquement à proximité des stations de mesures.

Une des spécificités de la vallée de l'Arve est également de connaître des variations temporelles des concentrations de polluants importantes, avec des concentrations bien plus élevées en hiver que le reste de l'année. Les concentrations sont plus élevées en hiver du fait des sources (chauffage) et des conditions météorologiques défavorables en hiver (inversion de température). Ces variations temporelles sont plus marquées que dans d'autres territoires, et notamment par rapport aux grandes agglomérations de la région. Les niveaux plus faibles en été conduisent à avoir une exposition annuelle moyenne moins importante que celle qui pourrait être attendue en se focalisant sur les épisodes de pollution hivernaux dans la vallée.

Il faut noter que cette EQIS ne s'est intéressée qu'aux effets d'une exposition chronique à la pollution de l'air, partant du principe que ces effets sont un ordre de grandeur plus élevé que les effets à court-terme suivant une exposition aiguë. Cela ne signifie pas pour autant l'absence d'impact des effets à court-terme. De plus, les personnes les plus sensibles aux effets à court-terme ne sont pas forcément celles qui souffriront le plus des conséquences d'une exposition à long-terme. Si les efforts doivent avant tout porter sur l'amélioration des niveaux de fond, des mesures spécifiques pendant les pics de pollution peuvent être nécessaires pour protéger les personnes les plus sensibles des effets à court-terme.

La variabilité temporelle incite à travailler en priorité à la réduction des sources hivernales. Dans la littérature internationale, quelques études se sont attachées à documenter les bénéfices sanitaires observés suite à des interventions visant à améliorer la qualité de l'air, dont certaines dans des contextes s'approchant de celui de la vallée de l'Arve. Aux États-Unis, une campagne de remplacement des poêles à bois par des modèles plus performants dans une région montagneuse rurale du Montana en 2005 a permis de diminuer les concentrations journalières moyennes de $PM_{2,5}$ et de mettre en évidence une diminution de l'incidence de plusieurs symptômes respiratoires chez les enfants [25]. En 2001, en Australie, une campagne d'éducation, de renforcement des réglementations et de remplacements des appareils de chauffage dans une vallée encaissée a permis de réduire les concentrations annuelles moyennes de 13 % entre 2001 et 2007 (de 39 % pour les concentrations hivernales). Durant la même période, sur toute l'année, la mortalité toutes causes a significativement diminué chez les hommes d'environ 11 %. Chez les femmes, la baisse n'est pas significatif, ce qui peut être dû à un manque de puissance statistique [26]. Ces deux exemples illustrent que des actions sur les sources liées au chauffage résidentiel peuvent avoir des répercussions sanitaires significatives, rapides et mesurables.

Finalement, cette EQIS a permis d'affiner les estimations de Santé publique France de mai 2015 en précisant que l'impact sanitaire de la pollution de l'air dans la vallée de l'Arve était certes du même ordre que dans les agglomérations françaises de taille moyenne mais en deçà des villes les plus polluées.

Cette EQIS confirme la position portée par Santé publique France dans sa réponse à la première saisine de l'ARS en mai 2015, sur l'intérêt de mettre en œuvre des actions pour

améliorer la qualité de l'air dans la vallée de l'Arve au bénéfice de l'ensemble de sa population en ciblant les actions pour réduire la pollution en hiver qui pèse lourd dans l'exposition annuelle moyenne, et en sensibilisant les populations à cette problématique.

Références bibliographiques

- [1] Hoek G, Krishnan RM, Beelen R, Peters A, Ostro B, Brunekreef B, *et al.* *Long-term air pollution exposure and cardio- respiratory mortality: a review.* Environ Health. 2013;12(1):43.
- [2] Pope Iii CA, Burnett RT, Thurston GD, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, *et al.* *Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution: Epidemiological Evidence of General Pathophysiological Pathways of Disease.* Circulation. 2004;109(1):71-7.
- [3] Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA, Brook JR, Bhatnagar A, Diez-Roux AV, *et al.* *Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the american heart association.* Circulation. 2010;121(21):2331-78.
- [4] Hoek G, Raaschou-Nielsen O. *Impact of fine particles in ambient air on lung cancer.* Chin J Cancer. 2014;33(4):197-203.
- [5] Centre international de recherche contre le cancer. Communiqué de presse n°221 *La pollution atmosphérique une des premières causes environnementales de décès par cancer, selon le CIRC.* 2013.
- [6] Beelen R, Raaschou-Nielsen O, Stafoggia M, Andersen ZJ, Weinmayr G, Hoffmann B, *et al.* *Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project.* Lancet. 2014;383(9919):785-95.
- [7] Pope Iii CA, Dockery DW. *Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect.* Journal of the Air and Waste Management Association. 2006;56(6):709-42.
- [8] World Health O. *Review of evidence on health aspects of air pollution - Revihaap project.* Copenhagen, Danemark: World Health Organisation, 2013.
- [9] Europe WHORof. *Health risks of air pollution in Europe - Hrapie project - Recommendations for concentration-response functions for cost-benefits analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide.* Copenhagen, Danemark: WHO Regional office for Europe, 2013.
- [10] Organisation mondiale de la santé. *Review of evidence on health aspects of air pollution - Revihaap project technical report.* Copenhagen, Danemark: Organisation mondiale de la santé, 2013.
- [11] Pascal M, Falq G, Wagner V, Chatignoux E, Corso M, Blanchard M, *et al.* *Short-term impacts of particulate matter (PM₁₀, PM_{10-2.5}, PM_{2.5}) on mortality in nine French cities.* Atmospheric Environment. 2014;95:175-84.
- [12] Pascal M, Corso M, Chanel O, Declercq C, Badaloni C, Cesaroni G, *et al.* *Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities: results of the Aphemom project.* SciTotalEnviron. 2013;449:390-400.
- [13] Pascal M, De Crouy Chanel P, Corso M, Medina S, Wagner V, Gorla S, *et al.* *Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité, en France continentale et analyse des gains en santé, de plusieurs scénarii de réduction de la pollution atmosphérique.* Saint-Maurice: Santé publique France, 2016.
- [14] Haute-Savoie Pdl. *Plan de protection de l'atmosphère de la vallée de l'Arve.* 2012.

- [15] Ung A, Blanchard M, Gault G, Guillois Y, Pascal L, Pascal M, *et al.* *Évaluation quantitative d'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine en France : bilan des études locales et retours des parties prenantes.* Saint-Maurice: InVS, 2016.
- [16] Yvon JM, Huchet KC. *Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine dans l'agglomération d'Annecy, 2009-2011.* Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire, 2015.
- [17] Medina S, Ballester F, Chanel O, Declercq C, Pascal M. *Quantifying the health impacts of outdoor air pollution: useful estimations for public health action.* J Epidemiol Community Health. 2013;67(6):480-3.
- [18] Ung A, Pascal M, Corso M, Chanel O, Declercq C. *Comment réaliser une évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine ?* Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire, 2013.
- [19] Bentayeb M, Wagner V, Stempfelet M, Zins M, Goldberg M, Pascal M, *et al.* *Association between long-term exposure to air pollution and mortality in France: A 25-year follow-up study.* Environ Int. 2015;85:5-14.
- [20] Hoek G, Fischer P, Van Den Brandt P, Goldbohm S, Brunekreef B. *Estimation of long-term average exposure to outdoor air pollution for a cohort study on mortality.* J ExpoAnalEnviron Epidemiol. 2001;11(6):459-69.
- [21] Cesaroni G, Badaloni C, Gariazzo C, Stafoggia M, Sozzi R, Davoli M, *et al.* *Long-term exposure to urban air pollution and mortality in a cohort of more than a million adults in Rome.* Environmental Health Perspectives. 2013;121(3):324-31.
- [22] Beelen R, Hoek G, van den Brandt PA, Goldbohm RA, Fischer P, Schouten LJ, *et al.* *Long-term effects of traffic-related air pollution on mortality in a Dutch cohort (NLCS-AIR study).* Environ Health Perspect. 2008;116(2):196-202.
- [23] Carey IM, Atkinson RW, Kent AJ, Van Staa T, Cook DG, Anderson HR. *Mortality associations with long-term exposure to outdoor air pollution in a national english cohort.* American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. 2013;187(11):1226-33.
- [24] Pascal M, de Crouy Chanel P, Wagner V, Corso M, Tillier C, Bentayeb M, *et al.* *The mortality impacts of fine particles in France.* Science of The Total Environment. 2016.
- [25] Noonan CW, Ward TJ, Navidi W, Sheppard L. *A rural community intervention targeting biomass combustion sources: effects on air quality and reporting of children's respiratory outcomes.* Occupational and Environmental Medicine. 2012;69(5):354.
- [26] Johnston FH, Hanigan IC, Henderson SB, Morgan GG. *Evaluation of interventions to reduce air pollution from biomass smoke on mortality in Launceston, Australia: retrospective analysis of daily mortality, 1994-2007.* BMJ : British Medical Journal. 2013;346.

Annexe - Méthode de calcul de l'impact de la pollution sur l'espérance de vie à 30 ans

Les données de mortalité et de population sont recueillies par classes d'âge de 5 ans à partir de 30 ans.

La table de mortalité abrégée est construite selon une méthode classique décrite ci-dessous.

Le taux de mortalité dans chaque classe d'âge noté ${}_nM_x$ est calculé selon :

où
$${}_nM_x = \frac{{}_nD_x}{{}_nN_x * Y}$$

Y est le nombre d'années avec des données de santé utilisées pour le calcul de l'EQIS

x est l'âge de début de chaque classe

n est l'étendue de chaque classe, ici 5 ans

${}_nN_x$ est la population totale observée dans chaque classe d'âge pour la période d'étude

${}_nD_x$ est le nombre de décès observés dans chaque classe d'âge sommés sur les Y années.

La somme de ${}_nD_x$ sur toutes les classes d'âge donne le nombre total de décès observés.

On calcule ensuite la probabilité de décès dans chaque classe d'âge, définie comme

$${}_nq_x = \frac{n \times {}_nM_x}{1 + (n - n_{ax}) \times {}_nM_x}$$

où

n_{ax} est le nombre moyen d'années vécues dans la classe d'âge par les personnes décédées dans cette classe d'âge, estimé par $n/2$

Pour la dernière classe d'âge (par ex ≥ 85 ans), ${}_nq_x = 1$, puisque toutes les personnes de cette classes vont mourir un jour.

L'espérance de vie à 30 ans est calculée à partir d'une cohorte hypothétique de 100 000 personnes âgées de 30 ans.

Si l_x est le nombre de personnes vivantes dans une classe d'âge, le nombre de personnes vivantes dans la classe d'âge suivantes est défini par :

$$l_{x+n} = l_x (1 - {}_nq_x)$$

et le nombre de personnes décédées dans la classe d'âge ${}_nd_x$ est défini par :

$${}_nd_x = l_x * {}_nq_x$$

Pour la première classe d'âge, $l_x = 100\ 000$

Dans chaque classe d'âge sauf la dernière, on distingue les personnes qui survivront à cette classe d'âge et les personnes qui décéderont dans cette classe d'âge. Le nombre de personnes-années de chaque classe d'âge est alors approximé par :

$${}_nL_x = n * l_{x+n} + n_a * d_x$$

Pour la dernière classe d'âge :

$${}_nL_x = \frac{l_x}{M_x}$$

T_x est le nombre de personnes années dans la cohorte hypothétique, qui vivront après avoir atteint l'âge x

$$T_x = T_{x+n} + {}_nL_x$$

e_{30} est l'espérance de vie à 30 ans calculée selon

$$e_{30} = \frac{T_{30}}{l_{30}}$$

On calcule de la même manière une table de mortalité abrégée à partir du nombre de décès qui serait observés dans chaque classe d'âge si la pollution de l'air était différente, calculés selon :

$${}_nD_x^{impacté} = {}_nD_x * e^{-\Delta x * \beta}$$

où

Δx est la baisse du niveau de pollution.

β est la pente de la relation exposition – risque. Pour un RR exprimé pour une augmentation de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

$$\beta = \frac{\ln(RR)}{10}$$

Le gain en espérance de vie à 30 ans est alors calculé comme la différence entre l'espérance de vie obtenue à partir de la mortalité observée, et celle obtenue à partir de la mortalité qui serait observée si la pollution était différente :

$$G = e_{30}^{impacté} - e_{30}$$

Et le nombre de décès évité chaque année est la différence entre la somme de ${}_nD_x$ sur toutes les classes d'âge et la somme de ${}_nD_x^{impacté}$ sur toutes les classes d'âges, rapportée aux nombres d'années utilisées.