

Novembre
2018

QAMECS

QUALITE DE L'AIR DANS LA METROPOLE GRENOBLOISE

Evaluation de l'Environnement,
de la Santé et des coûts associés

RAPPORT SCIENTIFIQUE INTERMEDIAIRE



En partenariat avec :



AUTEURS

Stephan GABET (Inserm – IAB)
Jean-Luc JAFFREZO (CNRS – IGE)
Sandrine MATHY (CNRS – GAEL)
Emmanuel PRADOS (CNRS – Inria)
Camille RIEUX (Atmo AuRA)
Gaëlle UZU (CNRS – IGE)

Rémy SLAMA

Coordinateur scientifique du projet QAMECS
Equipe d'Epidémiologie environnementale appliquée à la reproduction et aux maladies respiratoires
Département Prévention et thérapie des maladies chroniques
Institut pour l'Avancée des Biosciences (IAB)
Inserm-CNRS-Université Grenoble-Alpes U1209
Grenoble

CITATION DE CE RAPPORT

Stephan GABET, Jean-Luc JAFFREZO, Sandrine MATHY, Emmanuel PRADOS, Camille RIEUX, Gaëlle UZU, Rémy SLAMA, 2018. QAMECS : Qualité de l'Air dans la Métropole grenobloise – Evaluation de l'Environnement, de la Santé et des coûts associés – Rapport scientifique intermédiaire. 52 pages.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1662C0029

Projet de recherche coordonné par : Rémy SLAMA
Coordination technique - ADEME : Nathalie POISSON
Direction/Service : SErvice Qualité de l'Air (SEQA)



SOMMAIRE

RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	6
1. Contexte du projet	7
1.1. Généralités.....	7
1.1.1. Pollution atmosphérique : risques sanitaires	7
1.1.2. Pollution atmosphérique : coût sociétal et économique.....	7
1.2. Pollution atmosphérique dans l'agglomération grenobloise : niveaux et sources.....	8
1.2.1. Des populations globalement exposées à des concentrations élevées	8
1.2.2. Inégalités sociales d'exposition aux polluants atmosphériques.....	8
1.2.3. Principales sources de pollution	9
1.3. Mesures prévues à court terme dans l'agglomération grenobloise	10
1.4. Évaluation de mesures visant à améliorer la qualité de l'air en milieu urbain.....	11
1.5. Région grenobloise : un environnement institutionnel et scientifique favorable	12
2. Objectifs et particularités du projet.....	13
2.1. Objectifs.....	13
2.2. Particularités du projet.....	13
3. Méthodologie.....	14
3.1. Approche s'appuyant sur des objectifs et sur des scénarios théoriques : démarche .	14
3.2. Volet environnement : Pollution atmosphérique	16
3.2.1. Evaluation ex-ante de mesures prévues et de scénarios théoriques	16
3.2.2..... Évaluation avant/après des impacts des actions effectivement mises en œuvre sur la qualité de l'air	16
3.3. Volet santé.....	17
3.3.1. Étude d'impact sanitaire	17
3.3.2. Stratification des impacts selon la défaveur sociale	17
3.4. Trafic	17
3.5. Analyse coût-bénéfices.....	18
3.6. Analyse des données	19
4. Livrables attendus et état d'avancement général.....	20
5. Avancée du projet et principaux résultats obtenus.....	21
5.1. Livrable 1. Evaluation ex-ante : étude d'impact sanitaire de scénarios théoriques et coûts associés	21
5.1.1. Participants	21
5.1.2. Objectifs.....	21
5.1.3. Avancement des travaux	21
5.1.4. Résultats.....	23



5.2.	<i>Livrable 2. Volet mesures d'action : développement de MECANO</i>	29
5.2.1.	Participants	29
5.2.2.	Objectifs	29
5.2.3.	Implémentation	29
5.2.4.	Avancement des travaux	29
5.2.1.	Premiers résultats	30
5.3.	<i>Livrable 3. Scénarios impliquant des actions concernant le trafic et/ou le chauffage au bois</i>	36
5.3.1.	Participants	36
5.3.1.	Objectifs	36
5.3.2.	Avancement des travaux et résultats	36
5.4.	<i>Livrable 4. Volet environnemental : mesures sur 3 sites différenciés de la métropole grenobloise</i>	38
5.4.1.	Participants	38
5.4.2.	Objectifs	38
5.4.3.	Implémentation	38
5.4.4.	Avancement des travaux	38
5.4.5.	Résultats	39
5.5.	<i>Livrable 5. Analyses coûts-bénéfices : recherches méthodologiques</i>	41
5.5.1.	Participants	41
5.5.2.	Objectifs	41
5.5.3.	Implémentation	41
5.5.4.	Avancements des travaux	41
5.6.	<i>Livrable 6. Aide aux décideurs</i>	43
6.	Perspectives pour la suite du projet	44
6.1.	<i>Livrable 1</i>	44
6.2.	<i>Livrable 2</i>	44
6.3.	<i>Livrable 3</i>	44
6.4.	<i>Livrable 4</i>	44
6.5.	<i>Livrable 5</i>	44
6.6.	<i>Livrable 6</i>	44
7.	Valorisation scientifique	45
	Références bibliographiques	46
	Index des tableaux et figures	48
	Sigles et acronymes	49

RÉSUMÉ

La pollution atmosphérique urbaine, et notamment celle due aux particules fines en suspension (ou $PM_{2,5}$), est un des plus importants risques sanitaires pouvant être contrôlés par l'action publique. Plusieurs villes d'Europe, en dehors de France, ont mis en place des zones à faible émission visant à limiter les émissions liées au trafic et parfois au chauffage, une politique que Grenoble commence à suivre. L'exposition aux $PM_{2,5}$ est principalement quantifiée via leur concentration massique, mais d'autres caractéristiques, comme leur composition chimique et leur potentiel oxydant (PO) sont des indicateurs a priori pertinents, tant du point de vue de la caractérisation de l'impact de mesures visant à améliorer la qualité de l'air que de leur effet sanitaire.

Dans ce contexte, le projet QAMECS a comme objectifs principaux : 1) d'identifier et définir des mesures collectives sur le trafic et le chauffage au bois pouvant être mises en œuvre par les collectivités territoriales et permettant d'obtenir une amélioration significative de la qualité de l'air et une réduction de l'impact sanitaire de la pollution particulaire (volet *aide à la décision*) ; 2) à partir des mesures effectivement mises en œuvre dans l'agglomération grenobloise, de caractériser leur impact environnemental (trafic routier, concentrations en particules, carbone élémentaire et organique, lévoglucosan), sanitaire (mortalité, cancer du poumon), économique, aboutissant à une analyse coût-bénéfice complète de ces mesures (volet *suivi de mesures réelles*). L'hétérogénéité de ces impacts en fonction des catégories sociales sera caractérisée.

Le projet associe modélisation, mesures environnementales, étude d'impact sanitaire, dans un consortium de spécialistes de la pollution de l'air (AASQA et chercheurs), économistes, épidémiologistes, modélisateurs, en lien avec les collectivités territoriales. Ce projet interdisciplinaire ambitieux permettra de documenter finement, pour la première fois en France, et de façon unique internationalement par son ampleur, l'efficacité de mesures d'amélioration de la qualité de l'air, et fournira des indications précises pour accroître cette efficacité.



ABSTRACT

Urban atmospheric pollution is one of the main threats to human health that can be to some extent controlled by public action. In Europe, many cities have implemented various types of low emission zones (LEZ, focused on traffic and heating emissions), France being a notable exception. Grenoble urban area has plans ambitious measures in the next years. Although fine particulate matter ($PM_{2.5}$) is usually assessed through its mass concentration, other metrics, such as PM chemical speciation as well as the so far little considered oxidative potential of PM, are worth considering, both in terms of associations with human health and in the context of monitoring of the efficiency of LEZ.

In this context, the QAMECS project aims: 1) to identify collective measures on traffic and wood heating that can be operated by local authorities to obtain a significant air quality improvement and a reduction of health impact of particulate matter pollution (policy decision process supporting) and 2) to characterize impact of air pollution reduction measures implemented in the Grenoble conurbation on environment (road traffic, particulate matter mass concentration, elemental and organic carbon, levoglucosan), health (mortality, lung cancer...), economic costs, resulting in a complete cost-benefit analysis (followed by real measures). The heterogeneity of these impacts will be characterized according to socioeconomic status.

The project relies on environmental measurements, modelling, and health impact and economic approaches. It is conducted by a consortium of specialists of chemistry and physics of air pollution, economics, epidemiology, modeling experts, in relation with local authorities. This ambitious interdisciplinary project, internationally innovative by its extent, will document for the first time in France the effectiveness of measures improving air quality, and will provide accurate indications to increase this efficiency.

1. Contexte du projet

1.1. Généralités

La pollution atmosphérique est constituée d'un mélange de gaz (oxydes d'azote, de soufre, ozone...) et particules en suspension ; celles-ci peuvent être caractérisées par leur granulométrie ; ainsi la réglementation impose le suivi des concentrations massiques en particules fines (PM_{2,5}), dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 µm, et en PM₁₀. Le diamètre des particules fines permet à une fraction d'entre elles de pénétrer dans les bronches et atteindre les alvéoles pulmonaires. En complément de la concentration massique, la composition chimique peut aussi être caractérisée. Celle-ci peut notamment permettre d'identifier leur source – ainsi la présence de lévoglucosan est un traceur des particules issues de la combustion de la biomasse, et de chercher à identifier si les particules issues de certaines sources spécifiques sont plus nocives que d'autres.

1.1.1. Pollution atmosphérique : risques sanitaires

La pollution atmosphérique a un effet sanitaire majeur sur la morbidité et la mortalité. L'essentiel de la mortalité s'explique par des pathologies cardiovasculaires et respiratoires ; l'estimation est que 48 000 décès chaque année seraient attribuables à la pollution par les particules fines à l'échelle nationale [1]. Concernant la morbidité, outre les effets sur la fonction et les pathologies cardiovasculaires et respiratoires, la pollution par les particules fines pourrait avoir des atteintes sur le développement du fœtus, et augmenter notamment le risque de petit poids de naissance [2]. La question des autres effets sur la santé de l'enfant de l'exposition aux polluants atmosphériques durant la vie intra-utérine, qui est posée dans le cadre de l'hypothèse des origines fœtales des maladies, a fait l'objet de quelques travaux suggérant des effets possibles sur la croissance postnatale [3, 4] et le neuro-développement [5]. Ces travaux sont encore limités du point de vue de la caractérisation des expositions ; très peu ont pris en compte la composition chimique des particules, pour essayer d'identifier si certaines fractions sont plus nocives que d'autres [6]. La réglementation actuellement en vigueur concernant l'exposition aux PM est basée sur une mesure de leur masse. Cette mesure, bien que validée par des études épidémiologiques, est fortement gouvernée par les composés à fortes concentrations, mais qui ne présentent généralement qu'une très faible toxicité.

1.1.2. Pollution atmosphérique : coût sociétal et économique

Le coût économique résultant de ces effets sanitaires est colossal, et a été estimé à environ 100 milliards d'Euros par an pour la France en 2015 [8]. Ce coût intègre les coûts tangibles, qui transparaissent à travers la variation du solde des finances publiques, et les coûts intangibles, relevant de la sphère non marchande, comme ceux liés aux années de vie perdues, en cas de décès prématuré, ou de qualité de vie perdue lorsque survient une grave maladie. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) [9] estiment le coût de la pollution de l'air pour la France à 2,3 % de son PIB. Malgré ces chiffres alarmants, il n'existe pas en France de démarche systématique d'analyse coût-bénéfices des mesures visant à limiter la pollution atmosphérique à la différence de ce qui est pratiqué aux Etats-Unis. Ainsi depuis 1990, l'EPA (Agence américaine de protection de l'environnement) se doit de fournir des analyses régulières et complètes des coûts et bénéfices totaux des programmes engagés dans le cadre du *Clean Air Act*. Depuis 1999, des études prospectives sont réalisées tous les deux ans. Ces études tiennent compte à la fois des coûts techniques de mise en œuvre des programmes, mais aussi à travers le recours à un modèle d'équilibre général des impacts sur l'emploi, les prix, la croissance économique et le revenu des ménages. Les bénéfices incluent quant à eux la monétarisation des effets sur la santé humaine (mortalité, morbidité) et des effets sur le bien-être (incluant des impacts tels que l'évaluation de l'amélioration des rendements agricoles, la réduction de l'acidification des cours d'eau et d'autres bénéfices écologiques mais aussi le bien-être tiré de l'amélioration de la visibilité due à la réduction de la pollution). Au total, les évaluations centrales conduisent à des bénéfices 30 fois supérieurs au coût (les estimations les plus favorables allant jusqu'à 90 fois).

En France, des valeurs tutélaires sont préconisées pour le calcul du bilan socio-économique des projets de transport [10, 11]. Le calcul se fait selon la méthode du bilan coûts/avantages monétarisés, qui consiste à sommer l'ensemble des gains et des coûts monétaires ou monétarisés d'un projet, pendant sa durée de vie. Les valeurs tutélaires utilisées pour la monétarisation des effets non-marchands portent sur la valeur du temps, qui est employée pour valoriser les gains de temps, la valeur de la vie humaine, qui est utilisée pour monétariser le bénéfice



d'une amélioration de la sécurité routière, la valeur de la pollution atmosphérique et la valeur du carbone (pour la monétarisation de l'effet de serre).

1.2. Pollution atmosphérique dans l'agglomération grenobloise : niveaux et sources

1.2.1. Des populations globalement exposées à des concentrations élevées

L'agglomération grenobloise fait partie des agglomérations françaises dont la situation est préoccupante du point de vue des polluants atmosphériques. Les seuils réglementaires concernant les particules en suspension, le dioxyde d'azote et l'ozone sont dépassés de manière récurrente sur le territoire de Grenoble-Alpes Métropole. La très grande majorité des habitants de l'agglomération grenobloise (96%) est exposée à un niveau moyen de particules PM_{2,5} supérieur à la valeur guide de 10 µg/m³ recommandée par l'OMS.

Les zones les plus exposées à la pollution atmosphérique sont le « cœur » de l'agglomération, le fond des vallées de l'Y grenoblois et les bandes de proximité des grandes infrastructures routières (Figure 1).

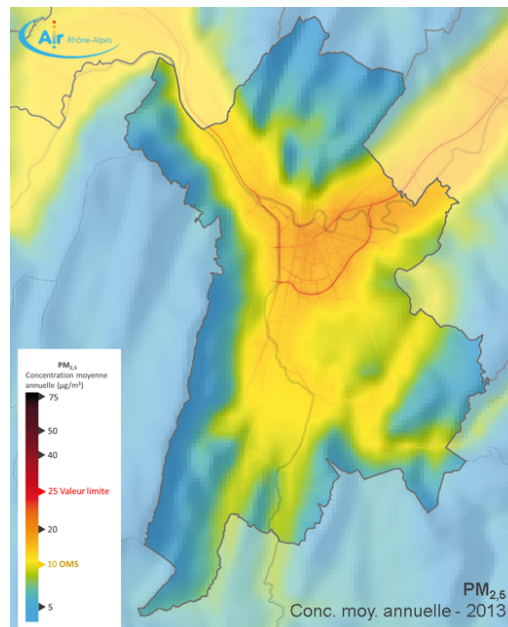


Figure 1. Niveaux moyens de particules fines dans l'agglomération grenobloise (2013).

Source : Air Rhône-Alpes.

1.2.2. Inégalités sociales d'exposition aux polluants atmosphériques

Une étude a mis en évidence une hétérogénéité sociale dans l'exposition moyenne aux particules fines dans l'agglomération grenobloise [12]. A partir d'une catégorisation de chaque IRIS (le plus petit îlot géographique), il a été établi que la concentration moyenne des PM_{2,5} était la plus faible dans les IRIS où la défaveur sociale (caractérisée par l'EDI, ou *European Deprivation Index*) était la plus faible. Les niveaux de PM_{2,5} étaient les plus élevés dans les IRIS où la défaveur sociale était supérieure à la médiane constatée sur l'ensemble de la zone, sans que la relation soit strictement monotone (Figure 2). Ainsi, dans la Métropole grenobloise, l'exposition aux particules fines semble donc toucher de façon plus importante les classes moyennes et défavorisées. En conséquence, l'impact sanitaire attendu des particules fines est plus important dans ces catégories sociales, un effet accentué par le fait que les catégories sociales les moins favorisées subissent de façon disproportionnée les effets d'autres facteurs contribuant aux pathologies chroniques (maladies cardiovasculaires, maladies respiratoires) dont les particules fines sont aussi une cause, et interagissent ensemble. Ainsi, à l'échelle nationale, la consommation de tabac est deux fois plus fréquente chez les sujets sans emploi et peu diplômés que chez les adultes des catégories sociales supérieures, et des disparités similaires existent pour les facteurs de risque alimentaires. Ceci signifie que l'impact sanitaire de la pollution est démultiplié dans les catégories sociales les plus défavorisées, cumulant de façon disproportionnée ces autres facteurs de risque.

L'enquête ZAPA a révélé un renouvellement plus rapide des personnes possédant un 3***, mais une tendance à pousser la voiture « jusqu'au bout » pour les personnes ayant un 2**. Les plus précaires renouvèlent moins souvent leurs voitures. Les sujets les plus touchés par une ZAPA sont plus représentés dans certaines catégories socioprofessionnelles : les ouvriers (42%) et les employés (27% ; APUR, 2012, consultable sur : <https://docplayer.fr/7919017-Zapa-etude-d-impact-socio-economique-rapport-final.html>).

A notre connaissance, la prise en compte rigoureuse des inégalités sociales en termes d'exposition ou d'impact sanitaire attendu est encore très rare dans les études visant à caractériser l'impact réel ou estimé de mesures visant à améliorer la qualité de l'air en France. Une telle prise en compte devrait à la fois considérer le poids des mesures sur la population (par exemple en termes de contraintes sur les déplacements quotidiens, coûts accrus de transport) et le bénéfice en termes de santé et qualité de vie.

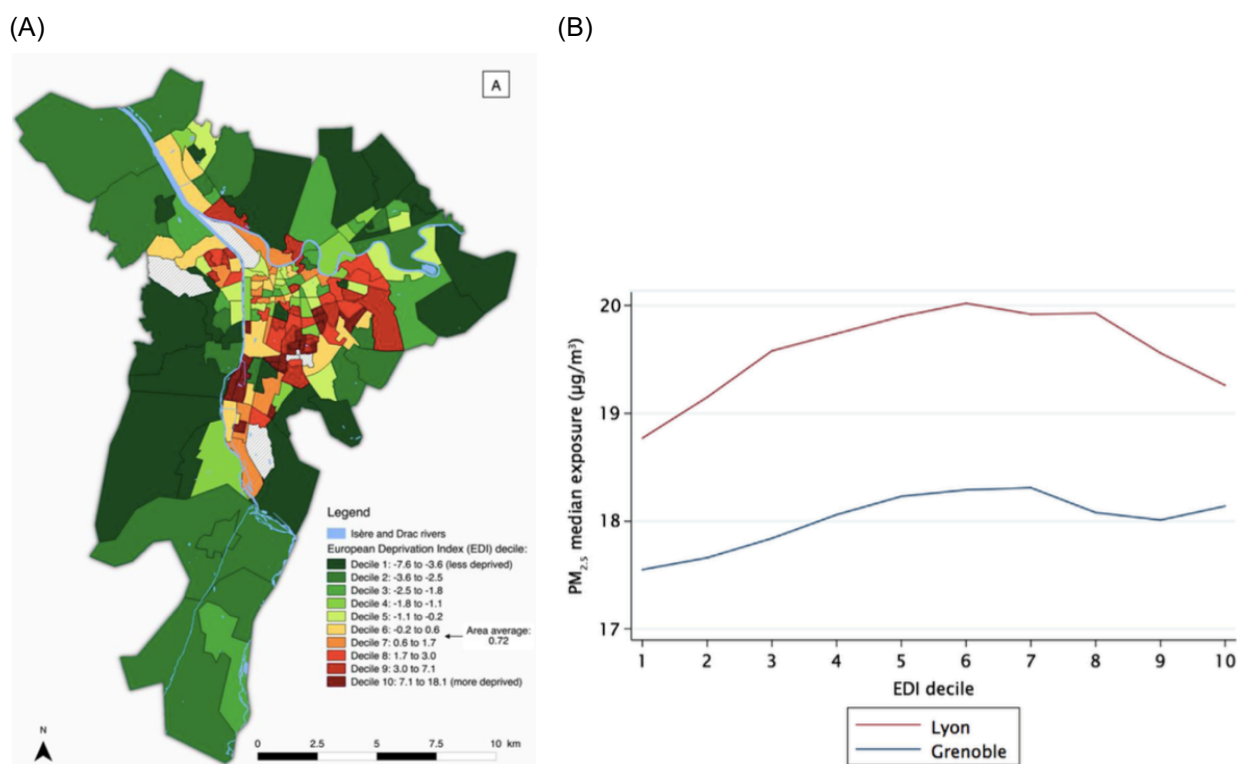


Figure 2. (A) Distribution de la défaveur sociale (caractérisée par l'European Deprivation Index, EDI) par IRIS dans l'agglomération grenobloise (2013). (B) Niveau médian des PM_{2,5} en fonction de la défaveur sociale de l'IRIS.

Source : Morelli et coll. [12].

1.2.3. Principales sources de pollution

Les secteurs d'activité responsables de la pollution aux particules fines sur la zone géographique considérée sont le chauffage au bois individuel non performant (45% des émissions de PM₁₀ en moyenne sur l'année et jusqu'à 75% les jours de grand froid), les transports routiers et l'industrie (Figure 3). Le trafic routier est responsable de la « surexposition » des populations résidant en bordure immédiate des axes routiers. La pollution au dioxyde d'azote est majoritairement liée au trafic routier.

Ainsi, le chauffage au bois individuel non performant et le trafic routier (déplacement de personnes et transports de marchandises) constituent, sur le territoire de Grenoble-Alpes Métropole, les principaux leviers d'amélioration de la qualité de l'air. En outre, à long terme, la conception de l'urbanisme est un élément de maîtrise de l'exposition de la population à la pollution atmosphérique.

Cette situation a des conséquences en termes de santé publique, a un coût économique important, joue sur l'image publique de l'agglomération et est à l'origine d'une procédure de contentieux européen dirigée contre la France pour non-respect de la réglementation. L'impact sanitaire de l'exposition de la population du bassin grenoblois, correspondant aux niveaux d'exposition aux particules fines constatés en 2012, a été récemment estimé par l'Inserm [12]. L'ordre de grandeur est que 3 à 10% des cas de mortalité non accidentelle et de cancers du poumon, et probablement une proportion plus importante des cas de petits poids de naissance (moins de 2500

g) à terme seraient attribuable à cette exposition. Il n'existe à notre connaissance pas d'estimation du coût financier correspondant induit pour la société. De même, bien qu'aux USA le *Clean Air Act* oblige à évaluer le bénéfice économique de la réglementation sur la qualité de l'air, et à le mettre en regard du coût des mesures (pour un ratio indiquant que le bénéfice est de 20 à 50 fois supérieur au coût, source : <http://www.epa.gov/air/sect812/aug10/fullreport.pdf>), il n'y a pas à notre connaissance en France de quantification précise du rapport coût/bénéfice de mesures visant à améliorer la qualité de l'air.

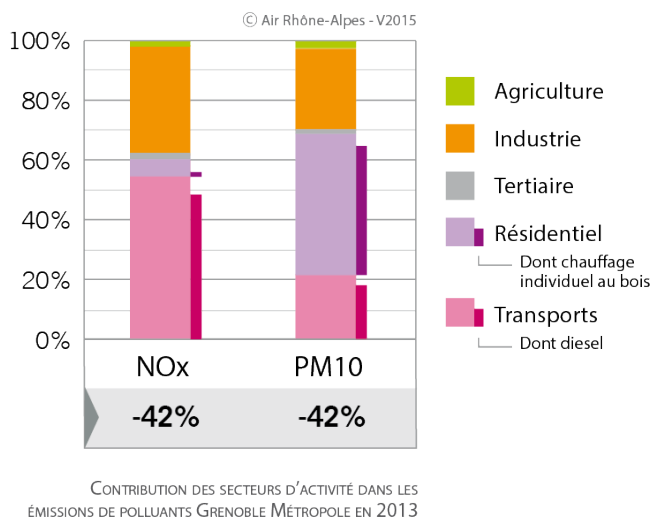


Figure 3. Répartition sectorielle des émissions de polluants dans la métropole grenobloise (2013).

1.3. Mesures prévues à court terme dans l'agglomération grenobloise

La Métropole de Grenoble a engagé une démarche d'amélioration de la qualité de l'air qui s'est notamment exprimée au travers de la réponse à l'appel à projet « Villes respirables en 5 ans » du Ministère de l'Environnement en juin 2015 dont elle est lauréate. Cette réponse constitue une feuille de route à 5 ans qui prévoit 21 actions ciblant les principaux leviers de réduction de l'exposition de la population à la pollution de l'air : transport et mobilité, chauffage au bois individuel non performant, prise en compte des enjeux de qualité de l'air dans la planification et la conception urbaine...

Toutes les mesures n'ont pas encore été définies dans le détail et actées. Les principales mesures dont au moins le principe est acté, et dont l'implémentation a déjà débuté pour certaines, sont (Figure 4) :

- *Dans le secteur du chauffage*, la mise en place d'un fonds de renouvellement des appareils non performants dans le cadre de l'AMI ADEME fonds bois (« prime air bois ») dès l'automne 2015 ;
- *Dans le secteur du trafic routier*, la diminution de la vitesse maximale de circulation à 30 km/h dans la commune de Grenoble au 1^{er} janvier 2016 (avec une extension aux communes avoisinantes en discussion ; « Métropole apaisée ») ; un projet de réseau express vélo ; un projet de limitation de la circulation dans le cœur de Grenoble (projet « Cœur de Métropole ») ; un projet de Zone à Circulation Restreinte (ZCR) « Marchandises » ; la possibilité d'extension de la ZCR aux véhicules particuliers est mentionnée dans le projet « Ville respirable », et cette question pourrait être arbitrée courant 2017; l'identification de mesures efficaces du point de vue de la santé publique pourrait favoriser la prise de décisions justifiées scientifiquement et pertinentes pour la société.

Compte tenu de son ambition, des moyens publics mis en œuvre et de sa dimension d'expérimentation, il serait très important que ce plan d'actions fasse l'objet d'une évaluation indépendante dans certaines de ces dimensions : environnement, santé, économie et sociologie. C'est l'objectif du projet QAMECS.

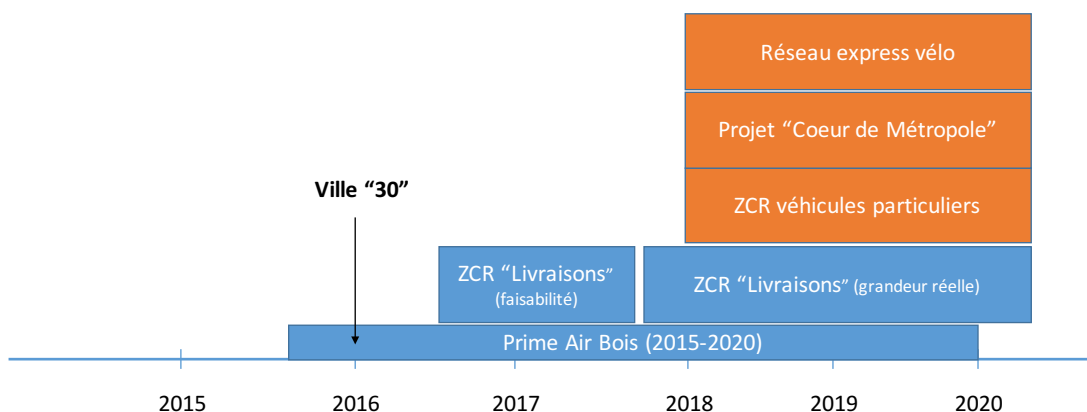


Figure 4. Chronologie (telle que prévue en 2017) des principales mesures de lutte contre la pollution de l'air (en cours, prévues, envisagées) dans l'agglomération grenobloise.

Ville 30 : Restriction de la vitesse maximale à 30 km/h. ZCR : Zone à Circulation Restreinte.

1.4. Évaluation de mesures visant à améliorer la qualité de l'air en milieu urbain

De nombreuses agglomérations en Europe et dans le monde ont pris par le passé des mesures ambitieuses, notamment sur les transports routiers et le chauffage, avec un effet environnemental attendu à court terme. La plupart de ces agglomérations se trouvent hors de France, du fait entre autres de l'abandon en 2012 des projets de Zones d'Action Prioritaires pour l'Air (ZAPA). Dans un certain nombre de villes, une évaluation environnementale de ces mesures a été réalisée, comme par exemple à Tokyo, où la concentration des PM_{10} a pu être abaissée d'environ 50% entre 2001 et 2010 [13], ou dans les villes allemandes, où des diminutions de 5 à 13% des PM_{10} ont été constatées selon les sites [14, 15]]. Un bilan de l'impact des *Low Emission Zones* (LEZ) en Europe a été établi par l'ADEME [16]. Dans certains cas relativement rares, l'évaluation environnementale des mesures visant à améliorer la qualité de l'air s'est accompagnée d'une évaluation des bénéfices sanitaires, comme par exemple à l'issue de l'interdiction du charbon à Dublin [17] ou après l'implémentation d'une LEZ à Rome [18].

Le bilan de ces mesures s'est en général centré sur la variation des concentrations de polluants (principalement les particules et les oxydes d'azote, parfois l'ozone) comme paramètre principal. Dans un petit nombre de situations, d'autres paramètres ont été pris en compte, et particulièrement les concentrations de suies, qui sont un marqueur plus spécifique des polluants liés aux phénomènes de combustion. Ainsi, dans les villes de Berlin et Munich, la diminution de la concentration des suies, marqueur des phénomènes de combustion, a été plus importante que la diminution de la concentration totale des particules [14]. A notre connaissance, un tel suivi des niveaux de carbone élémentaire lors de mesures ciblées sur les sources de combustion a été fait très rarement, et il n'y a pas eu de suivi plus complet de l'ensemble des constituants des particules. Dans le contexte de mesures ciblant les appareils de chauffage au bois, un suivi de la teneur en lévoglucosan (marqueur de la combustion du bois) serait notamment pertinent. Un suivi de la teneur des particules en carbone organique et en élément carbone serait pertinent. Un tel suivi est actuellement en cours dans la vallée de l'Arve, où des mesures concernant les appareils de chauffage au bois similaires à celles mises en place à Grenoble existent, sous l'égide du LGGE (Université Grenoble-Alpes, J.L. Jaffrezo), dans le cadre du projet DECOMBIO financé par PRIMEQUAL.

Les travaux décrivant le bénéfice attendu de scénarios *théoriques* de diminution des émissions de polluants sont très rares. Une étude a, ainsi, décrit l'impact de reports modaux de différents ampieurs à Barcelone [19]. Les principales actions en faveur de la qualité de l'air projetées ou réalisées par la Métropole grenobloise font généralement, au cas par cas, l'objet d'une évaluation en termes de qualité de l'air ou d'acceptabilité sociale (cas du projet ZAPA, de la prime Air bois). Cependant, à notre connaissance, il y a très peu de publications qui ont évalué l'impact de mesures réelles ou de scénarios théoriques en intégrant, outre les dimensions pollution de l'air et santé évoquées ci-dessus, d'autres dimensions telles que la qualité de vie, la mobilité, la perception des nuisances liées à la pollution atmosphérique, ou encore la perception par les populations des mesures prises pour lutter contre la pollution. De même, une évaluation du coût des mesures au regard des coûts (sanitaires notamment) évités par ces mesures a été très rarement conduite.



1.5. Région grenobloise : un environnement institutionnel et scientifique favorable

La région grenobloise possède plusieurs atouts pour avancer sur la question de l'amélioration de la qualité de l'air, et possède une antériorité en termes d'études menées sur ces questions :

- La Ville et Grenoble-Alpes Métropole sont déjà reconnues comme « laboratoires » en matière de climat, d'énergie et de qualité de l'air avec un Plan Air Energie Climat (premier Plan Climat de France à avoir intégré les enjeux de qualité de l'air) et des stratégies ambitieuses et innovantes notamment sur la mobilité et le chauffage au bois individuel.
- Des mesures en cours, prévues ou envisagées (notamment celles inscrites dans le plan d'actions « Villes respirables en 5 ans », voir ci-dessus). Elles peuvent être incitatives, pédagogiques, de communication et d'accompagnement, de report modal, de pratiques de chauffage, et coercitives de lutte contre la pollution liée au trafic routier. Leur impact environnemental et sanitaire n'est pas connu en détail, et encore moins monétarisé.
- Des données territoriales sociologiques, techniques, économiques et épidémiologiques issues de plusieurs études récentes complètes dont une sur la faisabilité d'une ZAPA et une seconde étude sur la pollution due au chauffage au bois et au brûlage des déchets verts ainsi que des travaux dans le cadre du Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA).
- Des études sociologiques visant à comprendre les représentations et les perceptions qu'ont les grenoblois de la pollution : que savent-ils et qu'en pensent-ils ? Quelles sont les mesures acceptables ou non - et sous quelles conditions - des mesures anti-pollution ? [20, 21]
- Une étude d'impact sanitaire sur les effets des particules fines dans les agglomérations de Grenoble et Lyon, décrivant les inégalités sociales dans l'exposition et l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique [12] et complétant les travaux sur ce sujet réalisés dans le passé par Santé Publique France et la cellule inter-régionale d'épidémiologie ;
- L'observatoire de la qualité de l'air Air Rhône-Alpes dont les outils et la connaissance du territoire permettent de produire des éléments de diagnostic et des évaluations de scénarios prospectifs spécifiquement adaptés à l'environnement local.

2. Objectifs et particularités du projet

2.1. Objectifs

Dans ce contexte, l'objectif du projet QAMECS (Qualité de l'Air dans la Métropole grenobloise : Evaluation de l'Environnement, des Comportements et de la Santé) est de :

- 1) **Fournir un état des lieux.** Fournir un diagnostic actualisé de la situation de la Métro grenobloise du point de vue de la qualité de l'air, de son impact sanitaire et des coûts économiques associés ;
- 2) **Réaliser une évaluation *ex-ante* i) des actions « ville respirable » prévues ainsi que ii) de propositions de scénarios théoriques « efficaces » afin d'éclairer les futurs choix politiques.** Évaluer *ex-ante* des scénarios « prévus » et différents scénarios et objectifs théoriques. Les scénarios pourront être formulés sur différentes dimensions : la santé, les niveaux environnementaux, les émissions (par exemple liées à des restrictions de trafic). Leur impact sera quantifié sur les dimensions qualité de l'air, santé, économie. Pour les objectifs théoriques (par exemple, une diminution de 10% de la concentration annuelle moyenne de particules fines, ou du nombre de décès attribuables à la pollution), des mesures permettant de les atteindre seront identifiées ;
- 3) **Réaliser un suivi avant/après du plan d'actions « ville respirable ».** Réaliser une étude de type avant/après sur la période 2016-2019 s'appuyant sur des modèles environnementaux, des mesures dans l'environnement (incluant PM, EC/OC, lévoglucosan, oxydes d'azote), et une étude d'impact sanitaire.

2.2. Particularités du projet

Le choix de s'appuyer à la fois sur des évaluations *ex-ante* (évaluation de scénarios théoriques avant leur réalisation) et sur des mesures réelles est justifié par le fait que toutes les décisions concernant les actions visant à améliorer la qualité de l'air n'ont pas encore été arbitrées, et que pour la plupart d'entre elles on ne dispose pas d'estimation de leur impact (environnemental, sanitaire, autre) attendu. Ainsi, la finalité du projet, outre son intérêt scientifique et sa pertinence pour d'autres agglomérations souhaitant entreprendre des actions similaires à celles envisagées par Grenoble-Alpes Métropole, **est aussi, à court terme et au niveau local, d'apporter des éléments d'aide (scientifiques, techniques économiques et sociaux) à la décision.**

Les scénarios théoriques considérés incluront à la fois des scénarios proches de ce qui a pu être évoqué dans le passé dans le cadre du projet de ZAPA, et des scénarios plus ambitieux, permettant de documenter l'impact d'une gamme d'actions d'ambitions variables.

L'étude prendra en compte trois dimensions complémentaires fondamentales : 1) l'environnement (concentrations en particules fines, en EC/OC et lévoglucosan, oxydes d'azote), 2) la santé (mortalité, incidence du cancer du poumon et des petits poids à la naissance, éventuellement des paramètres cardiovasculaires et d'autres paramètres respiratoires), 3) les coûts économiques externes de la pollution atmosphérique (ainsi que de celle liée aux gaz à effets de serre).

L'originalité réside :

- Dans la combinaison de l'évaluation de mesures réelles et de scénarios théoriques ;
- Dans la prise en compte d'un grand nombre de dimensions (environnement, économie, modélisation, santé) ;
- Dans la finesse de prise en compte de chacune de ces dimensions ; ainsi, les aspects liés à l'environnement intégreront la pollution atmosphérique en ne s'arrêtant pas aux concentrations de polluants réglementés, mais prenant aussi en compte lévoglucosan, EC, OC des particules ;
- Dans le caractère très pluridisciplinaire, et interdisciplinaire du projet, avec de réelles interactions interdisciplinaires grâce à une équipe expérimentée avec ce type d'approche ;
- Dans la longue expérience de dialogue des partenaires avec les collectivités territoriales et les agences, qui favorisera une diffusion immédiate des résultats du projet aux décideurs locaux.



3. Méthodologie

La méthodologie développée afin d'atteindre ces objectifs repose sur 2 approches : i) construction d'objectifs et de scénarios théoriques, évalués *ex-ante* et formulés sur différentes dimensions : la santé, les niveaux environnementaux, les émissions (par exemple liées à des restrictions de trafic) ; leur impact sera ainsi quantifié sur les dimensions qualité de l'air, santé, économie et, dans la mesure du possible, déplacements et les mesures à mettre en œuvre pour les atteindre seront identifiées et ii) étude de type avant/après s'appuyant sur des mesures dans l'environnement, des modèles environnementaux, et une étude d'impact sanitaire. De plus, l'hétérogénéité de ces impacts en fonction des catégories sociales sera caractérisée.

3.1. Approche s'appuyant sur des objectifs et sur des scénarios théoriques : démarche

Des scénarios théoriques peuvent être formulés à différents niveaux : en terme de gain sanitaire attendu (par exemple, diminuer de 10% la mortalité due aux particules fines), d'amélioration de l'environnement (une diminution de 10% de l'exposition aux particules fines de la population générale, ou des quartiers les plus exposés à la pollution), de diminution des émissions, d'actions sur les sources...voire même de diminution du fardeau économique que fait peser la pollution de l'air sur la société (Figure 5).

L'approche s'appuyant sur des scénarios théoriques considérera les principaux scénarios envisagés ou considérés par les décideurs, sans se limiter à eux ; ceux-ci sont généralement formulés en termes d'actions sur les activités humaines (levier 1, Figure 5) ou sur les sources de pollution (levier 2), par exemple dans le cas de la Prime Air-Bois ou d'une interdiction de circulation frappant les véhicules les plus polluants. Toutefois des « scénarios » ou « objectifs » peuvent aussi être formulés pour les autres niveaux de la Figure 5. **Dans le cas du projet GAMECS, un scénario ou plus sera formulé pour chacun des niveaux allant des activités humaines à la santé et au coût économique.** Pour chaque scénario, le principe consistera d'une part à évaluer ses conséquences en aval (sur les niveaux en aval, ou à droite, Figure 5) ; par exemple, les impacts sanitaires et économiques d'une diminution des concentrations de particules fines à la valeur recommandée par l'OMS seront évalués. D'autre part, nous identifierons, en amont, une ou des mesures pouvant permettre d'atteindre le scénario (dans ce cas, identifier l'ampleur des mesures sur le trafic routier et le chauffage urbain permettant d'atteindre la concentration visée en particules fines, voir Figure 6).

Des exemples de scénarios théoriques formulés en termes de diminution des concentrations de l'exposition de la population sont donnés Figure 7.



Figure 5. Différents niveaux d'action possible pour limiter l'impact sanitaire des polluants atmosphériques.

L'évaluation *ex-ante* repose sur l'outil de modélisation numérique *Sirane*, opéré par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, qui permet, en tenant compte des sources d'émission, de la météorologie, de la topographie et de l'implantation du bâti, de cartographier les concentrations en polluants (particules et oxydes d'azote) à une résolution spatiale de 10 m. L'élaboration de scénarios d'action nécessite le développement préalable d'outils spécifiques, tout comme l'évaluation des impacts sur la qualité de l'air de scénarios « transports » demande qu'une modélisation du trafic soit réalisée.

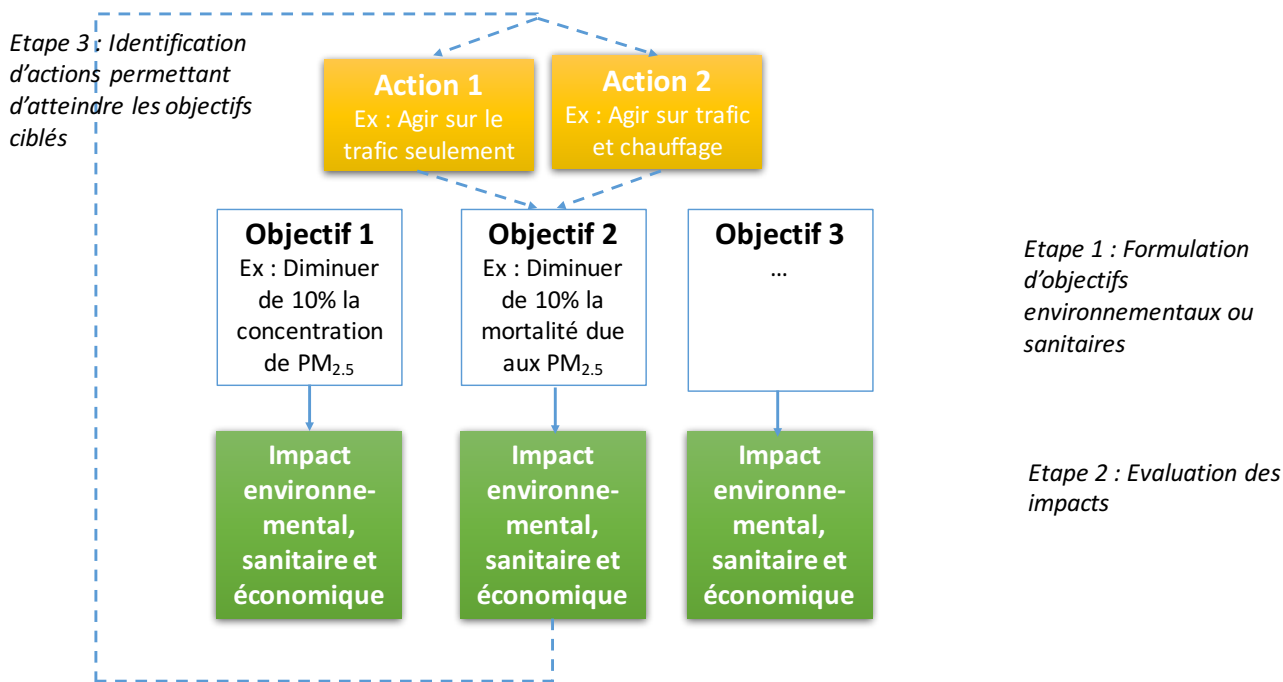


Figure 6. Démarche d'étude concernant les objectifs sanitaires ou environnementaux sanitaires.

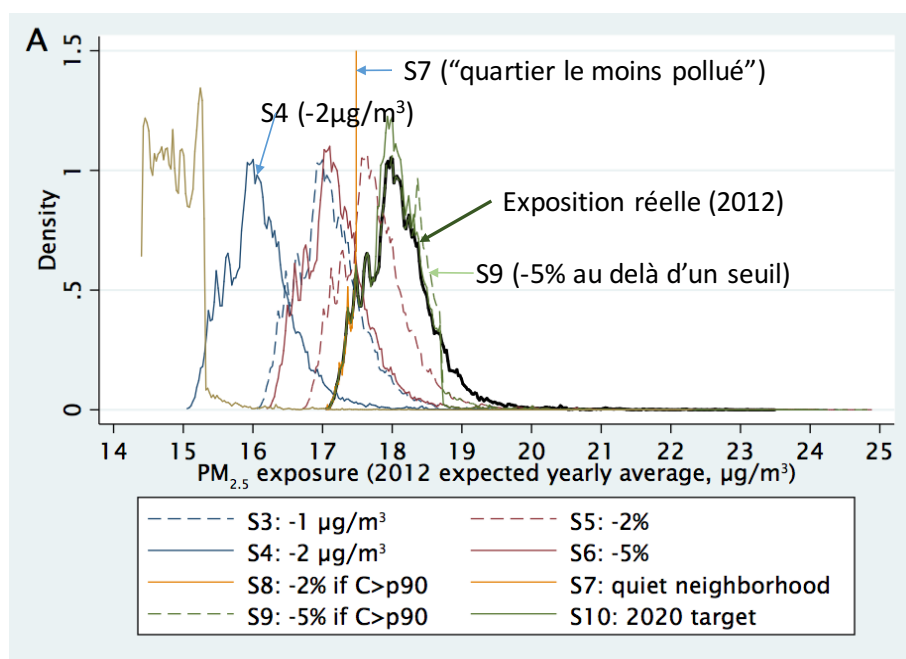


Figure 7. Exemple de scénarios théoriques d'amélioration de l'exposition aux particules fines dans l'agglomération grenobloise.

La distribution de l'exposition de la population aux particules fines en 2012 est indiquée, ainsi que des distributions sous certains scénarios théoriques d'amélioration de la qualité de l'air.

3.2. Volet environnement : Pollution atmosphérique

Ce volet propose d'évaluer l'efficacité des actions (théoriques, prévues ou réalisées) sur les paramètres de la qualité de l'air (cartographies des polluants, exposition de la population, contribution des différents secteurs...). En outre, les modélisations produites constitueront une donnée d'entrée de l'étude d'impact sanitaire.

Ce volet repose sur 3 axes :

- Synthétiser les éléments de diagnostic clés sur la qualité de l'air établis par les observatoires.
- Évaluation *ex-ante* des impacts sur la qualité de l'air des principaux scénarios prévus à horizon 2020 et de scénarios théoriques susceptibles d'éclairer la décision politique.
- Évaluation avant/après des impacts environnementaux des actions effectivement mises en œuvre sur la qualité de l'air.

3.2.1. Évaluation *ex-ante* de mesures prévues et de scénarios théoriques

Cette évaluation repose sur l'outil de modélisation numérique opéré par Air Rhône-Alpes : SIRANE [22, 23] permet de cartographier à une échelle spatiale de 10 m les principaux polluants atmosphériques (particules fines, oxydes d'azote) en prenant en compte l'ensemble des sources d'émission, la météorologie, la topographie et le bâti en 3 dimensions. Les outils de modélisation seront utilisés de manière conventionnelle pour évaluer les scénarios prévus (les actions sont traduites en termes d'émissions de polluants puis de concentrations atmosphériques), ainsi que de manière « inverse » afin de construire des scénarios d'actions à partir d'objectifs fixés en termes de concentration ou santé. Ce deuxième volet innovant demandera de réaliser des développements spécifiques à partir des outils existants.

L'évaluation des impacts sur la qualité de l'air de scénarios « transports » demande qu'une modélisation du trafic soit réalisée (cf. plus bas), qui servira d'entrée au modèle SIRANE.

3.2.2. Évaluation avant/après des impacts des actions effectivement mises en œuvre sur la qualité de l'air

Approche par modélisation : A l'issue de la période de mise en œuvre des actions, la situation « réelle » et le scénario « sans actions » seront modélisés afin d'évaluer les impacts des actions effectivement mises en œuvre (la comparaison avec le scénario « actions initialement prévues » pourrait également être envisagée).

Approche métrologique : Suivi de la qualité de l'air sur la base de données métrologiques. Il reposera sur les mesures de l'observatoire Air Rhône-Alpes (analyseurs en continu de PM₁₀, PM_{2,5}, aethalomètre AE33, et analyses de HAP et lévoglucosan) dans la Métro grenobloise. Ce dispositif minimal sera complété par des mesures d'EC/OC, de lévoglucosan et de potentiel oxydant (125 échantillons par site pendant 2 ans sur 3 sites) réalisées en trois points du territoire (fond urbain, centre-ville – dans la zone de la ZCR potentielle et en périphérie – hors de l'influence de la ZCR potentielle) selon des protocoles permettant d'appréhender les évolutions éventuelles. Les prélèvements permettront une analyse ultérieure du potentiel oxydant des particules (demande de financement déposée auprès de l'Université Grenoble Alpes).

L'ensemble des données recueillies seront exploitées dans l'objectif d'étudier les évolutions globales des niveaux de polluants, mais également celles des contributions spécifiques de la combustion de biomasse et du trafic routier à la pollution atmosphérique.

3.3. Volet santé

3.3.1. Étude d'impact sanitaire

Le volet santé consistera en une étude d'impact sanitaire reposant sur la méthodologie développée dans le cadre de l'évaluation du risque attribuable aux particules fines dans les agglomérations de Grenoble et Lyon en 2012 [12]. Elle s'appuiera, pour le volet théorique du projet, sur les projections ou hypothèses réalisées concernant les variations des niveaux de pollution par Air Rhône-Alpes, dans le modèle SIRANE. Les estimations du modèle SIRANE seront combinées à la densité de population (supposée constante au cours du temps), selon une méthodologie déjà appliquée permettant de prendre en compte les variations spatiales fines des niveaux de pollution [12]. Le principe est d'estimer un risque relatif pour chaque pathologie étudiée en chaque point (i,j) de la grille représentant la zone d'étude :

$$RR_{i,j} = RR_{E-R} \left(\frac{C_{i,j} - C_{ref}}{10} \right)$$

où C_{ref} est un niveau de référence et $C_{i,j}$ la concentration estimée ou mesurée en (i,j).

Le nombre de cas attribuables à l'exposition est ensuite obtenu en sommant les nombres de cas attribuables à l'exposition $NAC_{i,j}$ sur toute la zone d'étude :

$$NAC_{i,j} = n_{i,j} \times \left(\frac{D}{N} \right) \times \left(\frac{RR_{i,j} - 1}{RR_{i,j}} \right)$$

Dans un deuxième temps, l'estimation du nombre de cas attribuables sera basée sur les variations effectivement constatées dans les niveaux de pollution entre le début et la fin de l'étude.

3.3.2. Stratification des impacts selon la défaveur sociale

Les effets attendus seront stratifiés sur le niveau de défaveur sociale des IRIS, caractérisé par l'EDI (*European Deprivation Index*), comme dans notre étude récente [12].

3.4. Trafic

La modélisation du trafic constitue une des briques de base dans ce projet. Dans le cadre de l'approche théorique, l'utilisation d'un modèle de transport est indispensable pour simuler et identifier les mesures permettant d'atteindre les objectifs sanitaires de manière précise et concrète.

Nous nous appuyerons sur le modèle TRANUS de Grenoble qui a été développé par l'INRIA et l'IFSTTAR en partenariat avec l'AURG (Agence d'Urbanisme de Grenoble) dans le cadre du projet ANR CITIES [LVMT, LET, Vinci, IDDRI, IFSTTAR, INRIA - <https://project.inria.fr/cities/fr/>].

Le modèle TRANUS est un modèle LUTI (« *Land Use and Transport Interactions* », Figure 8). Ce modèle est constitué de deux modules. Le premier module est un modèle de trafic à quatre étapes qui permet de simuler toutes les mesures standards qu'on peut attendre d'un modèle de transport opérationnel *up-to-date*. En plus du module de transport, le modèle TRANUS intègre un module d'usage des sols qui permet de simuler, et donc de faire évoluer de manière endogène, la localisation des ménages et des activités économiques. L'interaction de ces deux modules permet d'obtenir des configurations où l'offre et la demande dans le transport et le marché immobilier sont simultanément et conjointement en équilibre. Cela permet en particulier pousser la réflexion à plus long terme (au-delà de 5 ans) en prenant en compte des rétroactions des changements de l'offre de transport sur l'occupation des sols, et pour lequel les conséquences sur un périmètre plus large pourraient être mesurées (phénomène d'étalement urbain ; Le périmètre du modèle TRANUS de Grenoble correspond à celui du SCOT grenoblois. Le niveau de précision du zonage varie et est directement lié à la densité des zones. Sur l'agglomération, l'échelle de maillage correspond à celui des IRIS de l'INSEE).



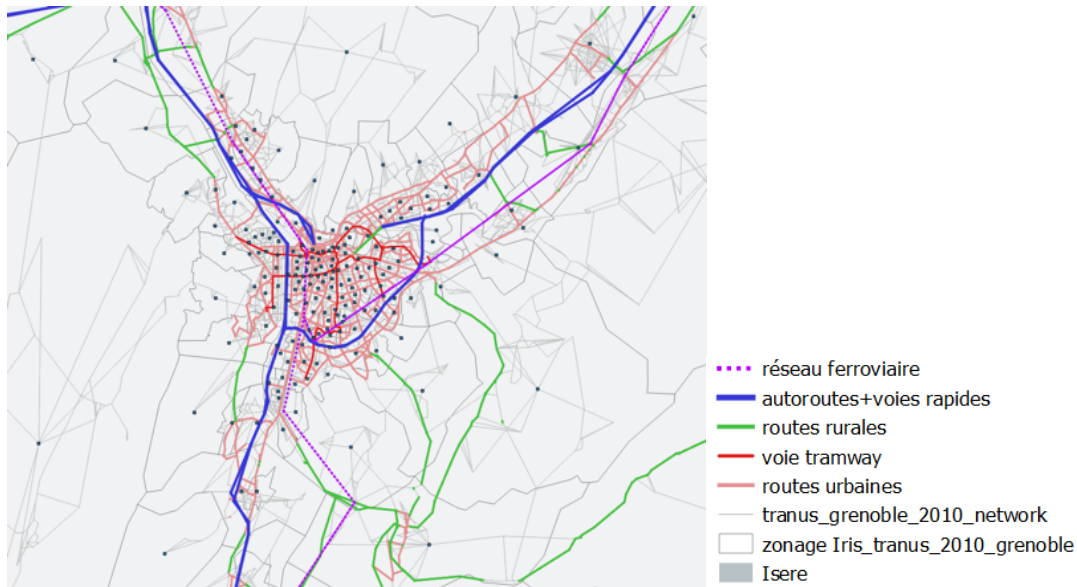


Figure 8. Modèle de trafic Tranus (INRIA) : Réseau structurant (voies ferrées, autoroutes, routes structurantes), zones, centroïdes et connecteurs.

3.5. Analyse coût-bénéfices

Nous mènerons pour chacun des scénarios une évaluation :

- *Des coûts directs de mise en œuvre des mesures.* Nous nous appuyerons pour cela sur les méthodologies développées pour l'évaluation des coûts directs liés à la mise en œuvre de mesures d'amélioration de la qualité de l'air développées dans le cadre de l'évaluation coût-bénéfices du Clean Air Act (2011), de méthodologies développées à partir des courbes de coût marginal de réduction des émissions et adaptées au niveau de villes [25] et sur des données provenant directement de la Métro et des opérateurs ou de ressources bibliographiques.
- *Des coûts/gains économiques induits par les mesures pour chacun des agents :* collectivités, ménages, activités économiques. Ainsi, nous évaluerons par exemple, les impacts des mesures de restrictions de circulation sur les activités économiques et notamment commerciales dans le centre-ville à l'aide des travaux menés sur la mobilité (évaluation des changements de comportement de mobilité à l'aide du modèle MIRO, de l'enquête participative et de l'enquête en population). L'impact des scénarios sur le budget des ménages (changement de véhicule motorisé, transfert modal, adaptation des déplacements quotidiens (y compris à long terme modification des distances domiciles-travail du fait de reconfiguration spatiales sous l'effet des contraintes de mobilité représentées par le modèle TRANUS)
- *Des coûts externes.* Nous nous concentrerons sur l'évaluation économique de la diminution des impacts sanitaires de la pollution. Diverses méthodes ont été employées dans la littérature: le coût de la maladie l'évaluation contingente ou les dépenses de protection et aux spécifications utilisées pour établir les mesures du coût de la pollution atmosphérique [26, 27].

Les deux méthodologies suivantes seront développées (voir Figure 9) :

- La méthodologie du coût de la maladie. Cette approche consiste à effectuer la monétisation en entrant une valeur dérivée des coûts directs ou indirects observés sur le marché. Il est, par conséquent, la limite inférieure des coûts sociaux et peut être plus facilement développé. Les coûts directs de la mortalité et la morbidité associées à la pollution de l'air seront accessibles en utilisant les coûts de traitement médical associés à chaque épisode d'hospitalisation. Les coûts indirects seront évalués en utilisant la perte de production en fonction des jours perdus au travail.
- La méthodologie du consentement à payer pour réduire la pollution atmosphérique ou pour réduire la mortalité ou les maladies du fait de la pollution [28]. La méthode d'évaluation contingente consiste à interroger directement via un questionnaire les individus sur leur consentement à payer pour la mise en place d'un programme public qui aurait pour effet de réduire les risques sanitaires. Ce type d'évaluation peut produire des résultats très hétérogènes car la nuisance n'est pas nécessairement ressentie comme une gêne et les individus ne sont pas toujours capables d'estimer leurs propres dommages. Les évaluations contingentes sont donc très conditionnées par la connaissance du phénomène par les personnes interrogées.

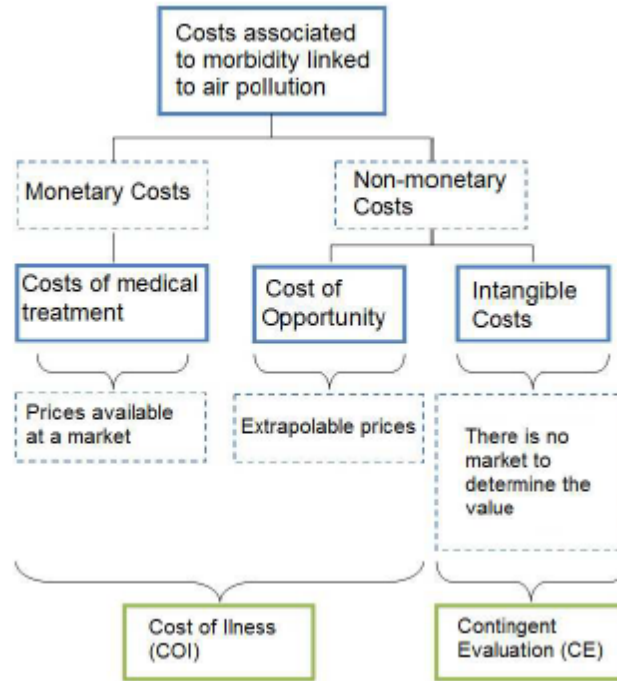


Figure 9. Méthodologies pour l'évaluation économique des impacts sanitaires de la pollution.

Les coûts externes portant sur les gains ou pertes de temps, les impacts relatifs à la sécurité routière, la valeur du carbone (pour la monétarisation de l'effet de serre) seront également évalués, tout comme les bénéfices directs sur la santé du développement des modes actifs (marche, vélo).

3.6. Analyse des données

Nous évaluerons l'effet des différentes mesures prévues par la Métro, les pouvoirs publics ou l'Europe, ainsi que des scénarios théoriques.

La partie de l'étude s'appuyant sur la comparaison de la qualité de vie, des comportements, des facteurs environnementaux *mesurés* avant et après les différentes interventions ne permettra pas de séparer l'effet de chacune d'entre elles. En revanche les évaluations environnementales (= pollution atmosphérique), ainsi que l'étude d'impact sanitaires s'appuyant sur des modèles *ex-ante*, pourront elles séparer l'effet de différentes mesures, et s'affranchir de l'effet des paramètres météorologiques.

Pour l'ensemble des dimensions considérées, des analyses présentant les résultats globalement, pour différents quartiers ou municipalités, ainsi que selon les catégories sociales ou l'indice de défaveur sociale de l'IRIS pourront être présentées, afin de renseigner l'équité sociale des mesures prises et de leur impact.



4. Livrables attendus et état d'avancement général

Les six livrables du projet GAMECS, ainsi que leur état d'avancement, sont indiqués dans le Tableau I.

Tableau I. Descriptif et avancement des six livrables du projet GAMECS.

Livrable	Descriptif	Avancement
1	Impact sanitaire et économique partant d'objectifs sanitaires, économiques ou environnementaux spécifiques et restriction à 3-5 objectifs sanitaires pertinents.	Terminé
2	Identification de mesures sur le trafic et le chauffage au bois permettant d'atteindre ces objectifs (approche simplifiée sans modélisation du report de trafic éventuel).	En cours
3	Identification de mesures sur le trafic et le chauffage au bois permettant d'atteindre ces objectifs sanitaires (validation/approche complète avec modélisation du report de trafic éventuel).	En cours
4	Évaluation des mesures réelles : suivi d'impact environnemental (masse et composition chimique simple (EC/OC, lévoglucosan, ions) des particules, dont traceurs de combustion de biomasse et trafic) sur trois sites et sanitaire des mesures prises par la Métropole grenobloise pour améliorer la qualité de l'air, et gain financier associé.	En cours
5	Évaluation du coût des mesures prises par la Métropole grenobloise pour améliorer la qualité de l'air ; analyse coût-bénéfice.	En cours
6	Recommandations générales (en termes de mesure et de méthodologie) à partir des modélisations et observations sur l'ensemble du projet ; transposabilité (des mesures, de la méthodologie) à d'autres agglomérations et zones françaises (notamment la Vallée de l'Arve et Lyon, si possible au-delà) ; transposabilité à l'échelle européenne.	En cours

5. Avancée du projet et principaux résultats obtenus

5.1. Livrable 1. Evaluation *ex-ante* : étude d'impact sanitaire de scénarios théoriques et coûts associés

5.1.1. Participants

Institut pour l'Avancée des Biosciences (IAB, Inserm-CNRS-Université Grenoble-Alpes), Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et Laboratoire d'Economie Appliquée de Grenoble (GAEL, CNRS-Université Grenoble-Alpes). Grenoble-Alpes Métropole a également apporté son soutien à cette étude.

5.1.2. Objectifs

Élaborer plusieurs scénarios théoriques de réduction de la pollution atmosphérique dans la métropole grenobloise puis évaluer les bénéfices de chaque scénario en termes d'impact sanitaire, de coûts économiques et de diminution des inégalités sociales vis-à-vis de l'exposition à la pollution.

5.1.3. Avancement des travaux

Les niveaux moyens annuels d'exposition aux $PM_{2,5}$ ont été estimés à une résolution spatiale de 10 m pour l'ensemble des 49 communes de la métropole grenobloise (444 000 habitants, Insee 2014) par modélisation (modèle *Sirane*, Atmo AuRA) sur la période 2015–2017. La moyenne des niveaux de $PM_{2,5}$ sur ces trois années a été prise comme référence dans cette étude *ex-ante*.

Au total, dix scénarios de réduction des niveaux d'exposition aux $PM_{2,5}$ ont été élaborés (Tableau II) :

- S1 à S3 : valeur cible d'exposition sur l'ensemble de l'agglomération,
- S4 et S5 : diminution homogène de l'exposition sur l'ensemble de l'agglomération,
- S6 à S8 : diminution de l'impact sanitaire en lien avec l'exposition aux $PM_{2,5}$,
- S9 et S10 : scénarios déclinés de la Directive européenne « Cible 2020 ».

Le bénéfice sanitaire de chaque scénario a été évalué grâce à plusieurs indicateurs complémentaires de santé :

- Mortalité non-accidentelle toutes causes confondues : expression du gain en nombre de décès évités par an chez les personnes de 30 ans et plus, en nombre d'années de vie chez les personnes de 30 ans et plus et en nombre de mois d'espérance de vie à 30 ans,
- Incidence du cancer du poumon : nombre de nouveaux cas de cancer du poumon évités par an,
- Petit poids de naissance à terme : nombre de cas évités par an.

Les gains sanitaires ont été calculés grâce aux données démographiques et de santé, obtenues auprès de l'Agence urbaine de la région grenobloise (AURG) et du Centre épidémiologique des causes de décès (CépiDC – Inserm), respectivement, ainsi qu'aux relations dose-réponse disponibles dans la littérature pour les différents indicateurs de santé choisis (Tableau III).



Tableau II. Description des dix scénarios hypothétiques de réduction de l'exposition aux particules fines (PM_{2.5}) considérés dans cette étude.

Scenario number	Scenario description	Scenario name	PM _{2.5} yearly level reduction
S1		"WHO guideline"	WHO yearly guideline (10 µg/m ³)
S2	Spatially homogeneous target value in the whole area	"No anthropogenic PM _{2.5} emissions"	Lowest nation-wide levels (4.9 µg/m ³) ^a
S3		"Quiet neighborhood"	Lowest study area district levels (10 th percentile of exposure) ^b
S4			
S5	Homogeneous PM _{2.5} decreases in the whole area	"-1 µg/m ³ "	Baseline ^c -1 µg/m ³
S6	Targeted reduction in PM _{2.5} -related mortality in the whole area ^d	"-1/3 of mortality"	Equivalent to decrease homogeneously and sufficiently the exposure baseline ^c to achieve the health objective ^e
S7		"-1/2 of mortality"	
S8		"-1/3 of mortality"	
S9	2008/50/EU Directive ^f "2020 target"	In the whole study area"	Baseline ^c -15%
S10		Restricted to PM _{2.5} exposure hotspots"	Baseline ^c -15%, only if baseline ≥90 th perc. of PM _{2.5} exposure levels ^g

^a Corresponding to the 5th percentile of PM_{2.5} concentration distribution among French rural towns [29].

^b The 10th percentile of PM_{2.5} exposure by Housing Block Regrouped for Statistical Information (IRIS) in the study area (corresponding to 10.3 and 12.4 µg/m³ in Grenoble and Lyon conurbations, respectively).

^c PM_{2.5} exposure average for the 2015-2017 period, taken as a reference in the present study.

^d Health objectives expressed as a percentage of the non-accidental death cases attributable to PM_{2.5} exposure that can be prevented under the scenario S2: "No anthropogenic PM_{2.5} emissions".

^e S6: -2.9 and -3.3 µg/m³ in Grenoble and Lyon conurbations, respectively; S7: -4.4 and -5.1 µg/m³; S8: -6.0 and -6.9 µg/m³.

^f Inspired by the 2008/50/EU Directive, which targets relative PM_{2.5} yearly average decreases to obtain by 2020. The decrease value depends on the exposure average for the last three years (2015-2017): -15% in the case of Grenoble and Lyon conurbations.

^g The 90th percentile corresponded to 16.0 and 17.4 µg/m³ in Grenoble and Lyon conurbations, respectively.

Tableau III. Relations dose-réponse utilisées pour l'estimation des effets de l'exposition chronique aux PM_{2.5} sur la santé.

Health event	Study	Relative risk (95% CI) for a 10 µg/m ³ increase in PM _{2.5} exposure
Non-accidental mortality	World Health Organization (2014) ^a [30]	1.066 (1.040 – 1.093)
Lung cancer incidence	Hamra et al. (2014) ^a [31]	1.09 (1.04 – 1.14)
Term low birth weight ^b	Pedersen et al. (2013) [32]	1.392 (1.124 – 1.769) ^c

^a Meta-analysis based relative risk.

^b Occurrence of low birth weight birth cases (<2 500 g) among term births (those occurring after the end of the 37th gestational week).

^c The original odds-ratio was reported for a 5 µg/m³ increase in exposure: 1,18 (1,06–1,33).

Pour chaque scénario, les coûts économiques intangibles – c'est-à-dire directement liés au décès, à la maladie et à la diminution de la qualité de vie – ont été calculés sur la base du nombre d'années de vie gagnées sous le scénario et du coût d'une année de vie humaine (= 99 786 €₂₀₁₇/an ±33%) [33]. Pour le cancer du poumon, les coûts tangibles – c'est-à-dire en lien avec les soins médicaux et la perte de productivité – ont également été estimés à partir des données de survie du cancer du poumon, des coûts liés aux traitements de la maladie et des estimations de temps d'inactivité professionnelle et des coûts induits. Les coûts économiques liés aux petits poids de naissance à terme n'ont pas pu être calculés par absence de données fiables dans la littérature.

Enfin, les niveaux d'exposition aux PM_{2,5} sous chaque scénario ont été stratifiés sur l'indice européen de défaveur sociale (EDI), fourni par la Plateforme méthodologique nationale pour l'étude et la réduction des inégalités sociales en oncologie (ERISC). Afin d'estimer la capacité des scénarios à réduire les inégalités sociales vis-à-vis de l'exposition à la pollution, le coefficient d'hétérogénéité de défaveur sociale (SDHC) de chaque scénario a été calculé selon la formule suivante :

$$SDHC_s = \frac{1}{10} \times \left(\sum_{d=1}^{10} E_d - 10 \times \min(E_d) \right)$$

avec *s* le scénario de réduction de la pollution de l'air, *d* le décile d'EDI et *E_d* le niveau moyen d'exposition aux PM_{2,5} dans le décile *d*. Dans le même but, la variance sous chaque scénario des expositions aux PM_{2,5} par décile d'EDI a également été comparée à celle sous la situation avant implémentation du scénario.

5.1.4. Résultats

Dans la situation de référence (période 2015–2017), l'exposition moyenne aux PM_{2,5} dans la métropole grenobloise est de 13,9 µg/m³ (5^e-50^e-95^e percentiles : 10,2-14,6-16,2 µg/m³) (Figure 10 et Figure 11). Au total, 2 601 personnes âgées de 30 ans et plus décèdent de façon non-accidentelle par an (moyenne calculée sur la période 2006–2015, c'est-à-dire sur les 10 dernières années de données disponibles). De plus, 269 nouveaux cas de cancer du poumon et 187 cas de petit poids de naissance à terme sont recensés en moyenne par an.

Les niveaux d'exposition aux PM_{2,5} attendus sous chaque scénario théorique de réduction de la pollution de l'air sont présentés Figure 12 et Tableau IV. La diminution des niveaux moyens d'exposition aux PM_{2,5} est minimale sous le scénario S10 « Cible 2020, hotspots », avec une diminution de seulement 0,2 µg/m³. Au contraire, en simulant une moyenne d'exposition aux PM_{2,5} égale à 4,9 µg/m³, le scénario S2 « Pas de PM_{2,5} d'origine anthropique » est, comme attendu, celui induisant la diminution maximale des PM_{2,5}.

Sous le scénario S2, 145 [Intervalle de Confiance à 95% : 90 ; 199] cas de décès, 20 [9 ; 30] nouveaux cas de cancer du poumon et 49 [19 ; 76] cas de petit poids de naissance à terme seraient évités chaque année dans l'agglomération grenobloise (Tableau IV et Tableau V). Cela correspond à un gain d'environ 4 960 et 310 années de vie au regard de la mortalité non-accidentelle toutes causes confondues et de l'incidence du cancer du poumon, respectivement. Les bénéfices économiques associés aux gains en années de vie – qui peuvent être interprétés comme une estimation du coût de l'exposition aux PM_{2,5} dans la situation de référence (2015–2017) – s'élèvent à 495 millions d'euros pour les coûts intangibles liés à la mortalité non-accidentelle toutes causes confondues. Pour le cancer du poumon, les coûts intangibles s'élèvent à 31 millions d'euros tandis que le total des coûts tangibles (directs et indirects) sont estimés à 1,4 millions d'euros.

Réduire les niveaux d'exposition aux PM_{2,5} au niveau recommandé par l'OMS (10 µg/m³ ; scénario S1) réduirait le taux de mortalité enregistré dans la région grenobloise de 25 [15 ; 34] cas pour 100 000 personnes-années ; cela correspond à un gain d'espérance de vie à 30 ans de 4,5 mois [2,8 ; 6,3]. Les bénéfices sanitaires tirés de ce scénario S1 sont proches de ceux du scénario S7 qui vise à réduire de 50% la mortalité liée à l'exposition aux PM_{2,5}. Respecter la valeur cible de l'OMS permettrait de réduire de 226 millions d'euros par an les coûts intangibles liés à la mortalité non-accidentelle toutes causes confondues ainsi que de 14 et 0,6 millions d'euros les coûts intangibles et tangibles liés au cancer du poumon, respectivement.



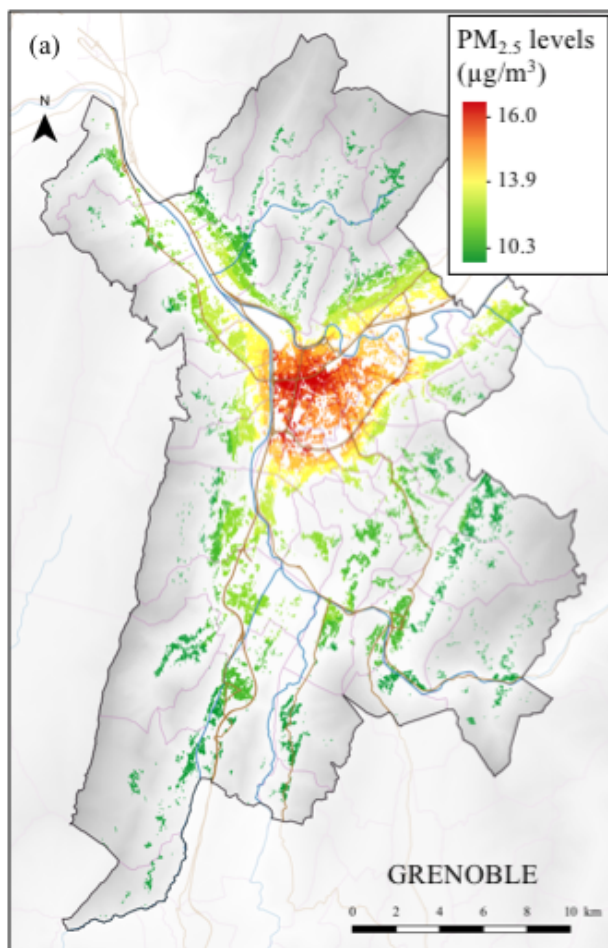


Figure 10. Exposition aux PM_{2.5} de la population de la Métropole grenobloise (exposition annuelle moyenne sur la période 2015–2017, en µg/m³).
Les zones inhabitées apparaissent ici en nuances de gris.

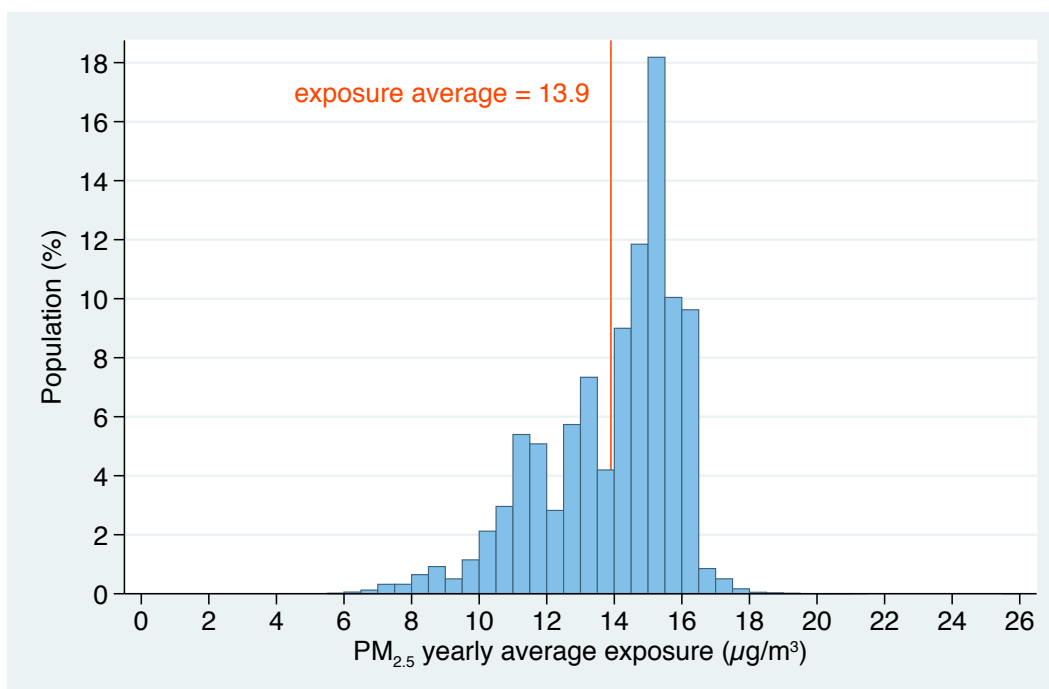


Figure 11. Distribution des niveaux d'exposition aux PM_{2.5} de la population de la Métropole grenobloise (exposition annuelle moyenne sur la période 2015–2017, en µg/m³).

Enfin, une réduction de l'exposition à la pollution atmosphérique restreinte aux points de concentration des $PM_{2,5}$ (Scénario S10) permettrait de prévenir 4 [2 ; 5] décès par an, tandis qu'une diminution homogène des niveaux de $PM_{2,5}$ de $1 \mu g/m^3$ (Scénario S4) permettrait d'en éviter 16 [10 ; 23]. Sous le scénario S10, le coût annuel de la mortalité non-accidentelle toutes causes confondues serait diminué de 17 millions d'euros, et celui du cancer du poumon de 0,8 millions d'euros. Le scénario de diminution de $1 \mu g/m^3$ (Scénario S4) est quant à lui associé à des économies de 52 millions d'euros pour la mortalité non-accidentelle toutes causes confondues et de 3,6 millions d'euros pour le cancer du poumon.

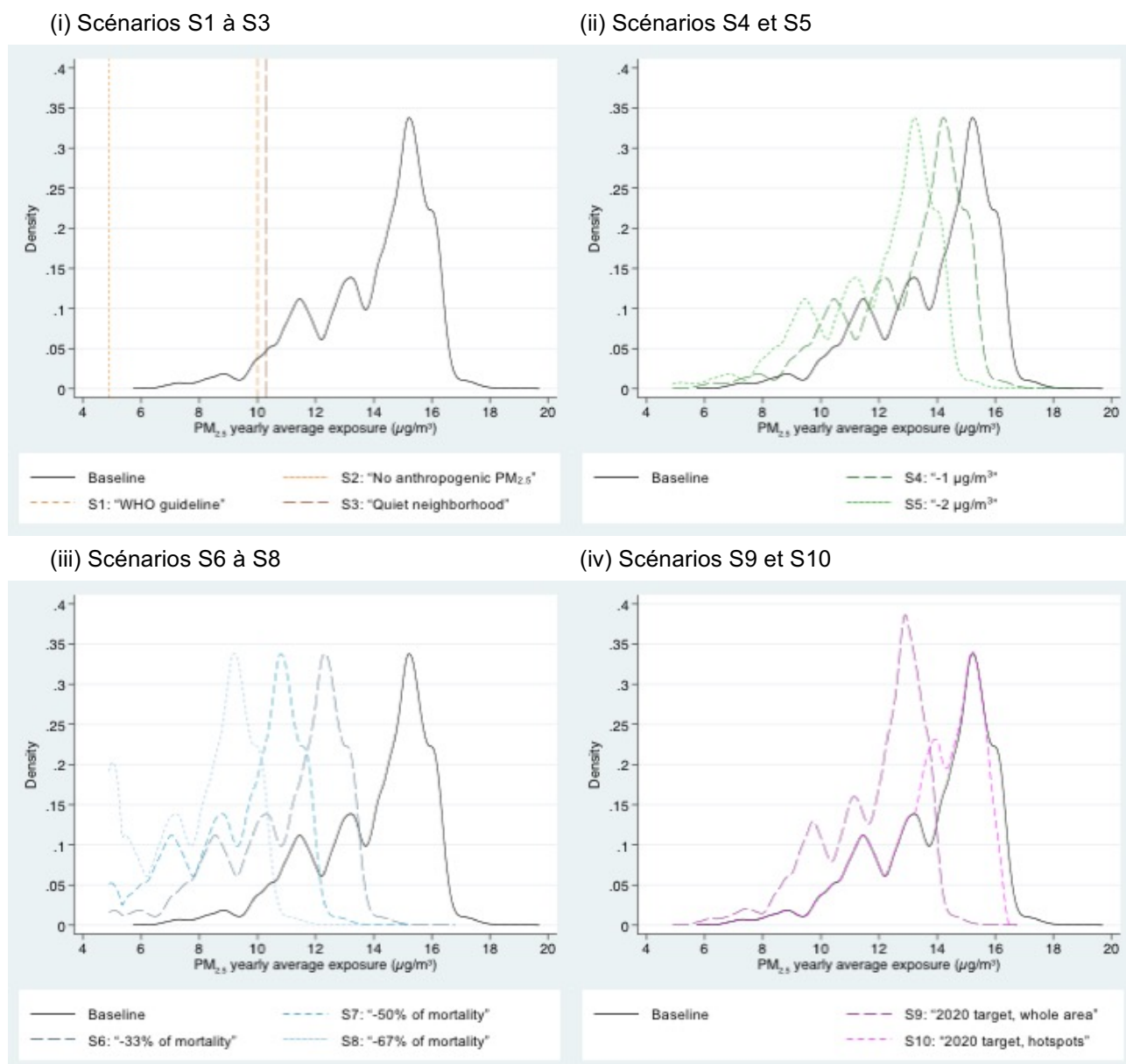


Figure 12. Exposition estimée aux $PM_{2,5}$ de la population de la Métropole grenobloise (exposition annuelle moyenne, en $\mu g/m^3$) pour chaque scénario théorique de réduction de la pollution de l'air.

(i) Scénarios visant une valeur cible d'exposition dans toute la zone d'étude (S1 à S3), (ii) scénarios diminuant de façon homogène l'exposition dans la zone d'étude (S4 à S5), (iii) scénarios visant une diminution de la mortalité en lien avec l'exposition aux $PM_{2,5}$ dans la zone d'étude (S6 à S8), (iv) scénarios inspirés de la Directive européenne 2008/50/CE (S9 et S10). La courbe noire représente la distribution des niveaux d'exposition aux $PM_{2,5}$ pendant la période de référence 2015-2017.



Tableau IV. Effets estimés des scénarios en termes d'exposition de la population aux PM_{2.5} et de mortalité non-accidentelle toutes causes confondues.

PM _{2.5} exposure reduction scenarios	Population PM _{2.5} exposure		Health benefits concerning all-cause non-accidental mortality										Economic costs associated to the health effects (life year loss)		
	Yearly average (µg/m ³)	5 th –50 th –95 th percentiles (µg/m ³)	Δ _{NAC} *‡		% of S2 §	% of baseline cases #		Mortality rate gain ¶		Gain in life expectancy months †		Gain in life years ‡		Intangible costs (in M€2017)	Low–high °
			95% CI	95% CI		95% CI	95% CI	95% CI	95% CI	95% CI	95% CI				
Grenoble conurbation (444,000 inhabitants)	13.9	10.2–14.6–16.2													
S1: "WHO guideline"	10.0	10.0–10.0–10.0	65	40–90	45%	2.5%	1.5–3.5%	25	15–34	4.5	2.8–6.3	2,263	1,384–3,158	226	92–420
S2: "No anthropogenic PM _{2.5} "	4.9	4.9–4.9–4.9	145	90–199	Ref.	5.6%	3.5–7.7%	55	34–76	10.0	6.1–13.9	4,963	3,027–6,950	495	201–925
S3: "Quiet neighborhood"	10.3	10.2–10.3–10.3	61	38–84	42%	2.3%	1.5–3.2%	23	14–32	4.3	2.6–5.9	2,120	1,297–2,958	212	86–394
S4: "–1 µg/m ³ "	12.9	9.2–13.6–15.2	16	10–23	11%	0.6%	0.4–0.9%	6	4–9	1.1	0.6–1.5	522	320–727	52	21–97
S5: "–2 µg/m ³ "	11.9	8.2–12.6–14.2	33	20–45	23%	1.3%	0.8–1.7%	12	8–17	2.1	1.3–2.9	1,046	641–1,457	104	43–194
S6: "–1/3 of mortality"	11.0	7.3–11.7–13.3	47	29–66	33%	1.8%	1.1–2.5%	18	11–25	3.0	1.9–4.2	1,518	930–2,115	151	62–281
S7: "–1/2 of mortality"	9.6	5.8–10.2–11.8	71	44–98	50%	2.7%	1.7–3.8%	27	17–37	4.6	2.8–6.4	2,300	1,407–3,209	230	94–427
S8: "–2/3 of mortality"	8.0	4.9–8.6–10.2	95	59–132	67%	3.7%	2.3–5.1%	36	22–50	6.3	3.8–8.7	3,119	1,906–4,356	311	127–580
S9: "2020 target, in whole area"	11.8	8.6–12.4–13.8	34	21–48	23%	1.3%	0.8–1.8%	13	8–18	2.3	1.4–3.1	1,120	686–1,560	112	46–208
S10: "2020 target, in hotspots"	13.7	10.2–14.1–15.9	4	2–5	3%	0.2%	0.1–0.2%	1	1–2	0.3	0.2–0.5	167	102–233	17	7–31

* Difference in the number of attributable cases before and after scenario implementation.

§ Gain (in %) compared to the number of avoided cases under the scenario S2, taken as a reference.

Proportion (in %) of all-cause non-accidental yearly death cases in Grenoble and Lyon conurbations, corresponding to 2,601 and 8,284 deaths, respectively.

¶ For 100,000 person-years.

† In people aged 30 (population average).

‡ In people aged 30 and older (global estimate for the whole population).

° The low and high values are calculated with the hypothesis that the unit value (in euros / life year) varies by plus or minus 33%.

Tableau V. Gains sanitaires estimés et coûts associés des scénarios au regard de l'incidence du cancer du poumon et des naissances de petit poids à terme.

PM2.5 exposure reduction scenarios	Health benefits related to lung cancer incidence										Health benefits related to term low birth weight cases					
	$\Delta_{NAC}^{*†}$	95% CI	% of S2 [§]	% of baseline cases [#]	95% CI	Intangible costs (in M€2017)	Low-high [°]	Tangible costs (in M€2017)	Low-high [°]	All costs (in M€2017)	Low-high [°]	Δ_{NAC}^*	95% CI	% of S2 [§]	% of baseline cases [¶]	95% CI
Grenoble conurbation (444,000 inhabitants)																
S1: "WHO guideline"	9	4–14	45%	3.4%	1.5–5.1%	14	4–28	0.6	0.2–1.2	15	5–29	24	9–39	49%	12.9%	4.8–21.0%
S2: "No anthropogenic PM _{2.5} "	20	9–30	Ref.	7.5%	3.5–11.1%	31	10–62	1.4	0.5–2.6	33	10–65	49	19–76	Ref.	26.3%	10.2–40.8%
S3: "Quiet neighborhood"	8	4–13	42%	3.1%	1.4–4.7%	13	4–26	0.6	0.2–1.1	14	4–27	23	8–37	46%	12.1%	4.5–19.8%
S4: "-1 µg/m ³ "	2	1–4	11%	0.9%	0.4–1.3%	4	1–7	0.2	0.1–0.3	4	1–8	6	2–10	12%	3.3%	1.2–5.5%
S5: "-2 µg/m ³ "	5	2–7	23%	1.7%	0.8–2.6%	7	2–14	0.3	0.1–0.6	7	2–15	12	4–20	24%	6.4%	2.3–10.8%
S6: "-1/3 of mortality"	7	3–10	33%	2.5%	1.1–3.7%	10	3–21	0.4	0.1–0.9	11	3–22	17	6–28	33%	9.1%	3.3–15.2%
S7: "-1/2 of mortality"	10	5–15	50%	3.7%	1.7–5.6%	15	5–31	0.7	0.2–1.3	16	5–32	25	9–41	50%	13.5%	5.0–22.1%
S8: "-2/3 of mortality"	13	6–20	67%	4.9%	2.3–7.4%	21	6–41	0.9	0.3–1.7	22	7–43	33	12–53	67%	17.8%	6.7–28.6%
S9: "2020 target, in whole area"	5	2–7	24%	1.8%	0.8–2.7%	7	2–15	0.3	0.1–0.6	8	2–16	13	5–21	26%	6.8%	2.4–11.4%
S10: "2020 target, in hotspots"	1	0–1	3%	0.2%	0.1–0.3%	0.8	0.2–2	0.03	0.01–0.1	0.8	0.2–2	1	1–2	3%	0.8%	0.3–1.3%

* Difference in the number of attributable cases before and after scenario implementation.

§ Gain (in %) compared to the number of avoided cases under the scenario S2, taken as a reference.

Proportion (in %) of the estimated incident lung cancer cases in Grenoble and Lyon conurbations, corresponding to 269 and 963, respectively.

¶ Proportion (in %) of the estimated total yearly number of term low birth weight cases in Grenoble and Lyon conurbations, corresponding to 187 and 657, respectively.

† In people aged 30 and older (global estimate for the whole population)

° The low and high values are calculated with the hypothesis that the unit value (in euros / life year) varies by plus or minus 33%.

Après stratification sur les déciles de défaveur sociale, on remarque que l'exposition moyenne aux PM_{2,5} varie en fonction du niveau social (Figure 13) : le SDHC est de 2,62 µg/m³ et la variance de l'exposition de 1,50 (p-valeur du test du Chi-2 de comparaison de la variance à zéro <10⁻¹⁶) (Figure 13 et Tableau VI). Les scénarios ciblant une valeur cible d'exposition dans l'ensemble de la métropole grenobloise (scénarios S1 à S3) sont les plus efficaces pour réduire les inégalités sociales vis-à-vis de l'exposition aux PM_{2,5} (Tableau VI). Le scénario S9 : « Cible 2020 », basé sur une diminution relative du niveau de PM_{2,5} à l'échelle de la métropole, permet également de réduire ces inégalités. Cependant, les scénarios correspondant à des baisses homogènes (Scénario S4 à S8) ou à une diminution sur une zone très restreinte (S10) ne permettent pas d'améliorer de manière significative l'équité sociale vis-à-vis de l'exposition à la population atmosphérique.

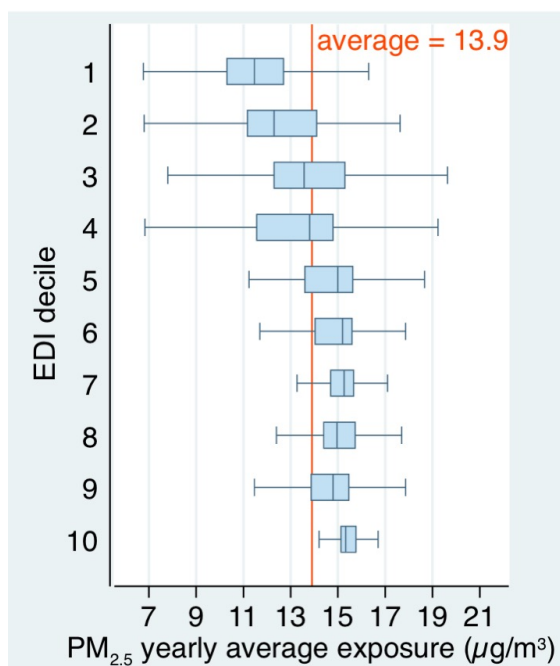


Figure 13. Distribution des niveaux d'exposition aux PM_{2,5} de la population de la Métropole grenobloise (exposition annuelle moyenne sur la période 2015–2017, en µg/m³) en fonction du décile de défaveur sociale. EDI = *European Deprivation Index* ; le 10e décile correspond à la population la plus défavorisée.

Tableau VI. Impact of each scenario on social differences in PM_{2,5} exposure.

PM _{2.5} exposure reduction scenarios	SDHC § (µg/m ³)	Variance	p-value*
Grenoble conurbation baseline (2015-2017)	2.62	1.50	-
S1: "WHO guideline"	0.25	0.01	0.019
S2: "No anthropogenic PM _{2.5} "	0.00	0.00	0.019
S3: "Quiet neighborhood"	0.23	0.01	0.019
S4: "-1 µg/m ³ "	2.62	1.50	1
S5: "-2 µg/m ³ "	2.53	1.45	0.26
S6: "-33% of mortality"	2.53	1.45	0.26
S7: "-50% of mortality"	2.45	1.39	0.19
S8: "-67% of mortality"	2.13	1.12	0.086
S9: "2020 target, in whole area"	2.24	1.13	0.028
S10: "2020 target, in hotspots"	2.41	1.32	0.12

* Grambsch test used to compare the variance of PM_{2,5} exposure by decile of European Deprivation Index (EDI) of the scenario to that of the baseline.

§ Social Deprivation Heterogeneity Coefficient (SDHC). A larger SDHC corresponds to an increased heterogeneity in PM_{2,5} exposure across social categories. Cf. Section 2.5 for details.

5.2. Livrable 2. Volet mesures d'action : développement de MECANO

5.2.1. Participants

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, avec la collaboration de l'IAB.

5.2.2. Objectifs

Identifier des actions sur le trafic et le chauffage au bois permettant d'atteindre les objectifs sanitaires fixés au livrable 1 – Développement et premières mises en œuvre de l'outil d'évaluation « MECANO ».

5.2.3. Implémentation

Les travaux présentés ici visent à identifier les actions sur le trafic et le chauffage au bois permettant d'atteindre les objectifs sanitaires fixés (cf. 5.1. Livrable 1. Evaluation *ex-ante* : étude d'impact sanitaire de scénarios théoriques et coûts associés). Les travaux réalisés à ce jour par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ont permis de concevoir et développer un outil original d'évaluation de scénarios d'actions en termes de concentration de particules fines $PM_{2,5}$ et d'exposition de la population. Cet outil est baptisé MECANO.

L'originalité de MECANO réside dans sa capacité i) à caractériser la responsabilité des différents secteurs dans l'exposition de la population aux $PM_{2,5}$ et ii) à évaluer très rapidement un très large spectre d'actions en termes de qualité de l'air et d'exposition de la population. En effet, si les outils de modélisation « classiques » de la qualité de l'air mobilisés pour évaluer des plans d'actions permettent de calculer très finement les impacts de scénarios, leur mise en œuvre est lourde et n'est donc généralement réalisée qu'en toute fin du processus décisionnel alors que les choix d'actions ne peuvent plus être ajustés.

MECANO a donc vocation à être utilisé, dès le début du processus de construction d'un plan d'actions, pour apporter aux décideurs les principaux éléments de sensibilité permettant de faire des choix d'actions efficaces sur l'exposition et la santé. Son utilisation « en première approche » n'est pas exclusive d'une évaluation complète et détaillée du scénario finalement retenu par une approche « classique » (Cf. 5.3. Livrable 3. Scénarios impliquant des actions concernant le trafic et/ou le chauffage au bois).

5.2.4. Avancement des travaux

Le développement de l'outil MECANO par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a demandé deux étapes :

- Etape 1 : modélisation « chimie-transport-dispersion » des particules $PM_{2,5}$ en mode « suivi des sources d'émissions ». Ce calcul initial très détaillé permet de calculer la concentration annuelle moyenne en $PM_{2,5}$ en tout point du territoire régional ainsi que l'origine géographique et sectorielle (trafic, chauffage au bois...) de cette concentration. *Par exemple : au point x,y du centre-ville de Grenoble, la concentration est de $15 \mu g/m^3$, dont $4 \mu g/m^3$ ont pour origine l'extérieur de l'agglomération, $4 \mu g/m^3$ ont pour origine le trafic de la Métropole et $5 \mu g/m^3$ proviennent du chauffage au bois de la Métropole.*
- Etape 2 : construction d'une interface permettant de tester des scénarios d'actions en modulant (par de simples opérations arithmétiques) les différentes composantes géographiques et/ou sectorielles de la concentration issues du calcul initial (étape 1). Cette interface permet de calculer en quelques secondes la concentration de $PM_{2,5}$ correspondant au scénario testé en tout point du territoire.

L'étape 1 repose sur l'utilisation combinée de deux modèles de chimie/transport/dispersion atmosphérique : CAMx et SIRANE (Figure 14) :

- Le modèle CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions) est un modèle eulérien de chimie-transport développé par les équipes de Ramboll Environ [34]. Il permet de simuler les concentrations dans l'atmosphère de polluants particulaires et gazeux de l'échelle continentale à la méso échelle. Pour notre étude, les cartes de concentrations des différents polluants sont réalisées à 3×3 km de résolution à partir des champs météorologiques issus des simulations avec le modèle WRF (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/>)



[users/docs/arw_v3.pdf](#)) et le cadastre d'émission d'Atmo Auvergne-Rhône-Apes. Environ 600 espèces chimiques sont suivies dans le calcul CAMx.

- Le modèle SIRANE est un modèle de dispersion à l'échelle urbaine développé par l'Ecole Centrale de Lyon (<http://air.ec-lyon.fr/Doc/Publi/Soulhac-Atm-Env-2011-a.pdf>). Ce modèle permet de calculer les concentrations de polluants à partir d'un réseau de rues prenant en compte le bâti. Il est validé pour des échelles de l'ordre de la centaine à la dizaine de mètres. Dans la chaîne de traitement, SIRANE modélise le transport de polluants dû aux émissions issues des trafics routiers, ferroviaires et aériens, ainsi que les plus grandes sources ponctuelles industrielles et conduit à des cartes de 10 m de résolution.

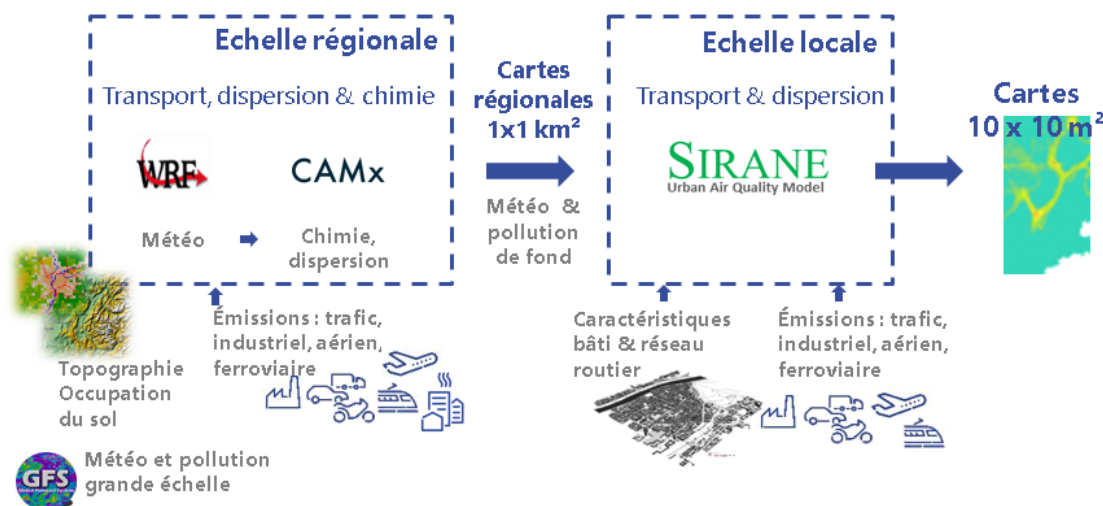


Figure 14. Chaîne de modélisation mobilisée pour développer l'outil MECANO.

Ces deux modèles sont utilisés en mode « suivi des sources d'émissions » (« source apportement ») des PM : les particules émises sont « tatouées » en entrée de la chaîne de calcul en fonction de leur origine sectorielle et géographique et sont ensuite « suivies » tout au long des calculs. Les sources d'émissions ciblées ont été regroupées en fonction de leur :

- Origine sectorielle : industrielles, routier, chauffage résidentiel, agriculture, « autre »
- Origine géographique :
 - Dans le cas de CAMx, les zones retenues sont : l'extérieur de Rhône-Alpes, Rhône-Alpes, la région urbaine grenobloise, le bassin grenoblois (Métropole grenobloise + Le Grésivaudan + Pays Voironnais), la Métropole Grenobloise
 - Dans le cas de SIRANE, 3 zones, incluses à l'intérieur de la Métropole ont été retenues : Métropole Grenobloise, Grenoble et communes de la 1^{ère} couronne et Grenoble (Figure 15).

Ce calcul initial est très lourd et demande environ 1 mois. L'ensemble des résultats de ce calcul est intégré dans une matrice présentant, pour chaque point du territoire, la concentration rattachée à chaque secteur géographique d'origine et à chaque activité.

L'étape 2 a consisté à développer une interface qui permet de tester des scénarios d'actions très rapidement en manipulant, par de simples opérations arithmétiques, les résultats du calcul initial (i.e., les contributions des différents secteurs d'activité/géographiques ; Figures 16 et 17). Ainsi, alors qu'il faut compter près d'un mois de calcul pour obtenir les cartes de contributions initiales (étape 1), la carte de concentration de PM_{2,5} liée à un scénario est obtenue en quelques minutes. Outre les cartes de concentration, MECANO permet de calculer l'exposition moyenne de la population.

5.2.1. Premiers résultats

La section suivante présente les résultats qui peuvent être obtenus grâce à MECANO et illustre l'intérêt d'un tel outil dans le cadre de l'accompagnement des décideurs au début du processus de construction d'un plan d'actions. Les exemples sont focalisés sur le cas du territoire Métropolitain.

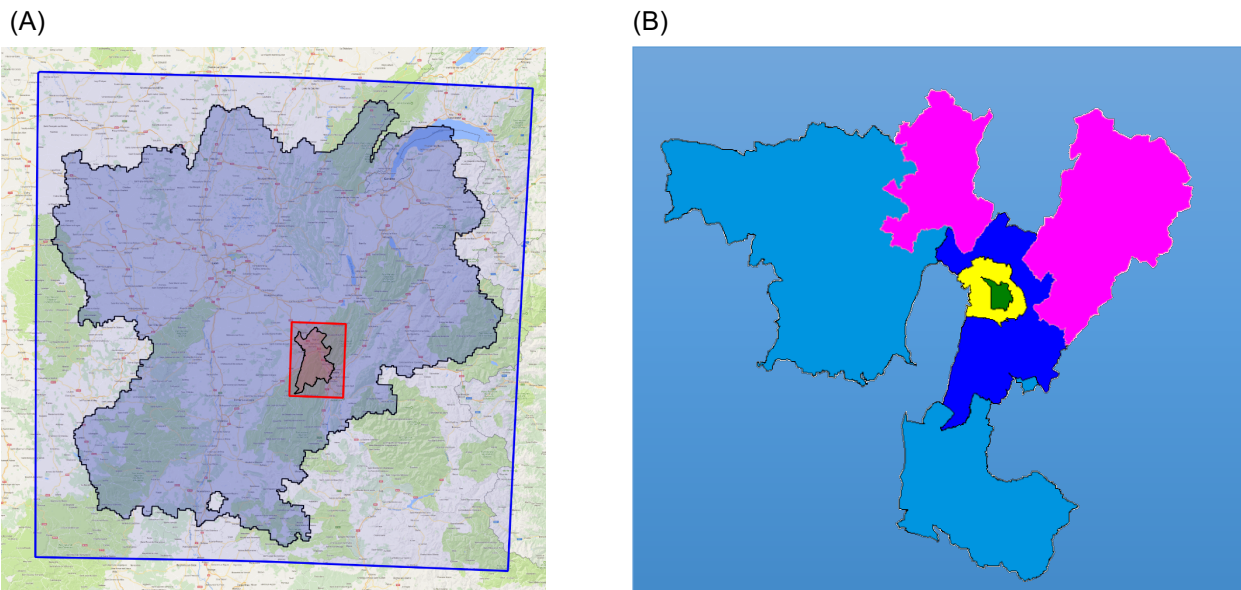


Figure 15. (A) Les zones Rhône-Alpes et Métropole et (B) les zones Région urbaine grenobloise, bassin grenoblois, Métropole, 1^{ère} couronne et Grenoble.

1. Analyse des secteurs responsables de la pollution aux PM_{2,5} en différents points du territoire

La Figure 16 présente la carte des concentrations en PM_{2,5} de la région grenobloise calculée par MECANO « cas de base » (à gauche), ainsi que la contribution des différents secteurs géographiques/d'activité responsables de la concentration en différents points de la zone (histogramme à droite).

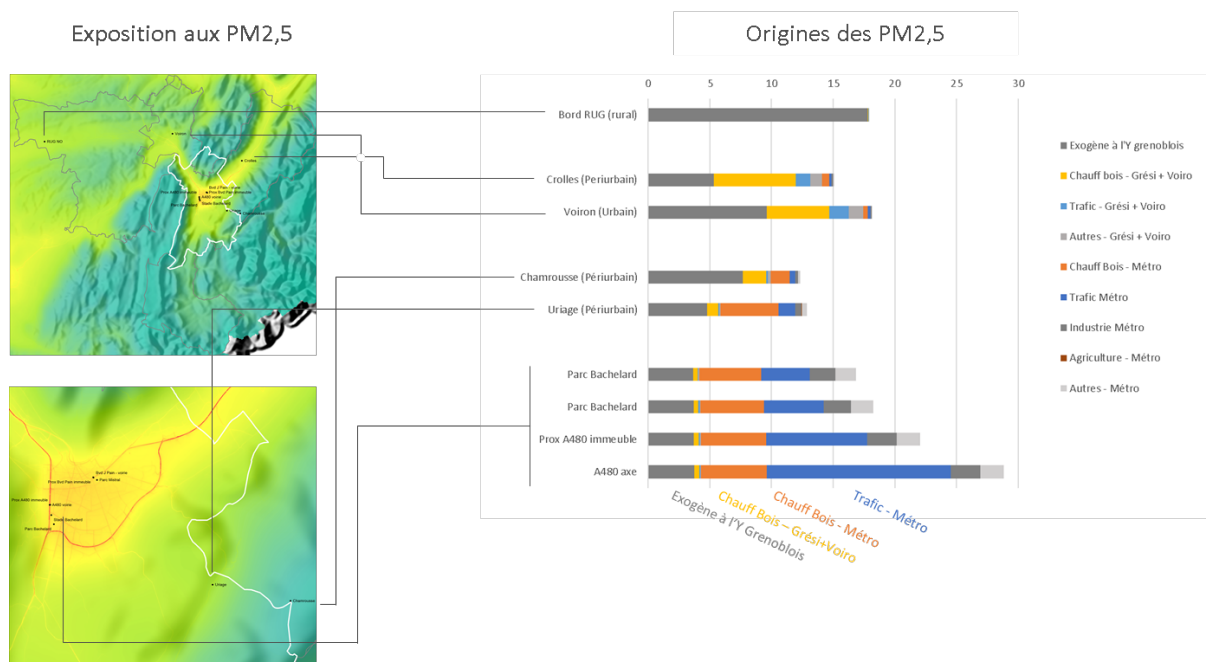


Figure 16. Utilisation de MECANO pour identifier les secteurs géographiques et d'activités responsables de la concentration en PM_{2,5} en différents points du territoire.

A gauche : cartes de concentration (les différents domaines sont délimités en gris, le périmètre de la Métropole grenobloise est délimité en blanc). A droite : la contribution des différents secteurs géographiques/d'activité responsables de la concentration en différents points.



Ainsi, il apparaît que l'exposition des habitants est variable dans l'espace et qu'elle est liée à :

- Une part de particules exogènes au bassin grenoblois (c.à.d. émises à l'extérieur de cette zone ; en gris). Cette part exogène est plus forte en périphérie du bassin grenoblois.
- Le chauffage au bois individuel de l'agglomération (en orange).
- Les transports routiers de l'agglomération selon la localisation (en bleu), dont l'influence dépend fortement de l'éloignement à une infrastructure routière.

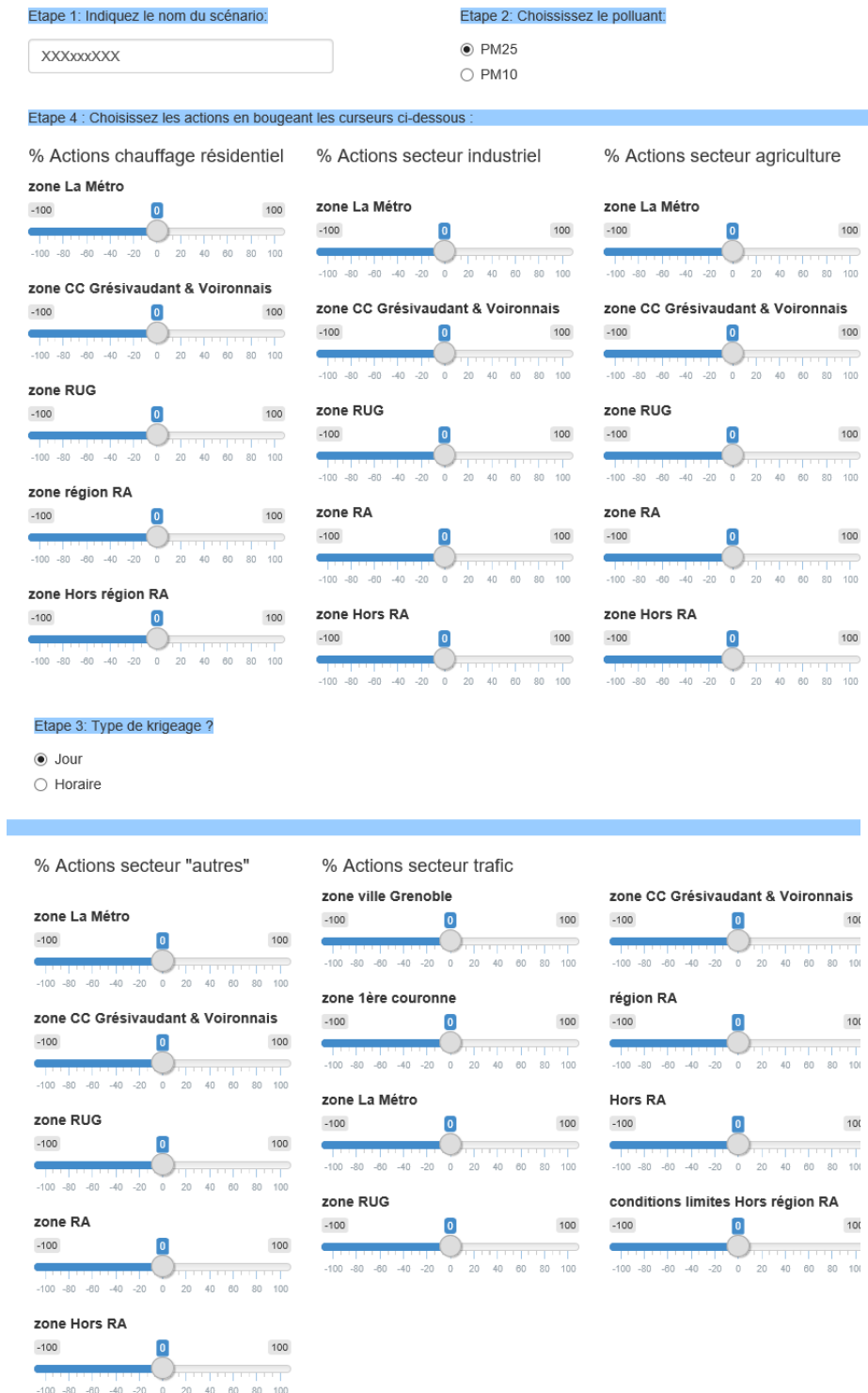


Figure 17. Capture d'écran de l'interface graphique permettant de « piloter » l'outil d'évaluation MECANO.

2. Analyse du potentiel des différents leviers d'actions à réduire l'exposition de la population aux PM_{2,5}

MECANO a été utilisé pour simuler de manière systématique la modulation des émissions (de 0 à 100%) de différents secteurs géographiques et d'activité. Au total plusieurs centaines de scénarios ont été testés. Une partie des résultats sont synthétisés dans la figure ci-dessous qui présente l'impact de la modulation des émissions de différents secteur sur l'exposition de la population. Ils correspondent à des scénarios de variation des émissions :

- De tous les secteurs d'activité du territoire métropolitain simultanément (Figure ci-dessous, en vert)
- Du chauffage bois et du trafic routier du territoire Métropolitain simultanément (en rose)
- Du chauffage au bois du territoire Métropolitain (en orange)
- Du trafic routier du territoire Métropolitain (en bleu)

Les cartes présentées dans la Figure 18 correspondent à la courbe rose. Elles représentent la concentration en PM_{2,5} liée au cas de base (au haut), au scénario « réduction de 100% des émissions du chauffage au bois et des transports routiers du territoire Métropolitain » (en bas à gauche). La carte en bas à droite représente la différence de concentration entre ces deux situations (la couleur verte correspond à une réduction de la concentration par rapport au cas de base).

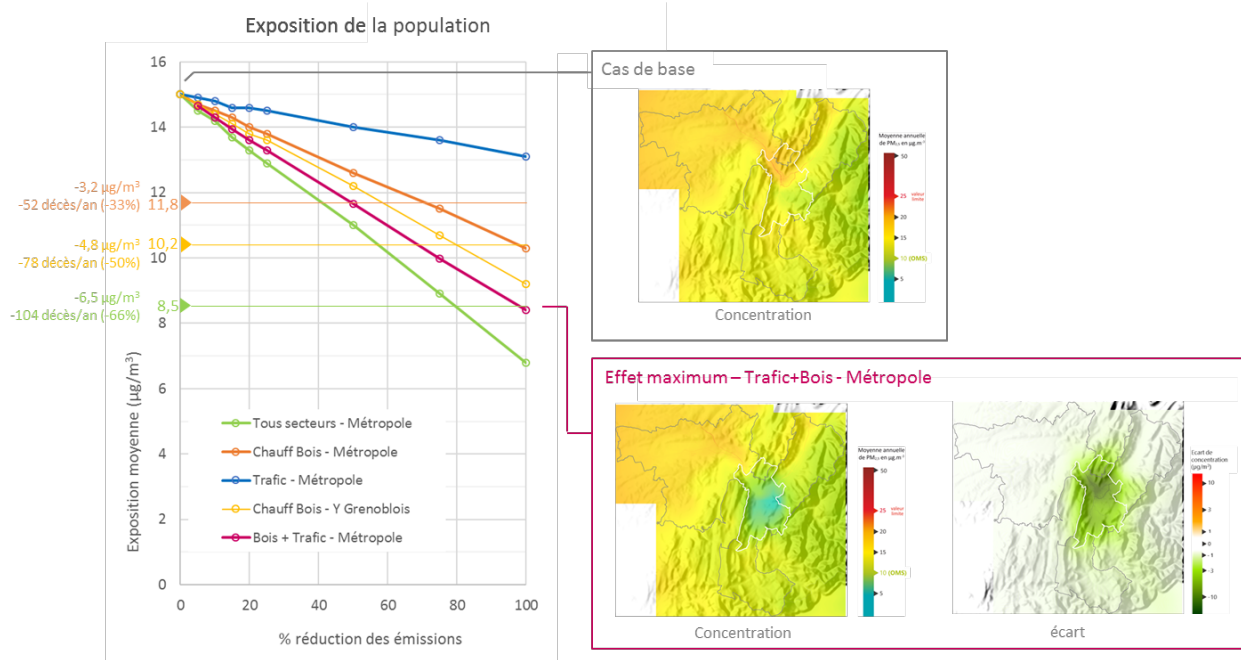


Figure 18. Utilisation de MECANO pour analyser le potentiel des différents leviers d'actions à réduire l'exposition de la population aux PM_{2,5}.

Ces résultats « illustratifs » permettent de mettre en évidence que :

- L'exposition moyenne de la population de la Métropole grenobloise pour le « cas de base » (en absence d'action) est de 15 µg/m³ (Cf. ordonnée à l'origine)
- **Le potentiel d'action « intra-agglomération » est fort puisque la « coupure » totale des émissions de la Métropole permet de réduire de 55% l'exposition des habitants** (variation de de 15 à 6,8 µg/m³ ; Cf. courbe verte). Toutefois, il est limité par la part de PM_{2,5} exogènes au territoire (qui est donc responsable de 45% de l'exposition des habitants de l'agglomération).
- Le chauffage au bois et le trafic routier dans l'agglomération constituent le principal gisement de gain d'exposition (80% du « gisement » local ; voir courbe rose).
- **Agir sur le chauffage au bois dans l'agglomération est un moyen très efficace de réduire l'exposition de la population aux PM_{2,5}** (il est responsable de 31% de l'exposition des habitants de l'agglomération et représente 57% du « gisement » métropolitain de gain d'exposition ; voir courbe orange)
- **Agir sur le transport routier a un effet sensible mais modeste sur l'exposition moyenne de la population aux PM_{2,5}** (23% du « gisement » métropolitain de gain d'exposition ; voir courbe bleue). Agir sur les transports routiers bénéficie majoritairement aux populations les plus exposées (« en situation de

proximité routière »). Agir sur le trafic permet donc de réduire les inégalités d'exposition aux $PM_{2,5}$. Le levier « trafic » tend à diminuer en lien avec la réduction des émissions des transports routiers.

3. Analyse « simultanée » des impacts de la modulation des émissions du chauffage au bois et des transports routiers

La Figure 19 synthétise les résultats de l'évaluation de 400 scénarios réalisés avec MECANO consistant en une modulation systématique des émissions du chauffage au bois et du trafic routier du territoire Métropolitain. Elle présente l'exposition moyenne de la population en fonction de la variation des émissions de chauffage au bois du territoire de la Métropole et des émissions des transports routiers de ce même territoire. Cette figure montre que :

- Comme décrit précédemment, la réduction des émissions du chauffage au bois est plus « efficace » pour réduire l'exposition de la population que la réduction des émissions du trafic routier.
- Il y a de nombreuses combinaisons d'actions « chauffage au bois » / « transports routiers » qui permettent d'atteindre un niveau d'exposition donné.

Ce type de représentation constitue un élément d'aide à la décision essentiel puisqu'il permet de sélectionner une combinaison d'action chauffage/trafic correspondant à un niveau d'ambition donnée (cf. par exemple les isolignes blanches qui illustrent un niveau d'exposition donné).

4. Évolutions en cours de mise en œuvre

Deux évolutions de l'outil MECANO sont en cours de mise en œuvre :

- MECANO produira des résultats en termes de qualité de l'air (comme présenté précédemment) mais aussi en termes d'impacts de santé. Comme présenté dans la section consacrée au livrable 1, le lien entre l'exposition de la population aux $PM_{2,5}$ et les impacts de santé ont été caractérisés. Cette relation a été implémentée directement dans MECANO de manière à ce que chaque scénario testé avec l'outil soit évalué directement en termes de concentration, d'exposition de la population mais aussi de santé.
- MECANO permettra de tester des scénarios définis en termes de variation des émissions de différents secteurs (comme présenté précédemment), mais aussi en puisant dans une bibliothèque d'actions concrètes (par ex. prime air bois permettant le renouvellement de X% des appareils anciens, politique cyclable permettant de réduire de X% les véhicules dans le centre-ville...).

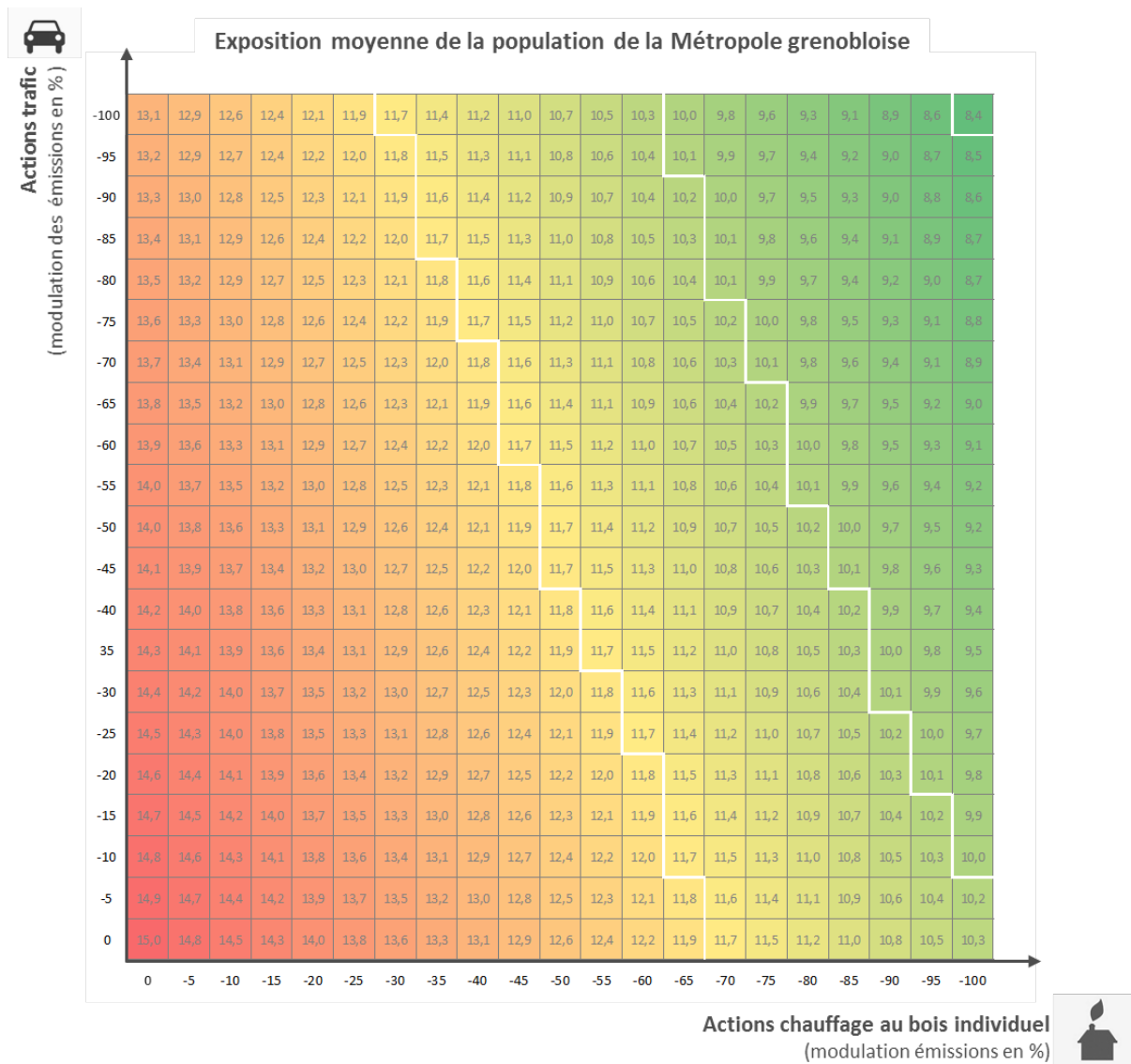


Figure 19. Modulation des émissions du chauffage au bois et du trafic routier et estimation de l'exposition moyenne résultante aux PM_{2,5} de la population de la métropole grenobloise.



5.3. Livrable 3. Scénarios impliquant des actions concernant le trafic et/ou le chauffage au bois

5.3.1. Participants

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA).

5.3.1. Objectifs

Développer une chaîne de modélisation permettant de connecter les modèles de transport-usage des sols aux modèles de pollution.

5.3.2. Avancement des travaux et résultats

1. Chaîne de modélisation numérique chimie/transports/dispersion

La chaîne de modélisation numérique chimie/transports/dispersion qui sera mise en œuvre par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes dans le cadre de l'évaluation des scénarios identifiés (livrable 2) permet de cartographier les niveaux de polluants heure par heure à une résolution spatiale de 10 m (Figure 20). Elle peut être mobilisée pour établir des diagnostics (situation de référence) ou évaluer des scénarios prospectifs.

Cette chaîne de modélisation a notamment pour données d'entrée : les émissions spatialisées de tous les secteurs (qui seront calculées sur la base du référentiel PCIT/OMINEA – CITEPA ; Les émissions du trafic routiers seront calculées grâce à la méthode standardisée de calcul des émissions des transports COPERT 5 et des simulations trafics réalisées à l'aide du modèle LUTI TRANUS), une modélisation de la météorologie, le relief, le bâti, les niveaux de polluants aux limites du domaine de calcul. Elle repose sur l'imbrication du modèle méso-échelle Chimère et du modèle SIRANE (gaussien avec prise en compte du bâti).

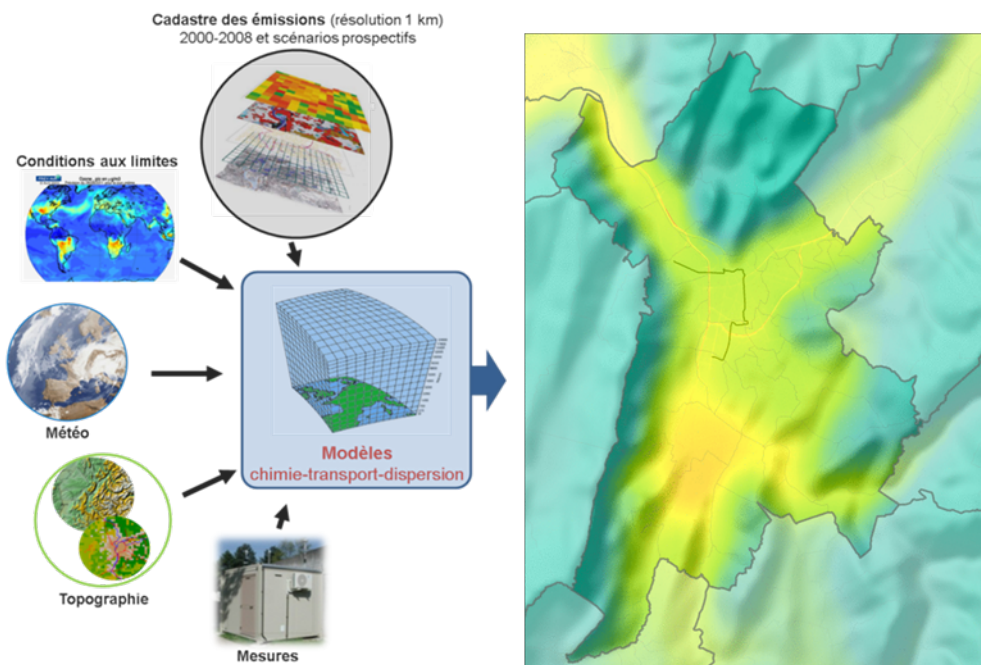


Figure 20. Chaîne de modélisation numérique pour le diagnostic, la prévision quotidienne court terme et les évaluations prospectives.

2. Calage du modèle TRANUS de Grenoble

Le calage du modèle TRANUS de Grenoble a été amélioré de façon à ce que la qualité des simulations soit à la hauteur des besoins du projet.

L'implémentation des scénarios de simulation économique et d'urbanisme à l'horizon 2020 et 2030 est basée sur le document du SCOT. Le SCOT définit des valeurs chiffrées de nouveaux logements à construire pour chaque commune, et associe à ces valeurs un seuil maximal ou minimal à respecter, en fonction de la typologie urbaine de chaque municipalité. Le logiciel TRANUS, suivant les principes des modèles d'entrées/sorties, peut limiter la production d'un secteur générique n dans une zone générique j , en définissant un seuil de capacité de production minimale ou maximale. De ce fait les seuils définis par le SCOT ont été reproduits dans le modèle TRANUS-Grenoble. Si, après l'exécution du modèle, la production attribuée à une zone générique j se situe dans les seuils établis, le prix d'une unité de production de ce secteur sera égal au coût de production, augmenté de la valeur ajoutée. Si, toutefois, la production est supérieure au seuil maximal ou inférieure au seuil minimal, le prix serait alors déterminé par l'équilibre entre offre et demande. À la fin de chaque itération, le modèle contrôle ces restrictions et ajuste les prix en conséquence ; en particulier, le prix de l'unité de production du secteur générique n est augmenté si la restriction maximale est violée et réduit si la restriction minimale est violée. Trois scénarios de simulation économique et d'urbanisme ont ainsi été définis : un premier scénario simule la mise en œuvre intégrale des nouveaux objectifs d'urbanisation (relatifs aux nouvelles unités de logements de type résidentiel) contenus dans le SCOT de la Région Urbaine Grenobloise et deux scénarios contrastés, qui supposent une implémentation partielle des objectifs du SCOT, avec une dynamique de centralisation et de polarisation urbaine dans le deuxième scénario et une tendance à la dispersion urbaine et à l'étalement dans le troisième scénario.

Les différentes briques permettant de connecter le modèle TRANUS de Grenoble et le modèle ESPACE développé par ATMO AuRA ont été développées. En particulier, cela a nécessité le développement d'outils permettant de re-projeter les résultats sur la distribution du trafic routier issue des simulations du modèle TRANUS de Grenoble dans les réseaux de transport du modèle VISUM utilisé en entrée du modèle ESPACE. Le modèle d'émission nécessite les valeurs de trafic référées à une journée entière. Cela a donc nécessité l'implémentation d'une nouvelle instantiation de TRANUS-Grenoble simulant l'heure de pointe du soir (HPS), la version précédente du modèle ne simulant le trafic qu'à l'heure de pointe du matin (HPM). Les valeurs du trafic journalier restent à estimer, via des méthodes standards, à partir du trafic routier à l'HPM et l'HPS.

Enfin, le travail de conception de la modélisation d'une ZCR (pour les véhicules particuliers) a été effectué. Dans le détail, il s'agit d'introduire dans le modèle TRANUS-Grenoble une nouvelle catégorie de véhicule particulier (moins polluante) qui peut circuler dans le périmètre de ZCR, et d'interdire l'accès à la ZCR aux autres véhicules. Cette catégorie de véhicule sera différenciée par un « coût d'investissement » supérieur à celui défini pour les véhicules particuliers polluants, par de meilleures performances énergétiques (dans TRANUS, il est possible de définir pour chaque type de véhicule une courbe de consommation d'énergie en fonction de la vitesse de circulation), ainsi que par des paramètres de préférence par groupe de population (catégories de demande de transport) supérieurs par rapport à ceux des véhicules polluants. Le périmètre de fonctionnement de la ZCR a été défini en coïncidence avec les limites de l'agglomération urbaine de Grenoble et les caractéristiques des tronçons routiers inclus dans ce périmètre ont été modifiées de manière à permettre seulement la circulation à la nouvelle catégorie de véhicules particuliers moins polluants. Une simulation à 2020 donnera des résultats sur la distribution du trafic routier et la répartition modale suite à l'introduction de la ZCR (en fonction des paramètres choisis). Les simulations à 2030 nous permettront de suivre l'évolution de ces phénomènes ainsi que leurs impacts (effet de rétroaction) sur l'usage du sol (consommation des surfaces de type résidentiel) et sur la localisation des ménages sur tout le bassin d'emploi grenoblois (i.e., sur un périmètre correspondant approximativement à celui de l'EMD).



5.4. Livrable 4. Volet environnemental : mesures sur 3 sites différenciés de la métropole grenobloise

5.4.1. Participants

Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE, CNRS-Université Grenoble-Alpes) et Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Le LCSQA est indirectement partenaire, en raison des mesures maintenues à la station de fonds de Grenoble Les Fresnes.

5.4.2. Objectifs

Déterminer :

- s'il y a des différences importantes de contribution de sources d'émissions des PM et de leur potentiel oxydant pour des sites différenciés sur la zone géographique de la Métro,
- si on peut observer des évolutions au cours du temps en liaison avec les mises en place d'actions du PPA Grenoblois

5.4.3. Implémentation

Il s'agit de réaliser des mesures de composition chimique et de Potentiel Oxydant sur des séries de prélèvements de PM₁₀, sur deux périodes d'un an chacune (au plus vite dans le programme, puis au bout de 2 ou 3 ans). Ces prélèvements sont implémentés sur 3 sites de typologies très différentes, selon des protocoles permettant de réaliser une étude des sources d'émissions par méthodologie PMF (collecte 1 jour sur 3 ; analyses d'une large gamme d'espèces chimiques). En parallèle, des capteurs de température doivent être installés sur les pentes des montagnes autour de Grenoble.

5.4.4. Avancement des travaux

Des séries de capteurs de température ont été installés le long des pentes autour de Grenoble (massifs de la Chartreuse et du Vercors), afin de pouvoir établir des classifications des journées selon la méthodologie mise au point pour l'Arve (programme DECOMBIO).

Les prélèvements des PM₁₀ ont été réalisés sur la première année du programme, d'Avril 2017 à Avril 2018. Les 3 sites choisis ont des caractéristiques très différentes : en utilisant la typologie des AASQA, la Caserne de Bonne est un site urbain se trouvant dans l'hyper-centre grenoblois (éco-quartier piéton) ; le site des Frênes se situe au sud dans la zone urbaine de la ville de Grenoble et est considéré comme un site de fond urbain ; le site de Vif est un site périurbain/rural à environ 11 kilomètres au Sud du site Caserne de Bonne (Figure 21).

Environ 300 échantillons ont été collectés sur cette année (Tableau VII), et analysés pour les espèces chimiques maintenant classiques au laboratoire (programmes DECOMBIO et SOURCES, par exemple), ainsi que pour leur potentiel oxydant (via 3 mesures différentes, AA, DTT, DCFH). La base de données sur ces prélèvements est donc finalisée.

Ces données ont commencé à être traitées (stage de M2 de K. Asslanian, Avril-Sept 2018). Les données de concentrations sur les différents sites ont été comparées, puis ont été utilisées dans des analyses PMF des contributions des sources. Les données de PO ont elles aussi été comparées. Quelques résultats marquants sont présentés ci-dessous. On notera qu'un article est en cours de rédaction, ces données ayant un caractère unique, entre autres avec l'analyse PMF sur des sites dans une même zone urbaine.

Tableau VII. Echantillons de PM collectés lors de la première campagne de mesure.

Sites de mesure	Nombre d'échantillons collectés	Nombre d'éléments chimiques intégrés dans la PMF	Série temporelle des mesures
Grenoble – Les Frênes	125	29	28/02/2017-10/03/2018
Grenoble – La Caserne de Bonne	127	29	28/02/2017-10/03/2018
Vif	127	29	28/02/2017-10/03/2018



Figure 21. Localisation des trois stations de surveillance de la qualité de l'air utilisées pour la collecte des PM₁₀ lors de la première campagne de mesure.

5.4.5. Résultats

Les figures ci-dessous présentent les évolutions des concentrations pour le sulfate (très majoritairement issu de l'oxydation de SO₂ et du transport à longue distance) (Figure 22) et pour le cuivre (très majoritairement issu des émissions véhiculaires indirectes par l'usure des freins, et plutôt d'origine locale) (Figure 23). On note que les concentrations de sulfate sont quasiment identiques sur les 3 sites sur l'ensemble de la période de prélèvement, quand les concentrations de cuivre sont nettement différentes (plus élevées à la Caserne de Bonne, particulièrement en hiver, et plus faibles sur le site suburbain de Vif). Cette observation peut être étendue à d'autres espèces chimiques, pour lesquelles on voit de nettes différences entre sites pour les espèces issues des sources dont on suppose qu'elles sont plutôt locales (combustion de la biomasse, nitrates d'origine secondaire, ...).

Ces différences se retrouvent (même sur les moyennes annuelles, Figure 24) dans l'analyse PMF qui a été faite sur ces données, où l'on note de plus grandes concentrations des nitrates à la Caserne de Bonne, et de la combustion de la biomasse sur le site suburbain de Vif.

Finalement, la Figure 25 présente les évolutions des moyennes mensuelles des mesures de PO_{DTT} (exprimées par m³ d'air) pour ces 3 sites. On notera que les mesures à la Caserne de Bonne présentent des moyennes assez systématiquement plus fortes, alors que les mesures à Vif sont nettement plus faibles. Ces différences sont symptomatiques d'exposition des populations autour de ces sites à une qualité de l'air assez différente, dans la zone de l'agglomération Grenobloise.



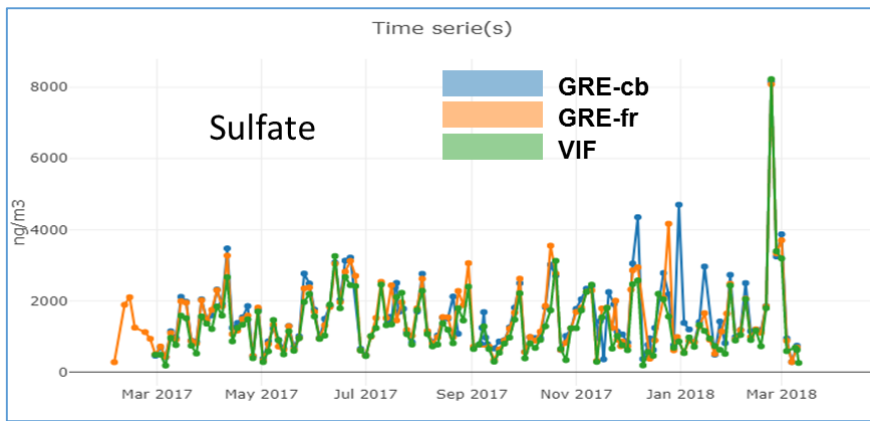


Figure 22. Concentrations journalières du sulfate sur les 3 sites de mesures.

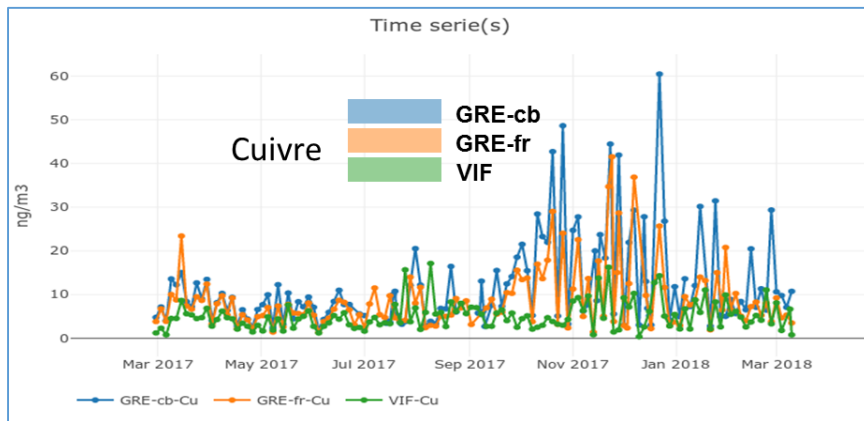


Figure 23. Concentrations journalières du cuivre sur les 3 sites de mesures.

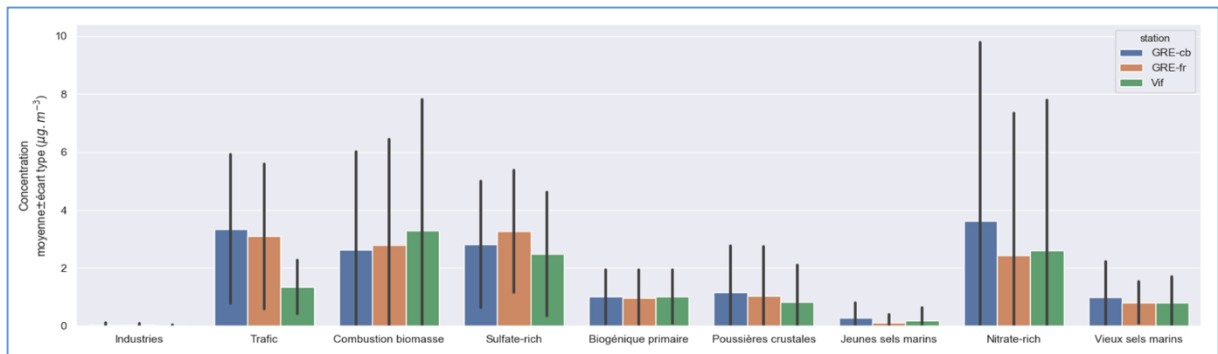


Figure 24. Contributions massiques comparées des différentes sources observées via une étude PMF des données annuelles sur les 3 sites de mesure.

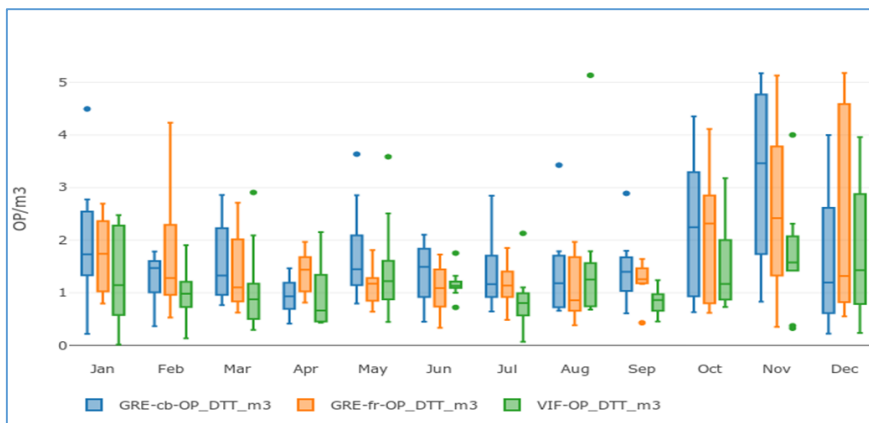


Figure 25. Moyennes mensuelles du PO_{DTT}/m^3 sur les 3 sites de mesures.

5.5. Livrable 5. Analyses coûts-bénéfices : recherches méthodologiques

5.5.1. Participants

Laboratoire d'Economie Appliquée de Grenoble (GAEL, CNRS-Université Grenoble-Alpes), en collaboration avec l'IAB.

5.5.2. Objectifs

Mettre en œuvre une analyse coût-bénéfice la plus complète possible pour évaluer les mesures de réduction de la pollution atmosphérique

5.5.3. Implémentation

Le travail sur la partie économique s'est pour le moment centré sur l'évaluation des coûts sanitaires de la pollution et sur l'identification des différents coûts et bénéfices qui seront visés dans l'analyse finale.

5.5.4. Avancements des travaux

Voici une nomenclature des différents coûts et bénéfices :

1. Analyse coût/bénéfices des mesures touchant la mobilité

1.1. COUTS FIXES

Coûts d'investissements pour la mise en place des mesures

- Coûts de mise en place de la signalisation
- Coûts de mise en place des outils de contrôle

Coûts de renouvellement des véhicules non autorisés

- Perte de valeur et coûts de renouvellement des VL et des PL

Coûts de changement de modes

- Perte de valeur des VL, coûts des TC et pertes de confort

1.2. COUTS/BENEFICES ANNUELS

Coûts de gestion

- Coûts d'entretiens
- Coûts de contrôle

Avantages et inconvénients externes totaux

- Pour les usagers motorisés
 - o Usagers VL
 - Temps de déplacement
 - Coût de fonctionnement des véhicules
 - o Usagers PL
 - Temps de déplacement
 - Coût de fonctionnement des véhicules
- Pour les usagers des TC
 - o Temps de déplacement
 - o Confort



- Avantages pour la collectivité
 - o Accidents (blessés légers, blessés graves, morts)
 - o Pollution atmosphérique (NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀)
 - Impact sanitaire (voir parties précédentes du rapport)
 - Impact sur le bâti
 - Autres couts externes de la pollution : biodiversité, rendements agricoles...)
 - o Bruit
 - o Réchauffement climatique

2. Analyse coût/bénéfices des mesures touchant le chauffage au bois

Coûts de renouvellement des installations de chauffage

Coût des subventions

Coûts d'usage

Avantages pour la collectivité

- Pollution atmosphérique (NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀)
 - o Impact sanitaire (voir parties précédentes du rapport)
 - o Impact sur le bâti
 - o Autres couts externes de la pollution : biodiversité, rendements agricoles...)

L'évaluation des coûts directs de mise en œuvre des mesures. Nous nous appuyerons pour cela sur les méthodologies développées pour l'évaluation des coûts directs liés à la mise en œuvre de mesures d'amélioration de la qualité de l'air développées dans le cadre de l'évaluation coût-bénéfices du Clean Air Act (2011), ou encore de méthodologies développées à partir des courbes de coût marginal de réduction des émissions et adaptées au niveau de villes (World Bank, 2003, Saujot et Lefèvre, 2016) et sur des données provenant directement des collectivités ayant mis en œuvre des zones à faibles émissions et des opérateurs ou de ressources bibliographiques (APUR, 2012 ; London, 2003 ; TML, 2012 ; Rabi et al., 2014 ; Sciare et al., 2014, PRIMEQUAL, 2016). Un travail avec l'AURG et la Métro sera réalisé de manière à adopter des valeurs les plus proches de la réalité du territoire.

L'évaluation de l'impact sur les coûts externes. L'évaluation économique de la diminution des impacts sanitaires de la pollution reprendra les éléments décrits au début du rapport. L'évaluation du bénéfice du CO₂ économisé s'appuiera sur les travaux portant sur le coût social du carbone (Tol, R. S., 2008 ; Hourcade, J. C., Pottier, A., & Espagne, E., 2018). L'intégration d'autres externalités sera sans doute possible en s'appuyant sur les travaux d'évaluation cout-bénéfice du Clean Air Act et sur les travaux de la Commission Européenne portant sur l'évaluation des coûts externes de l'énergie ([Extern-E, Needs](#)) et spécifiquement pour les transports ([CE Delf](#)) proposant des valeurs pour une large typologie de coûts externes.

L'évaluation de l'impact de ces mesures pour chacun des agents, collectivités, ménages, activités économiques et sur les inégalités. Nous étudierons la possibilité de développer une méthodologie simple permettant d'évaluer les impacts des mesures sur les activités économiques et sur l'emploi direct, indirect et induit (Perrier, Q., & Quirion, P. ; 2016). Un autre enjeu renvoie à l'impact de ces mesures sur le budget des ménages (évolution des consommations d'énergie, modification des comportements...) et sur les inégalités sociales. Nous verrons dans quelle mesure le travail de modélisation des scénarios avec le modèle TRANUS peut être mis à profit pour dégager des éléments sur cette question très importante en matière de faisabilité politique de ces mesures.

5.6. Livrable 6. Aide aux décideurs

L'aide à la décision a été formalisée par la mise en place d'un Comité des Décideurs (CoDec), impliquant les élus de Grenoble Alpes Métropole.

Une première réunion de ce Codec a eu lieu le 13 mars 2018. Cette rencontre a permis de discuter des perspectives d'amélioration de la qualité de l'air dans l'agglomération grenobloise avec de nombreux acteurs locaux :

- **Grenoble Alpes Métropole** : Christophe Ferrari, Président, Jérôme Dutroncy, Vice-Président délégué à l'environnement, l'air, le climat et la biodiversité, Claus Habfast, Vice-Président délégué à la Recherche, William Meunier, Chef du service Environnement Air Climat,

- **Ville de Grenoble** : Mondane Jactat, Adjointe au Maire à la Santé et politiques de prévention, Anne-Cécile Fouvet, Directrice de projets Air Climat,

- **Syndicat Mixte des Transports en Commun (SMTC)** de l'agglomération grenobloise : Yann Mongaburu, Président,

- **Atmo Auvergne-Rhône-Alpes** : Marie-Blanche Personnaz, Directrice Générale,

- **Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL)** Auvergne-Rhône-Alpes : Bertrand Durin, Chef du service Pôle Climat Air Energie, représenté par Audrey Joly.

Sur les bases des apports du premier livrable QAMECS présentés lors de ce CoDec, des objectifs de réduction de l'impact sanitaire lié à l'exposition aux $PM_{2,5}$ visés par La Métro ont été décidés par les élus et plusieurs jalons, correspondant à des objectifs progressifs, ont été posés. La prochaine étape sera de proposer des scénarios de mesures à mettre en place, à l'échelle de l'agglomération grenobloise, pour atteindre les objectifs sanitaires visés ainsi qu'une analyse coût-bénéfice de chaque scénario (livrables QAMECS 2 et 5).



6. Perspectives pour la suite du projet

6.1. Livrable 1

Valorisation des résultats : soumission prochaine d'un article scientifique dans une revue à comité de lecture et communication orale dans un congrès international (Urban Transitions, Barcelone, 25-27 novembre 2018).

6.2. Livrable 2

Production avec MECANO des résultats en termes de qualité de l'air et d'impact sanitaire, et tester des scénarios de variation des émissions de différents secteurs (principalement chauffage au bois et trafic).

6.3. Livrable 3

Concernant la chaîne de modélisation, les prochaines étapes consistent à : 1) finir de mettre en œuvre et tester la chaîne de modélisation connectant le modèle de transport-usage des sols TRANUS au modèle ESPACE et 2) implémenter et tester la modélisation de ZCR envisagée dans le modèle TRANUS.

6.4. Livrable 4

Continuation de l'exploitation des résultats obtenus et de leur publication : activités entrant dans le cadre de la thèse de Samuel Weber (en cours).

Nouvelle année de mesures similaire d'ici 2 ans.

6.5. Livrable 5

Poursuite de l'analyse coût-bénéfice des mesures de réduction de la pollution atmosphérique.

6.6. Livrable 6

Un second Comité des Décideurs (CoDec) sera organisé au début du printemps 2019. Les résultats du second livrable QAMECS seront présentés lors de cet événement.

7. Valorisation scientifique

Publications scientifiques dans des revues à comité de lecture

Morelli X, Gabet S, Rieux C, Bouscasse H, Mathy S, and Slama R. How ambitious should public intervention aiming to decrease air pollution be in order to bring health and economic benefits and to reduce social inequalities? (*soumis*)

Asslanian K, Weber S, Jacob V, Peter C, Charron A, Uzu G, Favez O, Albinet A, Guillaud G, Thomasson A, Trebuchon C, and Jaffrezo JL. Tracers of Primary and Secondary biogenic organic aerosol in a multi-sites PMF study at an urban scale. (*en cours de finalisation*)

Communications orales

Gabet S. How Ambitious Should Public Intervention Aiming to Reduce Air Pollution in Urban Areas Be? An Approach Allowing to Identify Air Pollution Reduction Scenarios on the Basis of Health Improvement Targets. Congrès International *Urban Transitions*. 25-27 novembre 2018, Barcelone, Espagne.

Slama R. La science au service de l'action pour limiter l'impact de la pollution atmosphérique. Assises Nationales de la Qualité de l'Air. 9 octobre 2018, Montrouge.



Références bibliographiques

1. Santé Publique France. Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique 2016.
2. Pedersen M, Giorgis-Allemand L, Bernard C, Aguilera I, Andersen AM, Ballester F et al. Ambient air pollution and low birthweight: a European cohort study (ESCAPE). *The Lancet Respiratory Medicine*. 2013;1(9):695-704. doi:10.1016/S2213-2600(13)70192-9.
3. McConnell R, Shen E, Gilliland FD, Jerrett M, Wolch J, Chang CC et al. A longitudinal cohort study of body mass index and childhood exposure to secondhand tobacco smoke and air pollution: the Southern California Children's Health Study. *Environ Health Perspect*. 2015;123(4):360-6. doi:10.1289/ehp.1307031.
4. Wei Y, Zhang JJ, Li Z, Gow A, Chung KF, Hu M et al. Chronic exposure to air pollution particles increases the risk of obesity and metabolic syndrome: findings from a natural experiment in Beijing. *FASEB journal: official publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*. 2016;30(6):2115-22. doi:10.1096/fj.201500142.
5. Raz R, Roberts AL, Lyall K, Hart JE, Just AC, Laden F et al. Autism spectrum disorder and particulate matter air pollution before, during, and after pregnancy: a nested case-control analysis within the Nurses' Health Study II Cohort. *Environ Health Perspect*. 2015;123(3):264-70. doi:10.1289/ehp.1408133.
6. Pedersen M, Gehring U, Beelen R, Wang M, Giorgis-Allemand L, Andersen AM et al. Elemental Constituents of Particulate Matter and Newborn's Size in Eight European Cohorts. *Environ Health Perspect*. 2016;124(1):141-50. doi:10.1289/ehp.1409546.
7. Uzu G, Sauvain JJ, Baeza-Squiban A, Riediker M, Hohl MS, Val S et al. In vitro assessment of the pulmonary toxicity and gastric availability of lead-rich particles from a lead recycling plant. *Environ Sci Technol*. 2011;45(18):7888-95. doi:10.1021/es200374c.
8. Aichi L. Rapport sur le coût économique et financier de la pollution de l'air. Paris: Sénat 2015 Contract No.: n°610.
9. WHO, OECD. Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: Clean air, health and wealth. Copenhagen: WHO Regional Bureau for Europe 2015.
10. Boiteux M. Transports: choix des investissements et coût des nuisances, rapport pour le Commissariat général du Plan, rapporteur Luc BAUMSTARK. Paris: La Documentation Française; 2001.
11. Quinet E. L'évaluation socio-économique en période de transition. Commissariat général à la stratégie et à la prospective. 2013.
12. Morelli X, Rieux C, Cyrus J, Forsberg B, Slama R. Air pollution, health and social deprivation: A fine-scale risk assessment. *Environ Res*. 2016;147:59-70. doi:10.1016/j.envres.2016.01.030.
13. Hara K, Homma J, Tamura K, Inoue M, Karita K, Yano E. Decreasing trends of suspended particulate matter and PM_{2.5} concentrations in Tokyo, 1990–2010. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2013;63(6):737-48. doi:10.1080/10962247.2013.782372.
14. Cyrus J, Peters A, Soentgen J, Wichmann HE. Low emission zones reduce PM₁₀ mass concentrations and diesel soot in German cities. *J Air Waste Manag Assoc*. 2014;64(4):481-7.
15. Fensterer V, Kuchenhoff H, Maier V, Wichmann HE, Breitner S, Peters A et al. Evaluation of the impact of low emission zone and heavy traffic ban in Munich (Germany) on the reduction of PM₁₀ in ambient air. *Int J Environ Res Public Health*. 2014;11(5):5094-112. doi:10.3390/ijerph110505094.
16. ADEME. Les Zones à faibles émissions (Low Emission Zones - LEZ) à travers l'Europe. Déploiement, retours d'expériences, évaluation d'impacts et efficacité du système. 2014.
17. Clancy L, Goodman P, Sinclair H, Dockery DW. Effect of air-pollution control on death rates in Dublin, Ireland: an intervention study. *Lancet*. 2002;360(9341):1210-4.
18. Cesaroni G, Boogaard H, Jonkers S, Porta D, Badaloni C, Cattani G et al. Health benefits of traffic-related air pollution reduction in different socioeconomic groups: the effect of low-emission zoning in Rome. *Occupational and environmental medicine*. 2011. doi:10.1136/oem.2010.063750.
19. Rojas-Rueda D, de Nazelle A, Teixido O, Nieuwenhuijsen MJ. Replacing car trips by increasing bike and public transport in the greater Barcelona metropolitan area: A health impact assessment study. *Environment International*. 2012;49:100-9. doi:10.1016/j.envint.2012.08.009.
20. La Branche S. Étude sociologique sur la pollution due au chauffage au bois dans l'agglomération grenobloise : synthèse des principaux résultats Pollution atmosphérique. 2016;228.
21. La Branche S, Charles L. Étude d'acceptabilité sociale de la ZAPA de l'agglomération grenobloise : synthèse des principaux résultats Pollution atmosphérique. 2012(N° spécial):226-30.
22. Soulhac L, Salizzoni P, Cierco F-X, Perkins R. The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; part I, presentation of the model. *Atmospheric Environment*. 2011;45(39):7379-95.

23. Soulhac L, Salizzoni P, Mejean P, Didier D, Rios I. The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; PART II, validation of the model on a real case study. *Atmospheric Environment*. 2012;49(320-337).
24. Fosset P, Banos A, Beck E, Chardonnel S, Lang C, Marilleau N et al. Exploring Intra-Urban Accessibility and Impacts of Pollution Policies with an Agent-Based Simulation Platform: GaMiroD. *Systems*. 2016;4(1):5. doi:10.3390/systems4010005.
25. Saujot M, Lefevre B. The next generation of urban MACCs. Reassessing the cost-effectiveness of urban mitigation options by integrating a systemic approach and social costs. *Energy Policy*. 2016;92:124-38.
26. Gastineau P, Manière D, Rotillon G. Une méta-analyse de l'évaluation économique des dommages sanitaires attribués à la pollution atmosphérique. *L'actualité économique*. 2007;83(1):5.
27. Chanel O, Faugère E, Geniaux G, Kast R, Luchini S, Scapecchi P. Valorisation économique des effets de la pollution atmosphérique. *Revue économique*. 2004;55(1).
28. Alberini A, Hunt A, Markandya A. Willingness to Pay to Reduce Mortality Risks: Evidence from a Three-Country Contingent Valuation Study. *Environmental and Resource Economics*. 2006;33(2):251-64.
29. Pascal M, de Crouy Chanel P, Wagner V, Corso M, Tillier C, Bentayeb M, et al. The mortality impacts of fine particles in France. *Sci. Total Environ*. 2016;571:416–425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.213>
30. World Health Organization. WHO Expert Meeting: Methods and tools for assessing the health risks of air pollution local, national and international level – Meeting report. WHO Regional Office for Europe, Germany. 2014:112p.
31. Hamra GB, Guha N, Cohen A, Laden F, Raaschou-Nielsen O, Samet JM, et al. Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: a systematic review and meta-analysis. *Environ. Health Perspect*. 2014;122:906–911. <https://doi.org/10.1289/ehp/1408092>
32. Pedersen M, Giorgis-Allemand L, Bernard C, Aguilera I, Andersen A-MN, Ballester F, et al. Ambient air pollution and low birthweight: a European cohort study (ESCAPE). *Lancet Respir. Med*. 2013;1:695–704. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(13\)70192-9](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(13)70192-9)
33. Chanel O, 2011. Aphekom – Guidelines on monetary cost calculations related to air-pollution health impacts – Deliverable D6. National Center for Scientific Research (CNRS), GREQAM and IDEP, France.
34. Ramboll 2018: User's Guide COMPREHENSIVE AIR QUALITY MODEL WITH EXTENSIONS. Version 6.50, 297p.



Index des tableaux et figures

TABLEAUX

Tableau I. Descriptif et avancement des six livrables du projet QAMECS.	20
Tableau II. Description des dix scénarios hypothétiques de réduction de l'exposition aux particules fines (PM _{2.5}) considérés dans cette étude.	22
Tableau III. Relations dose-réponse utilisées pour l'estimation des effets de l'exposition chronique aux PM _{2.5} sur la santé.	22
Tableau IV. Effets estimés des scénarios en termes d'exposition de la population aux PM _{2.5} et de mortalité non-accidentelle toutes causes confondues.	26
Tableau V. Gains sanitaires estimés et coûts associés des scénarios au regard de l'incidence du cancer du poumon et des naissances de petit poids à terme.	27
Tableau VI. Impact of each scenario on social differences in PM _{2.5} exposure.	28
Tableau VII. Echantillons de PM collectés lors de la première campagne de mesure.	39

FIGURES

Figure 1. Niveaux moyens de particules fines dans l'agglomération grenobloise (2013).	8
Figure 2. (A) Distribution de la défaveur sociale (caractérisée par l'European Deprivation Index, EDI) par IRIS dans l'agglomération grenobloise (2013). (B) Niveau médian des PM _{2.5} en fonction de la défaveur sociale de l'IRIS.	9
Figure 3. Répartition sectorielle des émissions de polluants dans la métropole grenobloise (2013).	10
Figure 4. Chronologie (telle que prévue en 2017) des principales mesures de lutte contre la pollution de l'air (en cours, prévues, envisagées) dans l'agglomération grenobloise.	11
Figure 5. Différents niveaux d'action possible pour limiter l'impact sanitaire des polluants atmosphériques.	14
Figure 6. Démarche d'étude concernant les objectifs sanitaires ou environnementaux sanitaires.	15
Figure 7. Exemple de scénarios théoriques d'amélioration de l'exposition aux particules fines dans l'agglomération grenobloise.	15
Figure 8. Modèle de trafic Tranus (INRIA) : Réseau structurant (voies ferrées, autoroutes, routes structurantes), zones, centroïdes et connecteurs.	18
Figure 9. Méthodologies pour l'évaluation économique des impacts sanitaires de la pollution.	19
Figure 10. Exposition aux PM _{2.5} de la population de la Métropole grenobloise (exposition annuelle moyenne sur la période 2015–2017, en µg/m ³).	24
Figure 11. Distribution des niveaux d'exposition aux PM _{2.5} de la population de la Métropole grenobloise (exposition annuelle moyenne sur la période 2015–2017, en µg/m ³).	24
Figure 12. Exposition estimée aux PM _{2.5} de la population de la Métropole grenobloise (exposition annuelle moyenne, en µg/m ³) pour chaque scénario théorique de réduction de la pollution de l'air.	25
Figure 13. Distribution des niveaux d'exposition aux PM _{2.5} de la population de la Métropole grenobloise (exposition annuelle moyenne sur la période 2015–2017, en µg/m ³) en fonction du décile de défaveur sociale.	28
Figure 14. Chaîne de modélisation mobilisée pour développer l'outil MECANO.	30
Figure 15. (A) Les zones Rhône-Alpes et Métropole et (B) les zones Région urbaine grenobloise, bassin grenoblois, Métropole, 1 ^{ère} couronne et Grenoble.	31

Figure 16. Utilisation de MECANO pour identifier les secteurs géographiques et d'activités responsables de la concentration en PM_{2,5} en différents points du territoire.	31
Figure 17. Capture d'écran de l'interface graphique permettant de « piloter » l'outil d'évaluation MECANO.	32
Figure 18. Utilisation de MECANO pour analyser le potentiel des différents leviers d'actions à réduire l'exposition de la population aux PM_{2,5}.	33
Figure 19. Modulation des émissions du chauffage au bois et du trafic routier et estimation de l'exposition moyenne résultante aux PM_{2,5} de la population de la métropole grenobloise.	35
Figure 20. Chaîne de modélisation numérique pour le diagnostic, la prévision quotidienne court terme et les évaluations prospectives.	36
Figure 21. Localisation des trois stations de surveillance de la qualité de l'air utilisées pour la collecte des PM₁₀ lors de la première campagne de mesure.	39
Figure 22. Concentrations journalières du sulfate sur les 3 sites de mesures.	40
Figure 23. Concentrations journalières du cuivre sur les 3 sites de mesures.	40
Figure 24. Contributions massiques comparées des différentes sources observées via une étude PMF des données annuelles sur les 3 sites de mesure.	40
Figure 25. Moyennes mensuelles du PO_{DTT}/m³ sur les 3 sites de mesures.	40

Sigles et acronymes

AA	Acide ascorbique
AASQA	Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AMI	Appel à Manifestation d'Intérêt
APUR	Atelier Parisien d'URbanisme
Au-RA	Région Auvergne-Rhône-Alpes
AURG	Agence Urbaine de la Région Grenobloise
CAMx	Comprehensive Air Quality Model with Extensions
CépiDc	Centre épidémiologique des causes de décès
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CoDec	Comité des décideurs
DCFH	Dichlorofluorescein
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DTT	Dithiothréitol
EC	Carbone élémentaire
EDI	Indice Européen de Défavor sociale
EMD	Enquête Ménages Déplacements
EPA	Agence de Protection de l'Environnement, USA
ERISC	Plateforme méthodologique nationale pour l'étude et la réduction des inégalités sociales en oncologie
GAEL	Laboratoire d'Économie Appliquée de Grenoble
HAP	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
HPM	Heure de Pointe du Matin
HPS	Heure de Pointe du Soir



IAB	Institut pour l'Avancée des Biosciences
IDDRI	Institut du Développement Durable et des Relations Internationales
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
IGE	Institut des Géosciences de l'Environnement
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et Automatique
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IRIS	Ilots Regroupés pour l'Information Statistique
LCSQA	Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air
LEZ	Zone de faible émission
LGGE	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
LUTI	Land Use and Transport Interactions
LVMT	Laboratoire Ville Mobilité Transport
NAC	Nombre de cas attribuables
NOx	Oxydes d'azote
OC	Carbone organique
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PIB	Produit Intérieur Brut
PL	Poids Lourd
PM ₁₀	Particules d'un diamètre inférieur à 10 µg
PM _{2,5}	Particules d'un diamètre inférieur à 2,5 µg
PMF	Positive Matrix Factorization
PO	Potentiel Oxydant
PPA	Plan de Protection de l'Atmosphère
QAMECS	Qualité de l'Air dans la Métropole grenobloise – Evaluation de l'Environnement, de la Santé et des coûts associés
SCOT	Schéma de cohérence territoriale
SDHC	Coefficient d'hétérogénéité de défaveur sociale
SMTC	Syndicat Mixte des Transports en Commun
TC	Transport en Commun
USA	United States of America
VL	Véhicule Léger
WHO	Organisation Mondiale de la Santé
WRF	Weather Research and Forecasting
ZAPA	Zone d'Actions Prioritaires pour l'Air
ZCR	Zone à Circulation Restreinte

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

<https://www.ademe.fr/>

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous un regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



QAMECS : Qualité de l’Air dans la Métropole grenobloise – Evaluation de l’Environnement, de la Santé et des coûts associés

Rapport scientifique intermédiaire

Résumé

La pollution atmosphérique urbaine, et notamment celle due aux particules fines en suspension (ou $PM_{2,5}$), est un des plus importants risques sanitaires pouvant être contrôlés par l’action publique. Plusieurs villes d’Europe, en dehors de France, ont mis en place des zones à faible émission visant à limiter les émissions liées au trafic et parfois au chauffage, une politique que Grenoble commence à suivre. L’exposition aux $PM_{2,5}$ est principalement quantifiée via leur concentration massique, mais d’autres caractéristiques, comme leur composition chimique et leur potentiel oxydant (PO) sont des indicateurs a priori pertinents, tant du point de vue de la caractérisation de l’impact de mesures visant à améliorer la qualité de l’air que de leur effet sanitaire.

Dans ce contexte, le projet QAMECS a comme objectifs principaux : 1) d’identifier et définir des mesures collectives sur le trafic et le chauffage au bois pouvant être mises en œuvre par les collectivités territoriales et permettant d’obtenir une amélioration significative de la qualité de l’air et une réduction de l’impact sanitaire de la pollution particulaire (volet *aide à la décision*) ; 2) à partir des mesures effectivement mises en œuvre dans l’agglomération grenobloise, de caractériser leur impact environnemental (trafic routier, concentrations en particules, carbone élémentaire et organique, lévoglucosan), sanitaire (mortalité, cancer du poumon), économique, aboutissant à une analyse coût-bénéfice complète de ces mesures (volet *suivi de mesures réelles*). L’hétérogénéité de ces impacts en fonction des catégories sociales sera caractérisée.

Le projet associe modélisation, mesures environnementales, étude d’impact sanitaire, dans un consortium de spécialistes de la pollution de l’air (AASQA et chercheurs), économistes, épidémiologistes, modélisateurs, en lien avec les collectivités territoriales. Ce projet interdisciplinaire ambitieux permettra de documenter finement, pour la première fois en France, et de façon unique internationalement par son ampleur, l’efficacité de mesures d’amélioration de la qualité de l’air, et fournira des indications précises pour accroître cette efficacité.



www.ademe.fr

