

RAPPORT FINAL – PROJET CEPEM

CARACTERISATION EPIDEMIOLOGIQUE DES
EPISODES DE POLLUTION DE L’AIR EN
FRANCE ET EVALUATION SANITAIRE DES
MESURES MISES EN PLACE PAR LES
POUVOIRS PUBLICS POUR LES LIMITER

RAPPORT FINAL



EXPERTISES

**Août
2022**

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Marie Pouponneau et Chantal Dekenne de l'Ademe qui ont suivi et soutenu le projet durant ces dernières années. Nous remercions également les membres du comité de pilotage Isabelle Momas (Paris Descartes) et Richard Le Goff (École nationale supérieure de techniques avancées).

CITATION DE CE RAPPORT

BENMARHANIA Tarik, ALARI Anna, CHANEL Olivier, ROUX Benjamin, MEDINA Sylvia, WAGNER Véréne, PASCAL Mathilde, de CROUY CHANEL Perrine, HOST Sabine, CHAIX Basile. **Caractérisation épidémiologique des épisodes de pollution de l'air en France et évaluation sanitaire des mesures mises en place par les pouvoirs publics pour les limites (CEPEM), Rapport Final.**

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'oeuvre 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

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1862C0011

Projet de recherche coordonné par : POISSON Nathalie

Appel à projet de recherche : PRIMEQUAL

Coordination technique - ADEME : DERKENNE Chantal

Direction/Service : Service de la Qualité de l'Air

SOMMAIRE

- RÉSUMÉ..... ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
- ABSTRACT..... ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
- 1. CONTEXTE DU PROJET 5**
 - 1.1. Sous-titre 1 Erreur ! Signet non défini.
 - 1.1.1. Sous-titre 2 5
 - 1.2. Sous-titre 1 Erreur ! Signet non défini.
 - 1.2.1. Sous-titre 2 **Erreur ! Signet non défini.**
 - 1.2.1.1. Sous-titre 3 **Erreur ! Signet non défini.**
 - 1.2.1.1.1. Sous titre 4 **Erreur ! Signet non défini.**
- 2. METHODOLOGIE..... ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**
 - 2.1. Sous-titre 1 Erreur ! Signet non défini.
 - 2.1.1. Sous-titre 2 **Erreur ! Signet non défini.**
 - 2.1.2. Sous-titre 2 **Erreur ! Signet non défini.**
 - 2.1.2.1. Sous-titre 3 **Erreur ! Signet non défini.**
- 3. BILAN / PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS..... ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**
 - 3.1. Sous-titre 1 Erreur ! Signet non défini.
 - 3.1.1. Sous-titre 2 **Erreur ! Signet non défini.**
 - 3.1.1.1. Sous-titre 3 **Erreur ! Signet non défini.**
 - 3.1.1.1.1. Sous-titre 4 **Erreur ! Signet non défini.**
 - 3.1.1.1.2. Sous-titre 4 **Erreur ! Signet non défini.**
 - 3.1.1.2. Sous-titre 3 **Erreur ! Signet non défini.**
- 4. RECOMMANDATIONS..... 28**
- 5. CONCLUSION / PERSPECTIVES..... 31**
- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 32**
- INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES..... 32**
- SIGLES ET ACRONYMES 34**

RÉSUMÉ

La pollution atmosphérique constitue aujourd'hui le déterminant environnemental de la santé des populations associé au fardeau sanitaire le plus important en France, du fait de l'ampleur et de la diversité des effets sanitaires qui lui sont attribués. Lorsque les niveaux d'émissions sont particulièrement élevés, des épisodes (ou pics) de pollution apparaissent. Ces jours sont définis en fonction du dépassement d'un certain seuil de concentration d'un ou plusieurs polluants atmosphériques. De tels épisodes surviennent en particulier lors de conditions météorologiques particulières, notamment durant des vagues de chaleur.

Pourtant les particularités épidémiologiques de ces épisodes et les mécanismes en lien avec les événements météorologiques extrêmes restent peu étudiés. **Le premier axe** de ce projet visait à mieux comprendre ces particularités épidémiologiques pour reconsidérer la manière dont ces seuils sont définis et articulés dans le cadre de politiques publiques. Nous n'avons pas trouvé d'évidence supportant les seuils tels que définis réglementairement pour les PM10 ni encourageant la mise en place de seuils spécifiques sur NO2 et PM2.5. Néanmoins, nous avons pu identifier un seuil à partir duquel les concentrations journalières d'ozone semblent augmenter les risques sanitaires, mais qui se situent en dessous des seuils réglementaires présentement en vigueur.

Sur la base des seuils définis réglementairement, des mesures d'alerte en lien avec des épisodes aux PM10 ont été mis en place notamment en région parisienne. Pourtant, ces mesures n'ont jamais l'objet d'évaluations vis-à-vis des bénéfices sanitaires ou économiques. C'est ce sur quoi **le deuxième axe** de ce projet s'est penché. Nous avons trouvé que suite à la mise à jour ces mesures en 2012, plusieurs centaines de décès étaient prévenus chaque année correspondant à des bénéfices économiques s'élevant autour de 14.1 millions €2017 par an.

Au-delà des mesures de lutte contre les épisodes de pollution à court terme visant ces épisodes de manière ponctuelle, il est également capital de s'intéresser aux mesures durables qui visent les niveaux de pollution à long terme et de comparer les bénéfices sociétaux de ces types d'approches. Dans **le troisième axe**, nous avons d'abord pris comme cas d'étude la zone à faibles émissions (ZFE) en région parisienne et montré que sa mise en place pourrait contribuer à réduire jusqu'à 811 décès et 3203 cas d'asthme par année ce qui en termes de bénéfices économiques correspondrait à des estimations entre 523 et 1 210 millions €2017 selon les scénarios envisagés ce qui est largement supérieur en comparaison aux mesures visant uniquement les épisodes de pollution. Nous avons ensuite mené un recensement dans lequel nous avons identifié 175 mesures portant sur des actions de mobilité active qui visaient directement ou indirectement à réduire les émissions de polluants atmosphériques sur l'ensemble du territoire français et avons constitué une base de données nationale mise en libre accès. Nous avons également analysé de manière approfondie ces mesures et mis en évidence les particularités, leviers de réussite et difficultés relatives aux mesures mises en place dans les politiques publiques.

Enfin, sur la base de ces travaux, nous avons également pu suggérer des pistes pour des travaux de recherche futurs et quelques pistes de réflexion qui pourront servir de base à de futures recommandations pour la mise en place de nouvelles mesures ou la mise à jour de politiques publiques existantes visant à réduire les émissions de polluants atmosphériques.

1.1. Contexte environnemental et enjeux économiques et sociétaux

La pollution atmosphérique constitue aujourd’hui le déterminant environnemental de la santé des populations associé au fardeau sanitaire le plus important, en France mais dans la plupart des autres régions du monde {Cohen, 2017 #1960;Pascal, 2016 #731}. Les effets sanitaires en lien avec la pollution atmosphérique sont nombreux et il est notamment possible de distinguer les effets à court terme (ex. exacerbations d’asthme, infarctus du myocarde...) des effets à long terme (ex. incidence de l’asthme, maladie d’Alzheimer, cancer des poumons, diminution de l’espérance de vie...). Les concentrations journalières de polluants atmosphériques auxquelles les populations sont exposées varient de manière importante dans le temps. Notamment, lorsque les niveaux d’émissions sont particulièrement élevés, les épisodes ou pics de pollution apparaissent. Ces jours sont définis en fonction du dépassement d’un certain seuil de concentration d’un ou plusieurs polluants atmosphériques (ex. particules PM10 et PM2.5, Dioxyde d’Azote NO2, Ozone O3 ...). Ces seuils varient grandement selon les contextes géographiques et sont en général établis afin de déclencher des actions visant à réduire les émissions de polluants atmosphériques.

Ce projet, vise dans un premier temps (**axe 1**) à répondre à la question suivante : existe-t-il une raison, au sens épidémiologique, de considérer les épisodes de pollution comme des événements particuliers ? Deux aspects sont notamment étudiés :

- i) Observe-t-on des changements de la susceptibilité des populations lorsque les seuils définissant les épisodes de pollution sont dépassés ?
- ii) Ces épisodes de pollution pouvant coïncider avec des événements météorologiques extrêmes, notamment les vagues de chaleur, quels mécanismes relient ces deux déterminants environnementaux de la santé ?

Pour le premier aspect, nous nous intéressons particulièrement à la forme de la relation entre niveaux journaliers de plusieurs polluants atmosphériques et le risque de mortalité et d’hospitalisation, autrement dit, la relation dose-réponse. Il est question de savoir si une modification de la relation dose-réponse est observée aux niveaux des seuils tels qu’identifiés dans le contexte réglementaire français. Pour le second aspect, deux mécanismes épidémiologiques distincts seront à l’étude. Premièrement, existe-t-il des effets synergétiques entre les effets de plusieurs polluants atmosphériques et des événements météorologiques extrêmes incluant les vagues de chaleur et vagues de froid ? En effet, une littérature abondante montre comment les événements météorologiques extrêmes augmentent également le risque de mortalité et d’hospitalisations {Ebi, 2021 #1961}. Il est ainsi question de documenter comment les effets sanitaires des polluants atmosphériques sont exacerbés durant des événements météorologiques extrêmes et vice-versa. Deuxièmement, parmi les polluants réglementés en France, l’Ozone est un polluant dit secondaire, qui se forme à partir de précurseurs (e.g. oxydes d’azote -Nox- ou composés organiques volatils) et particulièrement lorsque les températures sont particulièrement élevées. Pourtant, il n’existe aucune donnée épidémiologique documentant la proportion du fardeau sanitaire durant les épisodes de vagues de chaleur qui est due à la génération d’ozone. Documenter ce type de mécanisme peut être particulièrement important pour documenter la proportion de décès durant les vagues de chaleur qui sont en fait dus à une augmentation des niveaux d’ozone et qui nécessiteraient donc d’intervenir sur les sources de pollution et non sur la température uniquement {Reid, 2012 #117}.

De plus, dans l’hypothèse où il n’existe pas de particularité épidémiologique, en plus de ne concerner que très peu de jours dans l’année (par définition), les épisodes de pollution ne contribueraient que marginalement en comparaison aux effets sanitaires à long terme. Un des objectifs généraux de ce projet est de mettre en perspective les bénéfices sanitaires et sociétaux d’une approche focalisée sur les effets à court terme via ce type d’épisode avec des mesures qui seraient plus à long terme, à savoir qui s’inscrivent dans la durée. En outre, il s’avère qu’une partie importante des actions mises en place par les pouvoirs publics pour lutter contre la pollution atmosphérique et ses effets est focalisée sur ces épisodes. Ces actions répondent à la sensibilité de l’opinion publique à cette problématique, exacerbée lors d’épisodes de pollution. Malgré la mise en place de ces nombreuses interventions, les niveaux de pollution atmosphérique observés et leurs effets sanitaires continuent d’être élevés en France, en particulier dans les milieux urbains, dont l’agglomération parisienne. De nombreuses interventions y ont été mises en place au cours des dernières années afin de réduire les niveaux de concentration des différents polluants atmosphériques. Dans ce projet, nous nous intéressons particulièrement aux interventions mises en place dans le Grand Paris. Ces interventions ont porté essentiellement sur une réduction des émissions liées au trafic automobile qui constitue la source principale des concentrations de polluants atmosphériques en région parisienne {Beelen, 2013 #732;Pascal, 2016 #731}. Celles mises en place depuis 2008 et mises à jour en 2012, déclenchées lorsque certains niveaux de pollution sont dépassés (pour les particules PM₁₀), incluent la réduction de la vitesse de la circulation routière sur le périphérique, la mise en place de la circulation alternée ou la gratuité des transports publics par exemple. Bien que ces interventions bénéficient d’une mobilisation politique, économique et citoyenne très importante, et malgré leur mise en place depuis plus de 10 ans, il n’existait (avant ce projet) aucune information sur leur efficacité en matière de réduction des concentrations de polluants et des effets sanitaires associés. Ce projet vise donc également (axe 2) à évaluer si les mesures de lutte contre les pics de pollution sont efficaces. Pour cela, nous proposons une approche méthodologique innovante, fondée sur des expérimentations naturelles, qui permettent de reproduire les conditions d’un essai contrôlé randomisé afin

d'évaluer les effets causaux associés à la mise en place de ces interventions. De plus, nous proposons de mener une évaluation économique des bénéfices potentiels associés à ces mesures.

En parallèle, d'autres interventions de modification urbaine et visant à promouvoir la mobilité active existent pour réduire les émissions liées au trafic comme par exemple l'attribution de certaines voies à des utilisations spécifiques (bus, taxi, vélos...) ou des projets de piétonisations. Les bénéfices liés à une réduction durable des niveaux de pollution atmosphérique sont considérables. Il est important de préciser qu'à notre connaissance, il n'existe pas de recensement systématique de ces interventions de modification urbaine durables menées par les communes et visant à réduire les émissions liées au trafic automobile, une lacune qu'il conviendrait de combler en mettant à disposition de tous les acteurs locaux une base de données les recensant. Ce projet vise ainsi (**axe 3**) à combler cette lacune en menant un recensement de ces mesures visant à réduire la pollution atmosphérique liée au trafic à moyen et long termes, en partant des travaux existants. De plus, nous proposons en prenant comme exemple l'implantation de la Zone à Faible Emissions (ZFE) à Paris, de quantifier, par simulation, les bénéfices potentiels que cette intervention aurait sur la santé des populations, en comparaison aux interventions focalisées sur des épisodes de pollution.

En somme, ce projet vise à évaluer la pertinence, que ce soit d'un point de vue épidémiologique ou des politiques publiques, de concentrer les efforts de l'action publique sur les épisodes de pollution plutôt que sur des interventions plus durables. Dans cette perspective, nous faisons et testons l'hypothèse que les effets de ces dernières sont substantiellement plus importants pour la santé publique.

1.2. Positionnement du projet

Notre projet se positionne d'abord dans le contexte du déploiement du plan de lutte contre la pollution atmosphérique lancé en février 2015 par la Mairie de Paris, qui inclut notamment la mise en place progressive entre 2016 et 2019 d'une zone à circulation restreinte (maintenant appelée zone à faibles émissions), comme c'est le cas dans d'autres villes européennes (Holman, 2015 #735). En outre, des changements d'affectation de voirie tels que la piétonisation des voies sur berges (rive droite) par la Mairie de Paris ont été mis en place récemment. Ces interventions de modification urbaine, de même que de multiples autres de moindre ampleur, pourront ainsi être évaluées en suivant les approches développées dans le présent projet.

Le projet de recherche proposé a donc permis de mener pour la première fois en France une évaluation des effets sanitaires d'interventions visant à réduire les niveaux de pollution, apportant des éléments de preuve sur les impacts potentiels de ce type d'interventions sur les niveaux de polluants et sur la santé des populations. Nous avons analysé l'impact de 2 types de mesures sur le Grand Paris : i) les politiques de lutte contre la pollution durant les pics de pollution à Paris pour les effets à court terme ; ii) la mise en place de la ZFE et les effets à long terme ainsi que la distribution spatiale des potentiels bénéfiques et les implications en termes d'équité. Pour chacune de ces évaluations, nous avons également mené une évaluation économique afin de comparer les bénéfices sociétaux de ces deux types de mesures.

De plus, ce projet a permis de proposer des méthodes innovantes qui à l'heure actuelle ne sont que très peu mobilisées en santé publique dans la littérature internationale et tout particulièrement dans le cas des interventions liées à la pollution atmosphérique. Dans l'axe 1, nous proposons pour la première fois dans le contexte de problématiques liées aux liens entre chaleur et ozone l'application de méthodes de médiation basées sur un cadre d'inférence causale. Ces méthodes permettent de décomposer l'effet total des vagues de chaleur sur la mortalité en deux mécanismes : les effets directs liés à une exposition à la chaleur et les effets directs en lien avec une augmentation des niveaux d'ozone directement attribuables à l'augmentation de la chaleur. Nous avons pu mener ces analyses sur 15 agglomérations françaises incluant 4 types de climat distincts (Océanique, Tempéré, Semi-continental et Méditerranéen) afin de considérer de possibles hétérogénéités entre les villes. Dans l'axe 2, nous avons développé des méthodes quasi-expérimentales permettant d'imiter une randomisation de la mise en place des interventions de lutte contre les pics/épisodes de pollution en se basant sur ce que l'on appelle des expérimentations naturelles. Nous avons capitalisé sur les critères de déclenchement des alertes ainsi que les dates de leur mise en place (en 2008) ou la mise à jour des seuils de déclenchement (en 2012) et utilisé des scores de propension pour rendre le plus comparable possible les jours éligibles au déclenchement de ces alertes et les jours non-éligibles (juste en dessous du seuil). Cela nous a permis d'évaluer l'effet causal de ces mesures sur la mortalité pour plusieurs causes (cardiovasculaires, respiratoires et toutes causes non-accidentelles) et plusieurs groupes d'âge ainsi que les conséquences en termes de bénéfices économique. Dans l'axe 3, nous avons mené un recensement dans le contexte français de mesures visant à réduire les émissions de pollution atmosphérique en lien avec le trafic. En combinant des questionnaires (préalablement validés auprès d'acteurs locaux) et des entretiens avec plusieurs parties prenantes au niveau territorial incluant le niveau régional, départemental ou les communautés de commune nous avons pu identifier de nombreuses mesures mises en place ainsi que plusieurs caractéristiques pouvant faciliter leur implantation dans d'autres contextes. Nous avons aussi développé des fiches techniques qui résument les principaux types d'actions que nous avons pu identifier. Ce recensement, unique par son ampleur, l'inclusion de nombreuses régions en France et le type de mesures incluses servira non seulement de ressource pour encourager l'expérimentation de ce type de mesures dans de nouveaux contextes mais aussi pourra être utilisé dans le cadre d'évaluations d'impacts futures. Dans l'axe 3, nous avons aussi pu mener une évaluation

quantitative des risques sanitaires de la mise en place de la ZFE à Paris sur la mortalité prématurée chez les adultes ainsi que l'incidence de l'asthme chez les enfants combinée à une analyse des bénéfices économiques. De plus, nous avons analysé la distribution spatiale des bénéfices sanitaires et également considéré le fait que les populations vivant dans des quartiers avec différents niveaux de défaveur socio-économique étaient disproportionnellement impactées par la pollution atmosphérique afin de mettre en lumière les implications en termes d'équité de ce type de mesure.

Le volet économique a constitué une composante importante dans ce projet. En effet, au niveau de la France, la commission d'enquête du Sénat sur le coût économique et financier de la pollution, qui a rendu son rapport « Pollution de l'air : le coût de l'inaction » le 8 juillet 2015, évalue à 101,3 milliards EUR par an le coût de cette pollution. Les effets sanitaires y sont prépondérants (de 68 à 97 milliards EUR, dont 90% pour la mortalité), et les effets indirects (pertes de rendement liées à l'absentéisme, effets sur les bâtiments, politiques de prévention et surveillance) s'élèvent à environ 4 milliards EUR. Sur la base des résultats de la Banque Mondiale qui évalue à 21 138 décès prématurés la mortalité associée à l'exposition aux particules en France, et en retenant une valeur d'évitement d'un décès de 3 millions EUR (Quinet, 2013), l'évaluation économique de la mortalité s'élèverait à 63,3 milliards EUR.

Ces méthodes, notamment grâce aux recommandations d'utilisation que nous formulerons, seront à terme applicables à de nombreuses interventions de prévention visant à agir sur d'autres déterminants de la santé des populations ainsi qu'à d'autres contextes géographiques. Les retombées de ce projet sont nombreuses car il sera dès lors possible d'avoir à disposition un outil qui pourra être déployé à d'autres contextes et d'autres politiques environnementales. Ces informations seront extrêmement utiles pour la prise de décision sur le renforcement de ces mesures durables sur des arguments sanitaires et économiques, tout en proposant un argumentaire solide et exhaustif visant à réduire l'investissement et l'attention sur les épisodes de pollution.

1.3. Liste des axes et tâches du projet

Axe 1. Compréhension des particularités épidémiologiques des épisodes de pollution en France :

Tâche 1 : évaluer une potentielle modification de la relation dose/réponse entre pollution et santé lors des épisodes de pollution pour plusieurs issues de santé, avec compréhension des effets cumulatifs de ce type d'événements lorsque les pics durent plusieurs jours, et quantifier l'impact sanitaire pour montrer la proportion (attendue faible) de cas (de mortalité ou autre) attribuables à ce type d'événements (i.e. jours au-dessus du seuil défini de pic de pollution) par rapport au fardeau total de la pollution ;

Tâche 2 : étudier les liens entre température et pollution lors d'épisodes de forte chaleur et de froid et de pollution ;

Tâche 3 : Etudier le rôle médiateur de l'ozone dans la relation entre d'épisodes de forte chaleur et mortalité

Axe 2. Evaluation des politiques de lutte contre la pollution durant les pics de pollution à Paris :

Tâche 1 : évaluer si les mesures mises en place en 2008 ont un effet sur les concentrations de pollution durant les jours d'épisodes de pollution, puis sur les potentiels bénéfices sanitaires ;

Tâche 2 : évaluer les potentiels bénéfices économiques liés aux mesures mises en place.

Axe 3. Evaluation des mesures à une échelle temporelle plus longue visant des modifications urbaines plus durables :

Tâche 1 : recenser les mesures spécifiques pour réduire la pollution liée au trafic dans la durée sur l'ensemble de la France pour un futur projet d'évaluation ;

Tâche 2 : comparer l'impact sanitaire de la mesure ZFE à Paris avec celui des mesures prises pendant les épisodes de pollution et évaluation économique des bénéfices attendus.

* Cette tâche a été modifiée par rapport à la version initiale du projet

Reference	Axes et tâches
Wagner V, Pascal M, Corso M, Alari A, Benmarhnia T, Le Tertre A. On the supra-linearity of the relationship between air pollution, mortality and hospital admission in 18 French cities. <i>International Archives of Occupational and Environmental Health</i> [En Revision]	Axe 1, Tache 1
Pascal, M., Wagner, V., Alari, A., Corso, M., & Le Tertre, A. (2021). Extreme heat and acute air pollution episodes: A need for joint public health warnings?. <i>Atmospheric environment</i> , 249, 118249.	Axe 1, Tache 2
Alari A, Schwarz L, Chen C, Hansen K, Chaix B, Benmarhnia T. The role of ozone as a mediator in the relation between heat waves and mortality in 15 French urban agglomerations. <i>American Journal of Epidemiology</i> [Sous Presse]	Axe 1, Tache 3
Alari, A., Schwarz, L., Zabrocki, L., Le Nir, G., Chaix, B., & Benmarhnia, T. (2021). The effects of an air quality alert program on premature mortality: A difference-in-differences evaluation in the region of Paris. <i>Environment International</i> , 156, 106583.	Axe 2, Tache 1
Moreno E, Schwarz L, Host S, Chanel O, Benmarhnia T. The Environmental Justice Implications of the Paris Low Emission Zone: A Health Impact and Economic Assessment. <i>Air Quality, Atmosphere & Health</i> [En Révision]	Axe 3, Tache 1

Tableau 1 : Bilan des valorisations scientifiques en lien avec le projet CEPEM

2. Synthèse des activités menées : contexte, méthodologie et résultats principaux

2.1. Synthèse de l'axe 1

2.1.1. Introduction et description générale des tâches de l'axe 1

Durant certaines conditions météorologiques, du fait de phénomènes de couches d'inversion thermique entre autres, ou lorsque les niveaux d'émissions de polluants sont particulièrement élevés, apparaissent les épisodes, ou pics, de pollution. Ces épisodes sont définis en fonction du dépassement d'un certain seuil de concentration pour plusieurs polluants atmosphériques qui sont visés par la réglementation européenne et française incluant les particules (PM2.5 et PM10), le Dioxyde d'Azote (NO2) et l'Ozone troposphérique (O3).

Selon l'OMS, la pollution atmosphérique est le premier facteur de risque environnemental. En France, il a été estimé qu'entre 2016 et 2019, chaque année, 40 000 décès étaient attribuables à une exposition à long terme aux PM2.5 et 7 000 décès à une exposition à long terme au NO2. Que ce soit à court ou à long terme, les résultats des études épidémiologiques, notamment pour les particules fines, sont en faveur d'une relation linéaire sans seuil entre l'exposition aux particules et un effet sur la santé. Par conséquent, la littérature épidémiologique existante suggère qu'il n'existe pas de seuil en deçà duquel il n'y aurait pas d'effet de la pollution sur la santé. Ainsi, à court terme, les variations d'un jour à l'autre des niveaux de pollution atmosphérique sont susceptibles, en cas d'augmentation des niveaux, d'entraîner une exacerbation des symptômes de certaines pathologies, en dehors même de tout « épisode » exceptionnel de pollution de l'air. Toutefois, population et décideurs, lorsqu'ils sont confrontés à un épisode de pollution atmosphérique (notamment lors des dépassements des seuils d'information ou d'alerte définis réglementairement), manifestent leur inquiétude concernant l'impact sur la santé proprement lié à ces épisodes de pollution. Pour répondre à ces craintes, limiter l'impact sanitaire et protéger la santé de la population, des procédures d'information et d'alerte sont déployées. Ces mesures agissent sur les sources de pollution et les comportements des individus. Or, peu d'informations sont disponibles sur l'impact sanitaire proprement dit de ces « pics » de pollution et des liens avec les événements météorologiques extrêmes qui peuvent être concomitants.

Ces jours-là, dits d'épisodes, correspondent ainsi à des situations extrêmes sur de courtes périodes en termes d'exposition des populations aux polluants atmosphériques. Toutefois peu d'études ont ciblé spécifiquement ces épisodes pour savoir s'ils avaient un impact particulier sur la santé et aucune étude n'a été publiée sur des villes françaises. Il apparaît ainsi important d'étudier si les jours définis comme pics ou épisodes de pollution sont associés à des effets particuliers sur la santé. Dans la tâche 1 de l'axe 1, nous avons étudié les particularités épidémiologiques des épisodes de pollution en France. Nous avons évalué s'il existe un changement dans la relation dose-réponse (i.e. entre les polluants réglementés et différentes issues de santé), qui coïnciderait avec le seuil utilisé pour définir un épisode (voir détails plus bas). Nous avons utilisé plusieurs approches statistiques pour modéliser des relations non linéaires incluant des approches flexibles pour lesquelles aucun seuil a priori n'était défini, laissant ainsi le modèle identifier à quel niveau d'exposition un seuil apparaissait (si un seuil était identifié) nous permettant de comparer ces seuils à ceux définis dans le contexte français. Nous avons également quantifié le nombre de décès et hospitalisations attribuables aux jours classés épisodes de pollution (toutes les expositions au-dessus du seuil d'information) et comparé ce fardeau aux autres jours en dessous de ce seuil.

Les épisodes de pollution peuvent survenir en même temps que des épisodes de températures extrêmes. Bien que les épisodes de pollution et de températures extrêmes puissent être concomitants, les réponses apportées prennent peu en compte cette simultanéité d'exposition. Les seuils définissant les épisodes de pollution sont fixes et ne prennent pas en compte la température. Quant à la gestion des vagues de chaleur, elle considère l'ozone comme un facteur aggravant, et ne s'intéresse pas aux autres polluants. Pourtant, les résultats récents de la littérature en épidémiologie mettent en évidence des synergies probables entre polluants de l'air, températures, et impacts sur la santé. De plus, les effets sanitaires en lien avec les épisodes de températures extrêmes, incluant les vagues de froid et de chaleur, et les effets des polluants atmosphériques d'intérêt coïncident souvent, notamment vis-à-vis des impacts cardiovasculaires et respiratoires. Ainsi, il apparaît opportun d'analyser comment, d'une part les effets de la pollution atmosphérique sont exacerbés durant des épisodes de températures extrêmes et d'autre part, comment les impacts sanitaires survenant durant des épisodes de températures extrêmes de la pollution atmosphérique sont exacerbés lorsque les niveaux de pollution atmosphérique sont élevés. Répondre à ce type de question permettra notamment de considérer la pertinence d'adapter les mesures mises en place durant les épisodes de pollution en fonction des niveaux de températures et vice versa pour les systèmes d'alertes mises en place durant les épisodes de températures extrêmes. Dans la tâche 2 de l'axe 2, nous avons analysé les interactions entre pollution, température et mortalité, afin de déterminer s'il serait opportun de gérer simultanément épisodes de pollution et de températures extrêmes, plutôt que séparément comme c'est le cas actuellement.

Enfin, comme précisé plus haut, durant les épisodes de chaleur extrême, les niveaux d’ozone générés seront particulièrement hauts. Dans un contexte de changements climatiques où l’on s’attend à davantage d’évènements caractérisés par des températures élevées associées à des concentrations d’ozone élevées, nous proposons d’analyser dans quelle mesure il serait pertinent d’aller vers une gestion commune des épisodes de pollution et de températures extrêmes. Dans cette situation où nous nous intéressons à la relation entre des vagues de chaleur et des indicateurs de santé, nous pouvons ainsi considérer l’ozone comme médiateur. Nous proposons de quantifier pour chacune des villes à l’étude la proportion des décès attribuables à la chaleur qui est indirectement liée à la génération d’ozone durant ces épisodes de vagues de chaleur. Les résultats de ce type d’analyse seront particulièrement utiles pour documenter dans le cadre des mesures mises en place pendant une vague de chaleur la pertinence de combiner des actions préventives vis-à-vis de la chaleur et des actions visant à réduire l’émission de précurseurs d’ozone afin de maximiser les bénéfices sur la santé des populations.

Ci-après la description des travaux, les résultats produits et leur interprétation pour chacune des tâches 1,2 et 3.

2.1.2. Tâche 1 de l’axe 1

2.1.2.1. Objectif de cette tâche

L’objectif principal de cette tâche est d’étudier la forme de la relation exposition-risque entre pollution atmosphérique et santé et d’examiner en particulier si celle-ci est modifiée lors d’épisode de pic de pollution.

2.1.2.2. Données et Méthodes

L’étude a porté sur le réseau des 18 villes du Programme de surveillance air et santé de Santé publique France (Psas) sur la période 2000-2017 : Bordeaux, Brest, Clermont, Dijon, Grenoble, Le Havre, Lens-Douai, Lille, Lyon, Marseille, Montpellier, Nancy, Nantes, Nice, Paris, Rouen, Strasbourg et Toulouse (voir carte ci-dessous).

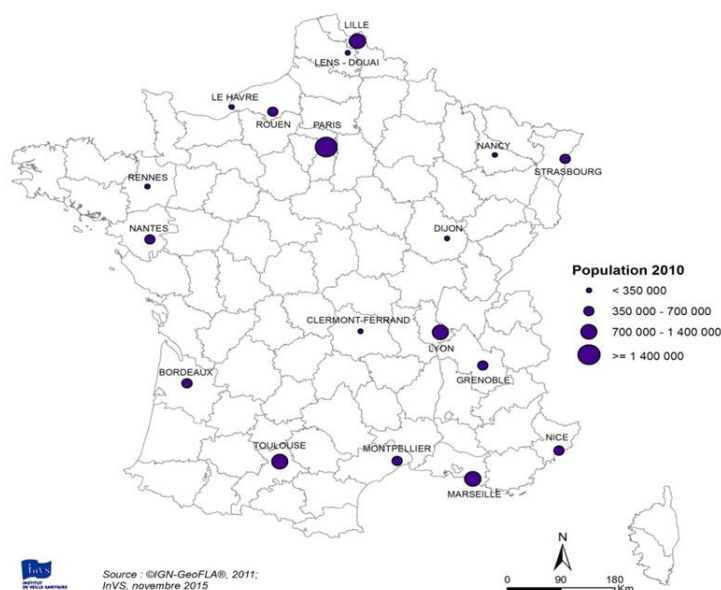


Figure 1 – Distribution géographique des 18 villes du Programme de surveillance air et santé de Santé publique France.

Les indicateurs d’exposition à la pollution atmosphérique étudiés sont les PM10, les PM2.5, le NO2 et l’Ozone. Les indicateurs sanitaires analysés sont la mortalité non accidentelle, la mortalité cardiovasculaire, les hospitalisations pour causes cardiaques et respiratoires. Des seuils définissant un épisode de pollution existent seulement pour les PM10 (50 µg/m³) and l’Ozone (120 µg/m³). Cependant, nous avons également analysé la forme de la relation dose-réponse pour les PM2.5 et le NO2 afin d’évaluer si la mise en place future de seuils pour ces seuils était pertinente.

Dans chaque ville, des modèles statistiques visant à quantifier les liens pouvant exister entre les variations quotidiennes du niveau d’un indicateur d’exposition à la pollution atmosphérique et celles du nombre d’occurrences d’un évènement sanitaire (décès, hospitalisations) ont été construits.

Les facteurs susceptibles de biaiser l’association à court terme entre la pollution et la santé (i.e. facteurs de confusion) ont été pris en compte dans les analyses comme la tendance à long terme, les variations saisonnières, les jours de la semaine, les jours fériés et les températures. Afin d’explorer la forme de la relation entre les concentrations des polluants et la mortalité et les hospitalisations, les indicateurs de pollution ont été introduits dans les modèles de quatre façons différentes :

1. La relation entre les polluants et les indicateurs de santé seront modélisés de manière linéaire (sans seuil)
2. La relation entre les polluants et les indicateurs de santé seront modélisés avec une approche linéaire dite 'piecewise' (qui permet de modéliser une relation non-linéaire avec un seuil) en imposant un seuil tel que défini par la réglementation française à savoir 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'ozone
3. La relation entre les polluants et les indicateurs de santé seront modélisés avec la même approche linéaire dite 'piecewise' mais sans imposer de seuil, afin de déterminer l'emplacement d'un seuil (si présent) via un critère statistique.
4. La relation entre les polluants et les indicateurs de santé seront modélisés de manière flexible en recherchant le point de changement de seuil optimal via des méthodes statistiques adaptées (i.e. fonctions cubiques splines)

Pour chaque ville, le nombre de décès et d'hospitalisations attribuable aux PM10 et à l'ozone ont ensuite été estimés en prenant le percentile 5 de la distribution du polluant comme valeur de référence. La part de ces décès et de ces hospitalisations survenus les jours de dépassement des seuils d'information (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'ozone) a également été calculée.

2.1.2.3. Résultats Principaux

Dans cette étude, des associations positives entre PM10, PM2.5, O3 et NO2 et la mortalité et les hospitalisations ont été observées en se basant sur une approche linéaire (modèle 1). Cela signifie que lorsque les concentrations journalières de polluants augmentent, on observe une augmentation du risque de mortalité et d'hospitalisation.

Tous les modèles permettant de caractériser une relation non-linéaire (modèles 2 à 4) ont mis en évidence une relation supra-linéaire entre les PM10, les PM2,5, le NO2, la mortalité et les admissions à l'hôpital, c'est-à-dire une association positive linéaire pour les concentrations les plus faibles des polluants qui stagne aux concentrations les plus élevées. Autrement dit, nous avons trouvé que le risque de mortalité et d'hospitalisation avaient tendance à diminuer, voire disparaître pour certains polluants et indicateurs de santé, pour les concentrations les plus élevées notamment au-delà des seuils définis pour ces polluants. Dans la figure 2 ci-dessous, il est possible d'observer cette tendance pour les PM10 en lien avec le risque de mortalité toutes causes pour le modèle le plus flexible (modèle 4).

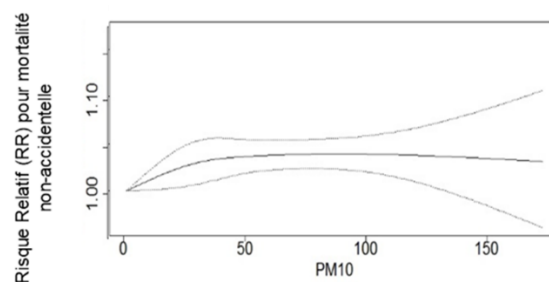


Figure 2 - Relations entre le risque de mortalité non-accidentelle et les niveaux journaliers de PM10 pour le modèle 4 (fonctions cubiques splines) pour l'ensemble des villes du Psas (2000-2017).

Quant à l'ozone, les résultats ont montré des relations exposition risque non linéaires, avec des effets plus prononcés à des concentrations supérieures à 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les décès non accidentels et les hospitalisations cardiaques, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les décès cardiovasculaires et 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les hospitalisations respiratoires. Autrement dit, il apparaît que pour l'ozone au-delà des valeurs proches des seuils tels que définis par la réglementation, les risques sanitaires (pour les indicateurs à l'étude) sont plus prononcés. Dans la figure 3 ci-dessous, il est possible d'observer cette tendance pour l'Ozone en lien avec le risque de mortalité toutes causes pour le modèle le plus flexible (modèle 4).

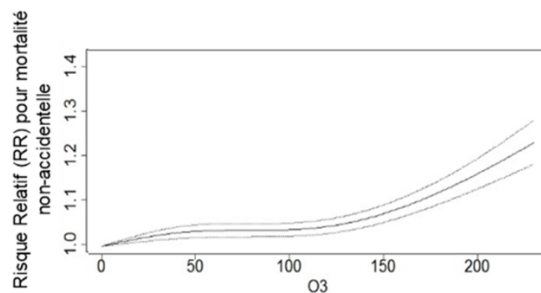


Figure 3 - Relations entre le risque de mortalité non-accidentelle et les niveaux journaliers d'Ozone pour le modèle 4 (fonctions cubiques splines) pour l'ensemble des villes du Psas (2000-2017).

Enfin, nous avons calculé le nombre de décès et d'hospitalisations attribuables aux concentrations journalières de ces polluants en comparant (pour les PM10 et l'Ozone) ce nombre au-dessus et en dessous des seuils réglementaires. Nous avons estimé que 16395 décès non accidentels et 4 199 décès cardiovasculaires étaient attribuables à une exposition à court terme aux PM10 entre 2007 et 2015, 10% de ceux-ci étant attribuables à des concentrations dépassant le seuil d'information. Entre 2009 et 2017, ces impacts sont de 21 710 hospitalisations pour causes cardiaques et 17 565 hospitalisations pour causes respiratoires, dont environ 8 % étaient attribuables à des concentrations dépassant le seuil d'information.

Pour l'ozone, entre 2000 et 2015, 23 488 décès non accidentels et 6510 décès cardiovasculaires étaient attribuables à une exposition à court terme, dont respectivement 29% et 36% étaient attribuables à des concentrations dépassant le seuil d'information. Entre 2007 et 2015, aucun impact n'a été constaté sur les hospitalisations pour causes cardiaques. Cet impact est de 1 679 hospitalisations pour causes respiratoires, celui-ci étant entièrement attribuable à des concentrations supérieures au seuil d'information.

2.1.2.4. Conclusions de cette étude

En conclusion, des associations positives entre PM10, PM2.5, O3 et NO2 et la mortalité non accidentelle et cardiovasculaire et les hospitalisations cardiaques et respiratoires ont été mises en évidence. La forme des relations exposition risque entre les PM et NO2 et la santé a montré une augmentation constante de la mortalité et des hospitalisations avec un aplatissement des pentes à des concentrations des polluants plus élevées. La supra-linéarité de la relation entre PM10, PM2,5, NO2, mortalité et hospitalisations justifie par conséquent la nécessité de réduire les concentrations de pollution atmosphérique bien en deçà des valeurs réglementaires. Ces résultats ne permettent donc pas de justifier le maintien (pour les PM10) ni la mise en place (pour les PM2.5 et NO2) de seuils réglementaires pour définir des épisodes de pollution dans une perspective de santé publique.

Pour l'ozone, la forme de la relation exposition-risque est non linéaire avec des effets sanitaires plus prononcés à des concentrations élevées. Elle est par conséquent cohérente avec la logique de fixer un seuil quotidien au-delà duquel il y a un risque accru pour la santé humaine. Cependant, les résultats suggèrent que ce seuil devrait être inférieur à 120 µg/m3, et être abaissé jusqu' à 90 µg/m3.

2.1.3. Tâche 2 de l'axe 1

2.1.3.1. Objectif de cette tâche

Cette étude a examiné l'influence de la température et de la saison sur le risque de mortalité associée à un niveau de polluant donné, et réciproquement, l'influence de la pollution sur le risque de mortalité associé à un niveau de température donné.

2.1.3.2. Données et Méthodes

Les analyses ont porté sur 17 villes métropolitaines entre 2000 et 2015. Dans chaque ville, des modèles statistiques permettent d'étudier comment les variations inter-journalières de la pollution et de la température se répercutent sur la mortalité. Ces modèles prennent également en compte plusieurs facteurs susceptibles d'influencer la mortalité, comme la tendance à long-terme et la saisonnalité.

Deux types de modèles ont été construits. Un premier modèle visait à comprendre si l'effet de l'ozone et des particules fines sur la mortalité était différent pendant les jours de grand froid, d'hiver (hors grand froid), de printemps, d'automne, d'été (hors vagues de chaleur), et de vagues de chaleur. Il répond à la question : la pollution de l'air est-elle plus dangereuse pour la santé quand il fait très chaud, ou très froid ? Un deuxième modèle visait à comprendre si l'effet de la température sur la mortalité dépendait des niveaux d'ozone ou de PM10 observés. Il répond à la question : la chaleur est-elle plus dangereuse pour la santé quand l'air est plus pollué ?

2.1.3.3. Résultats Principaux

Le premier constat est que les épisodes de pollution sont beaucoup plus fréquents que les épisodes de températures extrêmes. Elle a montré que les vagues de chaleur sont très souvent associées à des épisodes de pollution à l'ozone (entre 51 et 81% des jours selon la ville), et jamais à des épisodes de PM10, alors que les vagues de froid sont peu associées à des épisodes de PM10 (entre 0 et 38% des jours selon la ville), et jamais à des épisodes d'ozone.

Les résultats montrent également qu'une même augmentation des concentrations de polluants de l'air (ozone et PM10) est associée à une augmentation plus importante de la mortalité en été, et pendant les vagues de chaleur. Par exemple, une augmentation de 10µg/m³ des PM10 se traduit par une augmentation de +0,9% de la mortalité au printemps, +3,0% en été, et +14,2% pendant les vagues de chaleur. Autrement dit, la pollution de l'air est plus dangereuse pour la santé quand il fait chaud, et très chaud. Les résultats suggèrent également que l'effet de la température sur la mortalité est légèrement plus important lorsque les concentrations d'ozone ou de PM10 sont plus élevées. Cet effet semble très influencé par les vagues de chaleur les plus extrêmes, en particulier celles de 2003. Autrement dit, les très fortes chaleurs sont probablement plus dangereuses pour la santé quand l'air est plus pollué.

2.1.3.4. Conclusions et limites de cette étude

Nos résultats vont dans le sens des connaissances épidémiologiques, actuelles, à savoir l'existence d'une interaction entre pollution de l'air, chaleur et mortalité. Cette interaction peut s'expliquer par différentes hypothèses : 1) pollution et chaleur ont toutes deux un effet pro-inflammatoire systémique qui peut s'amplifier mutuellement, 2) la composition de la pollution peut être influencée par les conditions météorologiques, 3) l'exposition à l'extérieur peut être plus importante lorsqu'il fait beau et chaud. Etant donné l'influence de la saison et de la température sur l'effet de la pollution sur la mortalité, il pourrait être intéressant de l'intégrer dans la gestion des épisodes de pollution. Par exemple, des seuils plus bas sur les polluants pourraient être utilisés pendant l'été. Cependant, il apparaît important de continuer à informer sur les risques pour la santé liés à la pollution de l'air pendant les vagues de chaleur, comme fait actuellement pour l'ozone. De plus, en termes de prévention, il est important de diminuer le plus possible les niveaux de pollution pendant les vagues de chaleur, y compris lorsque ces niveaux sont inférieurs aux seuils réglementaires.

2.1.4. Tâche 3 de l'axe 1

2.1.4.1. Objectif de cette tâche

Dans cette étude nous avons décomposé l'effet total des vagues de chaleur sur la mortalité en deux mécanismes distincts : les effets directs liés à la chaleur et effets indirects en lien avec l'augmentation des niveaux d'ozone.

2.1.4.2. Données et Méthodes

L'étude a porté sur 15 grandes métropoles françaises entre 2000 et 2015 incluant 4 types de climats distincts : Tempéré (Paris, Toulouse) ; Semi-continentale (Clermont, Grenoble, Lyon, Nancy, Strasbourg) ; Océanique (Bordeaux, Le-Havre, Nantes, Rennes, Rouen) ; Méditerranéenne (Marseille, Montpellier, Nice). Nous nous sommes focalisés sur la période estivale uniquement (définie entre le 1^{er} Juin et le 30 Septembre) ce qui correspond notamment à la période durant laquelle le Système d'alerte canicule et santé est actif.

Les indicateurs d'exposition journalière à l'Ozone et la température ont été collectées pour chacune des villes. Nous avons aussi collecté les données journalières de NO2 afin de considérer son rôle comme facteur de confusion entre l'ozone et les indicateurs de santé. Séparément pour chacune des villes, nous avons défini un événement de vague de chaleur en se basant sur la définition officielle telle que proposée par Météo France {Pascal, 2021 #1962}. Nous avons aussi testé des définitions de vagues de chaleur alternatives et aussi analysé les données en retirant les observations de 2003, afin de vérifier dans quelle mesure nos résultats étaient sensibles à la définition d'un événement de vague de chaleur. Les indicateurs sanitaires analysés sont la mortalité non accidentelle, la mortalité cardiovasculaire et la mortalité respiratoire.

Afin de décomposer les effets de la chaleur sur la mortalité en fonction des mécanismes directs et indirects (i.e. via l'ozone), nous avons conduit trois modèles consécutifs en adoptant une approche d'analyse de médiation causale basée sur le modèle contrefactuel {VanderWeele, 2016 #986}. Ces modèles ont été conduits pour chaque ville séparément dans un premier temps avant d'être méta-analysés pour obtenir un effet groupé pour l'ensemble des villes. Premièrement, nous avons conduit des modèles statistiques similaires à ceux décrits pour les tâches 1 et 2 pour évaluer l'effet total (incluant à la fois les effets directs et indirects) de la chaleur sur la mortalité en prenant en compte les facteurs susceptibles de biaiser l'association incluant la tendance à long terme, les variations saisonnières, les jours de la semaine et les jours fériés. Deuxièmement, nous avons ajusté ce premier modèle sur l'ozone pour obtenir les effets directs. Enfin, nous avons conduit un modèle pour quantifier la relation entre vagues de chaleur et ozone ajustés sur les niveaux de NO2 comme proxy de précurseurs d'ozone (incluant les concentrations des 2 jours précédents), puis avons combiné les coefficients de ce troisième modèle aux coefficients du deuxième modèle pour obtenir les effets indirects. Cet effet indirect correspond ainsi à l'effet de l'ozone qui est induit par une vague de chaleur sur le risque de mortalité. Enfin, nous avons calculé la proportion médiée pour chaque ville pour estimer la proportion de l'effet total qui est attribuable à l'effet indirect de l'ozone (en %). Cette proportion médiée nous permettra d'évaluer dans quelle mesure, pour une ville donnée, il serait opportun de combiner des actions visant à réduire les émissions de précurseurs d'ozone avec des actions préventives visant les températures élevées lors d'une alerte canicule.

2.1.4.3. Résultats Principaux

Dans cette étude, nous avons confirmé l'effet des vagues de chaleur sur le risque de mortalité pour toutes causes (non-accidentelles), cardiovasculaires et respiratoires et dans toutes les villes étudiées. Dans la figure 4 ci-dessous, nous présentons les effets totaux des vagues de chaleur sur la mortalité toutes causes par ville. L'effet le plus important de la chaleur est à Paris tandis que l'effet le plus faible est à Montpellier.

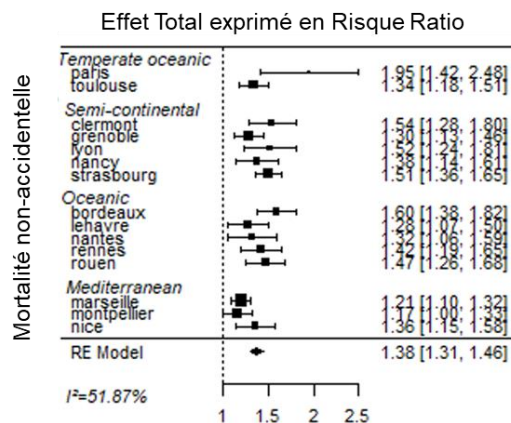


Figure 4 : Effets totaux des vagues de chaleur sur la mortalité toutes causes par ville

Nous avons identifié une hétérogénéité importante quant à la proportion médiée entre les différentes villes étudiées. Pour certaines villes, la contribution de l’ozone à l’effet total de la chaleur sur la mortalité était faible comme pour Nancy (2%) ou Bordeaux (4%). En parallèle, pour certaines villes cette contribution de l’ozone était plutôt importante comme pour Nantes (31%) ou Grenoble (25%). Autrement dit, cela signifie pour Grenoble par exemple, que lorsqu’une vague de chaleur survient, un quart (en moyenne) des décès attribuables à cette vague de chaleur sont en fait dues à l’augmentation des concentrations d’ozone induites par cette vague de chaleur.

Tableau 2 : Proportion médiée de l’ozone dans la relation chaleur-mortalité par ville

Climat et Agglomération	Proportion Médiée (%)
Tempéré	
Paris	11%
Toulouse	20%
Semi-continental	
Clermont-Ferrand	10%
Grenoble	25%
Lyon	13%
Nancy	2%
Strasbourg	8%
Océanique	
Bordeaux	4%
Le-Havre	11%
Nantes	31%
Rennes	20%
Rouen	23%
Méditerranéen	
Marseille	10%
Montpellier	11%
Nice	5%

2.1.4.4. Conclusions de cette étude

En conclusion, nous avons pu mettre en évidence dans cette étude que lorsqu’une vague de chaleur survient, une proportion qui varie grandement entre les agglomérations françaises de l’effet sanitaire est en réalité due aux mécanismes indirects impliquant une augmentation des niveaux d’ozone. Cette étude est la première à l’échelle internationale quantifiant ces mécanismes et pourra être répliquée dans d’autres contextes. En effet, dans cette étude, nous avons également adoptée une approche de reproductibilité en [publiant](#) nos codes afin de faciliter de futurs travaux similaires.

Nos résultats indiquent que pour certaines agglomérations (e.g. Nantes, Grenoble ou Rouen), il serait opportun lorsqu'une vague de chaleur survient, de combiner des actions préventives visant la chaleur d'ores et déjà mises en place avec des actions visant à réduire les émissions de précurseurs d'ozone qui peuvent notamment inclure des actions visant à réduire la vitesse du trafic automobile ou encore encourager des modes de transport actif via la gratuité des transports publics ou la facilitation du télétravail par exemple. Il serait particulièrement intéressant d'expérimenter ce type d'actions combinées lorsque des vagues de chaleur surviennent afin d'évaluer dans quelle mesure les bénéfices sanitaires peuvent être optimisés.

2.2. Synthèse de l'axe 2

2.2.1. Introduction et description générale des tâches de l'axe 2

De nombreuses interventions ont été mises en place lors d'épisodes de pollution au cours des dernières années. En région parisienne ces interventions ont porté essentiellement sur une réduction des émissions liées au trafic automobile. Ces mesures que nous appellerons ci-après alertes de qualité de l'air (AQA), ont été implémentées dans de nombreuses villes dans le monde incluant Los Angeles, Santiago, Beijing, Toronto ou Sao Paulo. Elles incluent des actions collectives incluant la réduction de vitesse (sur le périphérique à Paris notamment), la restriction de certaines activités industrielles la mise en place de la circulation alternée ou la gratuité des transports publics par exemple. Elles incluent aussi des recommandations individuelles telles que la réduction de l'activité physique, du temps passé en extérieur, le port du masque ou la prise de certains médicaments (Chen, 2018 #1193; Samet, 2018 #1963). Bien que ces interventions bénéficient d'une mobilisation politique, économique et citoyenne très importante, il n'existe pas d'information sur leur efficacité en matière d'effets sur la santé.

A Paris ce type de mesure a été mise en place progressivement. Des mesures ont été mises en place en 2000 basées sur les dépassements de seuil d'ozone et incluaient de simples mesures d'information sur les niveaux élevés d'ozone (appelés parfois smogs) avec des recommandations visant à limiter la vitesse du trafic. Malheureusement, n'ayant pas accès aux données de santé avant l'année 2000, il n'a pas été possible de réaliser une évaluation des mesures AQA basées sur les épisodes d'ozone. Cependant, la ville de Paris a mis en place des AQA en lien avec les épisodes de PM10 en 2008 qui ont été mises à jour en 2012. Les niveaux de PM10 à Paris sont parmi les plus hauts en Europe ce qui a justifié de se focaliser sur ces Dans la figure 5 ci-dessous, nous décrivons les actions spécifiques mises en place en distinguant les seuils d'information et seuils d'alerte qui sont plus élevés et incluent des actions plus drastiques. Dans l'analyse (voir détails ci-dessous), nous n'avons, cependant, pas pu analyser ces deux seuils de manière distincte par manque de puissance statistique. Dans notre étude, nous avons évalué les deux changements suivants : la mise en place de ces AQA en 2008 et la mise à jour de ces AQA via une réduction des seuils et une diversification des actions menées.

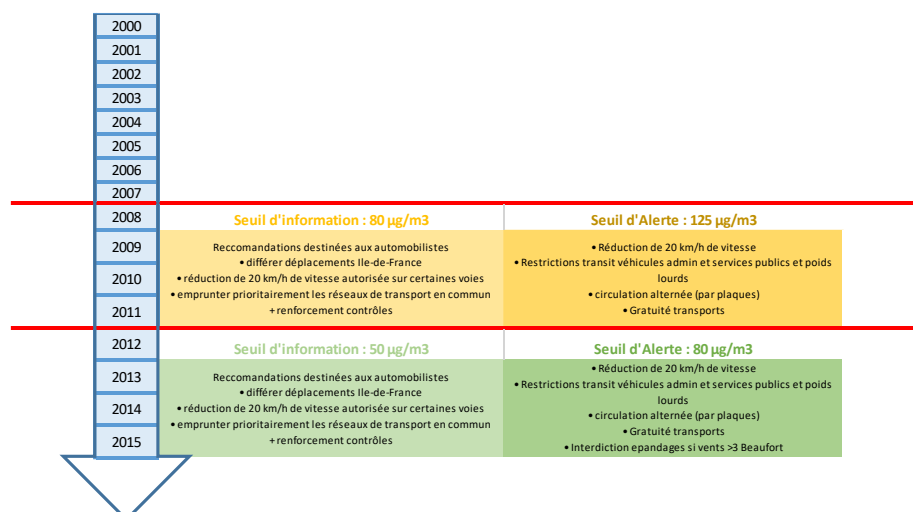


Figure 5 : Descriptif des actions mises en place lors des alertes de qualité de l'air basées sur les seuils de PM10 à Paris

Dans cet axe, notre objectif était d'évaluer si les mesures de lutte contre les pics de pollution étaient efficaces pour prévenir les décès et ensuite quantifier les bénéfices économiques éventuels afin de mettre en lumière les bénéfices sociétaux en lien avec ces mesures. Pour cela, nous proposons une approche méthodologique innovante, fondée sur des expérimentations naturelles, qui permettent de reproduire les conditions d'un essai contrôlé randomisé afin d'évaluer les effets associés à la mise en place de ces interventions.

2.2.2. Tâche 1 de l'axe 2

2.2.2.1. Objectif de cette tâche

L'objectif principal de cette tâche est d'évaluer les effets de la mise en place des AQA et de leur mise à jour sur la mortalité journalière dans le grand Paris.

2.2.2.2. Données et Méthodes

L'étude a porté sur le Grand Paris pour la période 2000-2015. Nous avons considéré les indicateurs sanitaires suivants : la mortalité non accidentelle, la mortalité cardiovasculaire et la mortalité respiratoire. Nous avons aussi considéré la mortalité pour toute la population ainsi que la population âgée au-delà de 75 ans. Les données journalières de PM10 ainsi que les dates de mises en place des AQA ont été collectées auprès de AirParif (<https://www.airparif.asso.fr/>). Nous avons aussi collecté les données journalières de température et d'ozone comme potentiels facteurs de confusion (voir détails plus bas).

En ce qui concerne l'analyse, nous avons d'abord séparé la période d'étude en trois phases : phase I (2000-2007), phase II (2008-2011) et phase III (2012-2015). Nous avons comparé séparément la phase I aux phases II et III et la phase II à la phase III. Pour chacune des périodes, nous avons identifié les jours dits éligibles (au-delà des seuils réglementaires de PM10) et les jours dits non-éligibles (en dessous des seuils). Nous avons capitalisé sur le choix de ces seuils d'éligibilité comme expérimentation naturelle et mobilisé des méthodes dites quasi-expérimentales. En effet, l'idée est d'estimer deux différences : i) la différence entre les jours éligibles et non-éligibles avant l'implantation de ces mesures (2008) ou leur mise à jour (2012) et ii) la différence entre les jours éligibles et non-éligibles après l'implantation de ces mesures (2008) ou leur mise à jour (2012). Il suffit ensuite de comparer ces deux différences pour estimer les bénéfices potentiels de la mise en place des AQA ou leur mise à jour à Paris. En faisant l'hypothèse que les AQA (ou leur mise à jour) n'ait aucun bénéfice sur la mortalité, nous ne devrions pas observer de différences entre ces deux quantités ; cependant, si l'on observe une différence (entre ces deux quantités) et suivant quelques hypothèses analytiques particulières (Abadie, 2018 #1964), il sera possible d'inférer que les AQA réduisent le risque de mortalité. De plus, il est possible qu'il y ait des différences systématiques entre les jours éligibles et non-éligibles en ce qui concerne des facteurs temporels, de température ou vis-à-vis d'autres polluants. Nous avons ainsi mené des analyses basées sur des scores de propension afin de s'assurer que les jours éligibles et non-éligibles soient les plus comparables possibles au regard de potentiels facteurs de confusion incluant variations saisonnières, les jours de la semaine et les jours fériés ainsi que la température et concentrations d'ozone (en considérant également les 2 à 3 jours précédents). Enfin, nous avons calculé le nombre de décès prévenus directement attribuables à la mise en place ou la mise à jour des AQA. Nous avons également adopté une approche de reproductibilité en publiant [nos codes](#) afin de faciliter de futurs travaux similaires.

2.2.2.3. Résultats Principaux

Entre la mise en place des AQA en lien avec les niveaux de PM10 en 2008 et la fin de la période d'étude en 2015, nous avons observé 122 interventions incluant 103 dépassements de seuils d'information et 19 de seuils d'alerte. La plupart de ces événements se déroulaient durant la saison hivernale. Sur les 622 268 décès observés durant la période d'étude, 386 202 étaient parmi les personnes âgées de plus de 75 ans.

En comparant la phase II à la phase I, ce qui correspond à l'efficacité de la mise en place des AQA avec les seuils et actions initiaux, nous n'avons pas identifié d'effet sur la mortalité (quel que soit l'indicateur de santé ou le groupe d'âge). En revanche, lorsque les AQA ont été mis à jour en 2012 via un abaissement des seuils et une diversification des actions mises en place, nous avons pu observer une réduction du risque de mortalité, notamment pour la mortalité cardiovasculaire et dans une moindre mesure pour la mortalité respiratoire. Ces bénéfices étaient similaires pour les 2 groupes d'âge à l'étude. Nous avons aussi évalué dans quelle mesure les bénéfices en lien avec la mise à jour des AQA se distribuaient sur plusieurs jours et avons conclu que ces bénéfices se concentraient principalement durant les jours durant les alertes étaient activées. Nous avons également estimé que 386 décès étaient prévenus grâce aux AQA (95% IC¹: 35 à 729) sur la période 2012-2015. Cela correspond à 163 décès évités [IC95% 7.75, 391] par an en moyenne.

2.2.2.4. Conclusions de cette étude

En conclusion, nous avons pu montrer que suite aux mises à jour des AQA sur le Grand Paris en 2012, plusieurs centaines de décès, qui auraient dû avoir en lieu si ces actions n'avaient pas eu lieu, ont été prévenus. Ces bénéfices sont également associés à des bénéfices économiques importants (voir section suivante). Ceci dit, lorsque les seuils étaient trop élevés (avant 2012), nous n'avons pu identifier aucun bénéfice des AQA.

¹ IC : intervalles de confiance

Ceci met en évidence que lorsque des actions préventives qui visent à la fois la réduction des émissions de polluants mais également les comportements individuels, sont mis en place à des seuils de PM10 qui ne sont pas trop hauts, les bénéfices sanitaires peuvent être substantiels. Cela encourage à poursuivre ces efforts en réduisant les seuils auxquels ces actions sont mises en place jusqu'à éventuellement devenir des actions qui deviennent durables et qui ne sont plus du ressort de situations exceptionnelles en lien avec ce qui est considéré comme un épisode de pollution. Ceci est cohérent avec les résultats de la tâche 1 de l'axe 1 dans laquelle nous avons montré que les seuils définis réglementairement ne coïncident pas avec une réalité épidémiologique. Cependant, il est difficile de savoir dans quelle mesure une généralisation de ce type de mesure à davantage de jours dans l'année conduirait à des bénéfices comparables vis-à-vis de possibles fatigues de la population en lien avec de telles alertes ou de la difficulté à veiller à la mise en pratique des actions recommandées. Bien que les bénéfices que nous avons pu mettre en évidence sont importants, ils ne s'appliquent qu'à quelques jours par an et mis en perspective du fardeau total (sur tous les jours de l'année) ils ne représentent qu'une part des décès évitables en lien avec une exposition court-terme aux particules. Ces résultats de l'axe 2, en plus des résultats de l'axe 1 encouragent donc à poursuivre ces actions et les rendre plus prévalentes en réduisant les seuils auxquelles les AQA sont activées. De plus, tel que mis en évidence dans l'axe 1, il apparaît que synergies importantes existent entre polluants atmosphériques et événements météorologiques extrêmes. Cela encourage à mener des expérimentations qui impliqueraient des seuils d'activation et types d'actions préventives qui fluctueraient en fonction des conditions météorologiques ou des saisons.

2.2.3. Tâche 2 de l'axe 2

Sur la base des travaux réalisés en amont dans la tâche 1 de l'axe 2, en termes de décès évités par la mise en œuvre de mesures de lutte contre la pollution (i.e AQA) durant les pics de pollution dans la métropole du Grand Paris (Alari, 2021 #1965), une valorisation économique est effectuée (cf. les détails dans le rapport spécifique à l'analyse économique, Chanel et al. 2022). Le choix de la valeur monétaire utilisée repose sur un cadre standard et une revue exhaustive de la littérature en matière de valeurs dérivées des préférences déclarées ou révélées. La mortalité évitée par les politiques de restriction de circulation durant les pics de pollution est dite de court terme, et se fonde sur l'utilisation de risque relatif de court terme. Plusieurs études montrent que les niveaux élevés de pollution touchent d'abord la partie vulnérable de la population (malades, personnes âgées, asthmatiques ou allergiques), dont la probabilité de mortalité est plus élevée que celle de la population générale. Elles estiment la perte moyenne d'espérance de vie entre quelques jours et un peu plus d'un an. Dès lors, l'utilisation d'une valeur d'évitement d'un décès (VED) pour évaluer monétairement ces décès ne semble pas pertinente. Nous retenons donc l'hypothèse d'une année de vie perdue par décès associé aux politiques de restriction de la circulation durant les pics de pollution, suivant en cela les choix du programme Clean Air For Europe par exemple, et nous choisissons de recourir à la valeur d'une année de vie perdue pour valoriser ces décès.

Toutefois, la façon d'obtenir une valeur d'une année de vie, par estimation directe dans une étude de préférences déclarées contextuelle ou par dérivation à partir d'une VED unique, conduit à des valeurs variant du simple au double environ. Aucun consensus scientifique ne favorisant l'une ou l'autre de ces approches, et ne voulant en privilégier aucune, nous choisissons la moyenne arithmétique d'une valeur faisant référence au niveau européen (Desaigues, 2011 #1966) et de celle préconisée dans les recommandations officielles françaises (Quinet, 2013), soit une valeur centrale de 86 500 EUR2017. Notons que cette valeur est cohérente avec celle recommandée en 2020 par le gouvernement britannique (60 000 £2010 soit 79 999 EUR2020) ou l'Union européenne (70 000 EUR2020).

Les résultats de l'axe 2 conduisent à une estimation de 163 décès évités [IC95% 7.75, 391] par an sur la période 2012-2015 du fait des mesures ponctuelles prises lors des déclenchements des seuils d'information et d'alerte sur la métropole du Grand Paris. L'évaluation monétaire annuelle correspondante est de **14.1 millions EUR2017** [IC95% 0.67, 33.82] **par an**. A titre de comparaison, sur cette période, 18 jours d'alerte (Phase 3) ont donné lieu aux transports publics RATP gratuits, soit en moyenne 4.5 jours par an. Les recettes moyennes journalières de la billetterie RATP étant d'environ 3 millions EUR2017, le coût consécutif à la mesure de gratuité est donc évalué à 13.5 millions EUR2017/an, soit une évaluation comparable aux bénéfices associés à une réduction de la mortalité (14.1 millions EUR2017).

2.3. Synthèse de l'axe 3

2.3.1. Tâche 1 de l'axe 3

2.3.1.1. Objectifs et problématique

Une grande variété d'acteurs participe de près ou de loin à l'élaboration de mesures durables visant l'amélioration de la qualité de l'air. Que ce soient les services de l'Etat, les collectivités territoriales, les établissements publics ou bien les

associations, ces acteurs agissent à travers différents secteurs d'intervention pour assurer aux habitants de leurs territoires un air moins pollué. De nombreuses informations et mesures déjà en place peuvent guider ces acteurs à mettre en œuvre des aménagements pour lutter contre l'exposition aux polluants atmosphériques sur le long terme, mais l'information est souvent éparpillée et les mesures existantes ne mettent pas forcément en avant l'amélioration de la qualité de l'air. Pour développer la compréhension de cette problématique, il est apparu nécessaire d'identifier les mesures en place et rassembler l'information pour construire une boîte à outil visant à faciliter le développement d'actions concrètes par les décideurs publics. L'information produite facilitera l'identification des leviers de mise en œuvre des politiques publiques visant à améliorer la qualité de l'air pour chaque secteur d'intervention. Ce travail se limite au secteur des transports et des mobilités.

Deux objectifs ont été fixés pour répondre à cette problématique. Le premier est le recensement des mesures de lutte contre la pollution atmosphérique en lien avec les transports et la mobilité, auprès des acteurs locaux. Le deuxième objectif, qui est un prolongement du premier, consiste à compléter le recensement des éléments descriptifs relatifs aux mesures existantes en étudiant les configurations institutionnelles favorables à leur mise en place. Ainsi l'étude aborde les particularités, leviers de réussite et difficultés relatives aux mesures mises en place dans les politiques publiques de transports et de mobilités. L'enjeu principal est de constituer un foyer de connaissance autour d'actions probantes pour outiller les acteurs qui pourront se saisir de cette étude pour favoriser la duplication des mesures identifiées partout sur le territoire national.

2.3.1.2. Méthodologie

Considérant plusieurs facteurs comme la nature qualitative et quantitative des livrables ainsi que la qualité spécifique des destinataires, les pouvoirs publics et acteurs des politiques de l'air, la méthode d'enquête pour le recensement est basée sur deux outils principaux. Tout d'abord, la mise en ligne et la diffusion d'un questionnaire ayant pour objectif de compiler des données descriptives relatives aux mesures recensées. Il a été décidé que le questionnaire serait hébergé sur le logiciel Lime Survey, mis à disposition par Santé publique France. Le questionnaire a été construit de manière collégiale avec des partenaires travaillant sur la qualité de l'air (direction régionale et interdépartementale de l'environnement, de l'aménagement et des transports, Alliance des collectivités pour la qualité de l'air, l'association agréée de surveillance de qualité de l'air (AASQA) ATMO Grand-Est et le réseau ville-santé OMS) et testé auprès de plusieurs collectivités du type établissement public territorial et communauté d'agglomération.

Le deuxième outil de l'enquête a été la réalisation d'une série d'entretiens avec les acteurs qui conçoivent, portent et mettent en œuvre les mesures recensées. Un large panel d'acteurs a été proposé pour couvrir l'ensemble des institutions participant de près ou de loin aux politiques de l'air. Les institutions concernées peuvent être les administrations gouvernementales, collectivités territoriales, autres établissements publics et associations. L'objectif des entretiens était de donner de la profondeur à l'étude des mesures. Les échanges visaient à recueillir des éléments relatifs aux architectures et dynamiques institutionnelles favorables à la mise en place des mesures recensées. Une première phase pilote en Île-de-France a permis d'étudier le rôle et les compétences de chaque acteur institutionnel tout en commençant à récolter les données sur le territoire national par questionnaire.

Enfin, deux partenariats ont été menés avec l'AASQA ATMO Auvergne-Rhône-Alpes pour un échange de données, et avec le CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) pour la valorisation des résultats de l'enquête.

2.3.1.3. Principaux résultats descriptifs

La première phase pilote de l'étude en Ile-de-France a permis d'opérer certains ajustements comme la réalisation d'une « fiche-action » pour chaque mesure, plus simple à renseigner que le questionnaire et proposée aux acteurs contactés, mais également de mieux cibler les acteurs d'intérêt pour la deuxième phase nationale.

Avec le concours de soixante-quatre contributeurs, l'enquête a permis de recenser 175 mesures sur l'ensemble du territoire national, avec une surreprésentation des régions Île-de-France et Auvergne-Rhône-Alpes où le taux de réponses a été plus élevé (66 des mesures recensées proviennent d'ATMO Auvergne-Rhône-Alpes). Les mesures recensées couvrent un grand panel de thématiques telles que les politiques cyclables, piétonnes, les transports en commun, l'apaisement de l'espace urbain, la logistique, le transport maritime et ferroviaire, la végétalisation, la protection de l'enfance, l'urbanisme et autres thématiques associées.

Les mesures recensées ont été classées en fonction des cinq thématiques suivantes (une mesure peut être liée à plusieurs thématiques) :

- Zones à faibles émissions mobilités : 16 mesures
- Transports en commun : 50 mesures
- Politique cyclable : 41 mesures
- Marche et apaisement de l'espace public : 40 mesures
- Sensibilisation et bonnes pratiques : 83 mesures

En complément de ces éléments descriptifs recensés, 58 entretiens ont pu être réalisés auprès des contributeurs pour approfondir la compréhension de certains secteurs d'intervention. Les principales architectures et dynamiques institutionnelles favorables à la mise en place des mesures ont été identifiées. D'après les données recueillies et les entretiens réalisés, une typologie de l'implication des collectivités dans les politiques d'amélioration de la qualité de l'air a été réalisée et résumée dans le tableau 3 ci-après.

Tableau 3 : Typologie de l'implication des collectivités dans les politiques d'amélioration de la qualité de l'air en France métropolitaine

<u>Niveaux d'implication sur la qualité de l'air</u>	Formation et suivi des élus	Moyens humains et budgétaires	Candidature à des appels à projets	Partenariat avec une AASQA	Diagnostic territorial	Transversalité	Document structurant l'action	Phase de consultation	Communication
Implication systématique	Elus forces de proposition Participation aux comités de pilotage ou réunions techniques	Budget pérenne et dimensionné ETP dédiés	Obtention régulière de budgets additionnels Mise à disposition d'un accompagnement technique	Subvention de l'AASQA par la collectivité Partenariats réguliers	Structuration de l'action Identification de zones à enjeux et des leviers d'action Fixation d'objectifs à moyen et long terme	Comités de pilotages et équipes-projets inter-directions Prise en compte systématique des problématiques santé, environnement, climat	Plan d'action dédié à la qualité de l'air Objectifs des PCAET ambitieux Suivis et évaluations programmés	Consultations larges et régulières Participation aux réunions techniques Possibilité pour les consultés d'être force de proposition	Dimension positive de l'apport pour la santé Communication répétée et synthétique Clarté de l'information
Implication par « fenêtre d'opportunité »	Implication par grands projets ou expérimentations	Moyens alloués ponctuellement	Obtention ponctuelle de budgets additionnels Mise à disposition d'un accompagnement technique	Partenariat par grand projet ou expérimentation	Diagnostic à petite échelle correspondant uniquement au projet à mener	Implication ponctuelle d'autres directions	Actions présentes dans d'autres documents (ex : PCAET)	Consultation des acteurs essentiels pour une partie des projets Commentaires sur les scénarios du décideur	Communication « one shot » pour un projet spécifique
Implication limitée	Problématique non prioritaire pour les élus	Moyens faibles ou non dimensionnés	Manque de ressources pour candidater	Lien complexe ou inexistant	Non réalisé ou minimum réglementaire	Fonctionnement en « silot »	Inexistant	Dimension participative pas ou peu développée	Pas ou peu d'outils de communication à disposition

Cette typologie dégage trois catégories d'implication présentées ci-après.

L'implication systématique

Le niveau d'implication systématique comprend un ensemble de métropoles de grande taille et territoires avancées sur la problématique de la qualité de l'air, un ensemble de facteurs déterminants les caractérise. Ces territoires mettent en avant la qualité de l'air comme sujet prioritaire, des élus sont dédiés à cette thématique et au suivi des projets. Les moyens alloués sont donc fixés à hauteur de l'intérêt porté par la collectivité sur cet enjeu et les candidatures à des projets nationaux régulièrement déposées. Ces territoires disposent de plans d'actions spécifiques, construits en transversalité avec l'appui des services d'urbanisme, de mobilité, d'énergie et de santé. Leur partenariat solide avec les AASQA locales leur permet de solliciter des évaluations des mesures mises en place et ainsi de consolider leur communication. Ce sont également souvent des territoires qui consacrent une partie importante de la création des projets aux consultations intégrées, dès la phase de diagnostic.

Ces institutions ne sont pas majoritaires sur le territoire métropolitain, néanmoins elles constituent de véritables réservoirs d'actions et territoires d'expérimentations. Elles peuvent produire un effet d'entraînement des collectivités limitrophes. Elles constituent également des démonstrateurs de politiques intégrées Climat-Air-Energie et une opérationnalisation de modes de fonctionnements transversaux très concrets.

Une grande partie de ces territoires possède de fortes capacités budgétaires et des ressources techniques qui facilitent la mise en œuvre de projets d'envergure. Néanmoins, certains territoires plus circonscrits et disposants de ressources moins volumineuses peuvent également se distinguer et rentrer dans cette catégorie sous certains aspects.

L'implication par « fenêtres d'opportunités »

Cette deuxième catégorie d'acteurs agit selon les possibilités. La notion de fenêtre d'opportunité définit une temporalité courte au sein de laquelle les conditions de l'action sont réunies. Ce mode de fonctionnement est majoritaire dans le recensement et concerne majoritairement des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI). Sur ces territoires, des plans d'actions peuvent être réalisés mais leur mise en œuvre peut être compromise par des moyens humains et budgétaires contraints ou une dépendance à d'autres acteurs plus systémiques. Dans ce cas, la prise en compte de la qualité de l'air n'est pas systématique mais intervient lors de moments de concordances d'intérêts de plusieurs institutions qui permettent ponctuellement la réalisation de projets. Dans ce cadre, la sollicitation des AASQA est moins fréquente et la collectivité peut faire appel à un cabinet d'études environnementales pour accompagner ses projets. Également, les phases de concertations se limitent aux aspects réglementaires et les diagnostics sont limités, faute de vision programmatique de long terme et de ressources disponibles.

Ces territoires sont intéressants dans cette étude car ils sont soumis à des impératifs de priorisation et peuvent montrer que des mesures d'intérêt peuvent être menées dans un cadre contraint en mobilisant des ressources préexistantes sur leur territoire (associatives, citoyennes, privées). L'intérêt de postuler à des appels à projets nationaux est fort pour ces territoires car c'est souvent dans cette temporalité, qui procure un cadre d'action renforcé, qu'une transition peut être effectuée vers des facteurs qui relèvent du modèle de l'implication systématique.

L'implication limitée

Le dernier niveau d'implication est de type limité, elle rassemble en grande partie des territoires péri-urbains et ruraux. Également mais dans une moindre mesure, cette catégorie peut concerner des EPCI urbains dont l'organisation interne et l'allocation faible de ressources ne permettent pas de mener à bien des mesures d'ampleur. Les institutions qui correspondent à ce niveau d'implication sont minoritaires dans le recensement. Une multitude de facteurs peuvent contraindre une institution à résider dans ce mode d'implication. L'impossibilité de flécher un budget sur des projets en lien avec la qualité de l'air, l'accompagnement inexistant d'institutions techniques et scientifiques et l'absence de la représentation de leurs intérêts auprès d'instances décisionnelles en sont des exemples représentatifs auprès des enquêtés. Ces catégories d'acteurs cumulent souvent plusieurs difficultés qui les empêchent d'aller au-delà des obligations réglementaires, obligations dont ils sont déjà tributaires. Cette catégorie contient aussi des collectivités ayant mis en place des mesures ayant eu des effets peu concluants, ainsi, à l'inverse d'un effet d'entraînement, ces résultats relatifs peuvent désinciter les élus à proposer de nouveau ce type de mesures.

Tout l'enjeu pour ces territoires réside dans le fait de débloquer des ressources de manière ponctuelle, établir un diagnostic plus poussé et trouver des partenaires solides pour arriver à mettre en place, a minima, un fonctionnement qui leur permet de remplir leurs obligations réglementaires.

2.3.1.4. Enjeux quant à la conduite de l'enquête et pistes de réflexion

La réalisation de l'enquête a révélé quelques difficultés. Premièrement, le temps disponible des agents enquêtés pour répondre à l'enquête, que ce soit à l'écrit ou à l'oral, était très contraint, nous avons parfois rencontré des difficultés pour recueillir des données auprès de certaines institutions fortement sollicitées par ailleurs.

Pour y faire face et après le retour de certains enquêtés, au niveau de la forme, nous avons créé une « fiche-action » synthétique pour adapter l'outil de l'enquête aux habitudes de travail des agents des collectivités, et nous avons multiplié le nombre d'entretiens.

Enfin, la partie de l'enquête consacrée aux résultats quantitatifs et à l'évaluation des mesures a été peu renseignée par les acteurs locaux. D'après nos échanges, la mise à disposition d'un modèle standardisé au niveau national permettant d'aider les acteurs locaux pour l'évaluation des mesures serait très apprécié. La systématisation de l'évaluation ne pouvant pas être

portée financièrement et techniquement par les collectivités, ce modèle standard clef en main permettrait néanmoins de faciliter le développement d'études d'impacts.

Plus globalement, ce travail s'est limité aux initiatives portées ou soutenues par les acteurs publics, concernant des mesures dans les secteurs d'émissions clefs liés aux transports et mobilités. Nous sommes conscients que d'autres sources d'émissions comme celles du secteur agricole et résidentiel, et dans certaines zones, du secteur industriel, jouent également un rôle déterminant dans la qualité de l'air ambiant et ses conséquences pour la santé, mais ces inventaires devraient faire l'objet de futurs projets.

2.3.1.5. Conclusions, enseignements et recommandations

Plusieurs enseignements généraux peuvent être tirés de l'enquête, enseignements devant toutefois être mis en perspective avec les configurations territoriales (géographiques, économiques et sociales) particulières de chaque territoire :

- une majeure partie des territoires s'engage sur la question de l'évolution des mobilités avec des objectifs d'augmentation de parts modales des « mobilités douces », partagées et de transports en commun plus ou moins ambitieux
- le poids des mesures apparaît plus fort lorsque la qualité de l'air est un enjeu en soi, soutenu par une feuille de route ou un programme, mais nous pouvons également retrouver des impacts potentiels sur la qualité de l'air dans une grande variété de secteurs d'interventions
- les projets d'ampleur sont la plupart du temps portés par des collectivités qui dédient des élus au suivi des projets, candidatent à des appels à projets nationaux pour obtenir des financements, organisent la transversalité dans leurs services et travaillent en concertation avec les acteurs associatifs et les citoyens, et dans certains cas avec le secteur privé
- l'ampleur des moyens humains et financiers est également un levier essentiel pour la réussite des mesures et une maximisation de leurs impacts
- une des grandes difficultés rencontrées est l'absence d'évaluation des impacts sur la santé et environnementaux des projets, mais pour l'évaluation de la qualité de l'air, un partenariat solide avec les AASQA locales est un réel atout
- la réussite des mesures et leur acceptation sociale dépend notamment de l'anticipation des impacts sociaux et économiques de ces mesures
- enfin, la communication relative aux projets a eu plus d'impact si elle était répétée, synthétique et comportait la dimension de santé de manière « positive ».

En matière de communication des résultats de notre enquête, dans une optique de mutualisation des connaissances et de diffusion de ces résultats, une démarche partenariale a été mise en place avec le CEREMA visant à rendre visible les mesures recensées dans notre projet sur la plateforme nationale « Territoire engagé pour mon environnement, ma santé ». Ainsi, les différentes réalisations de ce projet visent à contribuer à l'amélioration de la qualité de l'air et de la santé des populations en donnant des outils et éléments d'analyses au plus grand nombre d'acteurs agissant sur les territoires.

Les résultats de ce travail seront rendus publics dans le cadre de l'appel à projet PRIMEQUAL, et mis en ligne sur le site de Santé publique France. En termes de perspectives, dans la continuité de ce projet il semblerait utile de proposer aux acteurs locaux une méthode commune pour l'évaluation des impacts sur la santé et environnementaux des projets en faveur de la qualité de l'air, et d'assurer le partenariat nécessaire à la mise à jour régulière d'inventaires de mesures en faveur de la qualité de l'air et de la santé en France.

2.3.2. Tâche 2 de l'axe 3

2.3.2.1. Introduction et description générale

Tandis que dans l'axe 2, nous avons évalué les bénéfices des AQA dans le grand Paris comme mesure ponctuelle visant les jours considérés comme épisodes, dans cet axe nous nous intéressons aux mesures durables qui sont actives durant toute l'année incluant plusieurs types de mesures telles que recensées dans la tâche 1 de cet axe. Dans cette tâche, notre objectif était d'évaluer les bénéfices sanitaires et économiques en lien avec la mise en place de la ZFE à Paris afin de mettre en perspective les bénéfices de ce type d'actions avec des actions ponctuelles telles que les AQA étudiées dans l'axe 2.

Les ZFE constituent une stratégie commune pour réduire les émissions liées au trafic et ont été implémentées dans plusieurs villes, notamment en Europe. Il y a plus de 250 ZFE en activité en Europe aujourd'hui dont la plupart ont été établis après 2010 {Bernard, 2020 #1967}. De manière générale, les ZFE sont mises en place autour de périmètres urbains densément peuplés afin de limiter l'entrée des véhicules les plus anciens qui ont des taux d'émission plus élevés. La plupart des ZFE sont désignées pour accroître les restrictions au fur et à mesure des progrès technologiques et la mise en place en parallèle d'actions visant à promouvoir la mobilité active. Une revue de littérature récente a mis en évidence les bénéfices des ZFE sur la réduction des niveaux de pollution en lien avec le trafic tels que le NO₂ ou les particules (Bernard et al. 2020). Cependant, les évaluations en termes de bénéfices sanitaires et économiques sont encore rares dans la littérature. De plus, une littérature croissante en justice environnementale montre comment certaines populations sont systématiquement plus exposées à la pollution en lien avec le trafic et aussi plus vulnérables à ses effets sanitaires {Hajat, 2015 #310; Deguen, 2010 #800}. Cependant cet angle des inégalités territoriales et socio-économiques dans la répartition des bénéfices n'a jusqu'à présent pas été considérée.

En 2015, une ZFE a été introduite pour le territoire du Grand Paris avec une mise en place progressive en 5 étapes qui ultimement visera à restreindre les véhicules émettant des polluants atmosphériques d'ici 2030. Chacune des 5 étapes ciblent certains types de véhicules quant à leur restriction d'entrer dans le périmètre du Grand Paris (voir carte plus bas). Quatre scénarios différents ont été proposés pour guider les décideurs quant à la mise en œuvre de la ZFE. Brièvement, ces 4 scénarios sont définis selon deux périmètres d'action pour la ZFE (à l'intérieur du périphérique parisien et de l'autoroute A86) et deux niveaux de restriction (Crit'Air3 -haut- et Crit'Air4 -bas-). Sur la base de ces scénarios, AirParif a réalisé plusieurs travaux de modélisation visant à quantifier les réductions de NO₂ et PM_{2.5} à l'échelle de L'IRIS². En se basant sur ces modélisations, nous avons mené une évaluation quantitative des risques sanitaires à l'échelle de l'IRIS pour quantifier les bénéfices sanitaires attendus en lien avec la mise en place de la ZFE et ce pour les 4 scénarios décrits plus haut pour les changements à long terme (i.e. annuels) de NO₂ et PM_{2.5}.

2.3.2.2. Evaluation des bénéfices sanitaires de la mise en place de la ZFE

Nous nous sommes focalisés sur les bénéfices en termes de décès prématurés chez les adultes (>30 ans) et la réduction de l'incidence de l'asthme chez les enfants (0-17 ans). Nous avons aussi considéré les vulnérabilités spécifiques en lien avec le statut socio-économique de chaque IRIS et enfin quantifié les bénéfices économiques associés à la réduction du nombre de décès et de nouveaux cas d'asthme attribuables aux bénéfices de la mise en place de la ZFE. Nous avons considéré des relations dose-réponse dans la littérature telles qu'utilisées dans une étude par Host {Host, 2020 #1968} et avons également utilisé les résultats d'une étude par Cesaroni {Cesaroni, 2012 #737} conduite à Rome qui a caractérisé des relations dose-réponse pour 3 sous-groupes socio-économiques. Nous avons utilisé les terciles (n=3) du Fdep (*French deprivation index*) {Pornet, 2012 #1969} à l'échelle de l'IRIS qui est une mesure composite du niveau socio-économique du quartier pour identifier le niveau socio-économique du quartier. Nous avons ensuite mené une évaluation quantitative des risques sanitaires classique pour quantifier ces bénéfices à l'échelle de l'IRIS.

Dans le tableau 4 ci-dessous, nous présentons les résultats détaillés de cette évaluation quantitative des risques sanitaires pour chacun des 4 scénarios ZFE, des 3 niveaux socio-économiques et pour le NO₂ et les PM_{2.5} par année. Nous pouvons observer tel qu'attendu que les bénéfices sanitaires sont d'autant plus grands que les niveaux de restriction sont élevés et que le territoire visé par la ZFE est important. Nous pouvons observer également que les populations vivant dans les quartiers les plus défavorisés tendent à bénéficier davantage de la mise en place de la ZFE (notamment pour l'asthme) et ce d'autant plus lorsque la ZFE vise un périmètre large au-delà du périphérique. Ceci met en évidence les aspects positifs de la ZFE à réduire les inégalités sociales de mortalité en lien avec la pollution atmosphérique en région parisienne.

² Îlots regroupés pour l'information statistique

Table 4 : Nombre de cas annuels de décès et d’asthme (et 95% IC) prévenus pour chacun des 4 scénarios ZFE, des 3 niveaux socio-économiques et pour le NO2 et les PM2.5.

Indicateur de Santé et Polluant	Niveau Socio-économique	Zone			
		Zone Paris Restriction Basse	Zone Paris Restriction Haute	Zone Grand Paris Restriction Basse	Zone Grand Paris Restriction Haute
Mortalité (NO2)	T-Fdep 1 (Haut)	100 (50,149)	183 (92, 271)	162 (82, 241)	288 (146, 427)
	T-Fdep 2	55 (7, 103)	98 (12, 181)	94 (12, 174)	156 (20, 289)
	T-Fdep 3 (Bas)	81 (57, 106)	139 (99, 183)	169 (120, 222)	289 (206, 379)
	Tous groupes	236 (115, 358)	420 (203, 635)	425 (214, 637)	734 (372, 1096)
Mortalité (PM2.5)	T-Fdep 1 (Haut)	10 (5, 14)	16 (8, 24)	13 (7, 20)	31 (16, 46)
	T-Fdep 2	4 (0, 10)	16 (0, 24)	6 (0, 13)	13 (0, 29)
	T-Fdep 3 (Bas)	11 (7, 15)	14 (8, 19)	14 (8, 19)	33 (20, 46)
	Tous groupes	25 (12, 39)	36 (16, 57)	33 (15, 52)	77 (36, 121)
Asthme (NO2)	T-Fdep 1 (Haut)	268 (222, 312)	518 (431, 603)	510 (424, 595)	938 (781, 1092)
	T-Fdep 2	262 (203, 320)	490 (380, 597)	501 (388, 611)	866 (673, 1056)
	T-Fdep 3 (Bas)	362 (317, 410)	646 (567, 732)	797 (699, 902)	1398 (1229, 1581)
	Tous groupes	892 (743, 1043)	1653 (1377, 1932)	1808 (1511, 2109)	3203 (2683, 3728)

Enfin, nous avons également analysé la distribution spatiale des bénéfices en lien avec la mise en place de la ZFE. Nous avons produit des cartes pour chacun des scénarios ZFE, les deux indicateurs de santé et pour le NO2 et les PM2.5. Afin d’illustrer ces résultats, ci-dessous en figure 6 nous présentons la carte des bénéfices sanitaires pour les décès prématurés et les cas d’asthme pour le NO2 et le scénario « Zone Grand Paris Restriction Haute ». Nous pouvons voir que les bénéfices sont, comme attendu, concentrés dans les territoires les plus exposés aux émissions liées trafic et notamment dans les quartiers les plus défavorisés.

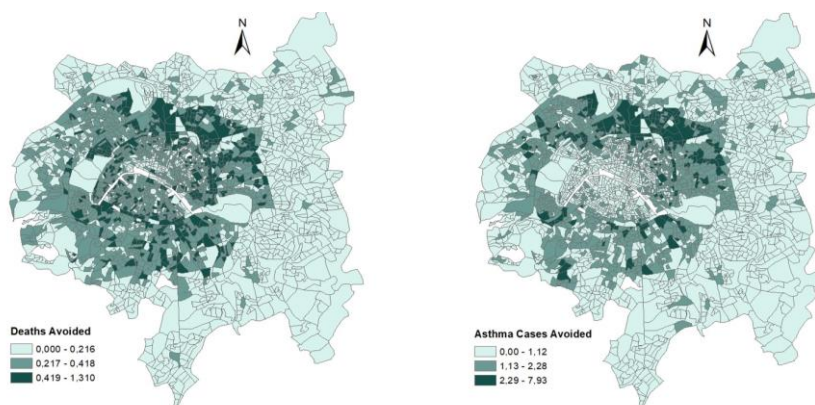


Figure 6 : Distribution spatiale des bénéfices sanitaires (pour décès et asthme) en lien avec une réduction de NO2 attribuable à la mise en place de la ZFE dans le Grand Paris avec des restrictions hautes

2.3.2.3. Évaluation des impacts économiques de la mise en place de la ZFE

Sur la base des travaux réalisés en amont, deux types de valorisation économique ont été menées (cf. les détails dans le rapport spécifique à l'analyse économique, Chanel et al.; 2022). La première, conventionnelle, repose sur les estimations effectuées en amont par les épidémiologistes, et concerne la mortalité, et la morbidité (prévalence de l'asthme chez les enfants de moins de 18 ans). La seconde évaluation, plus exploratoire, se fonde sur les volumes de réduction d'émission estimés par Airparif suite aux restrictions de circulation et calcule le coût externe des émissions évitées pour quatre indicateurs de pollution (PM2.5, PM10, NOx et CO2).

Le choix des valeurs monétaires repose sur un cadre standard et une revue exhaustive de la littérature : pour la mortalité, des valeurs dérivées des préférences déclarées ou révélées ; pour la prévalence de l'asthme, des valeurs reposant sur le coût de la maladie. Nous apportons toutefois deux évolutions que nous justifions scientifiquement.

D'une part, le choix d'une valeur différente pour valoriser les décès évités liés à des mesures pérennes (ZFE) de celle retenue dans l'axe 2 pour des mesures de lutte de la pollution de court terme. En effet la mortalité va concerner une population dont l'espérance de vie avant la maladie liée à l'exposition à la pollution de l'air qui a conduit au décès, est beaucoup plus élevée que celle d'une personne âgée ou fragile décédant pendant un épisode de pollution élevée. Ceci est étayé par trois éléments - les données médicales, épidémiologiques et la pratique empirique passée – qui suggèrent généralement une perte moyenne d'espérance de vie d'environ 10 ans. Nous utiliserons donc la valeur d'évitement d'un décès préconisée dans les recommandations officielles françaises (Quinet, 2013) pour évaluer en termes monétaires les décès évités fondés sur des risques relatifs de mortalité de long terme, soit une valeur centrale de 3.27 millions EUR2017. Cette valeur est compatible avec des valeurs plus récentes estimées en France (environ 2 millions EUR sur une enquête de préférences déclarées en population générale, environ 4.6 millions EUR sur la base de préférences révélées sur le marché du travail auprès d'ouvriers de plus de 30 ans). D'autre part, nous prenons en compte la dimension intangible associée à la prévalence de l'asthme. Nous avons identifié 50 études originales plus 3 revues de la littérature qui fournissent au total les résultats de 95 études entre 1984 et 2021, calculant un coût annuel moyen par patient asthmatique. Après analyse, nous retenons un coût annuel, pour un enfant asthmatique de moins de 18 ans, de 1080 EUR2017 (coût médical direct), auquel s'ajoute 115 EUR2017 (pertes de production associées par l'absentéisme des parents), et une composante intangible, évaluée à 1360 EUR2017.

Dans un premier temps, les résultats de l'axe 3 portent sur les gains sanitaires quantifiés dans Host et al. (2018). Ils concernent le scénario ZFE3 (interdiction de circulation des véhicules classés Crit'air 4 et plus) et ZFE4 (interdiction de circulation des véhicules classés Crit'air 3 et plus), pour deux zones géographiques : Paris (avec boulevard périphérique inclus) et périmètre intra A86 (A86 exclue). Pour Paris, le coût total associé à l'asthme et à l'indicateur NO2 s'élève à 3.98 millions EUR2017 par an [IC95% 0.97, 6.85] (ZFE4), et à 2.12 millions EUR2017 [IC95% 0.51, 3.68] (ZFE3). Pour le périmètre Intra A86, ces valeurs sont respectivement de 7.49 [IC95% 1.87, 12.95] et 4.16 millions EUR2017 [IC95% 1.02, 7.26]. Concernant l'évaluation de la mortalité en termes de décès évités, les valeurs varient selon les critères de restriction et la zone géographique, entre 360 [IC95% 0, 1079] et 1 112 millions EUR2017 [IC95% 0, 3303] par an pour le NO2, et sont comparables pour l'indicateur PM2.5 (respectivement, 392 [IC95%131, 654] et 1210 millions EUR2017 [IC95% 425, 1897]). Enfin, l'évaluation en termes d'années de vie gagnées conduit à des valeurs monétaires environ 9 fois plus élevées que celle en termes de décès évités.

Nous comparons les résultats associés à des restrictions de circulation ponctuelles (axe 2) et permanentes (axe 3) sur une zone géographique comparable (Périmètre Intra A86 hors A86) et sur la mortalité (seul indicateur sanitaire commun). En termes sanitaires, les mesures ponctuelles permettent d'éviter 163 décès [IC95% 7.75, 391] annuellement, alors que les mesures ZFE3 et ZFE4 permettent d'éviter respectivement 200 [IC95% 0, 580] et 340 décès [IC95% 0, 1010] pour le polluant NO2, et 160 [IC95% 60, 250] et 370 décès [IC95% 130, 580] pour le polluant PM2.5. Le gain s'avère donc sensiblement plus élevé pour des restrictions liées à la mise en œuvre de la ZFE-m que pour des restrictions de circulation les jours de forte pollution. Toutefois, le nombre de décès évités ne rend pas compte de la différence de degré de prématurité des décès entre les mesures de court terme (axe 2) et de long terme (axe 3). L'évaluation économique, en recourant à des valeurs unitaires différentes pour la mortalité, le permet. Ainsi, elle s'élève à 14.1 millions EUR2017 [IC95% 0.67, 33.82] pour les restrictions de circulation ponctuelles (axe 2) mais entre 523 [IC95% 196, 818] et 1210 millions EUR2017 [IC95% 425, 1897] pour les scénarios restreignant la circulation des véhicules de façon permanente. Les ordres de grandeur varient alors d'un facteur compris entre 37 et 85, renforçant l'intérêt pour les politiques de restriction permanentes.

Dans un second temps, nous utilisons les données de Host{Host, 2020 #1968}, qui évalue les impacts sanitaires de 3 situations par rapport à une situation de référence (ZFE-m parisienne existant depuis juillet 2017), et pour deux zones géographiques. Le scénario A évalue ainsi le gain lié aux mesures de restriction de circulation en vigueur depuis juillet 2019, le scénario B aux mesures en vigueur depuis le 1er juin 2021, et le scénario C aux mesures prévues pour juillet 2023. Logiquement, les bénéfices sanitaires augmentent avec l'extension des restrictions de circulation aux classes de véhicules Crit'air 4 (scénario B), puis Crit'air 3 (scénario C), et lorsque la zone étudiée s'élargit (de la ZFE-m Intra A86 à l'ensemble de l'Île de France). La mise en œuvre de restrictions en juillet 2021 (scénario B) conduit à éviter 50 décès annuels par rapport à la situation

précédente (scénario A) dans la zone infra A86, et 60 décès annuels sur l'ensemble de l'Île de France. La mise en œuvre de restrictions prévues en juillet 2023 (scénario C) devrait à son tour conduire à éviter 160 décès annuels par rapport à la situation actuelle (scénario B) dans la zone infra A86, et 200 décès annuels sur l'ensemble de l'Île de France. Le coût total associé à l'asthme représentent moins de 1% de l'évaluation en termes de décès évités, soit entre 0.31 et 6.03 millions EUR2017 par an selon le scénario et la zone étudiés. Concernant l'évaluation annuelle de la mortalité en termes de décès évités, les valeurs varient selon les critères de restriction et la zone géographique, entre 33 millions EUR2017 (scénario A et ZFE intra A86) et 916 millions EUR2017 (scénario C et impacts totaux). L'évaluation en termes d'années de vie gagnées conduit à des valeurs monétaires environ 9 fois plus élevées que celle en termes de décès évités

Enfin, l'évaluation exploratoire se fonde sur les volumes de réduction des émissions estimées par Airparif dans le cadre des scénarios évalués dans Host (2020). La borne supérieure de l'évaluation est obtenue en sommant les impacts monétaires des 4 indicateurs de pollution, et comprend sans doute du double comptage. Elle s'élève à environ 36 millions EUR2017 pour le scénario A, environ 124 millions EUR2017 pour le scénario B, et environ 383 millions EUR2017 pour le scénario C. Pour un scénario et une zone géographique données, ces évaluations sont environ deux fois plus faibles que celles fondées sur les impacts en termes de mortalité et de prévalence de l'asthme chez les 0-17 ans, estimés par Host (2020) pour le NO2 (et les PM2.5).

Au final, les mesures prises de façon pérenne (zones à faible émissions) génèrent un bénéfice sanitaire supérieur aux mesures ponctuelles (gestion des pics de pollution), ce qui plaide pour une gestion des émissions automobiles à long terme plutôt qu'à court terme.

3. Bilan, Recommandations et pistes pour futurs travaux

3.1. Bilan des résultats du projet CEPPEM

Dans le cadre du projet CEPPEM, nous avons eu pour objectif de fournir des données probantes afin d'aider à la formulation ou la mise à jour des politiques publiques visant à réduire les émissions et impacts sociétaux en lien avec la pollution atmosphérique. Pour cela, nous avons organisé ce projet selon trois axes ciblant respectivement les particularités épidémiologiques des épisodes de pollution, l'efficacité en termes sanitaires et économiques des mesures d'alerte durant les épisodes de pollution à Paris et enfin l'évaluation de la mise en place de la zone à faibles émissions dans la région Parisienne ainsi qu'un recensement des mesures visant à réduire les émissions de pollution atmosphérique à long terme.

A l'issue de ce projet, nous avons pu mettre en évidence les éléments structurants suivants organisés par axe :

Axe 1 :

- Les données épidémiologiques ne supportent pas l'existence de seuils au-dessus desquels les niveaux de PM10, PM2.5 et NO2 auraient des effets sanitaires plus importants. Au contraire, les risques tendent à disparaître lorsque les concentrations sont très élevées pour ces trois polluants
- Pour l'ozone, cependant, nous avons observé un effet seuil avec une augmentation du risque pour la plupart des indicateurs de santé à l'étude au-delà de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ce qui est en dessous du seuil réglementaire en vigueur pour l'ozone ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Les effets de PM10 et l'ozone sur la mortalité semblent varier selon les saisons et être plus importants lors de vagues de chaleur
- Nous avons montré que lorsqu'une vague de chaleur survient, jusqu'à un quart des décès attribuables à la chaleur sont en fait dues à l'augmentation des concentrations d'ozone induites par cette vague de chaleur. Cela concernait certaines villes comme Nantes, Grenoble ou Rouen tandis que pour certaines villes nous n'avons pas identifié d'effet indirect lié à l'ozone.

Axe 2 :

- La mise en place des mesures d'alertes pollution à Paris en 2008 avec les seuils initiaux de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ n'ont pas montré de bénéfices sur la santé des populations.
- Suite à la mise à jour des mesures d'alertes pollution à Paris en 2012 via un abaissement des seuils d'activation ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), nous avons montré que 163 décès étaient évités par an en moyenne grâce à ces mesures.
- Cela correspond à des bénéfices économiques équivalents à 14.1 millions EUR2017 par an.

Axe 3 :

- La mise en place de la ZFE dans le cadre du scénario le plus restrictif et visant le Grand Paris (intra A-86), et en considérant à la fois les réductions des niveaux de NO2 et de PM2.5, pourrait contribuer à réduire jusqu'à 811 décès et 3203 cas d'asthme par année.
- La mise en place de la ZFE permet de réduire les inégalités sociales de mortalité attribuables à la pollution atmosphérique.
- Les bénéfices économiques se situent entre 523 et 1 210 millions EUR2017 selon les scénarios.
- En comparaison aux mesures ponctuelles mises en place dans la région Parisienne, les mesures restreignant la circulation des véhicules de façon permanente comme dans le cadre la ZFE ont des bénéfices largement supérieurs avec des ordres de grandeur qui varient d'un facteur compris entre 37 et 85.

3.2. Pistes de réflexion et recommandations

A la conclusion de ce projet, nous sommes en mesure de proposer quelques pistes de réflexion qui pourront servir de base à de futures recommandations pour la mise en place de nouvelles mesures ou la mise à jour de politiques publiques visant à réduire les émissions de polluants atmosphériques.

Mesures à court terme ou ponctuelles

- En ce qui concerne les mesures d’alertes en milieu urbain basées sur les niveaux de PM10 (avec un seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ depuis 2012) qui sont d’ores et déjà en place, nos résultats sur la ville de Paris montrent que ces mesures peuvent être efficaces. Cependant, comme démontrée dans l’axe 1-tache 1, abaisser ces seuils progressivement pourrait constituer une piste prometteuse afin d’optimiser les bénéfices en termes de santé publique.
- En ce qui concerne le NO2 et les PM2.5, nos résultats ne mettent pas en évidence de seuils particuliers auxquels des mesures d’alertes spécifiques pourraient être déployées.
- En ce qui concerne l’ozone, nous avons pu mettre en évidence la présence d’un seuil autour de 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour plusieurs indicateurs de santé ce qui indiquerait un abaissement des seuils présentement en vigueur (i.e. 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Il serait peut-être intéressant d’explorer des mesures d’alertes (en combinaison des mesures plus durables étudiées dans l’axe 3) basées sur des indices composites de pollution de l’air (intégrant plusieurs polluants) comme mené au Canada, aux Etats-Unis ou à Hong-Kong par exemple ainsi que considérer plusieurs niveaux d’intervention avec des mesures mises en place progressivement au fur à mesure que les concentrations augmentent.
- Les effets sanitaires à court terme des PM10 et l’ozone semblent varier selon les saisons et les niveaux de température. Il serait intéressant de conduire de futures études pour déterminer dans quelle mesure introduire des seuils variables en fonction des événements météorologiques extrêmes ou des saisons serait faisable et efficace pour minimiser les risques pour la santé des populations.
- Pour certaines villes, nous avons pu mettre en évidence que lorsque des vagues de chaleur surviennent, l’augmentation des concentrations d’ozone générée pourrait contribuer significativement à l’augmentation du risque de mortalité. Cela pourrait mener à l’expérimentation d’actions visant à réduire les émissions de précurseurs d’ozone (notamment en lien avec le trafic) lorsque des vagues de chaleur sont attendues en combinaison des actions mises en place dans le cadre des mesures mise en place lors d’alertes en lien avec la chaleur.

Mesures à long terme ou durables

- Nos résultats, basés sur des outils de modélisation, sur l’évaluation de la ZFE montre les bénéfices substantiels que ce type de mesure durable peut apporter en termes de santé des populations, d’équité et économiques. Il sera important de mener des évaluations empiriques au fur et à mesure que la ZFE s’implémente dans la région parisienne afin de s’assurer que nos projections soient confirmées avec des données observationnelles.
- Nous avons recensé 175 mesures visant à réduire les émissions de polluants atmosphériques de manière durable sur l’ensemble du territoire national. Nous avons mise en place des modalités de distribution des informations que nous avons pu récolter auprès des différents acteurs locaux. Il serait important de faire un suivi de cette enquête afin d’évaluer dans quelle mesure ces informations pourront permettre d’expérimenter de nouvelles mesures.
- De plus, sur la base de données qui a été constituée et qui sera mise à disposition librement, il serait extrêmement intéressant de mener plusieurs travaux d’évaluation d’efficacité de ces mesures quant à la réduction des niveaux de pollution atmosphérique (ou autres enjeux tels que le bruit ou la qualité de vie) et les potentiels bénéfices sanitaires.

3.3. Limites générales et pistes pour futurs travaux

Enfin, il est important de souligner quelques limites quant à ces études ce qui permettra d'identifier autant de pistes pour des travaux futurs. Ces éléments incluent des éléments spécifiques à chacune des études menées dans ce projet mais également des éléments plus généraux pour fournir des éléments scientifiques visant aider à la décision en lien avec les politiques publiques à court terme ou à long terme vis-à-vis de la pollution de l'air.

Premièrement, nous avons intégré plusieurs indicateurs de santé incluant la mortalité et hospitalisations cardio-respiratoires ainsi que l'incidence de l'asthme. Toutefois, les effets sanitaires en lien avec la pollution atmosphérique sont nombreux et plusieurs indicateurs n'ont pas pu être intégrés par manque de données disponibles ou par manque de puissance statistique comme pour la mortalité respiratoire pour la tâche 1 de l'axe 1. Cette non-prise en compte de la diversité des indicateurs de santé qui sont potentiellement affectés par la pollution de l'air implique une sous-estimation du fardeau sanitaire et économique que nous avons pu mettre en évidence dans ce projet. Par exemple, de nombreuses études épidémiologiques montrent le rôle de plusieurs polluants incluant les PM2.5 ou l'ozone dans la survenue de la maladie d'Alzheimer et démences, incluant des travaux récents menés en France {Mortamais, 2021 #1970}. Étant l'augmentation rapide de cette maladie en France (et le reste du monde) dans le contexte d'un vieillissement de la population, il serait particulièrement important de documenter davantage les potentiels bénéfiques de politiques de réduction de pollution de l'air en lien avec cette maladie tel que mené récemment en France {Letellier, 2022 #1971}. D'autres indicateurs vis-à-vis de l'incidence de certains cancers ou la survie post-diagnostic, plusieurs maladies cardio-métaboliques ou encore les issues de grossesse ou les complications maternelles seraient intéressants à étudier.

Deuxièmement, bien que nous ayons pu inclure presque deux décennies de données et sur de nombreuses agglomérations françaises, plusieurs analyses n'ont pas pu être menées. Par exemple, nous n'avons pas pu évaluer l'efficacité des alertes mises en place pour les dépassements de seuils d'ozone car elles ont été mises en place avant le début des observations auxquelles nous avons pu avoir accès dans le cadre de ce projet. Certaines villes n'ont pas pu être incluses dans les analyses de l'axe 1 par manque de données comme pour la ville de Dijon pour la tâche 1 ou la ville du Havre pour la tâche 2. Il est également important de rappeler que dans l'axe 1, nous nous sommes exclusivement focalisées sur les effets à court terme de la pollution atmosphérique via l'utilisation de séries temporelles journalières ville par ville. Pour les effets à long-terme, nous n'avons pas eu accès à des données sanitaires directement et avons dû recourir à des approches indirectes de quantification des impacts via l'utilisation de données épidémiologiques publiées. Bien ce type d'approche permette d'avoir un ordre de grandeur des potentiels impacts/bénéfiques sanitaires en lien avec des changements de concentrations de pollution de l'air, il serait important de mener dans le futur des études mobilisant des données observationnelles via plusieurs cohortes existantes en France.

Troisièmement, dans les axes 2 et 3, nos évaluations se sont concentrées sur la région parisienne mais il est important de rappeler que plusieurs agglomérations françaises ont des AQA ainsi que des ZFE (dont 16 ont été recensées dans l'axe 3) en place. Il serait ainsi particulièrement intéressant de conduire des évaluations similaires à celles menées dans notre projet pour d'autres contextes géographiques.

Enfin, plusieurs aspects épidémiologiques n'ont pas pu être pris en compte dans ce projet et qui pourraient constituer des pistes de travaux pertinents pour de futurs projets. Cela inclut la prise en compte de la susceptibilité de certains sous-groupes de la population et une analyse qui considérerait les variations spatiales au sein des villes en termes d'exposition mais aussi d'impacts en lien avec plusieurs polluants atmosphériques. Nous avons aussi systématiquement considéré les polluants de manière individuelle. Pourtant, une littérature croissante {Peng, 2022 #1972; Sun, 2022 #1973} montre l'existence d'effets synergiques entre plusieurs polluants sur plusieurs indicateurs de santé ainsi qu'avec d'autres déterminants environnementaux ou sociaux de la santé tels que le bruit par exemple.

Ces éléments de réflexion pourront ainsi permettre de formuler de nouvelles pistes de recherche et continuer à informer la manière dont la santé des populations peut être protégée des effets des pollutions atmosphériques.

4. Conclusion

Dans ce rapport, nous avons présenté les résultats finaux du projet CEPEM, coordonné par L'Inserm et en collaboration avec l'Observatoire Régional de Santé en Ile de France, Santé Publique France et le CNRS. Ce projet s'est déroulé sur quatre années et a été articulé autour de 3 axes et plusieurs études incluant des méthodes épidémiologiques, économiques et d'évaluation de politiques publiques afin de fournir des éléments scientifiques permettant d'informer de futures interventions visant à réduire le fardeau sanitaire et économique en lien avec la pollution atmosphérique.

Dans l'axe 1, nous avons d'abord pu mettre en évidence des éléments épidémiologiques portant sur l'identification des relations dose-réponse en lien avec plusieurs polluants montrant l'absence de seuil pour les PM10, PM2.5 et NO2 mais l'existence de seuils pour l'ozone situées en dessous des seuils actuellement en vigueur. Nous avons ensuite analysé les liens entre pollution de l'air à court terme et événements météorologiques extrême. Nous avons montré que d'une part les impacts sanitaires de certains polluants comme les PM10 ou l'ozone variaient en fonction des saisons et augmentaient lors de vagues de chaleur et d'autre part que lorsqu'une vague de chaleur arrive, une proportion qui varie grandement entre les agglomérations françaises de l'effet sanitaire est en réalité due aux mécanismes indirects impliquant une augmentation des niveaux d'ozone.

Dans l'axe 2, nous avons étudié l'efficacité des mesures à court-terme basées sur les Alertes Qualité de l'air (AQA) dans la région parisienne mises en place en 2008. Nous avons pu montrer que suite aux mises à jour des AQA sur le Grand Paris en 2012, près de 163 décès étaient évités par an, qui auraient dû avoir en lieu si ces actions n'avaient pas eu lieu. Ces bénéfices sanitaires ont été associés à des bénéfices économiques équivalent à 14.1 millions EUR2017 par an.

Enfin dans l'axe 3, nous nous sommes intéressés aux mesures à long-terme visant à réduire les émissions de pollution de l'air de façon durable. Nous avons pris comme cas d'étude la zone à faibles émissions (ZFE) en région parisienne et montré que sa mise en place pourrait contribuer à réduire jusqu'à 811 décès et 3203 cas d'asthme par année ce qui en termes de bénéfices économiques correspondrait à des estimations entre 523 et 1 210 millions EUR2017 selon les scénarios envisagés. Nous avons aussi montré l'aspect équitable de ce type de mesure qui permettrait de réduire les inégalités sociales de santé en lien avec la pollution atmosphérique. Nous avons également pu mener un recensement dans lequel nous avons identifié 175 mesures sur l'ensemble du territoire français et avons pu mettre en évidence les particularités, leviers de réussite et difficultés relatives aux mesures mises en place dans les politiques publiques de transports et de mobilités qui visent directement ou indirectement à réduire les émissions de polluants atmosphériques.

A l'issue du projet CEPEM, tous nos résultats mis ensemble ont permis de fournir des éléments d'information permettant à la fois d'identifier les pistes de recherche futures, d'aider à la décision et enfin informer sur des pistes d'expérimentations futures pour continuer à mieux protéger les populations vis-à-vis des risques en lien avec la pollution atmosphérique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abadie, A., & Cattaneo, M. D. (2018). Econometric methods for program evaluation. *Annual Review of Economics*, 10(1).
- Alari, A., Schwarz, L., Zabrocki, L., Le Nir, G., Chaix, B., & Benmarhnia, T. (2021). The effects of an air quality alert program on premature mortality: A difference-in-differences evaluation in the region of Paris. *Environment international*, 156, 106583.
- Beelen, R., Hoek, G., Vienneau, D., Eeftens, M., Dimakopoulou, K., Pedeli, X., . . . Marcon, A. (2013). Development of NO₂ and NO_x land use regression models for estimating air pollution exposure in 36 study areas in Europe—the ESCAPE project. *Atmospheric Environment*, 72, 10-23.
- Bernard, Y., Miller, J., Wappelhorst, S., & Braun, C. (2020). Impacts of the Paris low-emission zone and implications for other cities. *True Real Urban Emiss. Initiat*, 3-17.
- Cesaroni, G., Boogaard, H., Jonkers, S., Porta, D., Badaloni, C., Cattani, G., . . . Hoek, G. (2012). Health benefits of traffic-related air pollution reduction in different socioeconomic groups: the effect of low-emission zoning in Rome. *Occupational and environmental medicine*, 69(2), 133-139.
- Chanel O., Benmarhnia T., Host S. (2022) Évaluation économique des impacts sanitaires des mesures limitant la circulation dans la métropole du Grand Paris, Rapport économique du projet CEPPEM, août, 47 p.
- Chen, H., Li, Q., Kaufman, J. S., Wang, J., Copes, R., Su, Y., & Benmarhnia, T. (2018). Effect of air quality alerts on human health: a regression discontinuity analysis in Toronto, Canada. *The Lancet Planetary Health*, 2(1), e19-e26.
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., . . . Dandona, R. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The lancet*, 389(10082), 1907-1918.
- Deguen, S., & Zmirou-Navier, D. (2010). Social inequalities resulting from health risks related to ambient air quality—a European review. *The European Journal of Public Health*, ckp220.
- Desaigues, B., Ami, D., Bartczak, A., Braun-Kohlová, M., Chilton, S., Czajkowski, M., . . . Jeanrenaud, C. (2011). Economic valuation of air pollution mortality: A 9-country contingent valuation survey of value of a life year (VOLY). *Ecological indicators*, 11(3), 902-910.
- Ebi, K. L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., de Dear, R., Havenith, G., . . . Malik, A. (2021). Hot weather and heat extremes: health risks. *The lancet*, 398(10301), 698-708.
- Hajat, A., Hsia, C., & O'Neill, M. S. (2015). Socioeconomic Disparities and Air Pollution Exposure: a Global Review. *Current environmental health reports*, 2(4), 440-450.
- Holman, C., Harrison, R., & Querol, X. (2015). Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities. *Atmospheric Environment*, 111, 161-169.
- Host S., Saunal A., Honoré C., Joly F., Le Tertre A., Medina S. (2018). Bénéfices sanitaires attendus d'une zone à faibles émissions : évaluation quantitative d'impact sanitaire prospective pour l'agglomération parisienne. Paris : Observatoire régional de santé Île-de-France. 106 p. www.ors-idf.org/nos-travaux/publications/benefices-sanitaires-attendus-dune-zone-a-faible-emissions.html
- Host S. (2020). Bénéfices sanitaires attendus d'une zone à faibles émissions métropolitaine. Paris : ORS IdF-, 16 p. <https://www.ors-idf.org/nos-travaux/publications/benefices-sanitaires-attendus-dune-zone-a-faibles-emissions-metropolitaine/>
- Host, S., Honoré, C., Joly, F., Saunal, A., Le Tertre, A., & Medina, S. (2020). Implementation of various hypothetical low emission zone scenarios in Greater Paris: Assessment of fine-scale reduction in exposure and expected health benefits. *Environmental research*, 185, 109405.
- Letellier, N., Gutierrez, L. A., Duchesne, J., Chen, C., Ilango, S., Helmer, C., . . . Benmarhnia, T. (2022). Air quality improvement and incident dementia: Effects of observed and hypothetical reductions in air pollutant using parametric g-computation. *Alzheimer's & Dementia*.
- Mortamais, M., Gutierrez, L.-A., de Hoogh, K., Chen, J., Vienneau, D., Carrière, I., . . . Mura, T. (2021). Long-term exposure to ambient air pollution and risk of dementia: Results of the prospective Three-City Study. *Environment international*, 148, 106376.
- Pascal, M., de Crouy Chanel, P., Wagner, V., Corso, M., Tillier, C., Bentayeb, M., . . . Host, S. (2016). The mortality impacts of fine particles in France. *Science of The Total Environment*.
- Pascal, M., Wagner, V., Alari, A., Corso, M., & Le Tertre, A. (2021). Extreme heat and acute air pollution episodes: A need for joint public health warnings? *Atmospheric Environment*, 249, 118249.
- Peng, R. D., Liu, J. C., McCormack, M. C., Mickley, L. J., & Bell, M. L. (2022). Estimating the health effects of environmental mixtures using principal stratification. *Statistics in medicine*, 41(10), 1815-1828.
- Pornet, C., Delpierre, C., Dejardin, O., Grosclaude, P., Launay, L., Guittet, L., . . . Launoy, G. (2012). Construction of an adaptable European transnational ecological deprivation index: the French version. *J Epidemiol Community Health*, 66(11), 982-989.

- Quinet E. (2013). L'évaluation socioéconomique des investissements publics Rapport de la mission présidée par Emile Quinet, Commissariat général à la stratégie et à la prospective, septembre, 351p.
- Reid, C. E., Snowden, J. M., Kontgis, C., & Tager, I. B. (2012). The role of ambient ozone in epidemiologic studies of heat-related mortality. *Environ Health Perspect*, 120(12), 1627.
- Samet, J. M. (2018). Do air quality alerts benefit public health? New evidence from Canada. *The Lancet Planetary Health*, 2(1), e6-e7.
- Sun, Y., Li, X., Benmarhnia, T., Chen, J.-C., Avila, C., Sacks, D. A., . . . Getahun, D. (2022). Exposure to air pollutant mixture and gestational diabetes mellitus in Southern California: results from electronic health record data of a large pregnancy cohort. *Environment international*, 158, 106888.
- VanderWeele, T. J. (2016). Mediation analysis: a practitioner's guide. *Annual review of public health*, 37, 17-32.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Bilan des valorisations scientifiques en lien avec le projet CEPEM	5
Tableau 2 : Proportion médiée de l’ozone dans la relation chaleur-mortalité par ville	19
Tableau 3 : Typologie de l’implication des collectivités dans les politiques d’amélioration de la qualité de l’air en France métropolitaine	25
Tableau 4 : Nombre de cas annuels de décès et d’asthme (et 95% IC) prévenus pour chacun des 4 scénarios ZFE, des 3 niveaux socio-économiques et pour le NO2 et les PM2.5.....	29

FIGURES

Figure 1 – Distribution géographique des 18 villes du Programme de surveillance air et santé de Santé publique France.....	14
Figure 2 - Relations entre le risque de mortalité non-accidentelle et les niveaux journaliers de PM10 pour le modèle quatre (fonctions cubiques splines) pour l’ensemble des villes du Psas (2000-2017).....	15
Figure 3 - Relations entre le risque de mortalité non-accidentelle et les niveaux journaliers d’Ozone pour le modèle quatre (fonctions cubiques splines) pour l’ensemble des villes du Psas (2000-2017).....	15
Figure 4 : Effets totaux des vagues de chaleur sur la mortalité toutes causes par ville.....	18
Figure 5 : Descriptif des actions mises en place lors des alertes de qualité de l’air basées sur les seuils de PM10 à Paris.....	20
Figure 6 : Distribution spatiale des bénéfices sanitaires (pour décès et asthme) en lien avec une réduction de NO2 attribuable à la mise en place de la ZFE dans le Grand Paris avec des restrictions hautes.....	29

SIGLES ET ACRONYMES

AASQA	Associations Agréées Surveillance Qualité de l'Air
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AQA	Alertes de Qualité de l'Air
CEREMA	Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
EPCI	Etablissements Publics de Coopération Intercommunale
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PSAS	Programme « Air et santé » de Santé Publique France
RATP	Régie autonome des transports parisiens
VED	Valeur d'Évitement d'un Décès
ZFE	Zone à Faibles Émissions

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



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.



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 son regard.



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.