

**SANTÉ  
ENVIRONNEMENT**

**DÉCEMBRE 2024**

MÉTHODE

**AGIR SUR LES ESPACES VERTS,  
LES MOBILITÉS ACTIVES,  
LA CHALEUR, LA POLLUTION DE L'AIR ET  
LE BRUIT: QUELS BÉNÉFICES  
POUR LA SANTÉ ?**

Évaluation quantitative des impacts sur la santé pilote  
sur trois métropoles. Rapport méthodologique

## Résumé

### **Agir sur les espaces verts, les mobilités actives, la chaleur, la pollution de l'air et le bruit : quels bénéfices pour la santé ? - Évaluation quantitative des impacts sur la santé pilote sur trois métropoles. Rapport méthodologique.**

L'Évaluation quantitative des impacts sur la santé (ÉQIS) est une méthode formalisée visant à illustrer l'influence sur la santé d'un déterminant de santé donné, en s'appuyant sur l'état de l'art des connaissances scientifiques et sur des données et des scénarios d'évolution locaux. Elle a été largement appliquée à la pollution de l'air et a été plus récemment étendue à d'autres déterminants environnementaux comme le bruit.

Cette étude pilote propose des méthodes reproductibles pour réaliser des ÉQIS de la présence d'espaces verts, de l'activité physique induite par les mobilités actives, de la chaleur, de la pollution de l'air ambiant et du bruit. Elle compare la situation actuelle pour ces déterminants à des situations théoriques scénarisées d'évolution de ces déterminants. L'objectif principal était de tester la pertinence et la faisabilité de telles ÉQIS. Une attention particulière a été apportée à la cohérence des approches utilisées pour chaque déterminant, afin d'obtenir des estimations cohérentes des bénéfices attendus sous différents scénarios d'évolution de ces déterminants.

La méthode a été testée avec la Métropole Européenne de Lille, Montpellier Méditerranée Métropole, et la Métropole Rouen Normandie, en s'appuyant sur les données existantes pour ces territoires. Des échanges réguliers avec les métropoles ont permis d'affiner le protocole, d'identifier les données disponibles et les informations contextuelles utiles, et de préciser les scénarios. Cette dynamique de co-construction visait à répondre au mieux aux attentes des métropoles, tout en respectant les contraintes méthodologiques de l'ÉQIS.

Pour tous les déterminants, les ÉQIS sont pertinentes et faisables, mais avec des points d'attention concernant principalement la construction des scénarios et le choix des relations expositions-risques. Ces points sont particulièrement sensibles pour les ÉQIS espaces verts et mobilités actives, où des hypothèses importantes interviennent pour transcrire les scénarios en équations. Pour la pollution de l'air et le bruit, le choix des relations expositions-risques demeure la principale source d'incertitude. Pour la chaleur, l'échelle d'analyse est le facteur le plus limitant pour développer des scénarios. Par ailleurs, il n'a pas été possible de tester des scénarios d'intervention influençant simultanément plusieurs déterminants car les données environnementales nécessaires n'étaient pas disponibles.

Les résultats soulignent que des interventions visant à augmenter le nombre d'espaces verts urbains, promouvoir les mobilités actives, améliorer la qualité de l'air, et réduire le bruit et la chaleur en ville se traduiraient par des bénéfices importants pour la santé, en termes de mortalité, de morbidité, de recours aux soins et de gêne. Ces bénéfices seraient plus marqués pour les populations les plus défavorisées.

L'ÉQIS apparaît comme un outil pertinent pour mieux prendre en compte les conséquences sur la santé de déterminants environnementaux urbains. Pour faire progresser les futures ÉQIS, la recherche devrait se concentrer sur la construction de relations expositions-risques adaptées au contexte français. Ces relations devraient utiliser des métriques environnementales facilitant la construction de scénarios utiles pour l'action locale. Il faut par ailleurs promouvoir la production de données environnementales croisées de manière plus systématique, par exemple en modélisant les impacts d'une politique de mobilité en termes de part modale mais également de bruit, de pollution de l'air, d'îlot de chaleur urbain et d'opportunité de végétalisation. De telles données faciliteraient la réalisation d'ÉQIS et une approche systémique de la santé urbaine.

**MOTS-CLÉS :** POLLUTION DE L'AIR, BRUIT, CHALEUR, MOBILITÉS ACTIVES, ESPACES VERTS URBAINS, ÉVALUATION QUANTITATIVE DES IMPACTS SUR LA SANTÉ

## Abstract

### Health benefits of action on green spaces, active mobilities, heat, air pollution and noise - Quantitative health impact assessment, pilot study in three metropolises

Quantitative Health Impact Assessment (QHIA) is a formalised method designed to illustrate the influence on health of a given health determinant, based on the state of the art of scientific knowledge, and on local data and scenarios of change. It has been widely applied to air pollution, and has more recently been extended to other environmental determinants such as noise.

This pilot study proposes reproducible methods for assessing the impact on health of green spaces, physical activity induced by active mobility, heat, ambient air pollution and noise. It compares the current situation for these determinants with theoretical scenarios of changes in these determinants. The main objective was to test the relevance and feasibility of such QHIAs. Particular attention was paid to the consistency of the approaches used for each determinant, in order to obtain coherent estimates of the benefits expected under different scenarios for these determinants.

The method was tested with the Métropole Européenne de Lille, Montpellier Méditerranée Métropole and the Rouen Normandie Metropole, using existing data for these areas. Regular exchanges with the metropolitan areas have enabled to improve the protocol, to identify available data and useful contextual information, and to select meaningful scenarios. The aim of this co-construction process was to respond to the expectations of the stakeholders, while respecting the methodological constraints of the HIA.

For all the determinants, QHIAs are relevant and feasible, but with points of attention mainly concerning the construction of the scenarios and the choice of exposure-risk relationships. These points are particularly sensitive for the green spaces and active mobility, where major assumptions are involved in transcribing the scenarios into equations. For air pollution and noise, the choice of exposure-risk relationships remains the main source of uncertainty. For heat, the scale of analysis is the most limiting factor in developing scenarios. In addition, it was not possible to test intervention scenarios simultaneously impacting several determinants, as the necessary environmental data were not available.

The results show that interventions aimed at increasing the number of urban green spaces, promoting active mobility, improving air quality, and reducing noise and heat in the city would result in significant health benefits in terms of mortality, morbidity, healthcare use and discomfort. These benefits would be more marked for the most disadvantaged populations.

QHIA appears to be a relevant tool for taking better account of the health consequences of urban environmental determinants. To take future QHIAs forward, research should focus on the construction of exposure-risk relationships adapted to the French context. These relationships should use environmental metrics that facilitate the construction of scenarios useful for local action. The production of cross-referenced environmental data should also be promoted on a more systematic basis, for example by modelling the impacts of a mobility policy in terms of modal share, but also noise, air pollution, urban heat islands and opportunities for greening. Such data would make it easier to carry out QHIAs and take a systemic approach to urban health.

**KEYWORDS :** AIR POLLUTION, NOISE, HEAT, ACTIVE MOBILITY, URBAN GREEN SPACES, QUANTITATIVE HEALTH IMPACTS ASSESSMENT

**Citation suggérée :** Pascal M, Lagarrigue R, Corso M, Stempfelet M, Medina S, Wagner V, *et al.* Agir sur les espaces verts, les mobilités actives, la chaleur, la pollution de l'air et le bruit : quels bénéfices pour la santé ? - Évaluation quantitative des impacts sur la santé pilote sur trois métropoles – Rapport méthodologique. Saint-Maurice : Santé publique France, 2024. 128 p. Disponible à partir de l'URL : [www.santepubliquefrance.fr](http://www.santepubliquefrance.fr)

ISSN : 2647-4816 - ISBN-NET : 979-10-289-0924-6 - RÉALISÉ PAR LA DIRECTION DE LA COMMUNICATION, SANTÉ PUBLIQUE FRANCE - DÉPÔT LÉGAL : DÉCEMBRE 2024

## Ont participé à cette étude

### Santé publique France

Mathilde Pascal, Robin Lagarrigue, Magali Corso, Morgane Stempfelet, Sylvia Medina, Véréne Wagner, Perrine De Crouy Chanel, Myriam Blanchard, Amandine Cochet, Valérie Ponties, Béranger Thomas, Maxime Grosbois, Séverine Deguen

### Montpellier Méditerranée Métropole

Yann Le Martret, Romain Périer

### Atmo Occitanie

Sylvain Nicolau

### Ville de Lille

Gaetan Cheppe, Olivier Savy

### Métropole européenne de Lille

Renaud Duval

### Atmo Hauts de France

Jessica Taillefer

### Métropole Rouen Normandie

Léo Kazmierczak, Patrick Michel

### Atmo Normandie

Jérôme Cortinovis

## Ont participé à la rédaction de ce rapport

Mathilde Pascal, Robin Lagarrigue, Magali Corso, Morgane Stempfelet, Sylvia Medina, Véréne Wagner, Perrine De Crouy Chanel, Myriam Blanchard, Amandine Cochet, Valérie Ponties

## Relecture scientifique

Kevin Jean, Jean Gaudart, Pascal Jehannin

## Remerciements

### Inserm

Ian Hough, Johanna Lepeule

### Montpellier Méditerranée Métropole

Julie Guiroy, Emilie Salles, Natalia de Olivera, Gilles Gustave, Nicolas Charbonnier, Erwann Gouezec, Amélie Labbe, Stéphanie Grosset

### Métropole Rouen Normandie

Julien Daniel, Camille Eeckeman, Brice Dewarlez

### Métropole européenne de Lille

Audrey Linkenheld, Roxane Billion Prunier, Audrey Perotti, Céline Depiere, Karine Szymanski Pannetier, Grégory Herman

### Agence de Développement et d'Urbanisme de Lille Métropole

Laakri Bouhadj, Guy Chautard

## Abréviations

|                          |                                                                                               |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>3M</b>                | Montpellier Méditerranée Métropole                                                            |
| <b>Aasqa</b>             | Association agréée de surveillance de la qualité de l'air                                     |
| <b>Ademe</b>             | Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie                                      |
| <b>CépiDc</b>            | Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès                                      |
| <b>Cerema</b>            | Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement |
| <b>CIM-10</b>            | Classification internationale des maladies, 10 <sup>e</sup> révision                          |
| <b>EDI</b>               | <i>European deprivation index</i>                                                             |
| <b>EMAPEC</b>            | <i>Estimation of Morbidity from Air Pollution and its Economic Costs</i>                      |
| <b>EMD</b>               | Enquête ménage déplacement                                                                    |
| <b>EPCI</b>              | Établissement public de coopération intercommunal                                             |
| <b>ÉQIS</b>              | Évaluation quantitative des impacts sur la santé                                              |
| <b>FA</b>                | Fraction attribuable                                                                          |
| <b>FDep</b>              | <i>French social deprivation index</i>                                                        |
| <b>ICU</b>               | Îlot de chaleur urbain                                                                        |
| <b>IGN</b>               | Institut national de l'information géographique et forestière                                 |
| <b>Insee</b>             | Institut national de la statistique et des études économiques                                 |
| <b>Ineris</b>            | Institut national de l'environnement industriel et des risques                                |
| <b>Iris</b>              | Îlots regroupés pour l'information statistique                                                |
| <b>L<sub>den</sub></b>   | <i>Level day-evening-night</i>                                                                |
| <b>L<sub>night</sub></b> | <i>Level night</i>                                                                            |
| <b>MEL</b>               | Métropole Européenne de Lille                                                                 |
| <b>MET</b>               | <i>Metabolic equivalent of task</i>                                                           |
| <b>MRN</b>               | Métropole Rouen Normandie                                                                     |
| <b>NDVI</b>              | <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>                                                 |
| <b>NO<sub>2</sub></b>    | Dioxyde d'azote                                                                               |
| <b>O<sub>3</sub></b>     | Ozone                                                                                         |
| <b>OMS</b>               | Organisation mondiale de la santé                                                             |
| <b>Oscour®</b>           | Organisation de la surveillance coordonnée des urgences                                       |
| <b>PCAET</b>             | Plan climat air énergie territorial                                                           |
| <b>PDM</b>               | Plan de mobilité                                                                              |
| <b>PM<sub>2,5</sub></b>  | Particules fines de diamètres inférieures à 2,5 µm                                            |
| <b>PM<sub>10</sub></b>   | Particules fines de diamètres inférieures à 10 µm                                             |
| <b>PMSI</b>              | Programme de médicalisation des systèmes d'information                                        |
| <b>RER</b>               | Relation exposition risque                                                                    |
| <b>RR</b>                | Risque relatif                                                                                |
| <b>SDIT</b>              | Schéma directeur des infrastructures de transport                                             |
| <b>SIG</b>               | Système d'information géographique                                                            |
| <b>SNDS</b>              | Système national des données de santé                                                         |
| <b>SurSaUD®</b>          | Système de surveillance sanitaire des urgences et des décès                                   |
| <b>VAE</b>               | Vélo à assistance électrique                                                                  |

# Table des matières

|                                                                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Résumé.....                                                                                                                    | 2         |
| Abstract.....                                                                                                                  | 3         |
| Ont participé à cette étude/rédaction du rapport/relecture scientifique.....                                                   | 4         |
| Remerciements.....                                                                                                             | 4         |
| Abréviations.....                                                                                                              | 5         |
| <b>1. INTRODUCTION .....</b>                                                                                                   | <b>9</b>  |
| <b>2. ÉLÉMENTS COMMUNS À TOUS LES DÉTERMINANTS ÉTUDIÉS .....</b>                                                               | <b>10</b> |
| 2.1 Type d'ÉQIS .....                                                                                                          | 10        |
| 2.2 Zones et période d'étude .....                                                                                             | 10        |
| 2.2.1 Choix des zones pilotes.....                                                                                             | 10        |
| 2.2.2 Contours géographiques et classification urbain/rural .....                                                              | 11        |
| 2.2.3 Période d'étude.....                                                                                                     | 12        |
| 2.3 Données démographiques et données de santé.....                                                                            | 13        |
| 2.3.1 Données de population.....                                                                                               | 13        |
| 2.3.2 Données de défaveur sociale .....                                                                                        | 13        |
| 2.3.3 Données de santé.....                                                                                                    | 13        |
| 2.3.4 Calcul des taux de mortalité et de morbidité .....                                                                       | 14        |
| 2.4 Principe général de l'estimation d'exposition aux déterminants pris en compte dans les ÉQIS.....                           | 14        |
| 2.5 Principe général du choix des couples exposition-effets et des relations exposition-risque.....                            | 15        |
| 2.6 Prise en compte des interdépendances entre les déterminants .....                                                          | 16        |
| 2.7 Prise en compte des inégalités environnementales et inégalités sociales et territoriales de santé.....                     | 17        |
| 2.8 Scénarios.....                                                                                                             | 19        |
| 2.9 Équation.....                                                                                                              | 19        |
| 2.10 Expression des résultats .....                                                                                            | 19        |
| 2.11 Incertitudes .....                                                                                                        | 19        |
| 2.11.1. Concernant les données de populations .....                                                                            | 20        |
| 2.11.2. Concernant les données de mortalité.....                                                                               | 20        |
| 2.12 Implication des parties prenantes des zones d'études.....                                                                 | 21        |
| <b>3. ESPACES VERTS URBAINS .....</b>                                                                                          | <b>22</b> |
| 3.1 Principaux bénéfices sur la santé des espaces verts urbains.....                                                           | 22        |
| 3.2 Méthode .....                                                                                                              | 23        |
| 3.2.1 Couples et relations exposition-risque.....                                                                              | 23        |
| 3.2.2 Données d'exposition .....                                                                                               | 24        |
| 3.2.3 Équation.....                                                                                                            | 25        |
| 3.2.4 Scénarios.....                                                                                                           | 25        |
| 3.2.5 Analyses de sensibilité .....                                                                                            | 29        |
| 3.3 Résultats .....                                                                                                            | 29        |
| 3.3.1 Analyses descriptives .....                                                                                              | 29        |
| 3.3.2 Bénéfices pour la santé d'atteindre une valeur de NDVI observée dans la zone .....                                       | 32        |
| 3.3.3 Bénéfices si tous les Iris atteignaient une valeur cible de NDVI associée au respect de la recommandation de l'OMS ..... | 33        |
| 3.3.4 Bénéfices si tous les Iris atteignaient une valeur cible de NDVI associée à 30 % de surface végétalisée.....             | 33        |
| 3.3.5 Bénéfices liés à des espaces verts urbains spécifiques .....                                                             | 33        |
| 3.3.6 Analyses de sensibilité .....                                                                                            | 34        |
| 3.4 Discussion .....                                                                                                           | 35        |
| 3.4.1 Des bénéfices potentiellement importants.....                                                                            | 35        |
| 3.4.2 Des incertitudes multiples.....                                                                                          | 36        |
| 3.4.3 Caractéristiques des espaces verts urbains favorables à la santé .....                                                   | 37        |
| 3.4.4 Liens avec les inégalités sociales de santé.....                                                                         | 38        |
| 3.4.5 Liens avec les autres déterminants.....                                                                                  | 38        |
| 3.4.6. Analyse de la faisabilité et de la pertinence d'ÉQIS sur les espaces verts.....                                         | 39        |

|                                                                                                                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4. MOBILITÉS ACTIVES.....</b>                                                                                                                                                       | <b>40</b> |
| 4.1 Principaux bénéfices sur la santé des mobilités actives .....                                                                                                                      | 40        |
| 4.2 Méthode .....                                                                                                                                                                      | 40        |
| 4.2.1 Couples et relations exposition-risque.....                                                                                                                                      | 40        |
| 4.2.2 Données d'exposition .....                                                                                                                                                       | 42        |
| 4.2.3 Équation.....                                                                                                                                                                    | 43        |
| 4.2.4 Scénarios .....                                                                                                                                                                  | 43        |
| 4.2.5 Analyses de sensibilité .....                                                                                                                                                    | 44        |
| 4.3 Résultats .....                                                                                                                                                                    | 45        |
| 4.3.1 Répartition des modes de déplacement par distance et par bassin .....                                                                                                            | 45        |
| 4.3.2 Impact sur la mortalité d'une augmentation de la durée des mobilités actives .....                                                                                               | 46        |
| 4.3.3 Impact sur la mortalité d'une modification des parts modales de la marche.....                                                                                                   | 47        |
| 4.3.4 Impact sur la mortalité d'une modification des parts modales du vélo .....                                                                                                       | 48        |
| 4.3.5 Bénéfices liés aux scénarios locaux .....                                                                                                                                        | 49        |
| 4.3.6 Analyses de sensibilité .....                                                                                                                                                    | 51        |
| 4.4 Discussion .....                                                                                                                                                                   | 52        |
| 4.4.1 Des bénéfices potentiellement importants.....                                                                                                                                    | 52        |
| 4.4.2 Des incertitudes multiples.....                                                                                                                                                  | 53        |
| 4.4.3 Accidentologie et exposition à la pollution de l'air .....                                                                                                                       | 54        |
| 4.4.4 Environnements favorables aux mobilités actives.....                                                                                                                             | 55        |
| 4.4.5 Liens avec les inégalités sociales de santé .....                                                                                                                                | 55        |
| 4.4.6 Analyse de la faisabilité et de la pertinence de l'ÉQIS .....                                                                                                                    | 56        |
| <b>5. CHALEUR .....</b>                                                                                                                                                                | <b>58</b> |
| 5.1 Principaux effets sur la santé de la chaleur .....                                                                                                                                 | 58        |
| 5.2 Méthode .....                                                                                                                                                                      | 58        |
| 5.2.1 Couples et relations exposition-risque.....                                                                                                                                      | 58        |
| 5.2.2 Données d'exposition .....                                                                                                                                                       | 59        |
| 5.2.3 Équation.....                                                                                                                                                                    | 60        |
| 5.2.4 Scénarios .....                                                                                                                                                                  | 60        |
| 5.2.5 Analyses de sensibilité .....                                                                                                                                                    | 61        |
| 5.3 Résultats .....                                                                                                                                                                    | 61        |
| 5.3.1 Données d'exposition .....                                                                                                                                                       | 61        |
| 5.3.2 Nombre de décès attribuables aux jours chauds et très chauds .....                                                                                                               | 62        |
| 5.3.3 Analyses de sensibilité .....                                                                                                                                                    | 63        |
| 5.4 Discussion .....                                                                                                                                                                   | 63        |
| 5.4.1 Des effets de la chaleur observés à partir de températures modérées .....                                                                                                        | 63        |
| 5.4.2 Des incertitudes multiples.....                                                                                                                                                  | 63        |
| 5.4.3 Lien avec les autres déterminants.....                                                                                                                                           | 64        |
| 5.4.4 Inégalités sociales .....                                                                                                                                                        | 64        |
| 5.4.5 Analyse de la faisabilité et de la pertinence .....                                                                                                                              | 65        |
| <b>6. POLLUTION DE L'AIR.....</b>                                                                                                                                                      | <b>66</b> |
| 6.1 Principaux effets sur la santé de la pollution de l'air ambiant .....                                                                                                              | 66        |
| 6.2 Méthode .....                                                                                                                                                                      | 66        |
| 6.2.1 Couples et relations exposition-risque.....                                                                                                                                      | 66        |
| 6.2.2 Données de santé.....                                                                                                                                                            | 68        |
| 6.2.3 Données d'exposition .....                                                                                                                                                       | 69        |
| 6.2.4 Équation.....                                                                                                                                                                    | 70        |
| 6.2.5 Scénarios .....                                                                                                                                                                  | 70        |
| 6.2.6 Évaluation des incertitudes.....                                                                                                                                                 | 71        |
| 6.3 Résultats .....                                                                                                                                                                    | 72        |
| 6.3.1 Données d'exposition .....                                                                                                                                                       | 72        |
| 6.3.2 Données de santé.....                                                                                                                                                            | 75        |
| 6.3.3 Effets à court terme de la pollution de l'air sur la santé.....                                                                                                                  | 76        |
| 6.3.4 Effets à long terme de la pollution de l'air sur la santé : bénéfices du respect des valeurs guides par l'OMS .....                                                              | 77        |
| 6.3.5 Effets à long terme de la pollution de l'air sur la santé : bénéfices du respect des concentrations observées dans les 10 % des communes les moins polluées de chaque zone ..... | 77        |
| 6.3.6 Analyses de sensibilité .....                                                                                                                                                    | 78        |

|                                                                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4 Discussion .....                                                                                                                  | 80         |
| 6.4.1 Des bénéfices potentiellement importants sur la mortalité et la morbidité .....                                                 | 80         |
| 6.4.2 Incertitudes .....                                                                                                              | 80         |
| 6.4.3 Liens avec les autres déterminants .....                                                                                        | 80         |
| 6.4.4 Liens avec les inégalités sociales de santé .....                                                                               | 81         |
| 6.4.5 Analyse de la faisabilité et de la pertinence .....                                                                             | 82         |
| <b>7. BRUIT DES TRANSPORTS .....</b>                                                                                                  | <b>83</b>  |
| 7.1 Principaux effets du bruit des transports sur la santé .....                                                                      | 83         |
| 7.2 Méthode .....                                                                                                                     | 84         |
| 7.2.1 Couples et relations exposition-risque .....                                                                                    | 84         |
| 7.2.2 Données de santé .....                                                                                                          | 84         |
| 7.2.3 Données d'exposition .....                                                                                                      | 85         |
| 7.2.4 Équations .....                                                                                                                 | 85         |
| 7.2.5 Scénario .....                                                                                                                  | 86         |
| 7.3 Résultats .....                                                                                                                   | 86         |
| 7.3.1 Données d'exposition .....                                                                                                      | 86         |
| 7.3.2 Données de santé .....                                                                                                          | 88         |
| 7.3.3 Effets du bruit routier et ferroviaire sur la santé : bénéfices du respect des valeurs guides OMS .....                         | 88         |
| 7.3.4 Analyse de sensibilité : influence des RER .....                                                                                | 94         |
| 7.4 Discussion .....                                                                                                                  | 95         |
| 7.4.1 Des impacts évitables pour un grand nombre d'habitants .....                                                                    | 95         |
| 7.4.2 Incertitudes .....                                                                                                              | 95         |
| 7.4.3 Lien avec les autres déterminants .....                                                                                         | 96         |
| 7.4.4 Évaluation de la faisabilité et de la pertinence .....                                                                          | 96         |
| <b>8. CONCLUSION .....</b>                                                                                                            | <b>98</b>  |
| 8.1 Pertinence des évaluations quantitatives des impacts sur la santé .....                                                           | 98         |
| 8.2 Faisabilité des évaluations quantitatives des impacts sur la santé .....                                                          | 98         |
| 8.2.1 Des ÉQIS faisables pour tous les déterminants, mais avec des incertitudes variables .....                                       | 98         |
| 8.2.2 Des données locales nombreuses, mais nécessitant un traitement important .....                                                  | 99         |
| 8.2.3 Des analyses qui demeurent complexes à mettre en œuvre .....                                                                    | 99         |
| 8.2.4 L'impossibilité de conduire des ÉQIS croisant plusieurs déterminants autour d'un même scénario .....                            | 100        |
| 8.3 Perspectives pour le développement des ÉQIS en France .....                                                                       | 100        |
| 8.3.1 Un outil tourné vers l'interdisciplinarité et l'intersectorialité .....                                                         | 100        |
| 8.3.2 Des besoins de recherche en épidémiologie .....                                                                                 | 100        |
| 8.4 Perspectives pour la santé publique .....                                                                                         | 101        |
| <b>ANNEXE 1. NDVI MOYEN DES TYPES DE VÉGÉTATIONS .....</b>                                                                            | <b>102</b> |
| <b>ANNEXE 2. RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES POUR LES ÉQIS SUR LES ESPACES VERTS .....</b>                                                  | <b>103</b> |
| <b>ANNEXE 3. DÉTAIL PAR BASSIN DES EMDDES BÉNÉFICES LIÉS À UNE AUGMENTATION DES PARTS MODALES DE LA MARCHÉ OU DU VÉLO .....</b>       | <b>105</b> |
| <b>ANNEXE 4. RELATIONS TEMPÉRATURE – MORTALITÉ UTILISÉE POUR L'ÉQIS .....</b>                                                         | <b>107</b> |
| <b>ANNEXE 5. LISTE DES UNITÉS MÉDICALES INCLUSES POUR SÉLECTIONNER LES HOSPITALISATIONS NON PROGRAMMÉES .....</b>                     | <b>109</b> |
| <b>ANNEXE 6. LOGIGRAMME POUR LA SÉLECTION DES CAS INCIDENTS D'ASTHME À PARTIR DE LA DÉLIVRANCE DE MÉDICAMENTS ISSUE DU SNDS .....</b> | <b>110</b> |
| <b>ANNEXE 7. RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES DES SCÉNARIOS DE RÉDUCTION DE LA POLLUTION DE L'AIR .....</b>                                  | <b>111</b> |
| <b>RESSOURCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>                                                                                              | <b>133</b> |

# 1. INTRODUCTION

L'Évaluation quantitative des impacts sur la santé (ÉQIS) est une méthode formalisée, initialement proposée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour mettre en lumière l'influence d'un déterminant de santé sur un effet sanitaire donné, pour une population et à un moment donné, et inciter à l'action sur ce déterminant. L'ÉQIS s'appuie pour cela sur l'état de l'art des connaissances scientifiques, et sur des données et des scénarios locaux.

Historiquement, l'ÉQIS a été largement appliquée à la pollution de l'air ambiant (1-5). Plus récemment, des méthodes ont été proposées pour réaliser des ÉQIS sur d'autres déterminants environnementaux, comme le bruit, les mobilités actives et les espaces verts urbains, dans l'objectif d'encourager des aménagements urbains favorables à la santé (6).

Ces travaux, qui sont portés par des équipes de recherche, posent la question de leur transposabilité à une plus large échelle d'utilisateurs. Santé publique France a mené une étude pilote dans trois métropoles françaises pour vérifier la possibilité de réaliser des ÉQIS simultanément sur les espaces verts, les mobilités actives, la chaleur, la pollution de l'air ambiant et le bruit. Il s'agit pour chacun de ces déterminants de proposer une méthode robuste et reproductible. L'étude vise également à identifier et, si possible, lever les verrous méthodologiques éventuels aux différentes étapes de l'ÉQIS. Une attention particulière a été apportée à la cohérence des raisonnements utilisés à chacune des étapes des ÉQIS, en appliquant autant que possible des critères de choix similaires pour l'ensemble des déterminants. L'objectif à terme est de mobiliser une vision croisée des effets de l'environnement sur la santé en ville.

Les ÉQIS présentées ici donnent un ordre de grandeur des bénéfices sur la santé qui seraient obtenus en agissant sur des déterminants positifs de la santé, ou en réduisant des expositions délétères pour la santé, toutes choses égales par ailleurs. Pour chaque déterminant étudié, elles comparent des indicateurs de santé observés actuellement dans les métropoles aux indicateurs de santé qui seraient observés, sur la base des connaissances actuelles, dans une métropole fictive où seul le déterminant serait différent. Cette différence peut s'interpréter comme un ordre de grandeur du nombre de cas évitables grâce à l'action sur ce déterminant.

Ce document détaille les méthodes utilisées pour ces ÉQIS, qui suivent toutes les principales étapes décrites dans la [Figure 1](#). Une première partie présente les éléments communs à tous les déterminants, puis les aspects spécifiques à chacun des déterminants considérés sont abordés dans des chapitres dédiés. L'étude a utilisé les données existantes pour chaque métropole, et n'a pas produit de données environnementales spécifiques pour les différentes ÉQIS. Ce rapport présente également pour chaque ÉQIS plusieurs scénarios et analyses de sensibilité, dans une logique de test de la pertinence et de la faisabilité.

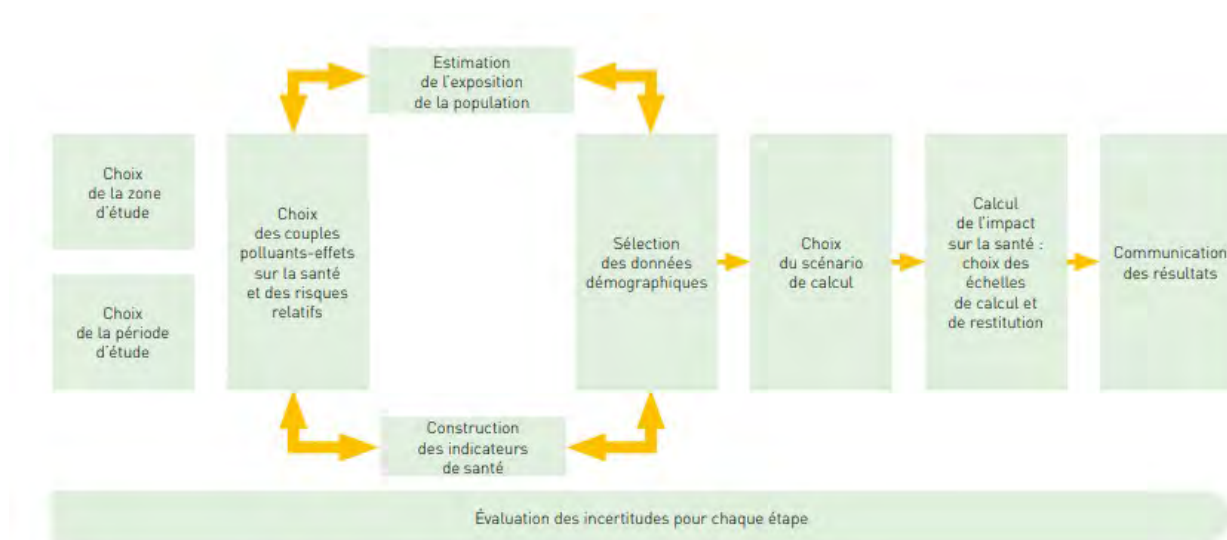
Le lecteur souhaitant avoir une vision globale de la méthode et des principaux résultats est invité à consulter en premier lieu les rapports de synthèse par métropole. Ces rapports reprennent les éléments clefs de chaque ÉQIS, et détaillent les bénéfices pour la santé de chaque déterminant pour les scénarios jugés les plus robustes.

## 2. ÉLÉMENTS COMMUNS À TOUS LES DÉTERMINANTS ÉTUDIÉS

### 2.1 Type d'ÉQIS

Pour tous les déterminants, une approche contrefactuelle a été adoptée. Elle compare l'impact sanitaire observé sous les conditions actuelles (environnementales, démographiques, sociales), et celui attendu si le déterminant ciblé dans l'ÉQIS changeait, toutes choses égales par ailleurs (Figure 1).

Figure 1. Principe général de l'évaluation quantitative des impacts sur la santé



L'OMS juge raisonnable de considérer que les bénéfices sanitaires d'interventions sur les mobilités et la pollution de l'air sont entièrement atteints au bout de cinq ans (7). Ce délai de cinq ans peut être considéré à titre indicatif pour l'interprétation des résultats, mais n'est pas intégré dans les calculs.

Les ÉQIS réalisées ici ne prennent pas en compte le temps nécessaire pour effectuer les modifications environnementales scénarisées (temps de la planification puis de la mise en œuvre et de l'atteinte des cibles des scénarios). Elles ne prennent pas non plus en compte les délais de latence entre ces modifications environnementales, leur répercussion biologique sur les personnes, et la traduction en matière d'indicateurs de santé.

### 2.2 Zones et période d'étude

#### 2.2.1 Choix des zones pilotes

Trois zones pilotes sont incluses dans l'étude (Tableau 1) :

- l'établissement public de coopération intercommunal (EPCI) de la Métropole Européenne de Lille (MEL), composé de 90 communes et rassemblant près de 1,2 million d'habitants ;
- l'EPCI Montpellier Méditerranée Métropole (3M), composé de 31 communes et rassemblant plus de 480 000 habitants ;
- l'EPCI de la Métropole Rouen Normandie (MRN), composé de 71 communes et rassemblant près de 493 000 habitants.

Ces EPCI ont été choisis sur la base de leur intérêt pour l'étude mais également dans le but de diversifier les caractéristiques des zones d'études, afin que les leçons tirées de cette étude pilote puissent être applicables plus largement.

**Tableau 1. Principales caractéristiques des zones d'étude**

|                                           | Nombre de communes | Population (2018) | Superficie          | Densité moyenne           | Climat           |
|-------------------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|------------------|
| <b>Métropole Européenne de Lille</b>      | 90*                | 1 174 273         | 672 km <sup>2</sup> | 1 748 hab/km <sup>2</sup> | Océanique altéré |
| <b>Montpellier Méditerranée Métropole</b> | 31                 | 481 276           | 422 km <sup>2</sup> | 1 140 hab/km <sup>2</sup> | Méditerranéen    |
| <b>Métropole Rouen-Normandie</b>          | 71                 | 492 681           | 664 km <sup>2</sup> | 742 hab/km <sup>2</sup>   | Océanique        |

\* La MEL compte 95 communes en 2023, 5 communes rattachées récemment n'ont pas été prises en compte dans cette étude.

## 2.2.2 Contours géographiques et classification urbain/rural

Au sein de chaque zone d'étude, les échelles de calcul et de restitution des résultats peuvent différer selon les déterminants et sont précisées au cas par cas. Cependant, les expositions environnementales (hors mobilités dont les données sont disponibles à l'échelle de bassins plus larges) ont toutes été exprimées au niveau de l'Iris<sup>1</sup> et de la commune.

Les données géographiques utilisées sont les contours à l'Iris de 2013 coproduits par l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee) et l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) (8). Les contours des communes ont été obtenus en agrégeant les Iris qui les composent.

Afin d'être en mesure de différencier les espaces urbains denses des espaces plus ruraux en périphérie des métropoles, un indicateur en quatre classes de l'Insee<sup>2</sup>, basé sur la densité de population, est utilisé (indicateur disponible à partir de 2018). Cet indicateur distingue : 1) les communes densément peuplées, 2) les communes de densité intermédiaire, 3) les communes peu denses, 4) les communes très peu denses.

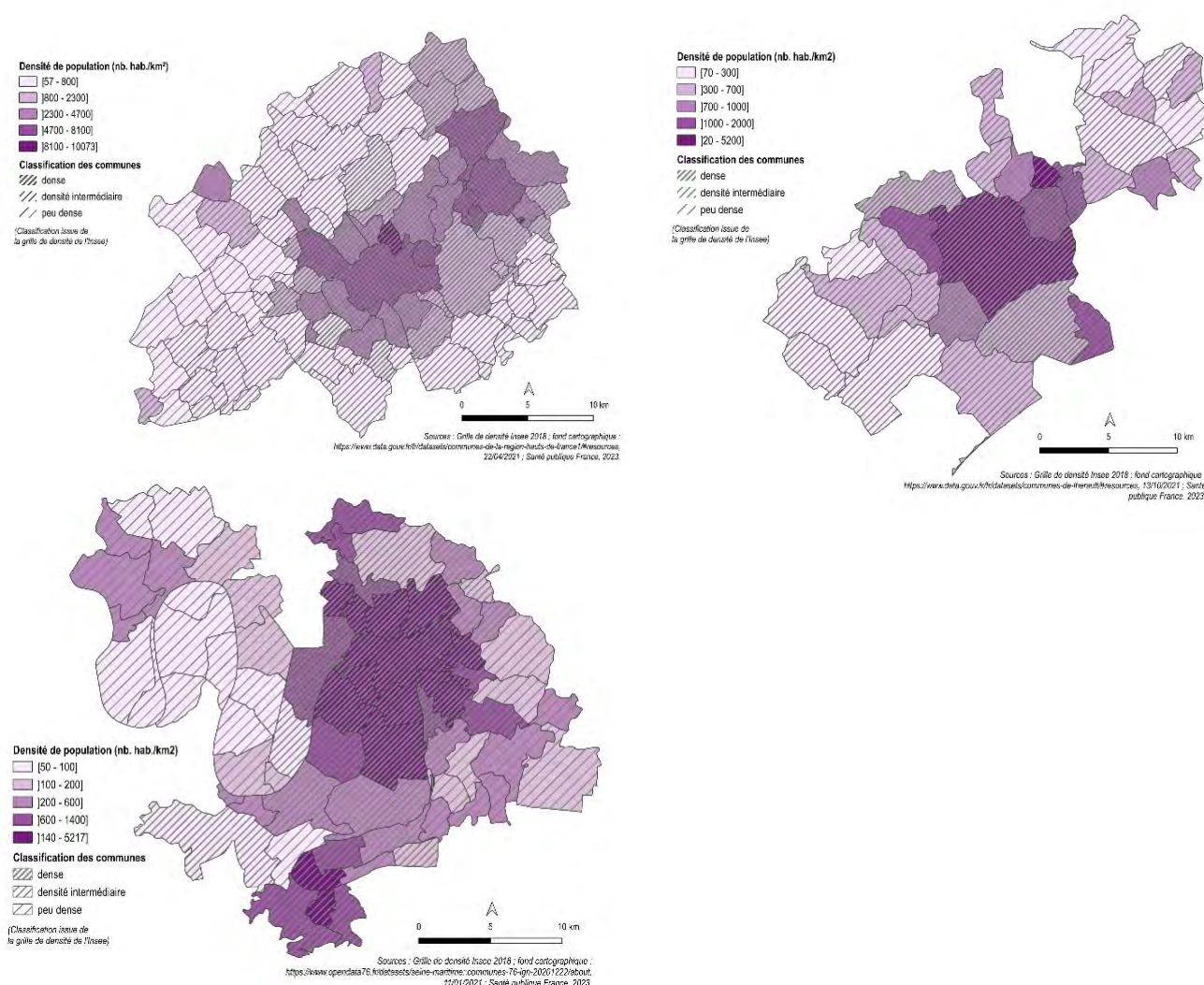
Les communes densément peuplées et les communes de densité intermédiaire constituent l'espace urbain ; les communes peu denses et les communes très peu denses constituent l'espace rural. La [Figure 2](#) illustre la répartition des communes de chaque zone selon cette classification. Aucune commune très peu dense n'est incluse dans les zones d'études.

<sup>1</sup> Les Iris ou « îlots regroupés pour l'information statistique » sont l'échelon infracommunal le plus fin permettant les ventilations statistiques courantes. C'est une partition des communes en « quartiers » dont la population est de l'ordre de 2 000 habitants.

<sup>2</sup> Selon la méthode de construction de la grille communale de densité, Insee, 2020 :

- si plus de 50 % de la population vit dans un centre urbain (un agrégat de carreaux contigus de plus de 1 500 habitants par km<sup>2</sup> avec au moins 50 000 habitants), la commune est dense.
- si plus de 50 % de la population vit dans un centre urbain ou dans un cluster urbain (un agrégat de carreaux contigus de plus de 300 habitants par km<sup>2</sup> avec au moins 5 000 habitants), la commune est de densité intermédiaire.
- si plus de 50 % de la population vit en dehors des centres urbains, des clusters urbains, et des mailles rurales intermédiaires (un agrégat de carreaux contigus de plus de 25 habitants par km<sup>2</sup> avec au moins 300 habitants) la commune est très peu dense.
- les autres communes sont peu denses.

**Figure 2. Répartition des communes rurales et urbaines dans chacune des trois métropoles de Lille, Rouen et Montpellier, selon la grille communale de densité 2018 de l'Insee**



### 2.2.3 Période d'étude

Compte tenu de la disponibilité des données au moment du démarrage de l'étude, et en particulier de la disponibilité des données de mortalité, la période d'étude principale est fixée à 2015-2017. Conformément aux recommandations pour les ÉQIS pollution de l'air (4), elle couvre trois années sans événement exceptionnel susceptible d'avoir engendré une mortalité plus importante qu'une année « ordinaire ».

Dans la mesure du possible, les données d'exposition sont obtenues pour la même période. Ceci n'est toutefois pas toujours possible, et des données environnementales plus récentes (2017-2019) sont parfois utilisées. Ce décalage de deux ans maximum entre données environnementales et sanitaires induit une incertitude dans le calcul du nombre de cas observés actuellement. Toutefois, cette incertitude demeure faible car les variations des données environnementales moyennes demeurent faibles sur ces échelles de temps.

## 2.3 Données démographiques et données de santé

### 2.3.1 Données de population

Les données de population par commune et par classe d'âge de 5 ans ont été obtenues à partir des recensements 2015-2017 de l'Insee. Les données de population totale et 30 ans et plus à l'Iris ont été obtenues pour 2015 uniquement (données Insee).

Des données plus fines de populations recensées au bâti ont été mobilisées pour certains déterminants, précisés ci-après. Ces données ont été produites par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) en 2018, à partir de la méthode MAJIC (méthode de répartition statistique des valeurs de population du carroyage 200 mètres Insee sur des bâtiments de la BD TOPO de l'IGN) (9).

### 2.3.2 Données de défaveur sociale

Des indices de défaveur sociale agrégeant des données de différentes sources peuvent aider à rendre compte des inégalités sociales de santé. Deux indices sont recommandés pour ce type de description : l'*European deprivation index* (EDI) et le *French deprivation index* (FDep) (10).

Le FDep est retenu pour cette étude. Il a été conçu spécifiquement pour être utilisé pour des études sur la santé des Français, et est corrélé à la mortalité (la mortalité standardisée est plus élevée dans les communes les plus défavorisées par rapport au plus favorisées) (11). Il estime la défaveur sociale à partir d'un cumul de désavantages matériels et sociaux, à partir du (12) :

- taux de chômage dans la population active de 15 à 64 ans ;
- taux d'ouvriers dans la population active de 15 à 64 ans ;
- taux de bacheliers dans la population non scolarisée des plus de 15 ans ;
- revenu médian déclaré par unité de consommation.

Les données de FDep utilisées ont été produites par l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) en 2015, à l'Iris et à la commune.

Pour chaque zone d'étude, cinq classes de défaveur sociale ont été créées à partir des quintiles de la distribution du FDep de la zone (le 1<sup>er</sup> quintile correspondant aux communes ou Iris très favorisés, et le 5<sup>e</sup> quintile aux communes ou Iris très défavorisés).

### 2.3.3 Données de santé

Pour chaque commune, les données de mortalité toutes causes annuelles et journalières, collectées par le CépiDc (Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès, Inserm), ont été obtenues via le Système national des données de santé (SNDS). Les données annuelles ont été extraites par classe d'âge de 5 ans.

Les données annuelles de mortalité par cause (codes CIM-10 détaillés dans les chapitres des déterminants ci-dessous) ont également été obtenues à partir du SNDS.

Les données de morbidité ont été obtenues à partir de différentes sources spécifiques à chaque indicateur de santé, le détail est donné dans les chapitres des déterminants correspondants.

Les données de santé ne sont pas disponibles à une échelle plus fine que la commune.

### 2.3.4 Calcul des taux de mortalité et de morbidité

Le taux de mortalité (ou d'incidence pour la morbidité) correspond au nombre de décès (ou de cas) divisé par la population. Les taux peuvent être mobilisés dans les équations de l'ÉQIS, notamment lorsque le calcul s'effectue à une échelle infra communale. Dans ce cas, par exemple à l'échelle de l'Iris, on fait l'hypothèse que le taux de la commune s'applique de manière homogène à chaque Iris appartenant à la commune.

Compte tenu des faibles effectifs dans les communes les moins peuplées, différentes méthodes d'estimation des taux ont été appliquées :

- dans chaque commune densément peuplée (critère Insee) et de plus de 5 000 habitants, les taux de décès ou d'incidence sont calculés en rapportant le nombre de cas annuel moyen observé à la population annuelle moyenne (moyennes des trois ans de la période d'étude).
- pour les communes densément peuplées de moins de 5 000 habitants, les données de santé et de population ont été agrégées sur l'ensemble de ces communes, et un taux unique a été estimé pour l'ensemble de ces communes.
- pour les communes de densité intermédiaires et peu denses, les données de santé et de population ont été agrégées sur l'ensemble de ces communes, et un taux unique a été estimé pour l'ensemble de ces communes.
- enfin, les Iris inhabités ou avec très peu d'habitants (<5) ne sont pas inclus dans l'analyse. Ceci représente 5 Iris à la MEL, 1 à 3M, et 5 à MRN.

Bien que cette méthode ne puisse refléter d'éventuelles disparités, elle permet de ne pas sous-estimer ou surestimer artificiellement les taux dans les communes peu peuplées, où il peut ne pas y avoir eu de décès ou de pathologies recensées pour les âges d'intérêt pendant la période d'étude, ou au contraire avoir un nombre important (relativement à la taille de la commune) dû au hasard et aux fluctuations naturelles.

## 2.4 Principe général de l'estimation d'exposition aux déterminants pris en compte dans les ÉQIS

Les données d'exposition aux espaces verts urbains, à la chaleur, aux polluants de l'air, et au bruit, ainsi que les données de mobilité peuvent être issues de bases de données nationales ou locales (enquêtes locales pour la mobilité). Ce sont des données disponibles à des échelles écologiques (i.e. d'une population) et non des données d'exposition individuelles.

Trois principes ont guidé le choix des données utilisées :

- les données environnementales doivent être jugées fiables par les experts techniques (par exemple, expertise des Aasqa sur les différentes sources de données de pollution de l'air, expertise de Météo-France sur les données météorologiques), et mettre en évidence des contrastes d'exposition à l'échelle de l'Iris ou de la commune.
- les méthodes d'estimation doivent s'approcher autant que possible des méthodes utilisées dans les études épidémiologiques sources fournissant la relation exposition-risque (RER)<sup>3</sup> ;
- lorsque plusieurs sources de données respectant les deux premiers principes sont identifiées, celle disponible sur le plus grand nombre de territoires est retenue.

Les choix sont présentés dans les chapitres spécifiques de chaque déterminant.

---

<sup>3</sup> Relation mathématique qui permet de transformer l'évolution de l'exposition (ou du déterminant) en évolution de l'effet sanitaire.

Le [Tableau 2](#) résume les bases de données géographiques utilisées communes aux trois métropoles. Les autres sources de données mobilisées sont précisées dans les chapitres par déterminants.

**Tableau 2. Synthèse des principales bases de données utilisées communes aux trois métropoles**

| Facteurs de risques | Données disponibles                                                                                                                                                                                  | Résolution                           | Date                   | Source        | Fournisseur/propriétaire     | Accès aux données                                    |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------|------------------------------|------------------------------------------------------|
|                     | Bd Topo                                                                                                                                                                                              | 1/2 000 à 1/50 000 <sup>e</sup>      | 2008, 2012, 2014, 2019 | Geoservices   | IGN                          | Ouvert                                               |
| Espaces verts       | NDVI brut - valeurs moyennes hiver/valeur moyennes été                                                                                                                                               | 30 m*30 m                            | 2015-2017              | Landsat 8     | Équipe Inserm/Univ. Grenoble | Données fournies sur chaque zone d'étude sur demande |
| Températures        | Températures journalières                                                                                                                                                                            | 1 km (200 m pour les zones urbaines) | 2015-2017              | Landsat 8     | Équipe Inserm/Univ. Grenoble | Données fournies sur chaque zone d'étude sur demande |
| Population          | Population ventilée au bati (Majic)                                                                                                                                                                  | bati (bd topo)                       | 2018                   | Bdd Majic     | Ineris/LCSQA                 | Ouvert sur demande                                   |
| Fdep                | Revenu médian par unité de consommation dans le ménage, le pourcentage de bacheliers dans la population de plus de 15 ans, le pourcentage d'ouvriers dans la population active et le taux de chômage | IRIS                                 | 2015                   | Inserm/CépiDC | Inserm/CépiDC                | Ouvert                                               |

## 2.5 Principe général du choix des couples exposition-effets et des relations exposition-risque

La réalisation d'une ÉQIS repose en premier lieu sur l'acceptation de la causalité de la relation entre l'exposition environnementale<sup>4</sup> et l'effet sanitaire considéré. Cet examen de l'acceptation de la causalité repose sur une approche pluridisciplinaire considérant les preuves apportées par la toxicologie, la physiologie, ou encore l'épidémiologie (13, 14). Pour les ÉQIS, ont été retenus des expositions et des effets pour lesquels la causalité peut être considérée comme acceptable, même si des incertitudes demeurent.

Une fois cette causalité acceptée entre une exposition et un effet donné, il faut sélectionner la relation mathématique qui permet de transformer l'évolution de l'exposition en évolution de l'effet sanitaire, le plus souvent appelée relation exposition-risque (RER)<sup>5</sup>. Ces RER sont issues d'études épidémiologiques souvent longues à mettre en œuvre (études de cohorte par exemple), et sont donc classiquement issues de la littérature scientifique. Cependant, pour le cas de la chaleur, en l'absence de RER adaptée au contexte français publiée dans la littérature, des RER spécifiques ont été construites pour cette étude en s'appuyant sur des travaux antérieurs menés par Santé publique France (15).

Pour les espaces verts urbains, les mobilités actives, la pollution de l'air ambiant et le bruit, les RER ont été choisies dans la littérature en s'appuyant sur des recherches bibliographiques et sur des

<sup>4</sup> Les mobilités actives ne sont pas formellement des expositions environnementales. Cependant, pour simplifier la rédaction, dans certains contextes le terme exposition est employé de manière large et s'applique également aux mobilités actives (par exemple, relation exposition/effet, peut signifier dans le cadre des mobilités « exposition » ou pratique régulière de la marche ou du vélo).

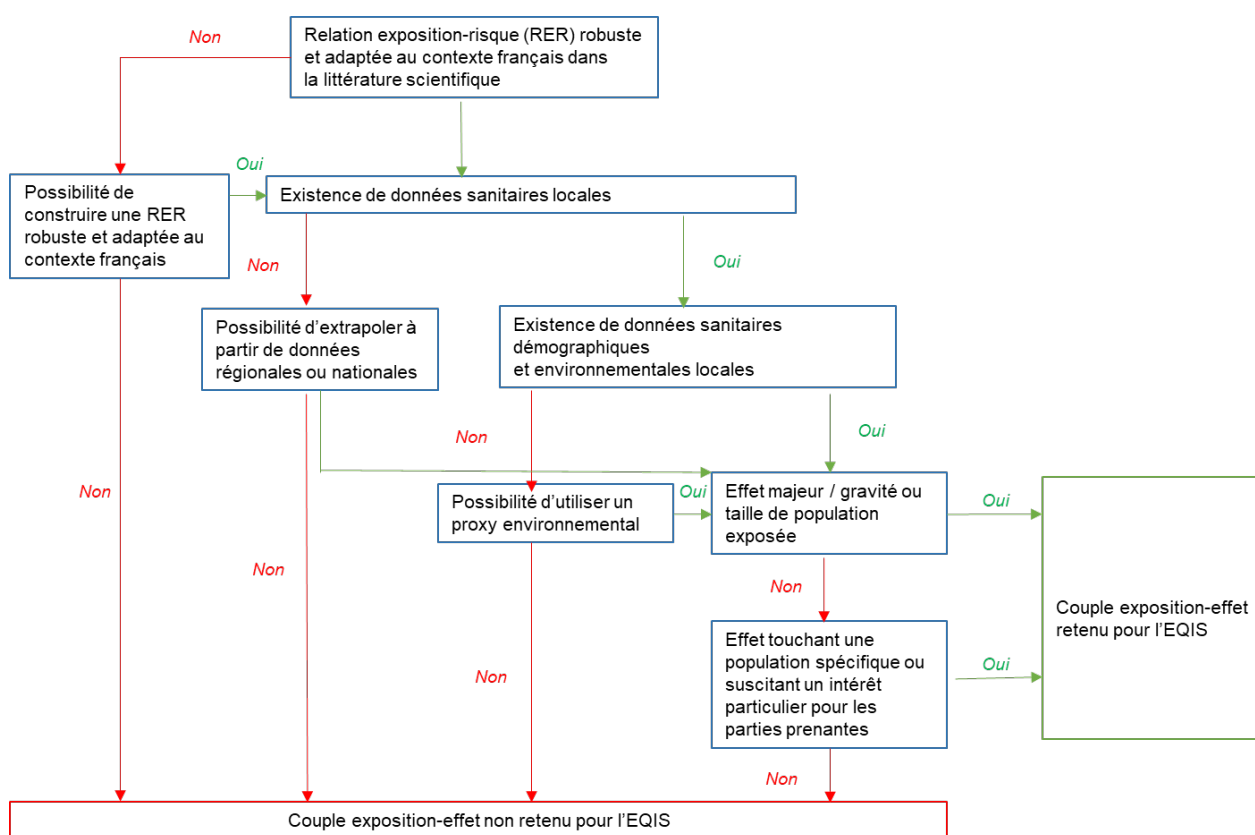
<sup>5</sup> Les termes relations concentration-risque, concentration-effet, exposition-effet, concentration-réponse, exposition-réponse sont également utilisés dans la littérature.

réflexions similaires menées par l'OMS. Les relations issues de méta-analyses robustes sur le plan méthodologique, et si possible menées dans un contexte européen sont privilégiées. Pour un même couple exposition-effet, plusieurs relations peuvent être retenues afin de mener des analyses de sensibilité.

Une fois les couples et RER potentielles sélectionnées, la faisabilité de l'ÉQIS au vu des données locales environnementales et sanitaires est analysée. Il s'agit de vérifier la cohérence entre les données disponibles localement et les données utilisées dans les études épidémiologiques fournissant la RER.

Enfin, afin de ne pas multiplier les résultats, une dernière étape consiste à sélectionner un nombre restreint de couples, en privilégiant les plus importants en termes de poids sur la santé, ou ceux qui permettent d'estimer un impact pour une population d'intérêt spécifique. L'approche est résumée dans la Figure 3.

**Figure 3. Approche pour le choix des couples expositions effets et des RER associées pour les espaces verts urbains, les mobilités actives, la pollution de l'air ambiant et le bruit**



## 2.6 Prise en compte des interdépendances entre les déterminants

Les déterminants retenus sont liés entre eux de différentes manières.

Certains partagent des sources communes (ex : pollution de l'air, bruit et transport routiers) et d'autres sont contraints par l'espace disponible et les choix d'urbanisme (ex : voies pour les mobilités actives vs routes pour les voitures, implantations d'espaces verts vs autres infrastructures (16)).

Certains déterminants vont directement en modifier d'autres. Par exemple, la végétation peut modifier la pollution de l'air, la chaleur et le bruit, selon le type d'espaces verts, les essences présentes, et la topographie du voisinage (17). La présence d'espaces verts peut favoriser la pratique de mobilités actives (18), mais le contexte local joue un rôle très important (19, 20).

La chaleur peut quant à elle décourager les mobilités actives sur les trajets non ombragés, tandis que le trafic automobile et les routes bitumées contribuent à l'îlot de chaleur urbain.

Des interactions physiologiques peuvent également exister entre plusieurs déterminants (ex : effet inflammatoire systémique de la pollution de l'air, du bruit et de la chaleur). Certaines pathologies développées à cause d'un déterminant peuvent enfin rendre plus susceptible de déclencher une réponse défavorable à un autre déterminant. Par exemple, une personne développant une pathologie cardiovasculaire à la suite d'une exposition chronique à la pollution de l'air sera plus vulnérable aux très fortes chaleurs.

Ces différentes connexions entre déterminants peuvent se traduire par des effets synergiques sur la santé, par exemple :

- les effets à court terme de la pollution de l'air sur la mortalité semblent dépendre en partie de la température, et réciproquement (i.e. un risque plus élevé associé à un même incrément de polluant quand il fait plus chaud, ou un risque plus élevé associé à un même incrément de température quand l'air est pollué) (21-23).
- les bénéfices liés à une activité physique peuvent être diminués en présence de niveaux de pollution de l'air trop élevés (24-27), ou lors d'une exposition à la chaleur (28).
- les effets sur la santé de la pollution de l'air (29), de la chaleur (30), ou du bruit (31, 32) peuvent s'avérer plus faibles dans les zones plus végétalisées.

Théoriquement, les ÉQIS devraient tenir compte de ces interactions. En pratique, ceci n'a pas été possible car :

- il n'a pas été identifié dans les zones pilotes de données environnementales et de scénarios permettant de répercuter les évolutions d'une exposition sur une autre ou d'identifier les retombées d'une intervention (par exemple, d'un aménagement) sur plusieurs déterminants simultanément ;
- les études épidémiologiques examinant simultanément plusieurs déterminants demeurent peu nombreuses, et d'une grande diversité méthodologique. Il n'a pas été identifié de méta-analyses pour des relations multidéterminants.

Aussi, les ÉQIS ont été réalisées déterminant par déterminant, et une approche systémique croisant plusieurs déterminants n'a pas été possible.

## 2.7 Prise en compte des inégalités environnementales et inégalités sociales et territoriales de santé

Le Conseil économique et social définit les inégalités environnementales comme 1) les inégalités d'exposition aux pollutions et d'accès aux aménités, 2) les inégalités distributives des politiques environnementales, 3) les inégalités face aux impacts environnementaux et 4) les inégalités dans la participation aux politiques publiques (33).

Ces inégalités environnementales se recoupent avec des inégalités sociales, et conduisent à des inégalités sociales de santé (définies comme « *toute relation entre la santé et l'appartenance à une catégorie sociale* »), générant des inégalités de santé, i.e. des « *différences systématiques, évitables et importantes dans le domaine de la santé* » (34), observées entre groupes sociaux. En général, l'état de santé sera d'autant moins bon que l'on se trouve dans une catégorie sociale défavorisée, cette distribution se faisant de façon graduée tout au long de la hiérarchie sociale (10).

Les inégalités d'exposition entre territoires et une partie des inégalités sociales de santé sont prises en compte dans l'ÉQIS : les zones les plus exposées (bruit, pollution de l'air, température, déficit d'espaces verts urbains, déficit d'infrastructures permettant les mobilités actives), et avec des taux de mortalité ou d'incidence plus élevés, seront celles où les impacts seront plus importants.

Les inégalités sociales n'ont pas été prises en compte comme facteur modificateur dans l'étape de calcul, car on ne dispose pas de suffisamment d'études épidémiologiques fournissant des RER pour la France par niveau d'inégalité.

Afin de contextualiser les résultats sous l'angle des inégalités sociales, le choix a été fait de :

- décrire les corrélations entre exposition à chaque déterminant (hors mobilités actives car les données sont à une échelle agrégée) et l'indice de défaveur sociale à l'Iris ou à la commune (Fdep) ;
- comparer les distributions de chaque déterminant (hors mobilités actives) par quintile de défaveur sociale ;
- lorsque c'est possible, présenter les résultats des ÉQIS en les stratifiant par quintile de défaveur sociale.

Pour certains déterminants, des scénarios ont également été testés afin de quantifier les bénéfices sanitaires qui pourraient être obtenus si les zones plus défavorisées atteignaient les expositions observées dans les zones plus favorisées.

La répartition de la population et de la mortalité diffère si l'on prend les quintiles de défaveur sociale à partir du FDep à la commune, ou du FDep à l'Iris (le nombre de commune étant plus faible que le nombre d'Iris, et les distributions du FDep différentes, les classes sont différentes).

Le [Tableau 3](#) détaille la répartition de la population et de la mortalité par quintile de défaveur sociale.

**Tableau 3. Répartition de la population et de la mortalité totale des 30 ans et plus par quintile de FDep – Données à la commune et à l'Iris (effectifs et taux annuels moyens 2015-2017)**

|                                                        | MEL                |                                               |                                                        | 3M                 |                                               |                                                        | MRN                |                                               |                                                        |
|--------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|                                                        | Nombre de communes | Population de 30 ans et plus annuelle moyenne | Taux de décès pour 100 000 habitants de 30 ans et plus | Nombre de communes | Population de 30 ans et plus annuelle moyenne | Taux de décès pour 100 000 habitants de 30 ans et plus | Nombre de communes | Population de 30 ans et plus annuelle moyenne | Taux de décès pour 100 000 habitants de 30 ans et plus |
| Communes moins défavorisées (1 <sup>er</sup> quintile) | 18                 | 84 423                                        | 1 231                                                  | 7                  | 30 147                                        | 1 085                                                  | 15                 | 41 805                                        | 1 404                                                  |
| 2 <sup>e</sup> quintile                                | 18                 | 84 010                                        | 1 130                                                  | 6                  | 50 207                                        | 1 073                                                  | 14                 | 21 723                                        | 1 294                                                  |
| 3 <sup>e</sup> quintile                                | 18                 | 92 907                                        | 1 264                                                  | 6                  | 42 825                                        | 1 139                                                  | 14                 | 75 210                                        | 1 362                                                  |
| 4 <sup>e</sup> quintile                                | 18                 | 448 090                                       | 1 215                                                  | 6                  | 29 002                                        | 1 091                                                  | 14                 | 51 974                                        | 1 580                                                  |
| Communes plus défavorisées (5 <sup>e</sup> quintile)   | 18                 | 434 348                                       | 1 352                                                  | 6                  | 312 861                                       | 1 156                                                  | 14                 | 106 793                                       | 1 534                                                  |
|                                                        | MEL                |                                               |                                                        | 3M                 |                                               |                                                        | MRN                |                                               |                                                        |
|                                                        | Nombre d'Iris      | Population de 30 ans et plus annuelle moyenne | Taux de décès pour 100 000 habitants de 30 ans et plus | Nombre d'Iris      | Population de 30 ans et plus annuelle moyenne | Taux de décès pour 100 000 habitants de 30 ans et plus | Nombre d'Iris      | Population de 30 ans et plus annuelle moyenne | Taux de décès pour 100 000 habitants de 30 ans et plus |
| Iris moins défavorisés (1 <sup>er</sup> quintile)      | 101                | 120 379                                       | 1 231                                                  | 32                 | 56 883                                        | 1 133                                                  | 48                 | 62 994                                        | 1 496                                                  |
| 2 <sup>e</sup> quintile                                | 101                | 145 473                                       | 1 259                                                  | 32                 | 51 774                                        | 1 128                                                  | 47                 | 58 651                                        | 1 468                                                  |
| 3 <sup>e</sup> quintile                                | 100                | 143 445                                       | 1 276                                                  | 31                 | 52 342                                        | 1 129                                                  | 47                 | 63 933                                        | 1 445                                                  |
| 4 <sup>e</sup> quintile                                | 101                | 129 136                                       | 1 278                                                  | 32                 | 51 047                                        | 1 138                                                  | 47                 | 56 725                                        | 1 445                                                  |
| Iris plus défavorisés (5 <sup>e</sup> quintile)        | 101                | 110 727                                       | 1 308                                                  | 32                 | 52 687                                        | 1 149                                                  | 47                 | 54 862                                        | 1 444                                                  |

## 2.8 Scénarios

Pour chaque ÉQIS, la situation observée pendant la période d'étude (exposition et nombre de cas attribuables à cette exposition) est comparée à une situation scénarisée.

Pour chaque déterminant, des scénarios d'atteinte de valeurs cibles ambitieuses ont été appliqués aux trois zones d'études. Ces valeurs ont été choisies en s'appuyant sur les valeurs recommandées par l'OMS lorsqu'elles existaient, et sur les valeurs observées dans des métropoles européennes de taille équivalente. Il n'a par contre pas été réalisé de scénario permettant de quantifier l'impact total d'un déterminant (par exemple, impact de l'ensemble de la pollution de l'air ou du bruit d'origine anthropique). La seule exception concerne la chaleur, pour laquelle il n'existe pas de valeurs guides. L'impact total de la chaleur a donc été calculé.

Des scénarios locaux définis en fonction des attentes des décideurs et des données disponibles dans chaque zone ont également été développés. Les scénarios retenus sont décrits dans les chapitres par déterminant.

## 2.9 Équation

Les impacts sur la santé d'une exposition sont classiquement calculés à partir de l'équation de la fraction attribuable (FA)(35).

**Équation 1**  $FA = \frac{Pp(RER-1)}{Pp(RER-1)+1}$

où Pp est la part de la population exposée, et la RER est exprimée le plus souvent par un risque relatif ou un odds ratio. Ces deux paramètres vont se calculer différemment selon les déterminants et les scénarios retenus, les détails étant précisés dans les chapitres par déterminant.

L'impact d'un scénario est calculé en faisant la différence entre la fraction attribuable à l'exposition actuelle, et la fraction attribuable à l'exposition sous le scénario.

## 2.10 Expression des résultats

À partir de la différence de fraction attribuable, il est possible d'exprimer les résultats en effectifs en appliquant cette fraction aux effectifs de mortalité ou de morbidité observés dans la zone. Les résultats peuvent également s'exprimer en espérance de vie. Le calcul de l'espérance de vie s'appuie sur des tables de mortalité abrégées, en comparant l'espérance de vie estimée à partir des taux de mortalité par âges observés, et des taux attendus sous les évolutions scénarisées (3). Afin de ne pas multiplier les résultats, ceux-ci sont uniquement présentés en effectifs et fractions attribuables.

L'ensemble des analyses ont été réalisées avec le logiciel R 4.1.2 (R Core Team, 2022).

## 2.11 Incertitudes

Une ÉQIS cherche à estimer de manière correcte un ordre de grandeur de l'évolution attendue d'un effet sur la santé à partir d'une modification d'un déterminant de santé donné, toutes choses égales par ailleurs. La valeur exacte de cette évolution demeure inconnue, aussi il n'est pas possible de quantifier les erreurs (au sens strict de la différence entre la valeur obtenue et une valeur réelle qu'on connaîtrait par ailleurs).

Les incertitudes découlent des données utilisées (ex : incertitude entourant la mesure ou la modélisation d'un déterminant, incertitudes concernant les hypothèses pour traduire une mesure environnementale en exposition de la population, incertitude concernant les données de santé), des paramètres utilisés (ex : incertitude sur la précision de l'estimation fournie par l'intervalle de confiance à 95 % autour de la valeur centrale d'un risque relatif), et de leur transposabilité à la situation étudiée (ex : en l'absence d'une RER calculée pour une population rurale, on en utilise une issue d'une population urbaine). Certaines de ces incertitudes sont quantifiables ou abordables via des analyses de sensibilité, alors que d'autres sont uniquement abordables de manière qualitative.

Il n'existe donc pas de méthode globale consensuelle pour estimer l'incertitude globale d'une ÉQIS. L'approche proposée ici consiste à recenser et qualifier l'ensemble des incertitudes pour chaque déterminant (cf. détail par chapitre), réaliser des analyses de sensibilité lorsque cela est possible, et proposer une interprétation globale combinant informations quantitatives et qualitatives.

Les incertitudes communes à une majorité des ÉQIS sont présentées ci-dessous, et ne sont pas détaillées dans les chapitres spécifiques à chaque déterminant.

Pour les paramètres dont l'incertitude peut être quantifiée, des méthodes plus approfondies de propagation et de quantification par des méthodes de Monte-Carlo sont proposées dans la littérature (36). Ces méthodes n'ont pas été explorées dans cette étude de faisabilité, mais pourraient être intégrées dans de prochaines études sous réserve de données disponibles.

### 2.11.1. Concernant les données de populations

Selon le déterminant, les données de population vont être mobilisées à la commune, à l'Iris, ou au bâti. Les données annuelles communales de l'Insee sont moyennées sur la période 2015-2017, les données à l'Iris sont estimées pour 2015, et les données au bâti sont produites pour l'année 2018. Les différences d'échelle et de période conduisent à des estimations de tailles de population totale de chaque métropole différentes ([Tableau 4](#)).

### 2.11.2. Concernant les données de mortalité

La classification internationale des maladies (CIM-10) a été utilisée pour extraire les causes équivalentes à celles utilisées dans les études fournissant les RER, ce qui limite les incertitudes liées à la transposabilité de ces relations au contexte français. À l'échelle de la commune, l'incertitude sur la mesure de la mortalité est quasi-nulle, le système de recensement de la mortalité étant exhaustif en France.

Les RER pour la mortalité s'appliquent à une population adulte, mais qui n'est pas définie de manière homogène. Certaines études ne considèrent que les 30 ans et plus, d'autres intègrent des résultats à partir de 18 ans, 20 ans, 30 ans... Pour simplifier la présentation des résultats, les calculs ont tous été faits sur la mortalité à partir de 30 ans. Cela peut conduire à une légère sous-estimation des impacts pour les déterminants pour lesquels il aurait fallu prendre les décès à partir de 20 ans. Par exemple, pour la Métropole Européenne de Lille, pour une fraction attribuable de 10 %, l'impact estimé à partir des données à partir 30 ans est de 827, et de 833 à partir des données à partir de 20 ans, soit une différence de 0,7 % ([Tableau 4](#)). Cette incertitude a donc une influence minime sur l'ÉQIS.

Certaines analyses peuvent être réalisées à une échelle infracommunale, à l'Iris. Dans ce cas, on fait l'hypothèse que les taux de mortalité observés à l'échelle de la commune, calculés à partir des données de mortalité et de population communales, s'appliquent à chacun des Iris constituant la commune. L'estimation de la population à l'Iris est réalisée via une source de donnée différente, aussi il existe de légère différence d'effectif lors de l'agrégation à la commune. Aussi l'agrégation du nombre de décès estimés à l'échelle de l'Iris donne des résultats légèrement différents du nombre

de décès mesurés à la commune ([Tableau 3](#)). Cette différence est plus grande dans les communes denses, composées de plusieurs Iris. En moyenne, dans les trois métropoles, les communes denses sont découpées en 12 Iris (de 1 à 107 au maximum), les communes intermédiaires de 2 Iris (de 1 à 11 au maximum), et les communes peu denses de 1 Iris (de 1 à 2 au maximum).

**Tableau 4. Comparatif des effectifs de population selon l'échelle géographique et des données de mortalité à partir de 20 ans et à partir de 30 ans**

|     | Nombre moyen d'habitants                          |                                  |                                  | Nombre de décès annuels moyens 2015-2017<br>(causes non accidentelles) |                    |                                                                                      |
|-----|---------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Population à la commune Insee (moyenne 2015-2017) | Population à l'Iris Insee (2015) | Population au bâti Ineris (2018) | des 20 ans et plus                                                     | des 30 ans et plus | des 30 ans et plus, estimé en appliquant les taux communaux aux populations à l'Iris |
| MEL | 1 143 777                                         | 1 182 564                        | 1 149 770                        | 8 328                                                                  | 8 273              | 8 254                                                                                |
| 3M  | 465 042                                           | 498 540                          | 490 221                          | 3 073                                                                  | 3 053              | 3 006                                                                                |
| MRN | 489 758                                           | 503 735                          | 492 663                          | 4 382                                                                  | 4 354              | 4 356                                                                                |

## 2.12 Implication des parties prenantes des zones d'études

Des conventions ont été signées avec les métropoles et/ou villes ainsi qu'avec les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (Aasqa) pour formaliser le partage des données et des connaissances. Tout au long de la réalisation de l'ÉQIS, des réunions techniques thématiques ont été organisées régulièrement avec des interlocuteurs experts techniques au sein des collectivités et leurs partenaires, en particulier avec les Aasqa. Une grande partie des données des différents déterminants ont été fournies par les interlocuteurs locaux et ont fait l'objet d'échanges multiples afin de bien s'approprier ces données.

Ces échanges ont permis d'affiner le protocole, d'identifier les données disponibles et les informations contextuelles utiles, et de préciser les scénarios. L'étude s'inscrit ainsi dans une logique de co-construction, l'objectif étant de se caler au mieux sur les attentes des zones, tout en respectant les contraintes méthodologiques de l'ÉQIS.

## 3. ESPACES VERTS URBAINS

### 3.1 Principaux bénéfices sur la santé des espaces verts urbains

Les espaces verts urbains sont définis par l'OMS comme « *tout terrain urbain sur lequel se trouve toute sorte de végétation, qu'elle soit sur des terrains privés ou publics, quelles que soient sa taille ou ses fonctions, et peut inclure des zones « bleues » (comme des étangs, des lacs ou des ruisseaux) et des rues longées d'arbres* » (37).

Cette définition se rapporte explicitement à un environnement urbain, et ne s'applique donc pas aux espaces agricoles ou aux espaces naturels pouvant faire partie du territoire des communes rurales. Cependant, elle est pertinente pour les zones habitées les plus denses des communes rurales. Aussi, dans la suite du document, le terme d'espaces verts urbains est également appliqué aux communes rurales.

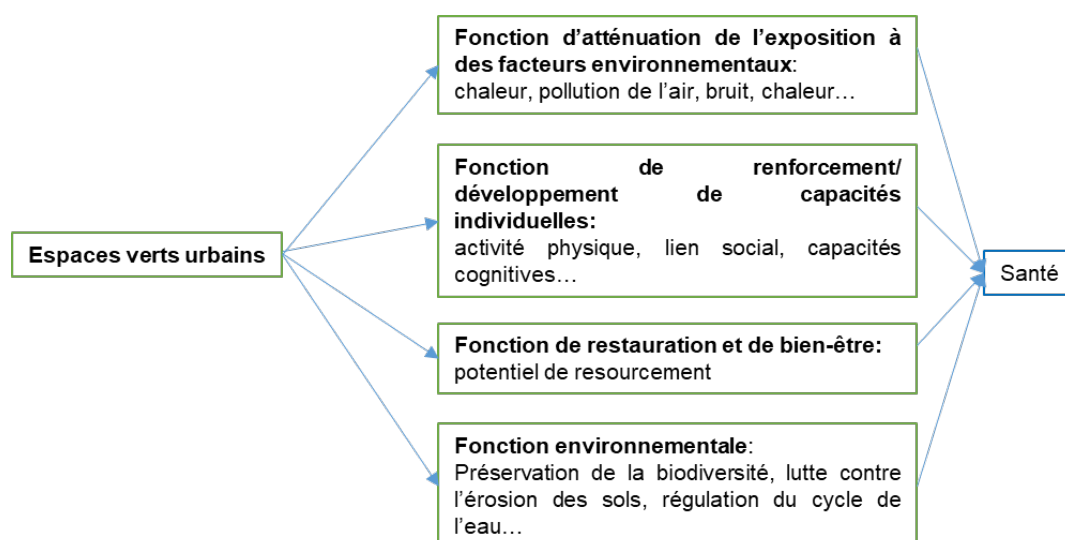
Les espaces verts urbains sont associés à de nombreux bénéfices sur la santé, via des mécanismes complexes abordés classiquement selon (38) :

- l'atténuation des expositions à des facteurs de stress environnementaux tels que la pollution atmosphérique, le bruit, la chaleur, la réduction du ruissellement et la prévention des inondations (39).
- la participation au développement des capacités : pratique d'une activité physique, cohésion et lien social, production alimentaire...
- le rétablissement des aptitudes par le ressourcement : ressource importante pour la restauration psychologique, le bien-être et la réduction du stress.
- la participation à la protection de la biodiversité en ville, associée à des bénéfices pour la santé mentale par exemple.

Enfin, les espaces verts et la faune peuvent également être perçus comme des nuisances (par exemple, présence d'espèces non désirées), ou favoriser la présence de vecteurs de maladies infectieuses.

La protection de la biodiversité et la capacité d'atténuation des expositions sont principalement conditionnées par des paramètres environnementaux, topographiques et climatiques, tandis que la participation au développement de capacités et au rétablissement d'aptitudes est fortement influencée par des facteurs socioculturels et comportementaux.

**Figure 4. Schématisation des liens entre espaces verts urbains et santé (inspiré de (38))**



Plusieurs revues systématiques de la littérature établissent des liens entre espaces verts urbains, santé physique et santé mentale (37, 40-50), à tous les âges de la vie. Ces études considèrent le plus souvent l'impact global des espaces verts urbains (44, 45, 51), sans distinguer les mécanismes impliqués. On note cependant un nombre croissant d'études se concentrant sur des mécanismes particuliers, par exemple le rôle protecteur des espaces verts urbains vis-à-vis des risques liés à la chaleur (30), ou leur rôle de promotion de l'activité physique (50). Ces études s'intéressent généralement à la quantité d'espaces verts urbains disponibles dans une zone, éventuellement à leur accessibilité, et dans une moindre mesure à leurs qualités du point de vue esthétique, récréatif, ou de biodiversité par exemple (52, 53).

Browning *et al.* ont réalisé une revue de la littérature visant à identifier si l'impact de la végétation sur la santé dépendait du type d'environnement (rural/urbain). Ils concluent que les espaces verts sont associés à une réduction du risque de mortalité et des risques liés à la santé périnatale en milieu rural comme urbain (54). Ils soulignent cependant qu'en milieu urbain, l'espace vert doit être plus proche du domicile qu'en milieu rural pour que des bénéfices pour la santé soient observés (54). L'OMS recommande par ailleurs que chaque habitant en milieu urbain dispose d'un espace vert de 0,5 ha dans un rayon de 300 m autour de son domicile (55).

Konijnendijk propose de compléter cette recommandation par deux autres critères : que chaque quartier soit recouvert à 30 % d'arbres, et que trois arbres soient visibles de chaque habitation (56). Ces valeurs sont proposées sur la base d'une étude de cohorte australienne montrant qu'une canopée de 30 % ou plus était associée à un meilleur état général de santé déclaré, et à une meilleure santé mentale (57). Définir un seuil sur une seule étude est peu robuste, mais la valeur de 30 % d'arbres a une portée symbolique et a été reprise comme scénario par d'autres études. Par exemple, un travail récent a estimé que la diminution de la température estivale observée si cette règle de 30 % d'arbres était appliquée dans les grandes villes européennes permettrait d'éviter 1,9 % de la mortalité attribuable à la chaleur en été (58).

Malgré la diversité des mécanismes impliqués, et un nombre d'études encore restreint, la littérature converge vers la reconnaissance de bénéfices importants de la présence d'espaces verts sur la santé. L'acceptation d'un effet causal entre espaces verts et santé, et notamment mortalité, ouvre la voie à la réalisation d'ÉQIS (59).

## 3.2 Méthode

### 3.2.1 Couples et relations exposition-risque

Dans les études épidémiologiques, l'exposition aux espaces verts urbains est majoritairement estimée via un indice de télédétection, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Le NDVI mesure l'intensité de l'activité chlorophyllienne à partir de la lumière visible et infrarouge observée par les satellites (60). Il varie de -1 à 1 : les valeurs négatives indiquent des surfaces d'eau ou de neige, une valeur proche de 0 indiquant une absence de végétation, et les valeurs positives (>0,1) la présence de végétation. Plus le NDVI est proche de 1 plus la densité de végétation verte est importante.

Une analyse de la littérature couvrant les articles publiés jusqu'en décembre 2019 sur espaces verts urbains et la santé a conduit à sélectionner le couple NDVI autour du domicile-mortalité totale (49, 59), avec une RER issue d'une méta-analyse de neuf études de cohortes (61) (Tableau 5). Les cohortes incluses dans la méta-analyse portent toutes sur des adultes, avec des définitions variées (> 18 ans, 25 ans, 30 ans, 35 ans). La relation est appliquée dans la présente ÉQIS pour les 30 ans et plus.

La méta-analyse retenue présente une hétérogénéité importante. Seules trois études portent sur l'Europe, et la mortalité totale (61). Comme il n'est pas possible de faire une méta-analyse sur ces

trois études uniquement, les RER des études retrouvant les effets les plus élevés (62) et les plus faibles (63) sont utilisées en analyse de sensibilité (Tableau 5).

Des relations pour la mortalité cardiovasculaire et respiratoire sont également disponibles dans la littérature, mais avec une plus grande incertitude, liée à un faible nombre d'études (49, 59). Ces causes n'ont pas été retenues pour ne pas multiplier les résultats en matière de mortalité.

Un nombre croissant d'études s'intéressent également aux impacts des espaces verts urbains sur la santé mentale (64). Toutefois, la grande diversité des effets étudiés dans ces études et des approches méthodologiques ne permet pas d'identifier de RER robuste pour une ÉQIS dans un contexte français (49).

**Tableau 5. Couple et RER retenue pour les espaces verts urbains**

| Événement de santé | Population               | Relation exposition risque                                          | Référence                             | Autre relation pour analyse de sensibilité                                                                           |
|--------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mortalité totale   | Adultes (30 ans et plus) | Relation log-linéaire, RER 0,96 [IC 95 % 0,94 ; 0,97] pour 0,1 NDVI | Rojas-Rueda <i>et al.</i> , 2019 (51) | 0,92 [0,89;0,97]<br>Nieuwenhuijsen <i>et al.</i> , 2018 (62)<br>0,99 [0,98;0,99]<br>Orioli <i>et al.</i> , 2019 (63) |

### 3.2.2 Données d'exposition

#### NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

La RER retenue s'appuyant sur le NDVI, il est nécessaire d'exprimer les indicateurs d'exposition, mais également les scénarios de l'ÉQIS dans cette métrique. Il n'existe pas de coefficient ou de méthode permettant de convertir un scénario construit sur la présence d'espaces verts (en surface, type d'espaces, types d'essences...) en NDVI. Les choix réalisés dans cette ÉQIS pour convertir un scénario en NDVI sont détaillés dans les chapitres suivants.

Le NDVI utilisé dans les études de cohortes de la méta-analyse de Rojas-Rueda *et al.* est le plus souvent calculé pendant l'été (avril-juillet, ou juin-juillet selon les études) (61). Dans les études épidémiologiques incluses dans la méta-analyse, l'exposition à la végétation est estimée en moyennant le NDVI mesuré dans un rayon autour du domicile, variant de 30 m à 500 m selon les études. Les auteurs recommandent d'utiliser leur RER pour un rayon de 500 m autour du domicile. Des données de NDVI estival (NDVI journalier observé du 1<sup>er</sup> juin au 31 août) sur une maille de 30 m ont été obtenues auprès de l'Inserm (65) pour 2015-2017. Ces données sont issues de mesures du satellite Landsat. Pour chaque maille, un NDVI moyen estival a été calculé en moyennant l'ensemble des données journalières des trois années.

À partir des données à la maille, le NDVI estival moyen à l'Iris a été calculé pour chaque Iris en croisant la grille du NDVI et la couche vecteur délimitant les surfaces des Iris. Les analyses ont été réalisées avec les outils de géo-traitements QGIS 3.1.

Pour l'ÉQIS, il est fait l'hypothèse que pour chaque habitant d'un Iris, le NDVI moyen dans un rayon de 500 m autour du domicile est assimilable au NDVI moyen de l'Iris. En zone dense, les Iris sont assez petits pour accepter cette hypothèse. En zones peu denses, les Iris peuvent couvrir une surface importante, et l'erreur d'estimation du NDVI peut être importante. Les incertitudes associées à l'exposition sont donc *a priori* plus importantes en zones peu denses.

#### Données d'occupation des sols

Afin de créer des correspondances entre les types de végétation et les gammes de NDVI observées dans chaque zone, des données d'occupation des sols ont été utilisées. Il s'agit des données de la BD TOPO, Corine Land Cover, OSO, OpenStreetMap (Tableau 6) et des données locales fournies par les métropoles.

## Part de population résidant à plus de 300 m d'un espace vert de plus de 0,5 ha

La part de la population résidant à plus de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 ha a été calculée en combinant dans un SIG les informations fournies par ces différentes sources d'occupation du sol, et les données de population au bâti (9).

**Tableau 6. Bases de données nationales mobilisées pour l'occupation des sols**

|                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| BD Topo                 | La BD Topo est une des composantes du Référentiel à grande échelle (RGE) produit par l'Ign (Institut national de l'information géographique et forestière). Elle décrit avec précision (métrique) l'implantation de certaines classes d'occupation du sol (bâtiments de tout type, infrastructures routières, zones d'activité, végétation, etc.). La classe végétation de la BD Topo permet d'identifier une majorité d'espaces verts urbains.                                                                                                                                                                                                                                                                      | (66) |
| CORINE Land Cover (CLC) | Élaborée dans le cadre d'un programme européen de l'agence européenne de l'environnement, CLC est une couche d'occupation des sols en 44 classes et trois niveaux de précision en termes de catégorisation, qui décrit, de façon exhaustive, à l'échelle du 1 : 100 000 <sup>e</sup> , l'occupation du sol du territoire pour plusieurs millésimes (1990, 2000, 2006, 2012 et 2018). Elle est issue d'un travail de télédétection sur images satellites. Elle n'a pas la précision de la BD Topo, la superficie des zones cartographiées n'étant pas inférieure à 25 ha.                                                                                                                                             | (67) |
| OSO                     | La carte d'occupation des sols « OSO » produite par le Centre d'expertise scientifique (CES OSO) est une donnée d'occupation du sol très fine, mise à disposition aux formats vecteur et raster, comportant entre 17 et 23 classes d'occupation du sol. Elle est issue d'une chaîne de traitements entièrement automatisée, fondée sur des algorithmes de classification supervisée, tournant sur les séries temporelles d'images Landsat-8, Sentinel-2 et/ou Sentinel-1. 3 millésimes (2016, 2017 et 2018) sont disponibles avec une précision de 10 à 20 m, les millésimes « historiques » (2009, 2010, 2011 et 2014), produits uniquement à partir d'images Landsat, sont disponibles avec une précision de 30 m. | (68) |
| OpenStreetMap (OSM)     | OpenStreetMap (OSM) est un projet collaboratif de cartographie en ligne initié en 2004, et visant à la constitution d'une base de données géographique libre couvrant le monde entier, pour la production et la réutilisation sous licence libre. Ces données sont aujourd'hui disponibles sous licence ODL et couramment utilisées voire intégrés dans un certain nombre d'outils (plugin QuickOSM de QGIS, bibliothèque Leaflet utilisable dans R ou dans un script Python, etc.) Les données géographiques disponibles dans OSM concernent des thématiques très variées.                                                                                                                                          | (69) |

## Part de surface végétalisée

La part de surfaces végétalisées a été calculée dans chaque commune et pour chaque Iris (2021), en utilisant les données de la BDtopo végétation. Ces données ne prennent pas en compte les surfaces agricoles.

### 3.2.3 Équation

Le nombre de décès évitables  $Y_0 - Y_1$  via un gain de NDVI ( $X_0 - X_1$ ) s'exprime comme :

**Équation 2** 
$$Y_0 - Y_1 = Y_0(1 - e^{-\beta(X_0 - X_1)})$$

Où  $\beta$  est un facteur représentant la RER (ici un risque relatif (RR)) associé à une incrémentation de 0,1 NDVI :

**Équation 3** 
$$\beta = \frac{\ln(RR)}{0,1}$$

### 3.2.4 Scénarios

Quatre types de scénarios ont été retenus :

- atteinte d'une valeur cible de NDVI, correspondant à une valeur observée par ailleurs dans la zone d'étude ;
- atteinte d'une valeur de NDVI associée au respect de la recommandation OMS de vivre à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 ha ;
- atteinte d'une valeur de NDVI associée à au moins 30 % de surface végétalisée
- impact d'un espace vert urbain spécifique.

## Atteinte d'une valeur cible de NDVI

Sous ces scénarios, on estime les impacts qui seraient observés si l'ensemble des Iris ayant une valeur de NDVI inférieur à la valeur cible atteignaient cette valeur cible. Les valeurs cibles considérées sont le percentile 50 et le percentile 90 de la distribution du NDVI, calculées sur l'ensemble de chaque zone, ou par type d'Iris (Tableau 7). Par exemple, on estime l'impact sur la mortalité si tous les Iris avec un NDVI inférieur au percentile 90 de NDVI de la zone atteignaient ce percentile 90 (les Iris avec un NDVI déjà supérieur ou égal à ce percentile ne sont pas impactés par ce scénario).

Par la suite les résultats pour le percentile 90 sont présentés dans le corps du texte, et les résultats pour le percentile 50 en Annexe 2.

Par ailleurs, compte tenu du lien observé entre défaveur sociale et NDVI (cf. résultats) notamment dans les Iris denses et intermédiaires, ces percentiles sont également calculés dans les Iris les plus favorisés (1<sup>er</sup> quintile de FDep). Cette analyse n'a pas été réalisée pour les Iris peu denses, car ils sont très peu nombreux dans le 1<sup>er</sup> quintile de FDep de chaque zone (5 à la MEL, 1 à 3M et 7 à MRN).

**Tableau 7. Valeurs cibles de NDVI pour les scénarios valeurs cibles**

| Tous les Iris |      |      | Par type d'Iris |      |                |      |            |      | Dans les Iris les plus favorisés socialement |      |                |      |
|---------------|------|------|-----------------|------|----------------|------|------------|------|----------------------------------------------|------|----------------|------|
|               |      |      | Denses          |      | Intermédiaires |      | Peu denses |      | Denses                                       |      | Intermédiaires |      |
|               | P50  | P90  | P50             | P90  | P50            | P90  | P50        | P90  | P50                                          | P90  | P50            | P90  |
| MEL           | 0,48 | 0,60 | 0,46            | 0,56 | 0,59           | 0,62 | 0,60       | 0,63 | 0,49                                         | 0,61 | 0,60           | 0,63 |
| 3M            | 0,38 | 0,49 | 0,37            | 0,44 | 0,42           | 0,52 | 0,50       | 0,54 | 0,39                                         | 0,49 | 0,50           | 0,54 |
| MRN           | 0,53 | 0,70 | 0,46            | 0,65 | 0,56           | 0,79 | 0,67       | 0,74 | 0,54                                         | 0,66 | 0,71           | 0,79 |

Lecture du tableau : à la MEL, la valeur médiane de NDVI (P50) est de 0,48, i.e. 50 % des Iris ont un NDVI inférieur et 50 % un NDVI supérieur à 0,48. Le percentile 90 (P90) est de 0,60, i.e. 90 % des Iris ont un NDVI inférieur, et 10 % un NDVI supérieur. 10 % des Iris denses ont un NDVI supérieur à 0,56, et 10 % des Iris denses et favorisés socialement ont un NDVI supérieur à 0,61.

## Atteinte d'une valeur cible de NDVI permettant de respecter les recommandations de l'OMS

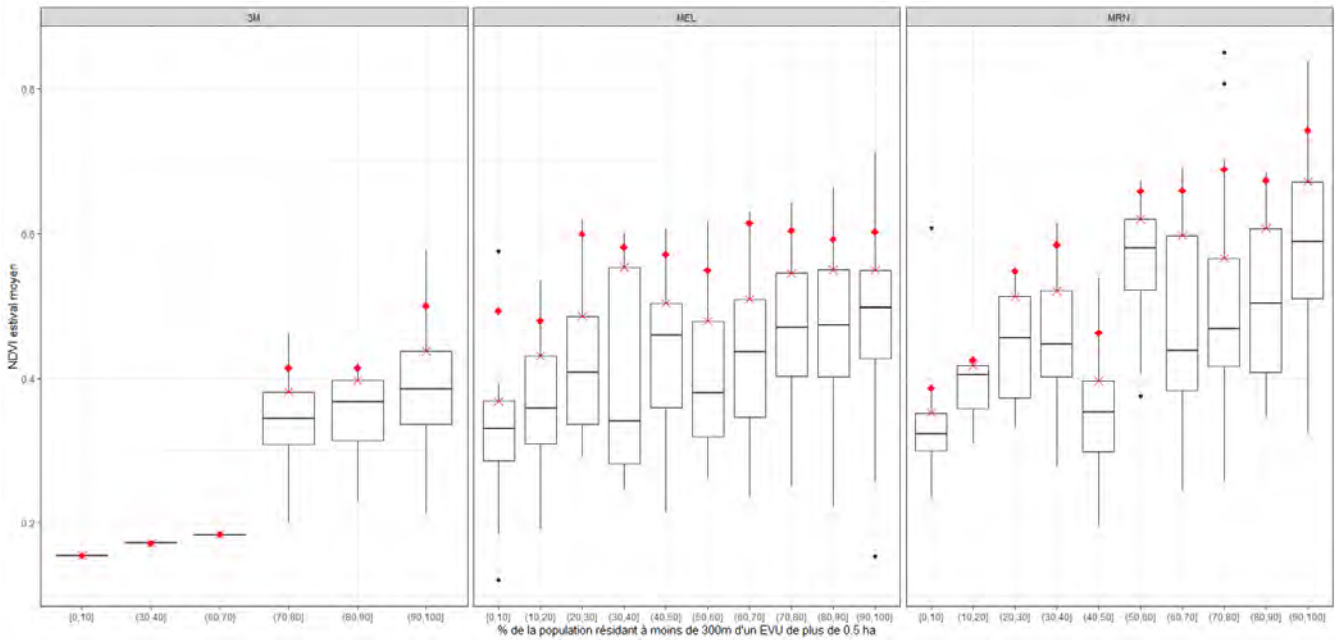
Pour ce scénario, il faut choisir une valeur de NDVI à l'Iris qui assurerait que toute la population de l'Iris résiderait à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 ha en NDVI. En effet, pour rappel, les études identifiées pour fournir la RER utilisent le NDVI pour estimer les expositions ; il n'a pas été identifié d'étude permettant de quantifier la relation entre santé et distance à un espace vert.

Il n'a pas été identifié dans la littérature de méthode adaptée pour faire ce choix. Il n'a pas été non plus possible de construire un modèle satisfaisant liant dans chaque Iris le niveau de NDVI moyen observé dans l'Iris et la part de population de l'Iris respectant la recommandation de l'OMS. La Figure 5 montre qu'en moyenne, plus le NDVI est élevé, plus la part de population de l'Iris respectant la recommandation de l'OMS est élevée. Cependant, des valeurs de NDVI très proches peuvent être associées à des parts de population respectant la recommandation de l'OMS très différentes. Dans chaque zone, le NDVI moyen des Iris où 100 % de la population respectent la recommandation de l'OMS (soit 32 Iris/504 à la MEL, 29/159 à 3M et 21/236 à la MRN) est proche du NDVI moyen de l'ensemble de la zone (respectivement 0,46 vs 0,47 à la MEL, 0,38 vs 0,38 à 3M, et 0,62 vs 0,53 à la MRN).

Pour choisir les valeurs de NDVI cibles de ce scénario, il est donc proposé de prendre les percentiles 75 et 90 des distributions du NDVI parmi les Iris où plus de 90 % de la population résident à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 ha (Figure 5). Cela permet de s'assurer que pour ces NDVI la majorité de la population habite à moins de 300 m quelle que soit la situation de l'Iris. Ces percentiles sont calculés d'une part pour l'ensemble de chaque zone, et d'autre part pour uniquement les Iris denses de chaque zone (pour se concentrer dans l'espace urbain qui est la cible de la recommandation de l'OMS) (Tableau 8). À noter que les valeurs cibles associées sont très proches de celles du scénario précédent.

Les résultats pour le percentile 90 seront présentés dans le texte principal, et les résultats pour le percentile 75 en Annexe 2.

**Figure 5. Distribution de NDVI dans les Iris selon la part de population résidant à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 ha. Les croix rouges représentent le percentile 75 du NDVI dans ces Iris, et les points rouges le percentile 90**



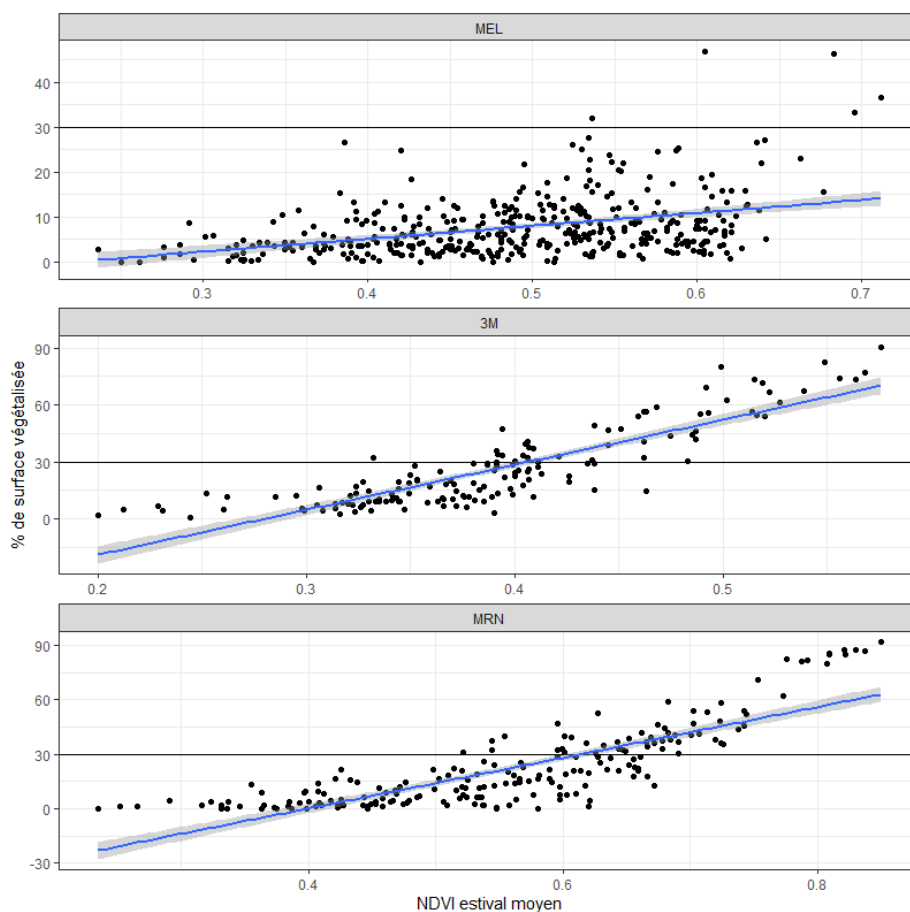
**Tableau 8. Valeur cibles de NDVI associées à une part important de population respectant la recommandation de l'OMS**

|     | Tous les Iris                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                    | Iris denses                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 75 <sup>e</sup> percentile de NDVI observé dans les Iris où plus de 90 % de la population résident à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 hectare | 90 <sup>e</sup> percentile de NDVI observé dans les Iris où plus de 90 % de la population résident à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 hectare | 75 <sup>e</sup> percentile de NDVI observé dans les Iris où plus de 90 % de la population résident à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 hectare | 90 <sup>e</sup> percentile de NDVI observé dans les Iris où plus de 90 % de la population résident à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 hectare |
| MEL | 0,55                                                                                                                                                               | 0,60                                                                                                                                                               | 0,53                                                                                                                                                               | 0,56                                                                                                                                                               |
| 3M  | 0,44                                                                                                                                                               | 0,50                                                                                                                                                               | 0,40                                                                                                                                                               | 0,44                                                                                                                                                               |
| MRN | 0,67                                                                                                                                                               | 0,74                                                                                                                                                               | 0,63                                                                                                                                                               | 0,68                                                                                                                                                               |

**Atteinte d'une valeur cible de NDVI associée à 30 % de surface végétalisée**

La [Figure 6](#) illustre dans chaque métropole la corrélation entre le pourcentage de surface végétalisée et le NDVI moyen observé dans chaque Iris. Pour estimer une valeur de NDVI associée à une surface végétalisée de 30 %, une régression linéaire simple entre la surface et le NDVI est utilisée. Ces régressions indiquent qu'un NDVI de 0,41 à 3M, et de 0,61 à la MRN prédit 30 % de surface végétalisée. À la MEL, trop peu d'Iris atteignent cette valeur de 30 % de surface végétalisée pour construire le modèle. La valeur moyenne de NDVI (0,68) observée dans ces Iris est donc utilisée comme valeur cible pour le scénario ([Tableau 9](#)).

**Figure 6. Pourcentage de surface végétalisée vs NDVI estival moyen – valeurs observées dans chaque Iris et régression linéaire**

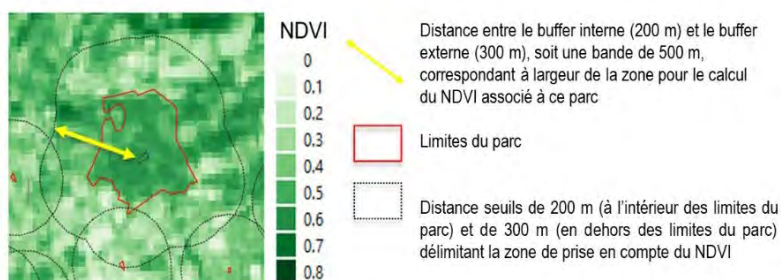


### Scénarios correspondants à des espaces verts spécifiques

Ce type de scénario se concentre sur les impacts liés à un espace vert existant ou en projet. Il s'agit alors d'estimer la taille de la population de 30 ans et plus résidant autour de cet espace vert, puis d'estimer le différentiel de NDVI induit par la présence de l'espace vert.

La majorité des études étudiant le lien entre espaces verts et mortalité estiment les expositions dans un rayon de 300 m ou 500 m autour du domicile (49). Afin de prendre en compte la taille de l'espace vert tout en restant cohérent avec ces seuils, le NDVI est estimé dans la zone située entre les limites de l'espace vert + 300 m et 200 m à l'intérieur de l'espace (Figure 7). Ainsi, dans les grands espaces verts urbains (diamètre >400 m) l'influence de la végétation la plus centrale, donc la plus éloignée de la population, n'est pas comptabilisée. La population résidant dans la zone de 300 m autour des limites de l'espace vert est estimée à partir des données de l'Insee.

**Figure 7. Délimitation de la zone autour et dans l'espace vert pour le calcul du NDVI associé à cet espace vert**



La valeur de NDVI sans l'espace vert est estimée à partir du NDVI moyen des Iris sans espace vert urbain de plus de 0,5 ha (Tableau 9). L'apport de NDVI par l'espace vert est estimé soit en prenant le NDVI moyen des espaces verts, soit en utilisant un espace vert auquel le projet est censé ressembler à terme, soit à partir de la table de correspondance type de végétation – NDVI présentée en Annexe 1. Cette table a été construite en croisant les valeurs de NDVI observées avec plusieurs bases de données d'occupation des sols. Lorsque cela a été possible, des espaces existants ressemblant à l'espace en projet ont également été identifiés pour fixer une valeur de NDVI scénarisé.

**Tableau 9. Valeurs moyennes de NDVI observées dans les Iris en enlevant les espaces verts urbains de plus de 0,5 ha et dans les espaces verts urbains de plus de 0,5 ha**

|     | Valeur cible de NDVI pour les scénarios de 30 % de surface végétalisée | NDVI moyen des espaces verts urbains de plus de 0,5 ha | NDVI moyen des Iris sans espace vert urbains de plus de 0,5 ha |
|-----|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| MEL | 0,68                                                                   | 0,57                                                   | 0,45                                                           |
| 3M  | 0,41                                                                   | 0,42                                                   | 0,34                                                           |
| MRN | 0,61                                                                   | 0,54                                                   | 0,48                                                           |

### 3.2.5 Analyses de sensibilité

Les analyses de sensibilité utilisent les RER et les valeurs cibles alternatives décrites dans les paragraphes précédents.

## 3.3 Résultats

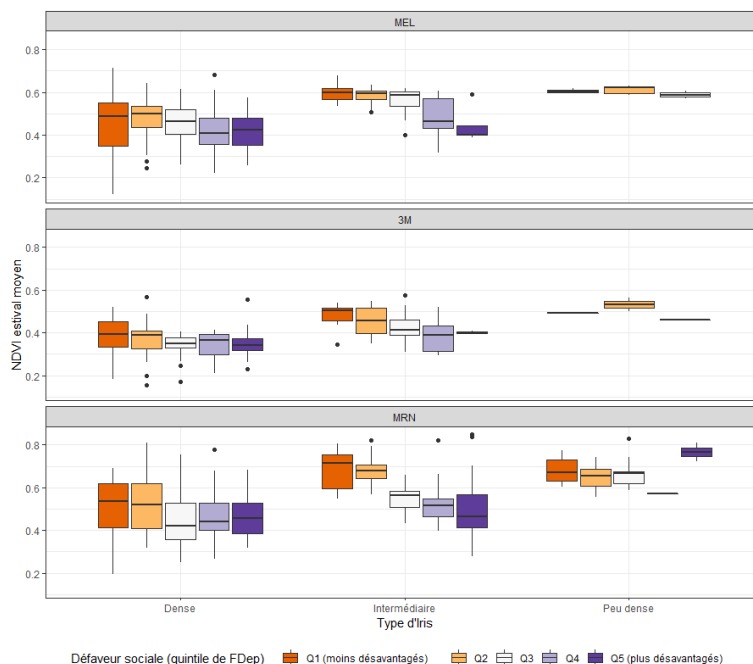
### 3.3.1 Analyses descriptives

#### **NDVI - Normalized Difference Vegetation Index**

À la MEL, le NDVI moyen dans les espaces verts urbains de plus de 0,5 ha est de 0,57, et le NDVI moyen dans les Iris hors espaces verts urbains de plus de 0,5 ha est de 0,45. À 3M, ces valeurs sont respectivement de 0,42 et 0,34, et à la MRN de 0,54 et 0,48 (Tableau 9).

Dans toutes les zones, on observe, dans les Iris denses et intermédiaires, une tendance à des valeurs de NDVI plus élevées dans les zones moins défavorisées socialement (Figure 8). Ces différences sont plus marquées dans les Iris de densité intermédiaire. À la MEL, le NDVI est en moyenne de 0,6 dans les Iris intermédiaires les plus favorisés (1<sup>er</sup> quintile de FDep) et de 0,44 dans les plus défavorisés (5<sup>e</sup> quintile de FDep). À 3M, le NDVI moyen dans les Iris intermédiaires les plus favorisés est de 0,48, vs 0,40 dans les plus défavorisés. À la MRN, ces valeurs sont respectivement de 0,68 et 0,52.

**Figure 8. NDVI moyen estival par type d'Iris et quintiles de défaveur sociale**



### Part de population résidant à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 ha

Dans toutes les zones, selon les Iris, la part de la population vivant à moins de 300 m d'un espace vert de plus de 0,5 ha, tel que recommandé par l'OMS, varie de 0 à 100 %. Au total, 80 % de la population de la MEL, 95 % de la population de 3M et 75 % de la population de la MRN résident à moins de 300 m d'un espace vert de plus de 0,5 ha. Cet indicateur ne présente pas de lien clair avec la défaveur sociale (Figure 9).

### Proportion de surface végétalisée

En moyenne, les Iris de la MEL ont une surface végétalisée plus faible que ceux de 3M et ceux de MRN, reflétant le caractère plus agricole de cette métropole (les surfaces agricoles étant exclues du calcul de surface végétalisée) (Tableau 10). Seuls 5 Iris de la MEL (sur 415) ont une surface végétalisée supérieure ou égale à 30 %, vs 47 Iris de la 3M (sur 148), et 61 de la MRN (sur 199). Ainsi, 0,6 % de la population de la MEL résident dans un Iris avec plus de 30 % de surface végétalisée, vs respectivement 27 et 25 % à 3M et MRN.

Comme pour le NDVI, on note que les Iris de densité intermédiaire plus défavorisés ont une surface végétalisée plus faible (Figure 10).

Figure 9. Part de la population résidant à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 ha par type d'Iris et quintiles de défaveur sociale

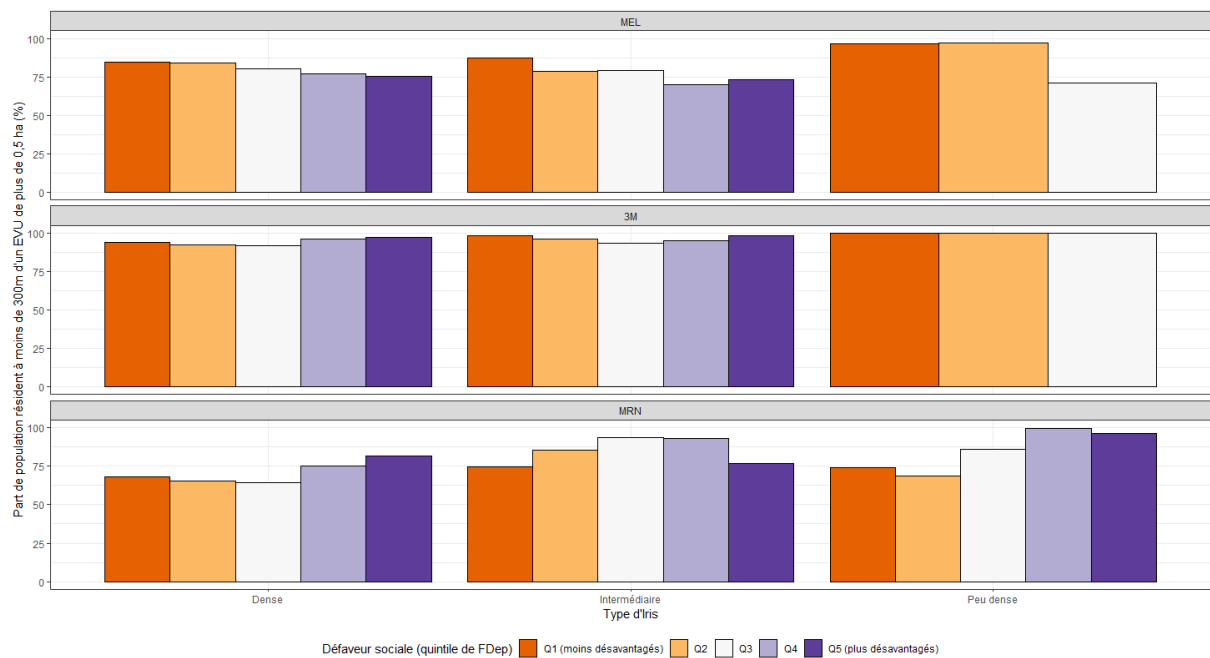
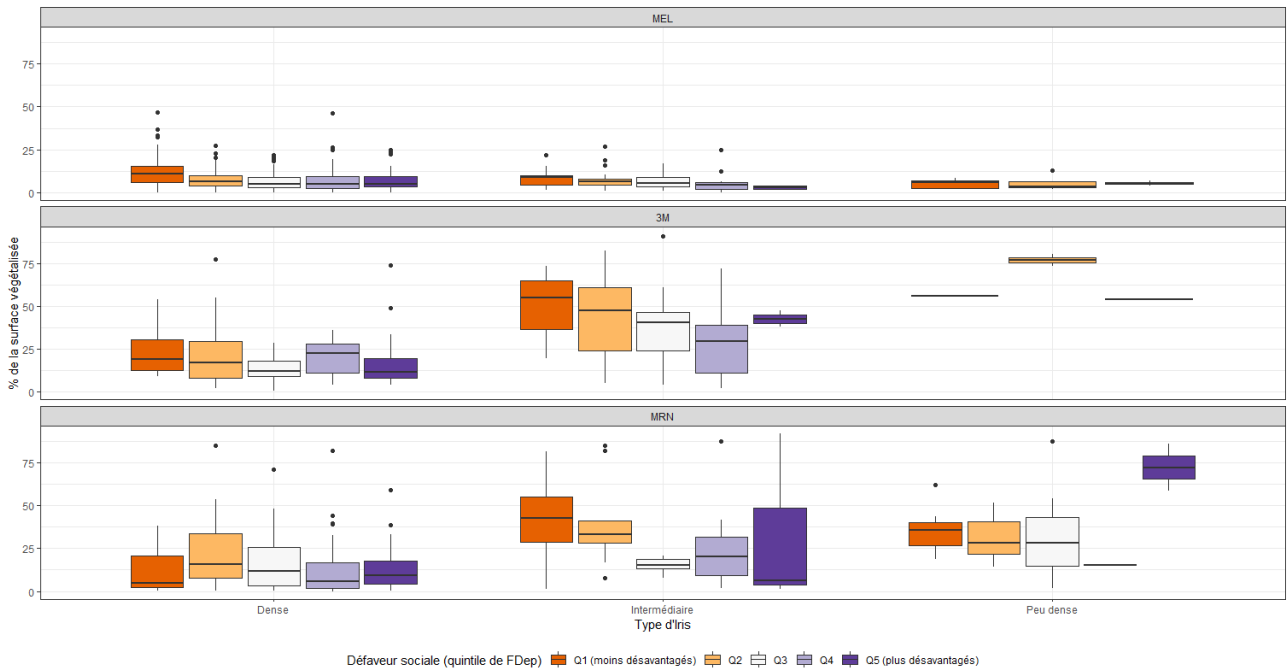


Tableau 10. NDVI moyen, Part de la population résidant à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 ha, et part de surface végétalisée par zone d'étude et type d'Iris

| Type d'Iris   | MEL        |                        |                                         | 3M         |                        |                                         | MRN        |                        |                                         |
|---------------|------------|------------------------|-----------------------------------------|------------|------------------------|-----------------------------------------|------------|------------------------|-----------------------------------------|
|               | NDVI moyen | Part de population (%) | Part de surface végétalisée moyenne (%) | NDVI moyen | Part de population (%) | Part de surface végétalisée moyenne (%) | NDVI moyen | Part de population (%) | Part de surface végétalisée moyenne (%) |
| Dense         | 0,47       | 88                     | 8                                       | 0,37       | 96                     | 19                                      | 0,48       | 82                     | 16                                      |
| Intermédiaire | 0,56       | 81                     | 7                                       | 0,43       | 95                     | 39                                      | 0,57       | 89                     | 29                                      |
| Peu dense     | 0,61       | 91                     | 5                                       | 0,50       | 100                    | 66                                      | 0,67       | 85                     | 34                                      |

Figure 10. Pourcentage moyen de surface végétalisée par type d'Iris et quintiles de défaveur sociale



## Données de mortalité

L'Iris étant l'échelle de calcul initiale pour cette ÉQIS, la mortalité annuelle moyenne 2015-2017 est estimée à l'Iris. En moyenne annuelle, avec les estimations à l'Iris, entre 2015 et 2017, 8 254 décès étaient estimés chez les personnes de 30 ans et plus à la MEL, 3 006 à 3M et 4 356 à la MRN (Tableau 11).

**Tableau 11. Décès des 30 ans et plus annuels moyens 2015-2017, par type de commune, comparaison des valeurs à la commune et à l'Iris**

|               | MEL                    |                    | 3M                     |                    | MRN                    |                    |
|---------------|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
|               | Décès estimés à l'Iris | Décès à la commune | Décès estimés à l'Iris | Décès à la commune | Décès estimés à l'Iris | Décès à la commune |
| Dense         | 6 692                  | 6 700              | 2 142                  | 2 174              | 2 951                  | 2 941              |
| Intermédiaire | 1 416                  | 1 462              | 812                    | 839                | 979                    | 1 053              |
| Peu dense     | 146                    | 110                | 52                     | 41                 | 426                    | 359                |
| Total         | 8 254                  | 8 273              | 3 006                  | 3 054              | 4 356                  | 4 353              |

### 3.3.2 Bénéfices pour la santé d'atteindre une valeur de NDVI observée dans la zone

#### Bénéfices si tous les Iris d'une zone d'étude atteignent au moins le P90 du NDVI sur la zone

Si tous les Iris atteignaient la valeur de NDVI minimale observée dans les 10 % d'Iris les plus végétalisés, 421 [317 : 626] décès seraient évités à la MEL, 135 [102 : 202] à 3M et 313 [236 : 461] à MRN, soit une baisse de la mortalité annuelle de 5,1 % [3,8 : 7,2] à la MEL, 4,5 [3,4 : 6,7] % à 3M et 7,2 [5,4 : 10,6] % à la MRN (Tableau 12).

**Tableau 12. Décès évitables chaque année si les Iris atteignent au moins le P90 de chaque zone**

|     | Si tous les Iris atteignent au moins le P90 de la distribution de NDVI |                        |                                    |
|-----|------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
|     | Valeur cible de NDVI                                                   | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL | 0,60                                                                   | 421 [317 : 626]        | 5,1 [3,8 : 7,2]                    |
| 3M  | 0,49                                                                   | 135 [102 : 202]        | 4,5 [3,4 : 6,7]                    |
| MRN | 0,70                                                                   | 313 [236 : 461]        | 7,2 [5,4 : 10,6]                   |

Lecture du tableau : si chaque Iris de la MEL avec un NDVI inférieur à 0,60 atteignait 0,60, 421 décès seraient évités (intervalle de confiance [317 : 626]) chaque année, ce qui représente 5,1 % de la mortalité annuelle totale des 30 ans et plus de la MEL.

#### Bénéfices si tous les Iris d'une zone d'étude atteignent au moins le P90 du NDVI des Iris de même densité

Avec une valeur cible au percentile 90, les bénéfices dans les Iris denses seraient respectivement de 4,6 [3,4 : 6,8] %, 3,4 [2,6 : 5,1] % et 6,7 [4,1 : 9,9] % de mortalité évitable à la MEL, 3M et MRN. À la MEL et 3M, les bénéfices seraient plus faibles dans les Iris intermédiaires, mais pourraient représenter 8,6 [6,5 : 12,7] % à la MRN (Tableau 13).

**Tableau 13. Décès évitables chaque année si les Iris atteignaient au moins le P90 des Iris de même densité**

|     | Iris denses          |                        |                                    | Iris intermédiaires  |                        |                                    | Iris peu denses      |                        |                                    |
|-----|----------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|
|     | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL | 0,56                 | 319 [240:474]          | 4,6 [3,4:6,8]                      | 0,62                 | 38 [28 :55]            | 2,6 [1,9:3,9]                      | 0,63                 | 2 [1:3]                | 1,2 [0,9:1,8]                      |
| 3M  | 0,44                 | 81 [61:121]            | 3,4 [2,6:5,1]                      | 0,52                 | 32 [24 :48]            | 3,8 [2,9:5,7]                      | 0,54                 | 1 [1:2]                | 1,8 [1,3:2,7]                      |
| MRN | 0,65                 | 197 [149:292]          | 6,7 [4,1:9,9]                      | 0,79                 | 84 [64:124]            | 8,6 [6,5:12,7]                     | 0,74                 | 13 [10:20]             | 3,1 [2,3 4,6]                      |

### 3.3.3 Bénéfices si tous les Iris atteignaient une valeur cible de NDVI associée au respect de la recommandation de l'OMS

Si tous les Iris atteignaient au moins la valeur de NDVI observée dans les 10 % des Iris où plus de 90 % de la population réside à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 ha, la mortalité évitable chaque année serait de l'ordre de 5,1 % [3,6 : 7,6] à la MEL, 4,9 % [3,7 : 7,2] à 3M, et 8,6 % [6,5 : 12,6] à la MRN (Tableau 14).

**Tableau 14. Décès évitables chaque année si les Iris atteignaient au moins le P90 de NDVI observé dans les Iris où plus de 90 % de la population résident à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 hectare**

| Tous les Iris |                      |                        |                                    | Restriction aux Iris denses |                        |                                    |
|---------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------------|
|               | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Valeur cible de NDVI        | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL           | 0,60                 | 421 [317 : 626]        | 5,1 [3,6 : 7,6]                    | 0,56                        | 296 [223 : 440]        | 4,4 [3,3 : 6,6]                    |
| 3M            | 0,50                 | 146 [110 : 217]        | 4,9 [3,7 : 7,2]                    | 0,44                        | 73 [55 : 109]          | 3,4 [2,6 : 5,1]                    |
| MRN           | 0,74                 | 374 [283 : 550]        | 8,6 [6,5 : 12,6]                   | 0,68                        | 229 [173 : 337]        | 7,7 [5,9 : 11,4]                   |

### 3.3.4 Bénéfices si tous les Iris atteignaient une valeur cible de NDVI associée à 30 % de surface végétalisée

Sous ce scénario, la mortalité évitable chaque année serait de l'ordre de 8,1 [6,1 : 11,9] % à la MEL, 2,0 [1,5 : 2,9] % à 3M, et 4,4 [3,3 : 6,4] % à la MRN (Tableau 15).

**Tableau 15. Décès évitables chaque année si les Iris atteignent une valeur de NDVI associée à 30 % de surface végétalisée**

| Tous les Iris |                      |                        |                                    |
|---------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|
|               | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL           | 0,68                 | 667 [504 : 985]        | 8,1 [6,1 : 11,9]                   |
| 3M            | 0,41                 | 59 [44 : 88]           | 2,0 [1,5 : 2,9]                    |
| MRN           | 0,61                 | 188 [142 : 279]        | 4,3 [3,3 : 6,4]                    |

### 3.3.5 Bénéfices liés à des espaces verts urbains spécifiques

Les espaces verts étudiés sont soit des espaces déjà existants, soit des espaces en projet de réaménagement, voire de création. Les valeurs de NDVI scénarisés correspondent aux valeurs moyennes observées dans des espaces similaires, ou au NDVI d'un espace vert spécifique identifié comme ressemblant au projet à venir lorsque cela a été possible.

Chacun des espaces verts urbains étudiés permet (ou permettrait dans le cas des projets) d'éviter un à deux décès chaque année, soit de 1,6 % à 5,9 % de la mortalité pour les personnes vivant à moins de 300 m chaque année (Tableau 16). Ces bénéfices sont importants compte tenu de la faible population à laquelle ils s'appliquent.

**Tableau 16. Décès évitables chaque année en lien avec des espaces verts urbains spécifiques**

|            | Espace vert                                    | Type d'espace                                                                               | Population de 30 ans et plus résidant à moins de 300 m | NDVI estimé sans l'espace vert | NDVI estimé avec l'espace vert (existant ou selon le projet) | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitée (%) |
|------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| <b>MEL</b> | Terrain rue de la haute loge                   | Projets de plantations d'arbres                                                             | 1 915                                                  | 0,45                           | 0,6 (valeur moyenne des espaces boisés)                      | 2 [1 :2]               | <b>5,9%</b>                      |
|            | Parc des Sarts/Square Devos/Jardin des Acacias | Trois parcs urbains reliés combinant espaces boisés et pelouses avec projets de plantations | 2 610                                                  | 0,45                           | 0,58 (Parc Jean-Baptiste Lebas)                              | 2 [1 :2]               | <b>5,2%</b>                      |
| <b>3M</b>  | Parc René Dumont                               | Espace récent avec jeunes arbres et aires de jeux                                           | 2 377                                                  | 0,34                           | 0,38 (parc de l'hôtel de ville)                              | 1 [0 :1]               | <b>1,6%</b>                      |
| <b>MRN</b> | Bois de la Garenne                             | Espace boisé                                                                                | 2 459                                                  | 0,48                           | 0,6 (valeur moyenne des espaces boisés)                      | 2 [1 :3]               | <b>4,8%</b>                      |
|            | Bois de Landry                                 |                                                                                             | 1 223                                                  | 0,48                           | 0,6 (valeur moyenne des espaces boisés)                      | 1 [1 :1]               | <b>4,8%</b>                      |
|            | Bois des Anémones                              |                                                                                             | 1 210                                                  |                                |                                                              | 1 [1 :1]               | <b>4,8%</b>                      |
|            | Jardin des plantes                             | Jardin botanique, espaces mixtes avec une canopée et des pelouses                           | 4 283                                                  | 0,48                           | 0,54 (valeur moyenne des parcs)                              | 1 [1 :1]               | <b>2,4%</b>                      |
|            | Parc des Bruyères                              | Espaces récents avec jeunes arbres et aires de jeux                                         | 1 657                                                  | 0,48                           | 0,61 (Parc Grammont)                                         | 1 [1 :1]               | <b>5,2%</b>                      |
|            | Parc des Chartreux                             | Espace boisé                                                                                | 1 202                                                  | 0,48                           | 0,54 (valeur moyenne des parcs)                              | 0,4 [0 :1]             | <b>2,4%</b>                      |

### 3.3.6 Analyses de sensibilité

#### Influence de la RER

Le [Tableau 17](#) reprend pour le scénario d'atteinte du P90 du NDVI de l'ensemble de chaque zone pour les risques relatifs alternatifs. Selon le RR choisi, les estimations peuvent être de l'ordre de quatre fois plus faibles, ou deux fois plus élevés. Des ratios similaires s'appliquent pour tous les scénarios, et ne sont pas présentés ici.

**Tableau 17. Décès évitables chaque année si les Iris atteignent au moins le P90 de chaque zone selon la valeur de la relation exposition risque**

| RER (RR pour 0,1 NDVI) |                        |                                    |                        |                                    |                        |                                    |
|------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Valeur cible de NDVI   | 0,96 [0,94 : 0,97]     |                                    | 0,92 [0,89 : 0,97]     |                                    | 0,99 [0,98 : 0,99]     |                                    |
|                        | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL 0,60               | 421 [317: 626]         | 5,1 [3,8;7,2]                      | 826 [317:1 119]        | 10,0 [3,8;13,6]                    | 107 [107:213]          | 1,3 [1,3;2,6]                      |
| 3M 0,49                | 135 [102:202]          | 4,5 [3,4;6,7]                      | 267 [102:364]          | 8,9 [3,4;12,1]                     | 34 [34:68]             | 1,1 [1,1;2,3]                      |
| MRN 0,70               | 313 [236: 461]         | 7,2 [5,4;10,6]                     | 605 [236:811]          | 13,9 [5,4;18,6]                    | 80 [80:159]            | 1,8 [1,8;3,6]                      |

Lecture du tableau : à la MEL, en utilisant une RER de 0,96 [0,94 : 0,97] pour une augmentation de 0,1 NDVI, atteindre partout 0,60 NDVI permettrait d'éviter 421 [intervalle de confiance à 95 % 317 : 626] décès par an, soit 5,1 % de la mortalité totale. En prenant une RER associée à une baisse plus importante de la mortalité (0,92 [0,89 : 0,97] pour 0,1 NDVI), ce sont 826 [317 : 1 119] décès qui seraient évités chaque année. Mais avec une RER estimant une baisse plus faible de la mortalité (0,99 [0,98 : 0,99] pour 0,1 NDVI), seuls 107 [107 : 213] décès seraient évités chaque année.

## 3.4 Discussion

### 3.4.1 Des bénéfices potentiellement importants

Les différents indicateurs de végétation étudiés (NDVI estival moyen, part de population résidant à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 ha, part de surface végétalisée) sont variables selon les zones, mais sont globalement plus faibles dans les Iris denses.

L'analyse montre que l'augmentation des niveaux de NDVI dans chaque métropole peut être associée à des bénéfices importants en termes de mortalité évitable, de l'ordre de plusieurs dizaines à centaines de décès chaque année selon la zone et le scénario. Par exemple, si dans chaque zone tous les Iris atteignaient au moins le niveau de NDVI observé dans les 10 % d'Iris les plus végétalisés de même densité, environ 325 décès seraient évités chaque année à la MEL, 114 à 3M et 295 à MRN, soit respectivement 4,0 %, 3,7 % et 6,8 % de mortalité évitable. Les bénéfices seraient relativement plus importants dans les Iris plus défavorisés, avec par exemple à la MEL une fraction de mortalité évitable sous ce scénario de l'ordre de 7,0 % dans les Iris des 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> quintiles de FDep, vs moins de 4,3 % dans les Iris des trois premiers quartiles de FDep (Tableau 18).

Les résultats suggèrent également que des efforts de végétalisation concentrés dans les zones densément peuplées pourraient se traduire par des bénéfices sanitaires importants.

**Tableau 18. Décès évitables chaque année si les Iris atteignaient au moins le P90 des Iris de même densité de chaque zone, résultats stratifiés par quintile de défaveur sociale**

|     | Iris moins défavorisés (1 <sup>er</sup> quintile) |                                    | 2 <sup>e</sup> quintile |                                    | 3 <sup>e</sup> quintile |                                    | 4 <sup>e</sup> quintile |                                    | Iris plus défavorisés (5 <sup>e</sup> quintile) |                                    |
|-----|---------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|
|     | Décès évités [IC 95 %]                            | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités [IC 95 %]  | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités [IC 95 %]  | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités [IC 95 %]  | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités [IC 95 %]                          | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL | 53 [40: 78]                                       | 3,4 [2,6;5,0]                      | 47 [35:70]              | 2,5 [1,9;3,7]                      | 67 [51:101]             | 3,6 [3,3;6,6]                      | 100 [75:140]            | 5,9 [4,4;8,7]                      | 91 [69:135]                                     | 5,8 [4,4;8,7]                      |
| 3M  | 16 [12:24]                                        | 2,3 [1,7;3,4]                      | 17 [13:26]              | 2,8 [2,1;4,3]                      | 25 [19:38]              | 3,9 [2,9;5,9]                      | 31 [23:46]              | 4,6 [3,4;6,9]                      | 25 [19:38]                                      | 3,8 [2,9;5,8]                      |
| MRN | 50 [38:74]                                        | 5,0 [3,8;7,3]                      | 48 [36:72]              | 5,5 [4,1;8,3]                      | 68 [51:100]             | 7,2 [5,4;10,6]                     | 68 [52:101]             | 8,3 [6,3;10,3]                     | 61 [46:90]                                      | 7,3 [5,5;10,7]                     |

Les scénarios locaux estiment qu'un espace vert peut contribuer à éviter entre 1 et 2 décès par an parmi la population résidente, soit entre 1,6 % et 5,9 % de la mortalité annuelle selon les cas. Ces résultats soulignent l'importance pour la population riveraine des espaces existants, et l'intérêt de développer de nouveaux espaces. Les bénéfices sont d'autant plus importants que les espaces présentent des niveaux de NDVI élevés, correspondant en particulier à des espaces boisés.

Cette étude n'a quantifié que les effets sur la mortalité, mais des bénéfices des espaces verts sont également documentés sur la morbidité, la santé cardiovasculaire, la santé mentale et le bien-être (37, 42, 44, 45, 61, 64, 70-73).

La définition des espaces verts urbains devrait conduire à restreindre les analyses en zones urbaines : la présence de végétation peut correspondre à des situations très différentes en zones rurales et en zones périurbaines. En zone rurale, les espaces agricoles peuvent être associés à des risques pour la santé (épandage de produits phytosanitaires par exemple), et ne jouent pas nécessairement de rôle de régulation de la chaleur par exemple, ou de promotion de l'activité physique. Or, à partir du seul NDVI, il n'est pas possible de distinguer les espaces agricoles des autres types de végétations. De plus, l'accès à une zone de végétation « de loisir » n'est pas garanti pour toute la population dans les zones rurales. Le choix a donc été fait ici de considérer l'ensemble des Iris dans les analyses, en proposant des scénarios variant selon la densité de population, ou se limitant aux Iris denses en analyse de sensibilité. Les résultats soulignent l'intérêt d'augmenter les espaces verts urbains dans les Iris denses, mais également dans les Iris intermédiaires, où le déficit de végétation est par ailleurs associé à des inégalités sociales. Enfin, cette étude ne s'est intéressée qu'aux espaces verts, mais des travaux suggèrent également un rôle bénéfique des espaces bleus pour la santé (74). Par exemple, en Écosse les promenades le long des rivières et des canaux sont associées à une amélioration de la santé mentale déclarée (75).

### 3.4.2 Des incertitudes multiples

La principale incertitude vient de la difficulté à choisir correctement la valeur de NDVI la plus appropriée pour chaque scénario. Les scénarios de type « atteinte d'une valeur de NDVI observée dans la zone » ne sont pas concernés par cette incertitude. Mais pour les scénarios de type « respect de la valeur guide de l'OMS » ou « respect d'une surface végétalisée d'au moins 30 % », cette incertitude est très importante, et le choix de la valeur cible relativement arbitraire. Par exemple, le choix d'utiliser une relation linéaire pour estimer la valeur de NDVI prédisant une surface végétalisée d'au moins 30 % peut être discuté dans certaines zones. De plus, le NDVI est un indicateur global de la présence de végétation, mais il ne permet pas de caractériser finement la diversité des types d'espaces verts et de végétations.

Le choix de la RER utilisé pour la quantification des impacts conduit également à des variations conséquentes des résultats. Les estimations peuvent être sept fois plus importantes en utilisant les RR les plus faibles de la littérature vs les plus élevés. La valeur principale utilisée issue d'une méta-analyse internationale est jugée aujourd'hui la plus robuste disponible, malgré une hétérogénéité dans les méthodes des études prises en compte, et dans l'étendue des RR.

Une part des impacts positifs des espaces verts urbains sur la santé dépend *a priori* de facteurs culturels liés à l'utilisation de ces espaces : les fonctions de renforcement des capacités, de restauration supposent une utilisation active de l'espace vert, et une perception positive de ces espaces. Quant à la fonction d'atténuation de l'exposition, elle dépend de facteurs environnementaux et topographiques, mais également culturels (qui conditionnent le type de paysage des espaces verts, ou encore leur implantation dans la ville). Tous ces éléments sont susceptibles de jouer sur la transposabilité d'une RER obtenue dans une ville à un autre contexte géographique et culturel. L'incertitude propre à la RER est par ailleurs prise en compte par le biais de l'intervalle de confiance de la RER. Pour réduire simultanément ces incertitudes, il faudrait mener davantage d'études épidémiologiques, s'appuyant sur divers indicateurs d'expositions à la végétation (76), et non uniquement sur le NDVI.

Enfin, les calculs s'appuient sur des données de populations à l'Iris, auquel on applique les taux de mortalité de la commune, avec les incertitudes associées décrites au 2.10. Cette incertitude est cependant faible par rapport à celles induites par la RER, et par les choix au niveau des scénarios.

### 3.4.3 Caractéristiques des espaces verts urbains favorables à la santé

Avec le NDVI, les espaces verts urbains sont approchés uniquement par la dimension présence / absence de végétation. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) souligne que plusieurs caractéristiques des espaces verts urbains sont utiles à prendre en compte (taille de l'espace vert, présence interne de zones bleues, qualité environnementale en termes de biodiversité...), mais il n'est aujourd'hui pas possible de quantifier leurs contributions au bénéfice sanitaire global (37). En pratique, pour que les espaces verts urbains aient un bénéfice réel, il faut qu'ils agissent sur la réduction des expositions (bruits, chaleur, pollution), ou qu'ils améliorent l'activité physique, la santé mentale, le bien-être ou les relations sociales.

La capacité d'un espace vert à réduire les expositions à la pollution de l'air ou à la chaleur dépend de la taille de cet espace, du type de végétation, et du contexte topographique et environnemental (39, 73, 77).

Par ailleurs, plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer le rôle positif des espaces verts, en particulier sur la santé mentale : 1) les paysages naturels seraient perçus comme plus cohérents et plus intéressants que des paysages artificiels, 2) les paysages liés à l'évolution de l'espèce, i.e. avec de l'eau, de la végétation, des espaces variés offrant des refuges seraient plus rassurants, 3) l'exposition à des éléments physiques, chimiques et biologiques émis naturellement par les espaces naturels serait positive pour la santé (78). Sur la base de ces hypothèses, plusieurs pistes ont été proposées pour concevoir des espaces verts urbains favorables à la santé mentale et à la biodiversité (79-82). Ces deux objectifs peuvent d'ailleurs être contradictoires. Ainsi, la richesse, la diversité et le type de végétation peuvent être selon les études perçues comme favorables ou défavorables à la santé mentale, le sentiment de sécurité perçu dans les espaces verts urbains semblant être l'élément central déterminant le sens de l'impact. Les espaces très entretenus semblent perçus comme plus positifs pour la santé mentale, alors qu'ils sont moins favorables à la biodiversité (80). Le sentiment de sécurité et la perception d'espaces esthétiques semblent également déterminants dans le rôle des espaces verts urbains sur l'amélioration des liens sociaux (83).

La contribution positive (par contraste aux travaux examinant les problématiques liées aux zoonoses ou aux allergies) de la faune et de la flore à la santé fait enfin l'objet de peu de travaux (80). En Allemagne, les scores d'une mesure de plusieurs dimensions de la santé mentale sont meilleurs dans les zones présentant une plus grande diversité d'espèces végétales et aviaires (84). Une étude au Royaume-Uni a mis en évidence une déclaration plus fréquente d'émotions positives dans les espaces verts urbains présentant une plus grande diversité aviaire, des habitats plus variés, ou perçus comme présentant une plus grande richesse biologique (cette perception pouvant être différente de la richesse biologique réelle) (78). La littérature met également en avant le rôle positif des sons naturels sur la santé mentale, en particulier les chants d'oiseaux, et les sons liés au vent et à l'eau (80, 85, 86).

Les bénéfices pour la santé des espaces verts semblent également plus importants pour les personnes présentant des scores plus élevés dans des échelles mesurant la connexion avec la nature, ou l'engagement avec la beauté naturelle (78, 87). Ceci suggère qu'un accompagnement de la population pour développer ces compétences pourrait permettre d'augmenter les bénéfices pour la santé mentale associés aux espaces verts urbains. On note cependant l'absence d'étude française sur l'ensemble de ces questions, qui sont a priori fortement conditionnés par le contexte socioculturel (82).

La lumière artificielle nocturne, inversement corrélée à la présence de végétation, pourrait également expliquer une part des bénéfices des espaces verts urbains sur la santé, et ce paramètre devrait être pris en compte dans les aménagements (la lumière artificielle ayant également des effets négatifs sur l'organisme) (88).

### 3.4.4 Liens avec les inégalités sociales de santé

Les analyses descriptives montrent un fort gradient de NDVI en fonction de la défaveur sociale, tandis que les résultats des ÉQIS soulignent des bénéfices attendus plus importants pour les populations les plus défavorisées. De manière plus globale, dans les villes européennes, la qualité de vie des habitants est positivement associée au NDVI moyen, avec une association plus forte dans les villes plus défavorisées économiquement. Des augmentations même modestes de NDVI dans les quartiers les plus défavorisés pourraient être associées à une amélioration significative de la qualité de vie perçue, et être un outil de réduction de justice environnementale (70).

Cependant, les risques de gentrification en lien avec la végétalisation ne doivent pas être occultés. Des travaux suggèrent que les bénéfices pour la santé des espaces verts urbains (mesurés via la santé déclarée) sont plus importants pour les personnes plus éduquées et plus favorisées économiquement dans les quartiers en cours de gentrification. Les auteurs suggèrent que l'utilisation active des espaces verts, qui contribue à l'amélioration de la santé, est différenciée socialement et culturellement, avec des mécanismes d'exclusion sociale qui limitent l'usage de ces espaces par les populations les plus défavorisées (89, 90). Les études épidémiologiques suggèrent qu'en Europe et en Amérique du Nord, les bénéfices de résider à proximité d'un espace vert urbain soient plus importants pour les femmes (91).

Enfin, une étude récente au Royaume-Uni souligne que les espaces verts existants dans les zones les plus défavorisées ont moins de chance d'être protégés dans les différents documents d'urbanisme, que ceux situés dans les zones plus favorisées. Compte tenu de l'importance des bénéfices pour la mortalité induits par les espaces verts pour les populations riveraines, ces espaces devraient être davantage protégés et végétalisés (92), en particulier dans les zones les plus défavorisées.

Une meilleure compréhension des déterminants économiques et sociaux (y compris de genre) impliqués dans l'usage des espaces verts urbains en France serait nécessaire pour appliquer des politiques favorables à tous.

### 3.4.5 Liens avec les autres déterminants

Les bénéfices sanitaires des espaces verts urbains intègrent plusieurs dimensions possibles, notamment le rôle de régulation de ces espaces vis-à-vis de la chaleur. L'influence des espaces verts urbains sur la température alentour est cependant limitée, et conditionnée par le type d'espace vert, sa taille, et les conditions atmosphériques observées ponctuellement (l'effet de la végétation sur la température des zones voisines est plus important lorsque la turbulence atmosphérique est faible).

L'influence de la végétation en ville sur la pollution de l'air est complexe, et dépend là encore du type d'espace vert, des essences impliquées, et de la topographie de la ville. Si la végétation peut piéger une partie des polluants particuliers et gazeux (93), elle peut également conduire localement à une dégradation de la qualité de l'air (par exemple, dans le cas des rues canyons) (77, 94). La végétation émet également des précurseurs de l'ozone, et, dans des villes plus végétalisées, sous un climat plus chaud, et avec moins de voitures<sup>6</sup>, la contribution de la végétation à la production d'ozone pourrait augmenter. L'influence de la végétation sur la pollution de l'air dépend donc du type d'espace vert, des essences, de la topographie, de l'occupation des sols, de l'orientation des bâtiments, du climat urbain, et des sources de pollution (95). Par ailleurs, la pollution de l'air affecte la croissance des plantes, et dégrade la santé des écosystèmes terrestres et aquatiques (95). Le bruit pourrait également avoir des effets délétères sur la végétation et la biodiversité.

---

<sup>6</sup> Les NOx émis par les voitures thermiques détruisent l'ozone, mais posent par ailleurs des effets propres pour la santé et l'environnement.

### 3.4.6. Analyse de la faisabilité et de la pertinence d'ÉQIS sur les espaces verts

Les données de NDVI mobilisées dans cette étude ont été produites par l'Inserm dans le cadre d'un projet de recherche (65). D'autres sources de données de NDVI sont disponibles à des résolutions spatiales diverses, mais nécessitent des traitements parfois importants.

Les indices de NDVI sont sensibles aux conditions climatiques, aux saisons, à l'état de santé de la végétation, etaturent lorsque le couvert végétal a atteint son maximum de développement. Ces limites intrinsèques sont peu discutées dans les études épidémiologiques, qui utilisent une grande diversité de métriques (NDVI moyen ou maximal sur la saison d'activité végétative maximale, sur l'été, sur quinze jours...). Les variations de NDVI selon le type de végétation ne sont également pas discutées dans la littérature épidémiologique.

L'utilisation du NDVI comme indicateur d'exposition est ainsi une de principales difficultés de ce type d'ÉQIS. Cet indicateur fournit une information brute sur la présence ou l'absence de végétation, mais sans détail sur le type de végétation, le type d'espace, l'accessibilité, ou les services associés. Il est donc difficile de s'approprier cet indicateur et de le lier aux connaissances du terrain. Des indicateurs de végétation donnant davantage de poids à la qualité et à l'accessibilité des espaces verts urbains par exemple (20, 96) seraient plus intéressants en termes de scénarisation.

Malgré ces limites, des ÉQIS entre espaces verts abordés via le NDVI et mortalité sont identifiées comme faisables (données environnementales et sanitaires disponibles, RER issues d'une méta-analyse, possibilité de construire des scénarios avec des incertitudes plus ou moins marquées). Elles sont également pertinentes dans la mesure où elles apportent un ordre de grandeur des bénéfices de ces espaces verts sur la santé, dans un contexte où les liens entre espaces verts et santé sont encore peu connus. Un renforcement des connaissances épidémiologiques sera cependant nécessaire pour réduire les incertitudes des futures ÉQIS.

## 4. MOBILITÉS ACTIVES

### 4.1 Principaux bénéfices sur la santé des mobilités actives

Les mobilités actives sont définies comme l'ensemble des transports non motorisés n'utilisant que l'énergie humaine (97). Les principaux sont la marche et le vélo, mais incluent également la trottinette, les rollers, ou le skateboard.

Les mobilités actives s'inscrivent dans le cadre des activités physiques de déplacement, au côté des trois autres types d'activités physiques : de travail, domestiques et de loisirs (98). Combinant les bénéfices d'une activité physique avec les nécessités de déplacement quotidien, les mobilités actives sont un levier essentiel pour promouvoir l'activité physique et atteindre les niveaux recommandés par l'OMS (au moins 150 minutes d'activité physique modérée par semaine (99)), l'un des principaux freins à l'activité physique étant le manque de temps (100). Par ailleurs, des caractéristiques de l'environnement urbain telles que la marchabilité, l'existence d'infrastructures favorisant les mobilités actives et les transports en commun, ou la perception de la sécurité et de la beauté de l'environnement sont associées à une plus grande activité physique (101).

Les bénéfices pour la santé de l'activité physique sont nombreux et bien connus, y compris dans le cadre des mobilités actives. Ces dernières ont un impact métabolique démontré, permettant une meilleure régulation des taux de lipides dans le sang, une diminution de la pression artérielle et une amélioration de la forme physique (102-104). L'usage régulier de mobilités actives a également un impact marqué sur la morbidité : réduction des maladies cardiovasculaires, du diabète de type 2, des cancers, amélioration de la santé mentale, réduction de l'obésité (102, 103, 105, 106). Ceci se traduit par une réduction de la mortalité toute cause et par maladie cardiovasculaire (107). Ces bénéfices s'observent y compris après ajustement sur l'âge, le sexe, le niveau socio-économique, les autres activités physiques et l'indice de masse corporelle (IMC). En plus des bénéfices liés à l'activité physique, le développement des mobilités actives pourrait avoir des effets sur la santé via la réduction de la sédentarité (temps passé assis ou allongé hors repas et sommeil) (108).

Au-delà de ces impacts directs, les mobilités actives participent également à la réduction de la pollution atmosphérique et du bruit, au recul des accidents de trafic, à l'amélioration de l'environnement de vie urbain et au développement du tourisme (109) ainsi qu'à l'atténuation du changement climatique (110).

Les connaissances scientifiques permettent d'accepter un lien de causalité entre activité physique et santé. Ceci a ouvert la voie à l'évaluation des bénéfices liés à l'activité physique induite par les mobilités actives, et de plus en plus d'ÉQIS sont proposées considérant principalement à la marche et au vélo (111-122).

### 4.2 Méthode

#### 4.2.1 Couples et relations exposition-risque

La littérature disponible conduit à retenir pour l'ÉQIS les effets de la marche et du vélo sur la mortalité toutes causes, pour les adultes de 20 ans et plus ([Tableau 19](#)). Pour harmoniser avec les autres déterminants, les analyses sont cependant réalisées pour les personnes de 30 ans et plus.

Les RER retenues sont issues d'une méta-analyse réalisée par Kelly *et al.* mettant en évidence une relation linéaire entre ces mobilités et la mortalité toutes causes, avec les risques relatifs (RR) suivants (123) :

- pour la marche, 0,89 [intervalle de confiance à 95 % : 0,83 ; 0,96] pour 11,25 MET-h<sup>7</sup>/semaine ;
- pour le vélo, 0,90 [IC 95 % 0,87 ; 0,94] pour 11,25 MET-h/semaine ;
- le RR pour le vélo est également appliqué aux vélos à assistance électrique (VAE).

Les RR sont exprimés pour 11,25 équivalents métaboliques (MET) par heure par semaine. Cette métrique représente la dépense énergétique consacrée à une activité par rapport au repos. Plus une activité physique est intense, plus elle est associée à une MET élevée. Les valeurs de MET utilisées dans les études épidémiologiques sont harmonisées via le compendium des activités physiques (124), qui propose par exemple une valeur de 6,8 MET-h pour un trajet domicile-travail à vélo, et une valeur de 14 MET-h pour un trajet à vélo sportif rapide en montagne. La marche pour aller au travail ou à l'école est estimée à 4 MET-h, alors qu'une randonnée avec un sac à dos est associée à 7,8 MET (124). Pour le VAE, une valeur de 4,8 MET-h mesurée sur 30 participants utilisant des vélos à assistance électrique est retenue en analyse principale (125).

Si on estime qu'une heure de marche correspond à 4 MET-h, il faut marcher 169 minutes par semaine pour atteindre 11,25 MET-h/semaine de dépense énergétique grâce à la marche, et voir son risque de mortalité diminuer de 0,89. Ceci correspond à 34 minutes de marche par jour de semaine (hors week-end). Pour le vélo, si une heure de vélo correspond à 6,8 MET-h, il faut 100 mn de vélo par semaine pour atteindre 11,25 MET-h/semaine grâce au vélo, soit 20 minutes de vélo par jour de semaine.

Bien que les relations obtenues par Kelly *et al.* soient linéaires, il est raisonnable de considérer que les relations sont supra-linéaires, i.e. que les bénéfices sont moins importants lorsque les personnes ont déjà un niveau d'activité physique élevé (activités fréquentes et intenses) (126, 127). Hors situation spécifique (ex : coursiers à vélo), les niveaux d'activités physiques associés aux mobilités actives restent *a priori* dans des valeurs pour lesquelles l'hypothèse de linéarité est valide. Pour ne pas surestimer les bénéfices pour les personnes ayant un niveau de mobilité très élevé, les bénéfices ne sont plus comptabilisés au-delà de 447 minutes de vélo et 460 minutes de marche par semaine. Ces valeurs plafond sont utilisées par l'OMS dans son outil HEAT de calcul des bénéfices liés aux mobilités actives (128) ([Tableau 19](#)).

**Tableau 19. Couples et relations retenus pour les mobilités actives**

| Événement de santé | Population               | Indicateur d'exposition | Relation exposition risque                                                                                           | Référence                         | Relation pour analyse de sensibilité                                   |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Mortalité totale   | Adultes (30 ans et plus) | 4 MET-h marche          | 0,89 [IC 95 % 0,83 ; 0,96] pour 11,25 MET-h/semaine<br>Relation linéaire, plafonnée à 460 min de marche par semaine. | Kelly <i>et al.</i> , 2014 (129). | -                                                                      |
| Mortalité totale   | Adultes (30 ans et plus) | 6,8 MET-h vélo          | 0,90 [0,87 ; 0,94] pour 11,25 MET-h/semaine<br>Relation linéaire, plafonnée à 427 min de vélo par semaine.           | Kelly <i>et al.</i> , 2014 (129). | 0,91 [0,86 ; 0,96] pour 5 MET-h/sem<br>Zhao <i>et al.</i> , 2021 (130) |

<sup>7</sup> Le MET (*Metabolic Equivalent Of Task*) permet d'évaluer l'activité physique. Un MET correspond à la dépense énergétique du corps au repos.

## 4.2.2 Données d'exposition

À l'échelle de la population, le nombre de MET-h/semaine est estimé à partir du nombre total de trajets effectués par jour, de la part modale du mode considéré (nombre de trajets réalisés selon ce mode rapporté au nombre de trajets totaux), et de la durée moyenne des trajets pour ce mode. Ces données sont extraites des Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) disponibles auprès des métropoles.

### Enquêtes Ménages Déplacements

Les EMD sont coordonnées par les métropoles et réalisées à intervalles réguliers suivant un protocole élaboré par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Elles visent à fournir des estimations représentatives des déplacements en semaine et en week-end pour un territoire donné (131). Les EMD sont un outil d'aide à la planification de la mobilité ; elles fournissent des données comparables entre territoires, grâce à une méthode standardisée. Un échantillon de personnes de 5 ans et plus sont interrogées sur leurs caractéristiques sociodémographiques, leur logement, leur équipement en modes de transport motorisés et non motorisés, et la mobilité quotidienne la veille du jour de l'enquête (motif des déplacements, mode de transport, heure de départ et d'arrivée, temps de déplacement, zones d'origine et de destination). Les données sont ensuite redressées pour fournir une information représentative de la population du territoire enquêté.

Les EMD permettent d'estimer les parts modales de la marche, du vélo et des transports en commun nécessaires pour la réalisation des ÉQIS. Elles ne fournissent pas directement les parts modales du VAE, mais celles-ci peuvent être estimées à partir de la part de ménages disposant d'un VAE parmi les ménages disposant d'un vélo, fournie par l'EMD.

Les résultats des EMD ont été fournis par chaque métropole, par bassin qui correspond à des regroupements de communes. Pour la MEL, l'EMD porte sur l'année 2016 (132), pour 3M, sur les années 2013-2014 (133), et pour la MRN sur les années 2016-2017 (134).

### Nombre de trajets, parts modales et durées moyennes des trajets

Pour chaque personne interrogée par l'EMD, des informations sur les trajets réalisés sont disponibles, notamment le mode de transport, adresse de départ et d'arrivée qui permettent de calculer la distance, et l'heure de départ et d'arrivée qui permettent de calculer la durée. Ces données sont exploitées afin d'extraire, pour les adultes de 30 ans et plus<sup>8</sup> :

- le nombre total de trajets journaliers ;
- la part modale de la marche, du vélo, des transports en commun, de la voiture ;
- la durée moyenne de trajet (pour les transports en commun, la durée moyenne de marche associée est également recueillie).

L'EMD propose ces valeurs pour les déplacements en semaine. Aussi, en analyse principale, l'ÉQIS se concentre uniquement sur les déplacements réalisés en semaine (pas de prise en compte des déplacements des week-ends). Elle fournit ainsi une approche conservatrice des bénéfices pour la santé des mobilités actives. La prise en compte du week-end fait l'objet d'une analyse de sensibilité.

Les résultats des EMD sont présentés pour des groupements de communes (appelés bassins). Si pour un bassin, un mode de transport n'existe pas actuellement (par exemple, aucun déplacement à vélo selon l'EMD), les valeurs moyennes observées pour ce mode dans l'ensemble des autres bassins sont utilisées pour le scénario (par exemple, durée moyenne des déplacements à vélo sur l'ensemble de la zone).

---

<sup>8</sup> Les pratiques de mobilité varient selon l'âge, et les parts modales pour les 30 ans et plus sont donc différentes des parts modales tous âges qui sont classiquement reportées dans les synthèses des EMD.

Si une des communes n'est pas représentée dans l'EMD, les données moyennes obtenues sur l'ensemble des communes concernées par l'EMD lui sont appliquées.

### 4.2.3 Équation

Le calcul du nombre de cas attribuables s'appuie sur la différence d'équivalent métabolique par heure/semaine/personne entre la situation actuelle et le scénario considéré. Pour rendre cette notion plus tangible, l'équivalent métabolique est transformé en temps de trajet.

À partir des données de l'EMD, on estime une durée moyenne de marche ou de vélo pour la population de la zone d'étude (moyenne des données individuelles prenant en compte les facteurs de redressements préconisés par l'EMD pour avoir une valeur représentative de la population) :

**Équation 4**  $Durée_{mode} = \min((N_{dep} \times part_{mode} \times durée_{moyenne_{mode}} \times N_{sem}), plafond)$

$N_{dep}$  est le nombre moyen de déplacements par jour par personne,  $part_{mode}$  la part modale du mode considéré,  $durée_{moyenne_{mode}}$  la durée moyenne des déplacements pour ce mode, et  $N_{sem}$  le nombre de jours pris en compte dans la semaine (5 ou 7). La durée est plafonnée, et ne peut être supérieure à 447 minutes de vélo ou 460 minutes de marche par semaine (on considère qu'il n'y a plus de bénéfices au-delà de ces valeurs).

La durée attendue sous un scénario d'augmentation de la part modale est calculée de la même manière, en modifiant la part modale.

Le différentiel de durée,  $\Delta Durée_{mode}$ , est transformé en différentiel de décès selon :

**Équation 5**  $\Delta DC_{mode} = DC \times \Delta Durée_{mode} \times (1 - RER_{mode}) / Ref_{RER}$

Où  $DC$  est le nombre de décès observés sur la période d'étude,  $RR_{mode}$  est le risque relatif de mortalité associé au mode, et  $Ref_{RER}$  est le temps de trajet de référence utilisé pour la RER, exprimée en minutes par semaine (169 min/semaine pour la marche, et 100 min/semaine pour le vélo).

### 4.2.4 Scénarios

L'ensemble des scénarios présentés ci-dessous concerne des reports modaux. Ils font varier la part modale des différentes mobilités actives, mais considèrent que le nombre total de déplacements réalisés chaque jour tout mode confondu n'évolue pas. Cela reste cohérent avec la stabilité de la mobilité observée sur de longues périodes (135). De même, ils font l'hypothèse que les durées moyennes de déplacement pour un mode donné ne changent pas.

Dans les plans de déplacements, les objectifs des parts modales sont exprimés en moyenne pour l'ensemble des trajets. Cependant, la distance conditionne la faisabilité d'un trajet sous certains modes de transports. Les scénarios se concentrent donc sur des durées et distance raisonnablement compatibles avec chaque mode de déplacement soit 0 à 3 km pour la marche, 3 à 5 km pour le vélo, et 5 à 15 km pour le VAE.

Dans tous les cas, la totalité du report est estimée venir de la voiture. Il s'agit d'une hypothèse peu réaliste, mais qui a du sens du point de vue de la santé publique : l'objectif est de montrer les bénéfices via l'activité physique du passage d'une mobilité passive et sources de multiples pollutions (bruit, gaz à effet de serre, polluants de l'air) à une mobilité active non polluante.

### Bénéfices d'une augmentation du temps consacré à la marche et au vélo

Ces scénarios, les plus simples, évaluent l'impact d'une augmentation du temps consacré chaque jour à la marche et au vélo (+10 minutes), sans faire d'hypothèse sur les parts modales.

## Bénéfices si la majorité des déplacements était réalisée en marche ou à vélo

Dans ces scénarios, les mobilités actives atteignent des parts modales très élevées, s'inspirant des valeurs observées dans les métropoles européennes de moyenne à grandes tailles les plus actives : 50 % de marche (observé à Paris (136)), et 35 % de vélo (observé à Amsterdam (137) et Copenhague (138)) (Tableau 20).

### Bénéfices du plan vélo

Ce scénario reprend les objectifs du Plan vélo concernant la part modale du vélo, avec une cible à 12 % en 2030 (139, 140), et prenant en compte ou non une part de VAE (Tableau 20).

### Bénéfices des objectifs des plans locaux de déplacements

Dans cette famille de scénarios, les parts modales à atteindre correspondent à des objectifs identifiés dans les plans locaux des métropoles (SDIT, PDM...). Lorsque ces objectifs sont exprimés pour une seule commune, les valeurs du bassin d'appartenance de l'EMD sont utilisées pour cette commune. Les scénarios sont détaillés dans les chapitres consacrés aux résultats.

**Tableau 20. Scénarios communs élaborés pour évaluer l'impact des mobilités actives sur la santé**

| Scénario                                                          | Part modale marche                                                                | Part modale vélo                                                                | Part modale du VAE                        |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Ville très active<br>prenant en compte la<br>distance des trajets | 90 % des trajets de moins de 1 km<br>50 % des trajets de 1 à 3 km                 | 35 % des trajets de 3 à 5 km                                                    | 35 % des trajets de moins<br>de 5 à 15 km |
| Plan vélo Objectif 12 %                                           | Inchangée                                                                         | 12 % des trajets de 3 à 5 km                                                    | 12 % des trajets de moins<br>de 5 à 15 km |
| Temps accru                                                       | Part modale correspondant à 10 minutes<br>de marche en plus par jour par personne | Part modale correspondant à 10 minutes<br>de vélo en plus par jour par personne |                                           |

## 4.2.5 Analyses de sensibilité

Plusieurs analyses de sensibilité sont proposées pour estimer les ordres de grandeur de l'incertitude associée aux différentes hypothèses de ces ÉQIS. Pour simplifier l'interprétation, elles sont présentées pour le scénario le plus simple : augmentation de 10 minutes par jour des temps de marche et de vélo.

### Risque relatif

Un risque relatif alternatif n'est disponible que pour le vélo (Tableau 19). L'incertitude liée à la transposabilité du RR n'est pas quantifiable, mais l'incertitude du RR est prise en compte via l'IC95 % du RR.

### Modification des valeurs moyennes de MET

Les valeurs moyennes de MET pour une heure de marche ou de vélo sont entachées d'incertitudes. Le compendium des activités physiques propose des valeurs allant de 3,5 à 8 MET-h pour la pratique du vélo hors course ou montagne, principalement selon la vitesse. Pour la marche, les valeurs vont de 2,3 MET-h pour une marche lente en portant un enfant, à 5 MET-h pour une marche rapide en terrain plat, ou une marche avec une valise. Une valeur spécifique pour la marche vers un autre mode de transport est proposée à 2,5 MET-h, soit assez basse par rapport à la marche domicile-travail (4 MET-h) (124). Les valeurs basses et hautes de 3,5 MET-h et 8 MET-h sont considérées en analyse de sensibilité pour le vélo, et de 2,3 MET-h et 5 MET-h pour la marche.

Pour le VAE, les bornes hautes et basses rapportées par Alessio *et. al.* pour un VAE avec une assistance de niveau E-2 sont utilisées, soit respectivement 2,7 MET-h et 6,9 MET-h (125). Pour un

VAE avec une assistance de niveau E-1, les valeurs proposées par cette même étude sont de 3,2 MET-h et 8,4 MET-h, et pour un vélo traditionnel de 4,7 MET-h et 8,7 MET-h (125).

Prise en compte des déplacements du week-end

L'EMD fournit des informations sur les déplacements réalisés en semaine. On peut supposer que les déplacements réalisés le week-end sont en partie différents, en termes de mode, de distances parcourues et de temps, notamment en lien avec des activités de loisir.

En l'absence d'information sur les déplacements du week-end, une analyse de sensibilité les inclut en considérant que les mêmes pratiques de déplacements sont observées en semaine et le week-end (les données semaine de l'EMD sont appliquées également au week-end).

Modification de la population d'étude

Certains auteurs proposent d'exclure les populations les plus âgées des analyses, avec des seuils d'âge variables. Selon l'enquête nationale transports et déplacements, 45 % des personnes de plus de 75 ans déclarent être gênées physiquement ou limitées dans leurs déplacements. Les nombres de déplacements et les trajets de déplacements diminuent à partir de la retraite et après 75 ans (141). Une gêne physique pour la marche est ressentie par près de la moitié des personnes de plus de 75 ans. Une analyse de sensibilité est donc réalisée en se concentrant uniquement sur les 30-75 ans.

4.3 Résultats

4.3.1 Répartition des modes de déplacement par distance et par bassin

Pour la population adulte (30 ans et plus), la voiture est le mode de déplacements privilégié pour l'ensemble des déplacements dans les trois métropoles (Figure 11). Elle représente 70 % des déplacements toutes distances confondues à 3M, 68 % à la MRN, et 67 % à la MEL. La marche est le mode de trajet majoritaire pour les trajets de moins de 1 km, mais sa part modale chute pour les trajets entre 1 et 3 km (14 % en moyenne). Les transports en commun et le vélo représentent des parts modales très faibles pour toutes les distances. Le nombre de déplacements et les durées moyennes de déplacements pour chaque mode sont similaires dans chaque métropole, les plus grandes différences étant observées pour les temps de trajets à vélo, reflétant peut-être des différences d'infrastructures ou de topographie entre les métropoles (Tableau 21). Au sein de chaque zone, les parts modales peuvent varier de manière importante selon les bassins, comme illustré sur la Figure 12 pour les trajets de moins de 1 km.

Tableau 21. Nombre moyen de déplacements par jour et durée moyenne des déplacements réalisés en marche et vélo

| Marche |                                       |                     |                                       |                     | Vélo                                  |                     |                                       |                     |
|--------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
| <1 km  |                                       |                     | entre 1 et 3 km                       |                     | entre 1 et 3 km                       |                     | entre 3 et 5 km                       |                     |
|        | Nombre moyen de déplacements par jour | Durée moyenne (min) | Nombre moyen de déplacements par jour | Durée moyenne (min) | Nombre moyen de déplacements par jour | Durée moyenne (min) | Nombre moyen de déplacements par jour | Durée moyenne (min) |
| MEL    | 4                                     | 8                   | 0,7                                   | 27                  | 0,1                                   | 20                  | 0,1                                   | 16                  |
| 3M     | 4                                     | 7                   | 0,8                                   | 29                  | 0,1                                   | 10                  | 0,2                                   | 22                  |
| MRN    | 4                                     | 8                   | 0,7                                   | 27                  | 0,1                                   | 12                  | 0,1                                   | 21                  |

Figure 11. Parts modales de la marche, des transports en commun, du vélo et de la voiture par métropole, selon les distances des trajets des 30 ans et plus

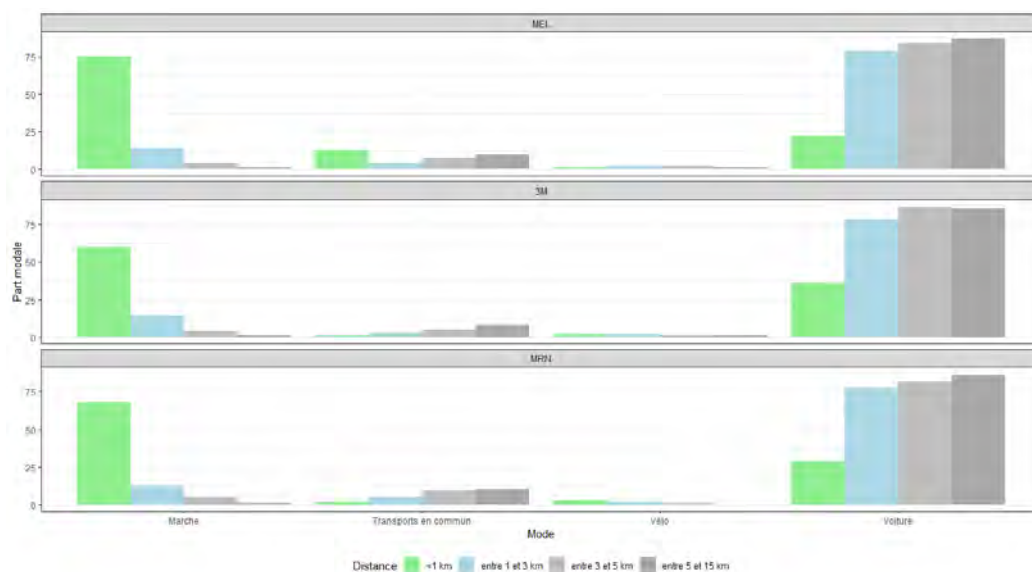
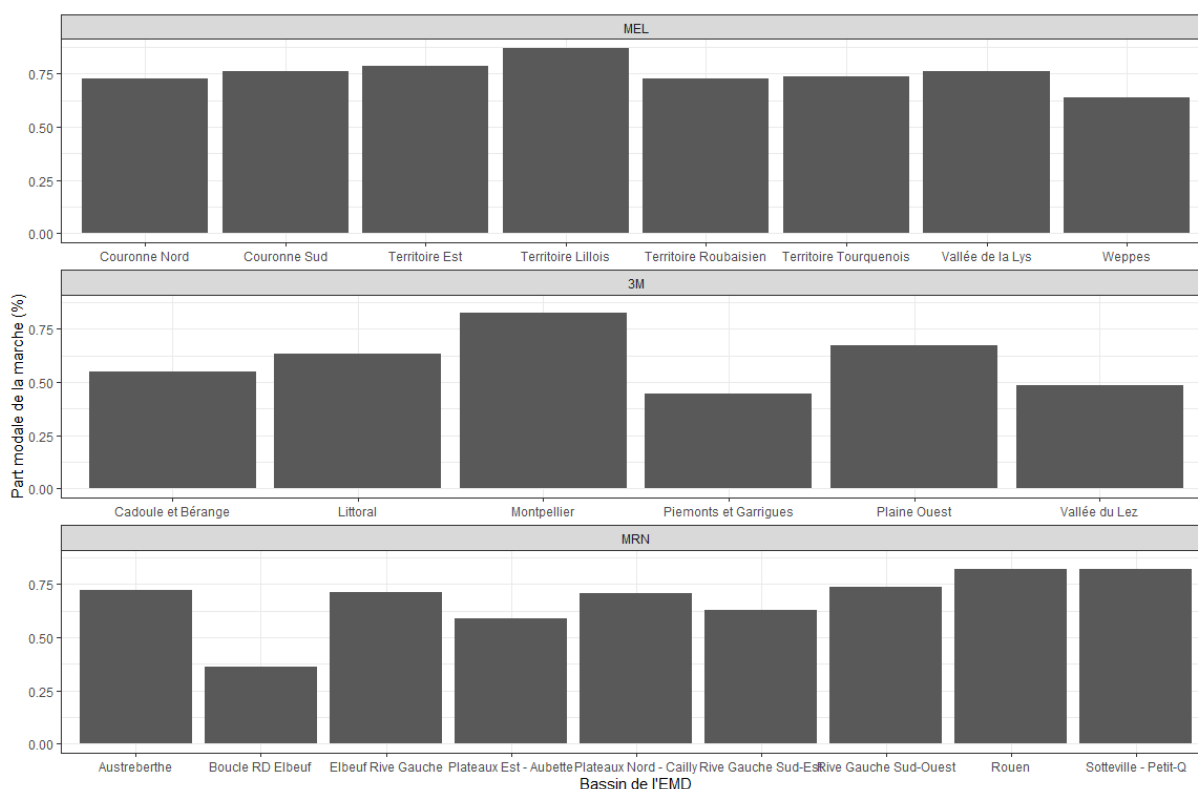


Figure 12. Part modale de la marche par bassins pour les 30 ans et plus, pour les trajets de moins de 1 km



#### 4.3.2 Impact sur la mortalité d'une augmentation de la durée des mobilités actives

Si chaque habitant augmentait son temps de marche de 10 minutes par jour de semaine (ce qui représente à une distance de 500 à 700 m à pied selon les vitesses de déplacements moyennes estimées d'après les EMD), 3,4 % [0,8 : 5,7] de la mortalité serait évitable chaque année. Si chaque habitant augmentait son temps de vélo de 10 minutes par jour (soit environ 2,5 km), la mortalité serait réduite de 5,7 % [1,4 : 9,8] (Tableau 22). Les bénéfices plus importants associés au vélo reflètent l'intensité physique plus importante associée à la pratique du vélo. Pour le VAE, les bénéfices sont intermédiaires entre le vélo et la marche, car associé à une intensité physique intermédiaire.

**Tableau 22. Mortalité évitée par l'augmentation du temps consacré à la marche et au vélo**

|     | 10 minutes de marche en plus par jour |                                    | 10 minutes de vélo en plus par jour |                                    | 10 minutes de VAE en plus par jour |                                    |
|-----|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|     | Décès évités (IC 95 %)                | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités (IC 95 %)              | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités (IC 95 %)             | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL | 279 [66 : 476]                        | 3,4 [0,8 :5,7]                     | 475 [113 :808]                      | 5,7 [1,4 :9,8]                     | 335 [79 :571]                      | 4,1 [0,9 :6,9]                     |
| 3M  | 103 [24 :176]                         | 3,4 [0,8 :5,7]                     | 175 [42 :298]                       | 5,7 [1,4 :9,8]                     | 124 [29 :211]                      | 4,1 [0,9 :6,9]                     |
| MRN | 147 [35 : 250]                        | 3,4 [0,8 :5,7]                     | 250 [59 :425]                       | 5,7 [1,4 :9,8]                     | 176 [42 :300]                      | 4,1[0,9 :6,9]                      |

Lecture du tableau : si chaque personne de la MEL marchait 10 minutes de plus par jour de semaine, 279 décès seraient évités (intervalle de confiance [66 : 476]) chaque année, ce qui représente 3,4 % de la mortalité annuelle totale des 30 ans et plus de la MEL.

### 4.3.3 Impact sur la mortalité d'une modification des parts modales de la marche

#### Bénéfices si 90 % des trajets de moins de 1 km étaient réalisés à pied

En moyenne, 75 % des déplacements de moins de 1 km sont actuellement réalisés à pied à la MEL, 60 % à 3M et 68 % à la MRN. Si 90 % des trajets de moins de 1 km étaient réalisés en marchant, 173 [41 : 294] décès seraient évités chaque année à la MEL, 84 [20 : 143] à 3M, et 118 [28 : 201] à MRN, soit respectivement 2,1 [0,5 : 3,6] %, 2,7 [0,7 : 4,7]% et 2,7 [0,7 : 4,7] % de la mortalité annuelle (Tableau 23). Ceci représente en moyenne une augmentation du temps de marche quotidien de 7 à 13 minutes selon la métropole.

Le détail par bassin est donné en Annexe 2. Les bénéfices sont d'autant plus importants que la part modale de la marche est actuellement faible dans les bassins, le nombre de déplacement élevés, et la population importante. Ainsi, dans toutes les zones, les bénéfices attendus sont faibles dans les communes centrales où les parts modales de marche sont déjà élevées pour les trajets courts, et jusqu'à 8 fois plus importants dans les zones où la part modale de la marche est la plus faible.

#### Bénéfices si 50 % des trajets de 1 à 3 km étaient réalisés à pied

En moyenne, 14 % des déplacements de 1 à 3 km sont actuellement réalisés à pied à la MEL et à 3M, et 13 % à la MRN. Augmenter la pratique de la marche sur les trajets entre 1 et 3 km représenterait une activité physique additionnelle importante, se traduisant par un gain très fort en termes de mortalité, de l'ordre de 16 % à 3M et MRN, et 17 % à la MEL, soit plusieurs centaines de décès évités chaque année (Tableau 23). Cela implique une augmentation importante du temps consacré à la marche chaque jour (50-60 min).

**Tableau 23. Mortalité évitée par l'augmentation de la part modale de la marche des 30 ans et plus**

| 90 % des trajets de moins de 1 km |                                                           |                                                |                                                  |                        |                                    |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
|                                   | Nombre actuel de déplacement à pied par jour (en moyenne) | Nombre de déplacements à pied sous le scénario | Temps additionnel moyen de marche par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL                               | 4,5                                                       | 5,2                                            | 7                                                | 173 [41 :294]          | 2,1 [0,5 :3,6]                     |
| 3M                                | 3,5                                                       | 5,3                                            | 13                                               | 84 [20 :143]           | 2,7 [0,7 :4,7]                     |
| MRN                               | 3,7                                                       | 5,0                                            | 9                                                | 118 [28 : 201]         | 2,7 [0,7 :4,7]                     |
| 50% des trajets entre 1 et 3 km   |                                                           |                                                |                                                  |                        |                                    |
|                                   | Nombre actuel de déplacement à pied (en moyenne)          | Nombre de déplacements à pied sous le scénario | Temps additionnel moyen de marche par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL                               | 0,8                                                       | 2,7                                            | 52                                               | 1 435 [340 : 2 442]    | 17,3 [4,1 :29,5]                   |
| 3M                                | 0,8                                                       | 2,3                                            | 57                                               | 494 [117 :840]         | 16,2 [3,8 :27,5]                   |
| MRN                               | 0,6                                                       | 2,4                                            | 49                                               | 688 [163 : 1 172]      | 15,8 [3,7 :26,9]                   |

Lecture du tableau : Sur la MEL, en moyenne 4,5 déplacements de moins de 1 km sont réalisés chaque jour à pied par les habitants de 30 ans et plus. Si la part modale de la marche passait à 90 %, cela représenterait 5,2 déplacements à pied par jour, soit 7 minutes supplémentaires consacrées à la marche par jour de semaine, ce qui permettrait d'éviter 173 décès [41 : 294] par an, soit 2,1 % de la mortalité annuelle totale de la MEL.

### 4.3.4 Impact sur la mortalité d'une modification des parts modales du vélo

#### Bénéfices si 35 % des trajets de 3 à 5 km étaient réalisés à vélo

En moyenne, 2,5 % des déplacements de 3 à 5 km sont actuellement réalisés à vélo à la MEL, 1,3 % à 3M, et 1 % à la MRN. Les parts modales du vélo sont très faibles dans les EMD, y compris pour les trajets de moins de 5 km. Atteindre 35 % de part modale sur les trajets de 3 à 5 km, bien qu'étant un scénario ambitieux, permettrait d'éviter 15,8 % des décès à la MEL, 18,3 % à MRN et 21,1 % à 3M, représentant plusieurs centaines de décès évitables par an (1 435 [340 : 2 442] à la MEL, 688 [1 172 : 1 63] à MRN, et 494 [117 : 840] à 3M). Cela implique une augmentation moyenne de 30 minutes dédiées au vélo chaque jour à la MEL et MRN, et 43 minutes à 3M (Tableau 24).

#### Bénéfices si 35 % des trajets de 5 à 15 km étaient réalisés à vélo à assistance électrique

En moyenne, 1 % des déplacements de 3 à 5 km sont actuellement réalisés à vélo à la MEL et à 3M, et 0,2 % à la MRN. Augmenter la part modale du VAE à 35 % sur les trajets de 5 à 15 km représente une augmentation importante d'activité physique et de temps associé (45-50 minutes par jour), ce qui se traduirait par une diminution très importante de la mortalité, de 2 265 [537 : 3 855] décès à la MEL, 685 [162 : 1 165] à 3M et 1 213 [287 : 2 065] à MRN (Tableau 24).

**Tableau 24. Mortalité évitée par l'augmentation de la part modale du vélo à 35 % des 30 ans et plus**

| 35 % des trajets entre 3 et 5 km |                                                           |                                                |                                          |                        |                                    |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
|                                  | Nombre actuel de déplacement à vélo par jour (en moyenne) | Nombre de déplacements à vélo sous le scénario | Temps additionnel de vélo par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL                              | 0,12                                                      | 1,8                                            | 27                                       | 1 309 [310 : 2 228]    | 15,8 [3,7 :26,9]                   |
| 3M                               | 0,07                                                      | 2,0                                            | 43                                       | 644 [153 :1 097]       | 21,1 [5,0 :35,9]                   |
| MRN                              | 0,05                                                      | 1,6                                            | 33                                       | 795 [188 : 1 353]      | 18,3 [4,3 :31,1]                   |
| 35% des trajets entre 5 et 15 km |                                                           |                                                |                                          |                        |                                    |
|                                  | Nombre actuel de déplacement à vélo par jour (en moyenne) | Nombre de déplacements à vélo sous le scénario | Temps additionnel de VAE par jour (min)  | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL                              | 0,04                                                      | 1,6                                            | 48                                       | 2 265 [537 : 3 855]    | 27,4 [6,5 :46,6]                   |
| 3M                               | 0,04                                                      | 1,5                                            | 45                                       | 685 [162 :1 165]       | 22,4 [5,3 :38,2]                   |
| MRN                              | 0,01                                                      | 1,4                                            | 49                                       | 1 213 [287 : 2 065]    | 27,9 [6,6 :47,4]                   |

#### Bénéfices du plan vélo

Le plan vélo vise à atteindre 12 % de part modale de vélo en 2030. Pour l'estimation des bénéfices, cette part modale a été appliquée respectivement aux trajets de 3 à 5 km pour le vélo et de 5 à 15 km pour le VAE. La mortalité évitée serait de l'ordre de 5 à 6 % pour les trajets à vélo, et 7 à 9 % pour les trajets en VAE, soit plusieurs centaines de décès par an, pour un temps additionnel dédié à la mobilité inférieure à 20 minutes par jour (Tableau 25). Le détail par bassin est donné en Annexe 2.

**Tableau 25. Mortalité évitée par l'augmentation de la part modale du vélo à 12 %**

| 12 % des trajets entre 3 et 5 km |                                            |                           |                                          | 12 % des trajets entre 5 et 15 km            |                           |                                          |
|----------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------|
|                                  | Temps additionnel de<br>vélo par jour (mn) | Décès évités<br>(IC 95 %) | Fraction de<br>mortalité évitable<br>(%) | Temps additionnel<br>de VAE par jour<br>(mn) | Décès évités (IC<br>95 %) | Fraction de<br>mortalité évitable<br>(%) |
| MEL                              | 8                                          | 379 [90 : 645]            | 4,6 [1,1 :7,8]                           | 16                                           | 736 [174 :1 253]          | 8,9 [2,1 :15,1]                          |
| 3M                               | 14                                         | 182 [43 :310]             | 6,0 [1,4 :10,2]                          | 15                                           | 215 [51 :366]             | 7,1 [1,7 :12,0]                          |
| MRN                              | 11                                         | 255 [60 : 434]            | 5,9 [1,4 :10,0]                          | 17                                           | 411 [97 :700]             | 9,4 [2,2 :16,1]                          |

### 4.3.5 Bénéfices liés aux scénarios locaux

#### MEL

Le [Tableau 26](#) détaille les bénéfices qui seraient observés si les habitants de 30 ans et plus atteignaient différentes cibles de parts modales proposées dans le plan de mobilité (PDM) pour 2035. Il faut noter que les objectifs du PDM ont été fixés pour la population résidente et pour les non-résidents visitant ou travaillant dans la métropole, et sans spécifier l'âge. Il n'est pas possible d'intégrer ces non-résidents dans l'ÉQIS, aussi on utilise comme scénario pour les 30 ans et plus résidents la part modale fixée par les plans pour les résidents et non-résidents tous âges.

L'atteinte de 32 % de part modale de marche ou de 8 % de part modale de vélo sur l'ensemble des trajets conduirait à éviter environ 2,7 % de la mortalité. Les bénéfices les plus importants concerneraient les transports en commun, avec une fraction de mortalité évitable de 4,5 % pour une part modale de 20 %.

**Tableau 26. Mortalité évitée par les objectifs identifiés (toutes distances) dans les plans de la MEL**

| Mode   | Part modale actuelle des 30 ans et plus (%) | Part modale du scénario (%) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|--------|---------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Marche | 25 %                                        | 32 %                        | 220 [ 52 : 374]        | 2,7 % [0,6 : 4,5]                  |
|        |                                             | 29 %                        | 148 [35 : 251]         | 1,9 % [0,4 : 3,0]                  |
| Vélo   | 1 %                                         | 8 %                         | 228 [54 : 388]         | 2,8 % [0,7 : 4,7]                  |
|        |                                             | 2 %                         | 30 [7 : 51]            | 0,4 % [0,1 : 0,6]                  |
| TC     | 6 %                                         | 20 %                        | 373 [88 : 635]         | 4,5 % [1,1 : 7,7]                  |
|        |                                             | 15 %                        | 238 [56 : 405]         | 2,9 % [0,7 : 4,9]                  |

\* pour les transports en commun, via la marche associée.

#### 3M

Le [Tableau 27](#) détaille les bénéfices qui seraient observés si les habitants de 30 ans et plus atteignaient différentes cibles de parts modales proposées dans le plan de mobilité (PDM) à l'horizon 2032. Il faut noter que les objectifs du PDM ont été fixés pour la population résidente et pour les non-résidents visitant ou travaillant dans la métropole, et sans spécifier l'âge. Il n'est pas possible d'intégrer ces non-résidents dans l'ÉQIS, aussi on utilise comme scénario pour les 30 ans et plus résidents la part modale fixée par les plans pour les résidents et non-résidents tous âges.

Sur l'ensemble de la métropole, l'atteinte de la part modale ciblée pour la marche se traduirait par un bénéfice faible ([Tableau 27](#)). Les parts modales par bassin pressenties à l'horizon 2030 pourraient cependant permettre d'éviter jusqu'à 4,8 % de la mortalité dans les bassins où la marche est actuellement peu pratiquée. L'atteinte de 15 % de part modale pour le vélo ou de 23 % de transports communs permettrait d'éviter de l'ordre de 5,6 % de mortalité par an ([Tableau 27](#)). Les bénéfices associés au vélo pourraient atteindre jusqu'à 10 % de mortalité évitée par an dans la Vallée du Lez ([Tableau 29](#)). Concernant les transports en commun, les ambitions, et donc les bénéfices sanitaires associés, sont faibles en dehors de la ville de Montpellier ([Tableau 30](#)).

| Mode   | Part modale actuelle des 30 ans et plus (%) | Part modale du scénario (%) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|--------|---------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Marche | 20 %                                        | 21 %                        | 20 [5 : 34]            | 0,6 [0,2 : 1,1]                    |
| Vélo   | 1 %                                         | 15 %                        | 170 [40 : 290]         | 5,6 [1,3 : 9,5]                    |
| TC     | 4 %                                         | 23 %                        | 163 [39 : 277]         | 5,3 [1,3 : 9,1]                    |

\* pour les transports en commun, temps de marche associé.

**Tableau 28. Mortalité évitée par les objectifs marche dans les plans de 3M par bassin**

| Bassin                | Part modale actuelle des 30 ans et plus (%) | Nombre actuel de déplacement à pied (en moyenne) | Part modale sous le scénario (%) | Nombre de déplacements à pied sous le scénario | Temps additionnel moyen de marche par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|-----------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Cadoule et Béranger   | 16 %                                        | 0,7                                              | 30 %                             | 1,3                                            | 7                                                | 11 [3 : 19]            | 4,8 [1,3 : 8,2]                    |
| Littoral              | 19 %                                        | 0,8                                              | 23 %                             | 1                                              | 2                                                | 4 [1 : 7]              | 1,5 [0,4 : 2,6]                    |
| Montpellier           | 33 %                                        | 1,2                                              | 27 %                             | 1,1                                            | -                                                | -                      | -                                  |
| Piémonts et Garrigues | 13 %                                        | 0,5                                              | 30 %                             | 1,3                                            | 7                                                | 9 [2 : 16]             | 4,8 [1,1 : 8,5]                    |
| Plaine Ouest          | 24 %                                        | 1,2                                              | 27 %                             | 1,3                                            | 2                                                | 3 [1 : 5]              | 1,1 [0,4 : 1,8]                    |
| Vallée du Lez         | 15 %                                        | 0,7                                              | 24 %                             | 1                                              | 7                                                | 16 [4 : 28]            | 4,5 [1,1 : 7,8]                    |

**Tableau 29. Mortalité évitée par les objectifs vélo dans les plans de 3M par bassin**

| Bassin                | Part modale actuelle des 30 ans et plus (%) | Nombre actuel de déplacement à vélo (en moyenne) | Part modale sous le scénario (%) | Nombre de déplacements à vélo sous le scénario (en moyenne) | Temps additionnel moyen de vélo par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|-----------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Cadoule et Béranger   | 0                                           | 0                                                | 17 %                             | 0,7                                                         | 8                                              | 11 [3 : 18]            | 4,8 [1,3 : 8,2]                    |
| Littoral              | 0                                           | 0                                                | 18 %                             | 0,7                                                         | 15                                             | 23 [5 : 39]            | 8,4 [1,8 : 14,2]                   |
| Montpellier           | 0,05                                        | 0,2                                              | 17 %                             | 0,7                                                         | 8                                              | 78 [18 : 133]          | 4,5 [1,0 : 7,7]                    |
| Piémonts et Garrigues | 0                                           | 0                                                | 17 %                             | 0,7                                                         | 7                                              | 7 [2 : 13]             | 3,7 [1,1 : 6,9]                    |
| Plaine Ouest          | 0                                           | 0                                                | 17 %                             | 0,8                                                         | 27                                             | 44 [10 : 75]           | 15,7 [3,6 : 26,7]                  |
| Vallée du Lez         | 0,02                                        | 0                                                | 18 %                             | 0,8                                                         | 18                                             | 38 [9 : 64]            | 10,6 [2,5 : 17,9]                  |

**Tableau 30. Mortalité évitée par les objectifs transports en commun dans les plans de 3M par bassin**

| Bassin                | Part modale actuelle des 30 ans et plus (%) | Nombre actuel de déplacement en TC (en moyenne) | Part modale sous le scénario | Nombre de déplacements en TC sous le scénario (en moyenne) | Temps additionnel moyen de marche par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|-----------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Cadoule et Béranger   | 2 %                                         | 0,1                                             | 6 %                          | 0,3                                                        | 1                                                | 2 [1 : 3]              | 0,9 [0,4 : 1,3]                    |
| Littoral              | 4 %                                         | 0,2                                             | 4 %                          | -                                                          | -                                                | -                      | -                                  |
| Montpellier           | 11 %                                        | 0,4                                             | 33 %                         | 1,3                                                        | 29                                               | 121 [29 : 206]         | 7 [1,7 : 12,0]                     |
| Piémonts et Garrigues | 4 %                                         | 0,2                                             | 2 %                          | -                                                          | -                                                | -                      | -                                  |
| Plaine Ouest          | 3 %                                         | 0,1                                             | 4 %                          | -                                                          | -                                                | -                      | -                                  |
| Vallée du Lez         | 5 %                                         | 0,2                                             | 9 %                          | 0,4                                                        | 1,7                                              | 4 [1 : 7]              | 1,1 [4,8 : 2,0]                    |

## MRN

Le [Tableau 31](#) détaille les bénéfices qui seraient observés si les habitants de 30 ans et plus atteignaient différentes cibles de parts modales proposées dans le plan climat air énergie territorial (PCAET) et le prochain PDM. Il faut noter que les objectifs de ces plans ont été fixés pour la population résidente et pour les non-résidents visitant ou travaillant dans la métropole, et sans spécifier l'âge. Il n'est pas possible d'intégrer ces non-résidents dans l'ÉQIS, aussi on utilise comme scénario pour les 30 ans et plus résidents la part modale fixée par les plans pour les résidents et non-résidents tous âges.

Les bénéfices les plus importants seraient associés à l'augmentation des parts modales de transports en commun et de marche, représentant de 2 à 3 % de mortalité évitable selon les cibles ([Tableau 31](#)). Des ordres de grandeur similaires seraient observés avec les objectifs fixés spécifiquement pour la ville de Rouen ([Tableau 32](#)) et pour la première couronne urbaine (Amfreville-la-Mi-Voie, Bihorel, Bois-Guillaume, Bonsecours, Canteleu, Darnétal, Déville-lès-Rouen, Le Petit-Quevilly, Mont-Saint-Aignan, Sotteville-lès-Rouen) ([Tableau 33](#)).

**Tableau 31. Mortalité évitée par les objectifs identifiés dans les plans de MRN**

| Mode   | Part modale actuelle des 30 ans et plus (%) | Part modale du scénario (%) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|--------|---------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Marche | 23 %                                        | 32 %                        | 101 [24 : 173]         | 2,3% [0,6 : 4,0]                   |
| Vélo   | 1 %                                         | 5 %                         | 67 [16 : 114]          | 1,5% [0,4 : 2,6]                   |
| TC     | 6%                                          | 14 %                        | 86 [20 : 147]          | 2,0% [0,5 : 3,4]                   |
|        |                                             | 18 %                        | 135 [32 : 230]         | 3,1% [0,7 : 5,3]                   |

\* pour les transports en commun, temps de marche associé

**Tableau 32. Mortalité évitée par les objectifs identifiés dans les plans de MRN pour Rouen**

| Mode   | Part modale actuelle des 30 ans et plus (%) | Nombre actuel de déplacements (en moyenne par personne par jour) | Part modale du scénario (%) | Nombre de déplacements sous le scénario | Temps additionnel par jour (min)* | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|--------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Marche | 42 %                                        | 1,6                                                              | 36 %                        | -                                       | -                                 | -                      | -                                  |
| Vélo   | 2 %                                         | 0,1                                                              | 12 %                        | 0,5                                     | 7                                 | 32 [8 : 54]            | 3,9 [1,0 : 6,5]                    |
| TC     | 12 %                                        | 0,5                                                              | 28 %                        | 1,1                                     | 7                                 | 20 [5 : 35]            | 2,4 [0,6 : 4,2]                    |

\* pour les transports en commun, temps de marche associé

**Tableau 33. Mortalité évitée par les objectifs identifiés dans les plans de MRN pour la première couronne urbaine**

| Mode   | Part modale actuelle des 30 ans et plus (%) | Nombre actuel de déplacements (en moyenne par personne par jour) | Part modale du scénario (%) | Nombre de déplacements sous le scénario | Temps additionnel par jour (min)* | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|--------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Marche | 23 %                                        | 0,9                                                              | 33 %                        | 1,3                                     | 5                                 | 16 [4 : 26]            | 1,2 [0,3 : 1,9]                    |
| Vélo   | 0,5 %                                       | 0,02                                                             | 7 %                         | 0,3                                     | 5                                 | 33 [8 : 56]            | 2,4 [0,6 : 4,1]                    |
| TC     | 6 %                                         | 0,2                                                              | 23 %                        | 0,9                                     | 7                                 | 33 [8 : 56]            | 2,4 [0,6 : 4,1]                    |

#### 4.3.6 Analyses de sensibilité

##### Modification du RR pour le vélo

Le RR alternatif pour le vélo étant exprimé pour 5 MET-h/semaine au lieu de 11,25, il conduit à des estimations beaucoup plus élevées de nombre de décès évitables (Tableau 34).

**Tableau 34. Mortalité évitée par l'augmentation du temps consacré au vélo**

| RR 0,90 [0,87 ; 0,94] pour 11,25 MET-h/semaine |                        |                                    | RR 0,91 [0,86 ; 0,96] pour 5 MET MET-h/semaine |                                    |
|------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|
|                                                | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités (IC 95 %)                         | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL                                            | 475 [113 : 808]        | 5,7 [1,4 : 9,8]                    | 1 069 [253 : 1 819]                            | 12,9 [3,0 : 22,0]                  |
| 3M                                             | 175 [42 : 298]         | 5,7 [1,4 : 9,8]                    | 394 [93 : 671]                                 | 12,9 [3,0 : 22,0]                  |
| MRN                                            | 250 [59 : 425]         | 5,7 [1,4 : 9,8]                    | 563 [133 : 563]                                | 12,9 [3,0 : 22,0]                  |

##### Modification des valeurs de MET-h

En associant une heure de marche à 2,3 MET, la fraction de mortalité évitable pour 10 minutes additionnelles par jour de semaine est de 1,9 %. Avec un MET à 5, elle passe à 4,2 %. Pour le vélo, avec un MET à 5, la fraction de mortalité évitable pour 10 minutes additionnelles par jour de semaine est de 4,2 %. Elle passe à 6,8 % pour un MET de 8. Le choix des valeurs de MET a donc un impact notable sur les résultats, mais qui reste inférieur à l'incertitude induite par l'IC95 % du RR (Tableau 35).

**Tableau 35. Mortalité évitée par l'augmentation du temps consacré à la marche et au vélo**

|     | Décès évités (IC 95 %) pour 10 minutes de marche en plus par jour |              |              | Décès évités (IC 95 %) pour 10 minutes de vélo en plus par jour |               |               | Décès évités (IC 95 %) pour 10 minutes de VAE en plus par jour |              |               |
|-----|-------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------------------------------------------|---------------|---------------|----------------------------------------------------------------|--------------|---------------|
|     | 2,3 MET-h                                                         | 4 MET-h      | 5 MET-h      | 3,5 MET-h                                                       | 6,8 MET-h     | 8 MET-h       | 2,7 MET-h                                                      | 4,8 MET-h    | 6,9 MET-h     |
| MEL | 161 [38:273]                                                      | 279 [66:476] | 349 [83:594] | 245 [58:416]                                                    | 475 [113:808] | 559 [132:951] | 189 [321:45]                                                   | 335 [79:571] | 482 [114:820] |
| 3M  | 59 [14:101]                                                       | 103 [24:176] | 129 [31:219] | 60 [21:154]                                                     | 175 [42:298]  | 206 [49:351]  | 70 [16:118]                                                    | 124 [29:211] | 178 [42:303]  |
| MRN | 85 [20:144]                                                       | 147 [35:220] | 184 [44:313] | 129 [30:219]                                                    | 250 [59:425]  | 294 [70:501]  | 99 [24:169]                                                    | 176 [42:300] | 254 [60:432]  |

### Extension de l'analyse au week-end

Si la population augmente son temps de marche et de vélo de 10 minutes y compris le week-end, les bénéfices associés passent respectivement de 3,4 à 4,7 % pour la marche, et de 5,7 à 8 % pour le vélo (Tableau 36).

**Tableau 36. Mortalité évitée par l'augmentation du temps consacré à la marche et au vélo 7 jours par semaine au lieu de 5 jours par semaine**

|     | 10 minutes de marche en plus par jour |                                    | 10 minutes de vélo en plus par jour |                                    | 10 minutes de VAE en plus par jour |                                    |
|-----|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|     | Décès évités (IC 95 %)                | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités (IC 95 %)              | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités (IC 95 %)             | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL | 391 [93 : 666]                        | 4,7 [1,1 : 8,1]                    | 665 [158 : 1 132]                   | 8,0 [1,9 : 13,7]                   | 469 [111 : 799]                    | 5,7 [1,3 : 9,7]                    |
| 3M  | 144 [34 : 246]                        | 4,7 [1,1 : 8,1]                    | 245 [58 : 418]                      | 8,0 [1,9 : 13,7]                   | 173 [41 : 295]                     | 5,7 [1,3 : 9,7]                    |
| MRN | 206 [49 : 350]                        | 4,7 [1,1 : 8,1]                    | 350 [83 : 596]                      | 8,0 [1,9 : 13,7]                   | 247 [59 : 420]                     | 5,7 [1,3 : 9,7]                    |

### Restriction de l'analyse aux personnes de moins de 75 ans

Si l'on restreint les analyses à la population de moins de 75 ans, la fraction de mortalité évitable demeure de 3,4 % pour 10 minutes de marche en plus par jour, et de 5,7 % pour 10 minutes de vélo par jour. Ces fractions s'appliquant à une population plus petite, et avec des taux de décès plus faibles, les bénéfices en effectifs de décès sont plus faibles que lorsque l'analyse porte sur l'ensemble de la population (Tableau 37).

**Tableau 37. Mortalité évitée par l'augmentation du temps consacré à la marche et au vélo en restreignant l'analyse aux 30-75 ans**

|     | 10 minutes de marche en plus par jour |                        |                                                                              |                                                             | 10 minutes de vélo en plus par jour |                                                                  |                                                             |
|-----|---------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|     | Population concernée                  | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable pour les personnes concernées (30-75 ans) (%) | Fraction de mortalité évitable pour toute la population (%) | Décès évités (IC 95 %)              | Fraction de mortalité évitable pour les personnes concernées (%) | Fraction de mortalité évitable pour toute la population (%) |
| MEL | 603 386                               | 129 [31 : 220]         | 3,4 [0,8 : 5,7]                                                              | 1,6 [0,4 : 2,7]                                             | 219 [52 : 373]                      | 5,7 [1,4 : 9,8]                                                  | 2,7 [0,6 : 4,6]                                             |
| 3M  | 246 507                               | 40 [9 : 67]            | 3,4 [0,8 : 5,7]                                                              | 1,3 [0,3 : 2,2]                                             | 67 [16 : 114]                       | 5,7 [1,4 : 9,8]                                                  | 2,2 [0,5 : 3,7]                                             |
| MRN | 269 093                               | 63 [15 : 107]          | 3,4 [0,8 : 5,7]                                                              | 1,4 [0,3 : 2,3]                                             | 107 [25 : 182]                      | 5,7 [1,4 : 9,8]                                                  | 2,3 [0,5 : 4,0]                                             |

## 4.4 Discussion

### 4.4.1 Des bénéfices potentiellement importants

Les scénarios présentés ici soulignent l'importance des bénéfices obtenus par une augmentation de l'activité physique via les mobilités actives.

L'OMS conseille de réaliser au moins 150 minutes d'activité physique modérée par semaine (i.e. une activité d'une intensité entre 3 et 6 MET-h (123)). Si chaque habitant augmentait son temps de marche de 10 minutes par jour de semaine, ce qui correspond à 50 minutes d'activité physique

modérée par semaine soit un tiers de la quantité recommandée par l'OMS, 3,4 % de la mortalité serait évitable chaque année.

Si la marche est majoritaire pour les trajets de moins de 1 km dans les trois métropoles (avec des variations selon les bassins), la voiture demeure le mode de transport principal pour les trajets plus longs. Augmenter la part modale de la marche sur les trajets de moins de 1 km permettrait de réduire en moyenne la mortalité de 2 à 3 % selon les zones. Les bénéfices seraient faibles dans les communes centrales denses où la majorité des déplacements courts se font déjà à pied, mais seraient importants dans certains bassins moins urbanisés. Sur des trajets entre 1 et 3 km, les bénéfices d'une augmentation de la marche peuvent être très importants, de l'ordre de 16 % de la mortalité évitée, mais ceci implique un temps important dédié à la marche chaque jour (environ 50 minutes/jour). On peut noter que la marche est le mode de transport faisant l'objet des objectifs les moins ambitieux dans les plans de mobilité des trois métropoles.

Les bénéfices associés au vélo sont également potentiellement très importants, compte tenu de la faible part de ce mode, et d'un niveau d'activité physique plus soutenu que la marche. Atteindre 12 % de part modale du vélo sur les trajets de 3 à 5 km permettrait d'éviter de 4 à 6 % de la mortalité. Les scénarios d'atteinte de parts modales très élevées pour le vélo et le VAE seraient associés à des bénéfices sanitaires potentiellement très importants, mais cela suppose une augmentation très importante du temps dédié à ces mobilités actives. Il faudrait cependant déduire de ce temps, le temps actuellement passé en voiture. Selon l'Ademe, en ville, le vélo est le moyen de transport le plus rapide pour les trajets de moins de 5 km (142) ou de 8 km (143).

Il n'a pas été réalisé de scénario commun sur les transports en commun, mais les résultats des scénarios locaux soulignent le potentiel important lié à ce mode : l'augmentation des parts modales de transport en commun se traduit par une augmentation de la marche pour accéder à ces transports, avec des bénéfices importants en termes de mortalité.

#### 4.4.2 Des incertitudes multiples

Une des principales incertitudes de cette ÉQIS est associée aux RR utilisés. À ce jour, on ne dispose que d'une méta-analyse pour la marche et le vélo, prenant en compte des travaux publiés entre 1974 et 2013. Les études incluses (14 pour la marche dont 7 européennes, et 7 pour le vélo dont 6 européennes) sont hétérogènes en termes de méthodes et de populations. Les auteurs de la méta-analyse ont dû recourir à plusieurs hypothèses pour exprimer les RR des différentes études sur une échelle commune et calculer un méta-risque (123). Exprimés sur cette échelle commune (RR pour 11,25 MET-h par semaine), seuls 17 % des RR marche et 50 % des RR vélos étaient significatifs.

L'influence de trois hypothèses contribuant à l'incertitude globale a été quantifiée : la valeur de MET-h associée à chaque mode, la prise en compte des déplacements du week-end, et la restriction de la population d'étude aux moins de 75 ans. L'équation étant linéaire, la modification d'un de ces paramètres se répercute directement sur le résultat de l'ÉQIS. L'analyse principale a repris les valeurs de MET-h associées à la marche et au vélo utilisées par la méta-analyse (123), et correspondant à des situations de marche ou vélo pour aller au travail (124). Considérer des valeurs plus élevées ou plus faibles de MET-h modifie d'autant les résultats, mais en restant dans les marges des intervalles de confiance des RR. De la même manière, en étendant les scénarios aux déplacements du week-end, on augmente les bénéfices potentiels, mais d'un ordre de grandeur qui demeure dans l'IC des RR. Si on ne quantifie pas les bénéfices pour les 75 ans et plus, en considérant que cette population a une marge moins importante d'augmentation des mobilités actives, le nombre de décès évitables chaque année est plus faible, puisque concernant une population plus petite, et avec des taux de décès plus faibles. Le bénéfice relatif pour les populations concernées demeure cependant identique.

D'autres sources d'incertitudes n'ont pas pu être quantifiées. Notamment, les EMD utilisées sont anciennes et peuvent ne pas représenter correctement les parts modales actuelles de la marche et

du vélo, conduisant à une surestimation des bénéfices des scénarios d'atteinte d'un pourcentage de part modale en l'appliquant à des années récentes ou futures. Les parts modales des mobilités actives sont probablement plus importantes dans les années récentes. Par exemple, les compteurs de passages de vélo montrent une augmentation des passages entre 2019 et 2022, particulièrement en milieu urbain et en semaine (144).

Dans les scénarios, seule la distance a été prise en compte pour différencier le vélo et le VAE. Le VAE a été considéré sur des trajets de 5 à 15 km, des distances qui semblent raisonnables au vu d'études européennes qui rapportent des distances hebdomadaires allant de 15 à plus de 70 km pour ce mode. Ces études indiquent également que les utilisateurs de VAE sont en moyenne plus âgée que les utilisateurs de vélo traditionnel. Ces différences d'usage par âge peuvent influencer les bénéfices sanitaires associés. La production de RER plus précise par type de mode et âge permettrait d'améliorer les futures ÉQIS.

Globalement, les résultats de l'ÉQIS doivent être pris comme des ordres de grandeur, et les intervalles de confiance du RR étant très larges, on peut considérer qu'ils prédominent sur les autres sources d'incertitude. Ainsi, pour réduire les incertitudes de futures ÉQIS, une priorité devrait être de renforcer le choix du RR en produisant de nouvelles études épidémiologiques et méta-analyses.

#### 4.4.3 Accidentologie et exposition à la pollution de l'air

Dans la littérature, certains auteurs proposent de quantifier les impacts sur la santé des mobilités en intégrant les accidents sur la voie publique et l'exposition à la pollution de l'air lors de la pratique d'une mobilité active (145).

L'accidentologie liée aux mobilités actives dépend de très nombreux facteurs (autres mobilités, d'effets de groupes, des infrastructures et aménagements présents), difficilement mesurables et modélisables de façon fiable. Il n'a pas été identifié dans la littérature de méthode permettant d'intégrer cet aspect dans une ÉQIS de manière robuste. Cet effet n'est donc pas retenu dans l'ÉQIS. Les résultats des bénéfices liés à l'activité physique peuvent toutefois être mis en regard du nombre de décès liés aux accidents. À 3M, en 2015 et 2016, 38 décès sont associés à des accidents de la route, dont 10 piétons et 2 cyclistes (146). Sur l'ensemble de la France hexagonale, en 2023, 1 386 décès ont été associés à des accidents de la route, dont 172 piétons, 82 cyclistes, et 706 automobilistes (147). Les décès liés aux accidents sont donc très inférieurs aux bénéfices a priori attendus d'une augmentation des parts modales des mobilités actives.

Concernant la pollution de l'air, l'hypothèse initiale est que les personnes sont surexposées à la pollution lors de la mobilité active du fait de l'activité physique conduisant à un volume d'air inhalé plus important (148). Les concentrations en elle-même peuvent être plus faibles que celles observées dans l'habitacle d'une voiture, mais l'effort augmenterait la dose inhalée. Par exemple, des mesures réalisées en Île-de-France à partir de capteurs portables mettent par exemple en évidence une très grande variabilité de l'exposition aux particules fines dans les transports, avec des niveaux observés à vélo plus faibles que ceux mesurés dans les autres modes (tramway, train, métro, bus), et en particulier plus faibles que ceux mesurés en voiture (149). L'exposition à la pollution de l'air à vélo est également moindre que dans l'habitacle d'une voiture prise dans les embouteillages (142).

La démarche la plus courante pour prendre en compte le risque lié à la pollution est de réaliser une ÉQIS pour la pollution de l'air, en utilisant comme donnée d'entrée une concentration estimée à partir d'hypothèses sur la concentration ambiante et sur les volumes inhalés. Cependant, selon les polluants étudiés, la concentration observée le long de trajets réalisés à pied ou à vélo peut varier dans de grandes proportions selon le chemin emprunté (150, 151). En Europe, compte tenu des niveaux de pollution observés et des durées d'exposition, cette surexposition potentielle à la pollution est trop faible pour avoir un impact majeur en termes de mortalité, en comparaison aux bénéfices liés à l'activité physique réalisée (152). Une nuance peut être apportée pour des durées d'exposition

très importantes, qui pourraient correspondre à des activités professionnelles (par exemple livreurs à vélo). Ce type de situation ne rentre pas dans le cadre de cette ÉQIS. Par ailleurs, l'application de risques relatifs pour la pollution de l'air à des concentrations inhalées est une extrapolation très forte, associée à une grande incertitude, et nécessitant de faire de nombreuses hypothèses. Compte tenu du faible impact sanitaire au regard des autres déterminants examinés dans cette ÉQIS (notamment activité physique d'une part, pollution de l'air d'autre part), et des incertitudes importantes associées à un calcul restreint à la question de la surexposition à la pollution de l'air lors des mobilités, il a été décidé de ne pas réaliser ce type de calcul. Par ailleurs, les risques liés à l'accidentologie et la pollution sont indirectement inclus dans les RER utilisés dans cette ÉQIS, issus de la méta-analyse de Kelly *et.al.* (123).

Les conclusions des différentes ÉQIS menées en Europe intégrant la pollution de l'air dans les mobilités actives rapportent des bénéfices pour la santé liés à l'activité physique largement supérieurs aux effets négatifs de la pollution (148).

#### 4.4.4 Environnements favorables aux mobilités actives

La marche est le mode de déplacement le plus démocratique, et des études ont mis en évidence que les espaces publics favorables à la marche étaient également associés à une plus grande activité physique et à davantage d'interactions sociales (153). La marche est cependant identifiée comme particulièrement complexe à promouvoir, compte tenu de l'importance des environnements, du milieu social, et de la perception sur les pratiques (154).

Plusieurs indices de marchabilité des villes ont été proposés dans la littérature. Selon le plus utilisé, Walkscore (155), qui calcule les temps nécessaires pour accéder à des services en moins de 30 minutes à pied (et en donnant plus de poids aux services accessibles en moins de 5 minutes), dans les centres-villes des trois métropoles étudiées, la majorité des déplacements nécessaires au quotidien peuvent être réalisés à pied, ce qui est cohérent avec les parts modales de marche élevées pour les trajets de moins de 1 km observées dans ces zones. Ce score souligne également le potentiel pour la marche pour des trajets supérieurs à 1 km dans ces centres-villes. Ce score diminue par ailleurs dès qu'on se place dans des localisations moins centrales. Ainsi, pour promouvoir les mobilités actives dans des zones moins propices, des aménagements *ad hoc* sont nécessaires, et doivent prendre en compte les besoins spécifiques de l'ensemble de la population et en particulier des personnes de plus de 75 ans (141).

Il existe également des freins individuels aux mobilités actives tels que les conditions météorologiques, le sentiment de ne pas avoir le temps, les craintes pour la sécurité, et la perception de sa capacité à avoir une activité physique (156). La voiture demeure identifiée par les 70 ans et plus comme un moyen de rester en contact avec l'extérieur, dans les zones rurales et urbaines (141). La promotion des mobilités actives et les aménagements doivent également prendre en compte ces motivations personnelles (156).

#### 4.4.5 Liens avec les inégalités sociales de santé

Les inégalités sociales n'ont pas été prises en compte dans cette ÉQIS, compte tenu de l'absence de données de déplacements par niveau socio-économique. La MEL a réalisé une analyse spécifique des mobilités dans les quartiers prioritaires de la politique de la ville. Elle met en évidence un usage plus faible de la voiture dans ces quartiers, et une part plus importante de la marche, et des transports en commun. Le vélo y est par contre peu utilisé (157). Ce constat est a priori généralisable aux autres territoires, l'équipement en voiture tendant à être moindre pour les foyers plus défavorisés (158).

Les mobilités actives sont très peu coûteuses par rapport à la voiture. L'Ademe estime qu'un trajet domicile travail de 1 km coûte 7 € par an à la personne qui se déplace à pied, vs 20 € pour le vélo, et 200 € pour la voiture (143).

Enfin, les mobilités actives sont très peu émettrices de gaz à effet de serre : 1 km à pied ou à vélo émet 0 kg CO<sub>2</sub>e, vs 0,01 kg CO<sub>2</sub>e pour un VAE, 0,1 kg CO<sub>2</sub>e pour un bus ou pour une voiture électrique, et 0,2 kg CO<sub>2</sub>e pour une voiture thermique (159).

#### 4.4.6 Analyse de la faisabilité et de la pertinence de l'ÉQIS

Malgré les incertitudes sur les scénarios, et le peu d'études épidémiologiques fournissant des RER, les données disponibles sont suffisantes pour réaliser des ÉQIS sur les mobilités actives et la mortalité. L'outil apparaît également pertinent pour illustrer l'intérêt des politiques de mobilité du point de vue de la santé, et met notamment en avant les bénéfices importants qui pourraient être associés aux transports en commun.

Les analyses réalisées ici ont pris en compte l'ensemble de la population adulte, pour garder une cohérence avec les autres déterminants étudiés. Il aurait été également possible de construire des scénarios différents par âge, et par sexe. L'utilisation des différents modes de transports, les distances parcourues et les temps de trajets sont en effet très influencés par ces deux paramètres. Des scénarios faisant varier les parts modales selon l'âge, et la distance, et les zones (urbains, rural) des trajets ont été testés dans le cadre d'une analyse préliminaire (160). Ces travaux ont mis en évidence la flexibilité de l'ÉQIS pour développer de tels scénarios, et la disponibilité d'un grand nombre de données exploitables dans les EMDs. La disponibilité de RER par âge et sexe est par contre un facteur limitant.

#### Disponibilités des données et limites des EMD

Les EMD (désormais appelées Enquêtes mobilité certifiées Cerema ou EMC<sup>2</sup>) sont un outil de planification stratégique de la mobilité (161). Elles permettent de mesurer de manière harmonisée, représentative et robuste les mobilités de la population. Par rapport à d'autres types d'enquêtes sur les mobilités (ex : données issues de la téléphonie mobile, enquête origine-destination, comptage ponctuel...), elles apportent plus spécifiquement des données utiles aux ÉQIS (nombre de déplacements, parts modales, distances parcourues, temps de trajet) (162).

Elles sont cependant coûteuses, ce qui explique leurs mises à jour peu fréquentes (environ 10 ans). Ces enquêtes sont réalisées entre l'automne et le printemps pour représenter au mieux les trajets domicile-travail, à des périodes où la météorologie peut être moins favorable aux mobilités actives. Les déplacements très courts (<1 km), sur lesquels les mobilités actives sont majoritaires, sont les plus difficiles à documenter, et peuvent être sous-représentés dans les EMD. Enfin, cette ÉQIS a utilisé des EMD déjà anciennes, et qui sous-estiment *a priori* les évolutions récentes de pratique, en particulier pour le vélo. On ne dispose cependant pas de données qui permettraient d'émettre des hypothèses sur les parts modales actuelles de ces modes.

Un des avantages des EMD pour la réalisation d'ÉQIS est la disponibilité de données démographiques, qui permet de construire des scénarios variés, avec par exemple des objectifs différenciés par âge, par sexe, bassin de population, distances, durées de trajets... La diversité des applications possibles n'a pas été explorée dans cette ÉQIS, pour conserver une cohérence avec les autres risques, mais a fait l'objet d'un travail de stage de Master 2 (160).

Les nouvelles enquêtes EMC<sup>2</sup> vont désormais faciliter les comparaisons spatio-temporelles de la mobilité, et intégreront des modules optionnels permettant de documenter les déplacements du week-end, et prochainement d'estimer des émissions de CO<sub>2</sub> ou de polluants de l'air associées à chaque trajet, ou de recueillir des informations sur le bien-être et la santé mentale des populations (161).

Ainsi, ces enquêtes offrent des opportunités intéressantes pour développer de futures ÉQIS sur la mobilité.

## Scénarios

Pour le calcul de l'ÉQIS, on fait l'hypothèse que les parts modales s'appliquent en moyenne à chaque habitant de la zone. Cette approche de la part modale est différente de celle des collectivités qui expriment le plus souvent leurs objectifs en part modale du nombre de déplacements totaux.

De plus, les objectifs de parts modales sont souvent exprimés indépendamment des distances ; par exemple, atteindre 30 % de marche. Or, seuls les déplacements courts sont réalisables régulièrement en marche, donc l'objectif devrait se focaliser sur ces déplacements. Cela joue sur le calcul des bénéfices principalement via les durées de déplacement, qui vont ensuite conditionner la quantité d'activité physique. Par exemple, toutes distances confondues, la part modale de la marche est de 23 %, et la durée moyenne d'un déplacement à pied sur les trois métropoles est de 13 minutes. Cette part modale est de 68 %, pour une durée de 8 minutes sur les déplacements de moins de 1 km, et respectivement de 14 % et 28 minutes pour les déplacements de 1 à 3 km. Une ÉQIS visant à atteindre 30 % de part modale marche sur les trajets de moins de 1 km conduira à des bénéfices nuls (puisque la part modale dépasse déjà 30 %), et très importants sur les trajets de 1 à 3 km. Les bénéfices visant à atteindre 30 % de part modale marche sur l'ensemble des trajets seront par contre plus faibles. La marche est le mode le plus sensible à ce choix de scénarios, puisqu'elle est la plus conditionnée à la distance.

On s'intéresse également uniquement aux déplacements des résidents, et pas à ceux des personnes qui traversent les zones. Ce focus est logique pour étudier les impacts sur la santé des résidents, mais peut conduire à des parts modales différentes d'une approche qui prend en compte l'ensemble des déplacements traversant la zone quelle que soit leur origine.

Les scénarios retenus pour cette étude pilote illustrent le potentiel des ÉQIS, qui permettent, lorsque les données sont disponibles, de faire des hypothèses par distance, zone, classes d'âges. Des scénarios par sexe pourraient également être développés. Pour la présente ÉQIS, l'hypothèse d'un report total venant de la voiture a été utilisée, mais des hypothèses alternatives pourraient être prises en compte.

Enfin, des données et outils complémentaires pourraient être mobilisés pour affiner la construction de scénarios, par exemple en simulant des trajets individuels à partir des enquêtes de mobilités (163). Il serait également possible de construire des scénarios d'évolution des parts modales à partir de scénarios d'occupation des sols et de densification du tissu urbain (164).

## Complémentarité avec l'outil HEAT de l'OMS

HEAT (*Health economic assesment tool for walking and cycling*) (165) est un outil gratuit développé par l'OMS, et mis à disposition des collectivités pour réaliser des ÉQIS en lien avec la marche et le vélo. Il a notamment été utilisé pour des ÉQIS en Île-de-France (166), à Grenoble (167) et à Nantes (168). Les RR utilisés par HEAT pour la marche et le vélo sont similaires à ceux utilisés dans la présente ÉQIS. La principale différence entre les deux méthodes est la prise en compte par HEAT d'un délai de cinq ans entre la modification supposée de la part modale et l'observation des bénéfices sur la santé. HEAT permet également d'estimer les répercussions des changements de parts modales en termes d'accidents de la route, de pollution de l'air, et d'émissions de gaz à effet de serre, et propose une quantification économique, sur la base d'hypothèses générales. L'outil est préconisé pour une application à l'échelle d'un pays ou d'une ville, et permet d'ajuster plusieurs paramètres. Un guide d'utilisation simplifié a été rédigé par le Réseau français des villes santé de l'OMS (169).

HEAT peut être utilisé pour des scénarios simples, mais la création d'un outil de calcul *ad hoc* demeure plus ergonomique dès lors qu'on veut avoir plus de souplesse pour faire varier les différents paramètres.

## 5. CHALEUR

### 5.1 Principaux effets sur la santé de la chaleur

Les températures élevées sont identifiées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) comme l'un des risques climatiques les plus préoccupants en Europe, compte tenu de leurs effets sur la santé humaine et sur les écosystèmes (170).

Les études épidémiologiques montrent qu'une exposition à la chaleur est associée à une augmentation du risque de mortalité (22), et à la décompensation de pathologies respiratoires, cardiovasculaires, rénales, à des effets délétères sur la santé périnatale (171, 172), et la santé mentale (173, 174).

La forme de la relation entre température et santé est non-linéaire et sans seuil, marquée par une augmentation du risque très importante lorsque les températures s'éloignent fortement des valeurs habituelles observées dans la zone étudiée. En particulier, les vagues de chaleur, définies comme des périodes de plusieurs jours consécutifs avec des températures largement supérieures aux valeurs habituelles, sont susceptibles de constituer une véritable urgence de santé publique, comme cela a été le cas en France en 2003. Les vagues de chaleur constituent déjà l'événement extrême avec le plus d'impact sanitaire en France, faisant plus de 39 000 décès entre 1970 et 2020 (175).

Au-delà des périodes de canicule, l'impact de la chaleur tout au long de l'été est également important. En France, entre 2014 et 2022, près de 33 000 décès sont attribuables à la chaleur, dont 23 000 décès de personnes âgées de 75 ans et plus. Parmi ces décès, 28 % ont été observés pendant les canicules telles que définies par le plan de gestion des vagues de chaleur (176).

Les études épidémiologiques montrent également un effet du froid sur la santé, caractérisé par des risques faibles, mais fréquemment observés, et se maintenant possiblement sur plusieurs semaines (15, 177, 178). La causalité de cet effet, notamment pour les températures basses modérées, fait l'objet de discussion ; l'impact pourrait être fortement associé à des maladies infectieuses, et non au seul effet direct du froid.

Il faut noter que, pour l'instant, les effets de la température sur la santé, et notamment de la chaleur, sont principalement analysés via l'angle d'une exposition à court terme. Peu d'études se sont penchées sur les effets à long terme, et mettent en évidence un possible impact des températures inhabituelles sur la santé cardiovasculaire notamment (179).

### 5.2 Méthode

#### 5.2.1 Couples et relations exposition-risque

Les connaissances physiologiques (180) et épidémiologiques (178), ne permettent de retenir que le couple « effets à court terme de la température – mortalité totale ». Des impacts de la température sur d'autres effets sanitaires comme le recours aux soins d'urgences, ou des effets sur la santé périnatale sont également documentés dans la littérature, mais avec encore trop peu d'études pour permettre des ÉQIS. Comme il existe un phénomène d'acclimatation à la température, et que la relation est fortement non-linéaire, le contexte local doit être pris en compte dans la relation exposition / effet. Il n'est pas recommandé d'utiliser une relation issue de la littérature, mais plutôt une relation construite spécifiquement pour la zone d'étude considérée. De telles relations existent déjà pour 18 villes françaises continentales (15), et ont été mises à jour pour cette étude.

Pour cette mise à jour, les relations températures - mortalité utilisées ont été construites à partir d'analyses en séries temporelles, reproduisant les mêmes modèles dans plusieurs villes différentes, puis combinant entre eux les résultats de ces modèles pour obtenir une relation combinée robuste. Ces modèles ont été construits pour 20 villes françaises, pour la période 2000-2017, dont les unités urbaines des trois métropoles incluses dans cette ÉQIS.

Dans chaque ville, la RER a été étudiée à l'aide d'un modèle linéaire généralisé avec une distribution poissonnienne de la mortalité en prenant en compte la sur-dispersion des données. Le modèle inclut la température moyenne, le jour de la semaine et, les jours fériés. La tendance à long terme et la saisonnalité ont été modélisées à l'aide d'une *natural spline* du temps avec 8 degrés de liberté par an pour Paris, Marseille, Lille et Lyon et 3 degrés de liberté par an pour les autres villes pour lesquelles le nombre journalier de décès est plus faible. L'association avec la température est modélisée à l'aide de modèles non linéaires à retards distribués (181). Ces modèles permettent de décrire des associations non-linéaires retardées en combinant deux fonctions définissant d'une part l'association dose-réponse et d'autre part l'association dans la dimension des retards. L'association dans la dimension des températures est modélisée à l'aide d'une B-spline quadratique avec trois nœuds internes placés aux percentiles 1, 60 et 99 de la distribution des températures. Le choix du nombre et de la position des nœuds a été obtenu à l'aide du critère d'Akaike. L'association dans la dimension des retards (effet différé) est modélisée à l'aide d'une *natural spline* avec trois nœuds internes équidistants dans l'échelle log afin de permettre plus de flexibilité dans la première partie de la courbe des retards où plus de variabilité est attendue. La période des retards étudiée est fixée à 21 jours. Cette durée est classiquement utilisée dans la littérature, car elle permet de prendre en compte les effets différés du froid. Dans chaque ville, la RER a été réduite à l'association cumulée sur 0-3 jours, et sur 0-21 jours, puis les estimations spécifiques à chaque ville ont été combinées lors d'une méta-analyse en utilisant un modèle à effet aléatoire (182, 183). Des RER par type de climat ainsi que des estimateurs recentrés combinant l'estimateur issu de la méta-analyse et l'estimateur spécifique à la ville ont également été dérivés.

Les RER combinées sur 0-3 jours et recentrés pour chaque ville sont utilisées en analyse principale. Les résultats des différents modèles sont détaillés en Annexe 4.

## 5.2.2 Données d'exposition

### Températures des stations de Météo-France

Les modèles fournissant la RER utilisent la température moyenne journalière mesurée par les stations de référence (station des aéroports de Lille, Montpellier et Rouen). Les données de ces stations ont été obtenues auprès de Météo-France. En complément, des stations supplémentaires ont été sélectionnées, en ciblant les stations de type 0, 1 ou 2 (classification des stations selon Météo-France) (Tableau 38).

**Tableau 38. Localisation des sites de mesure de températures disponibles par zone**

|     | Station de Météo France  | Latitude   | Longitude |
|-----|--------------------------|------------|-----------|
| MEL | Lille-Lesquin            | 50°34'12"N | 3°05'51"E |
|     | Roubaix                  | 50°42'27"N | 3°10'49"E |
| 3M  | Montpellier Aéroport     | 43°34'34"N | 3°57'53"E |
|     | Villeneuve les Maguelone | 43°32'17"N | 3°51'14"E |
|     | Prades-le-Lez            | 43°43'06"N | 3°52'00"E |
| MRN | Jumièges                 | 49°26'09"N | 0°49'15"E |
|     | Rouen Jardin             | 49°25'22"N | 1°04'38"E |
|     | Rouen-Boos               | 49°23'22"N | 1°10'42"E |

## Températures spatialisées

Pour avoir une vision plus fine de l'hétérogénéité spatiale de la température, des données de températures moyennes journalières spatialisées sur la France continentale avec une maille 1 km ont été obtenues pour la période 2015-2017 auprès de l'Inserm (65). Les températures moyennes à l'Iris sont obtenues en moyennant les températures de chaque maille recouvrant l'Iris, pondérées par la surface d'intersection entre la maille et l'Iris. Ces données à l'Iris sont présentées à titre descriptif, mais ne sont pas mobilisées dans l'ÉQIS.

### 5.2.3 Équation

La RER étant non-linéaire, et prenant en compte des effets différés, le calcul du nombre de décès attribuable à la chaleur est plus complexe que pour les autres déterminants. Les associations température-mortalité issues des modèles sont utilisées pour prédire chaque jour le nombre de décès attribuable à une température donnée en appliquant la méthodologie décrite par Gasparrini *et al.* (184). L'équation de fraction attribuable présentée précédemment peut également s'écrire :

**Équation 6**  $FA = 1 - e^{-\beta x}$

Où  $\beta_x$  est le risque associé à l'exposition  $x$ .

Gasparrini *et al.* proposent de considérer l'exposition à la température aux différents lags comme des contributeurs indépendants au risque. Aussi, pour un jour donné, la fraction attribuable à la température se calcule selon

**Équation 7**  $FA = 1 - e^{-\sum_{l=0}^{l=N} \beta_{x,l}}$

Où  $\beta_{x,l}$  est le risque associé à l'exposition  $x$  au lag  $l$ .

Les scripts de calculs proposés par Gasparrini *et al.* (184) ont été adaptés pour l'ÉQIS.

### 5.2.4 Scénarios

#### Décès attribuables à la chaleur pendant les jours chauds et très chauds

Pour ces scénarios, un jour chaud est défini comme un jour où la température est supérieure au percentile 50 de la distribution des températures observées à la station sur la période 2015-2017 dans chaque zone d'étude. Un focus sur les jours très chauds est réalisé en considérant les jours où la température est supérieure au percentile 90. Ces percentiles sont choisis en cohérence avec des études précédentes réalisées en France (176).

#### Décès attribuables à la chaleur pendant les canicules

Pour ces scénarios, l'influence de la chaleur est calculée uniquement pendant les jours de canicules telles que définies par le plan national de gestion des vagues de chaleur. Ce plan définissant les canicules au niveau départemental, les jours de canicule pour chaque zone correspondent aux jours de canicules du département correspondant. Ils ont été identifiés rétrospectivement à partir des données observées par Météo-France (et peuvent donc différer des vigilances canicules qui s'appuient sur des données prédites).

### 5.2.5 Analyses de sensibilité

Pour cette ÉQIS, l'analyse principale a été réalisée à partir des relations température-mortalité recentrées pour chaque zone, et prenant en compte des effets retardés jusqu'à 3 jours.

L'utilisation de la relation recentrée permet d'utiliser au mieux l'information disponible pour chaque zone. Elle n'est cependant possible que pour les villes incluses dans l'étude épidémiologique ayant fourni la relation exposition risque. Pour vérifier la transposabilité à d'autres villes, deux relations alternatives ont été construites et testées : 1) une relation combinant l'information des 20 villes inclut dans l'étude épidémiologique, 2) une relation construite par type de climat.

Le choix d'un délai de 3 jours pour les effets retardés permet de prendre en compte la majorité de l'impact de la chaleur, tout en étant cohérent avec la démarche appliquée aux effets à court terme de la pollution de l'air (qui prend en compte les effets sur 0-1 jours après l'exposition). Pour les chaleurs très intenses, l'effet peut se maintenir jusqu'à 10 jours après l'exposition. Pour des chaleurs moins intenses, on peut au contraire observer une sous-mortalité au-delà de 3 jours après l'exposition (15). Le choix du nombre de jours sur lesquels le calcul du risque est réalisé, a donc une influence forte sur les résultats, en particulier pour la chaleur modérée. Une analyse de sensibilité portant sur des risques cumulés sur 0-10 jours a été réalisée.

## 5.3 Résultats

### 5.3.1 Données d'exposition

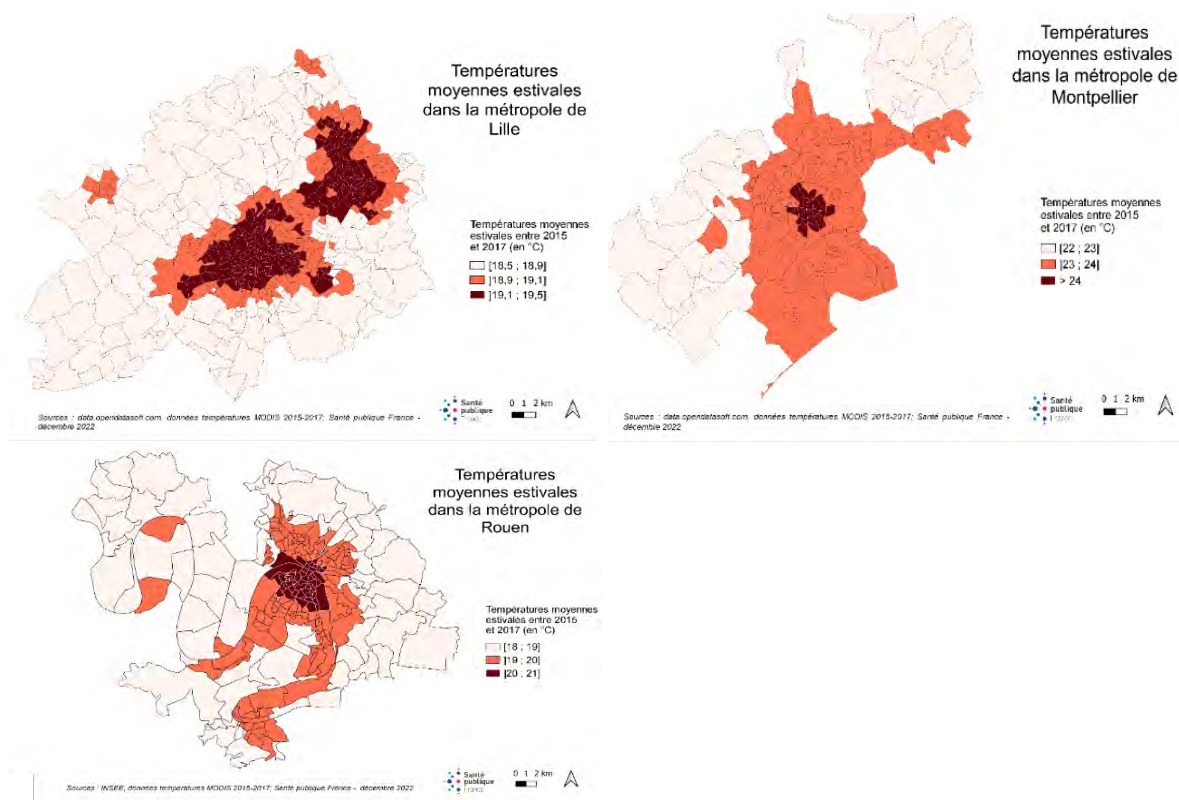
#### Températures mesurées par les stations de Météo-France

Pour la zone de la MEL, les données de la station de Roubaix présentaient trop de valeurs manquantes sur la période d'étude pour être exploitables, seules les données de la station de mesure de Lille-Lesquin (station de référence) ont été utilisées. La température estivale moyenne (juin-août) en 2015-2017 était de 18,7 °C à cette station. Dans la zone 3M, la température estivale moyenne (juin-août) en 2015-2017 était de 24,2 °C à la station Montpellier-Aéroport (station de référence), 23,9 °C à Villeneuve-les-Maguelone et 23,7 °C à Prades-le-Lez. Dans la zone de MRN la température estivale moyenne (juin-août) en 2015-2017 était de 18,1 °C à la station Rouen-Boos (station de référence), 19,9 °C à Rouen Jardin et 19,3 °C à Jumièges.

#### Température estivale moyenne modélisée

Dans toutes les zones d'études, à partir des données spatialisées de l'Inserm, on observe un gradient de température des Iris les moins denses, plus frais en moyenne, vers les iris les plus denses (Figure 13). À la MEL, la température estivale moyenne 2015-2017 varie de 18,6 °C dans les Iris peu denses à 19,0 °C dans les Iris denses. Elle variait, à 3M, de 22,9 °C à 23,6 °C et à la MRN, de 18,5 °C à 19,8 °C.

Figure 13. Températures moyennes estivales (juin-août) modélisée à l'Iris



### 5.3.2 Nombre de décès attribuables aux jours chauds et très chauds

Les analyses sont concentrées sur les aires urbaines de chacune des trois métropoles.

En moyenne chaque année, les 183 jours les plus chauds (avec des températures supérieures au percentile 50 de la distribution) sont associés à 149 [119 : 179] décès attribuables à la chaleur à la MEL, 66 [53 : 78] à 3M et 77 [61 : 92] à la MRN. Une part importante de cet impact se concentre sur les 37 jours très chauds (avec des températures supérieures au percentile 90 de la distribution) : 61 % à la MEL et MRN, et 53 % à 3M (Tableau 39). Les jours de canicule sont moins nombreux et selon les seuils départementaux du système d'alerte canicule et santé sont associés à un impact plus faible (NB : aucune canicule observée à la MRN pendant la période d'étude).

Tableau 39. Nombre annuel de décès attribuables aux jours chauds et très chauds (moyenne 2015-2017)

| Jours chauds |               |                 |                              |                                       | Jours très chauds |                 |                              |                                       | Canicule        |                              |                                       |
|--------------|---------------|-----------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-----------------|------------------------------|---------------------------------------|-----------------|------------------------------|---------------------------------------|
|              | Percentile 50 | Nombre de jours | Décès attribuables (IC 95 %) | Fraction de mortalité attribuable (%) | Percentile 90     | Nombre de jours | Décès attribuables (IC 95 %) | Fraction de mortalité attribuable (%) | Nombre de jours | Décès attribuables (IC 95 %) | Fraction de mortalité attribuable (%) |
| MEL          | 11,5 °C       | 183             | 149<br>[119 : 179]           | 1,8 %<br>[1,4 ; 2,1]                  | 19 °C             | 37              | 92<br>[76 : 105]             | 1,1 %<br>[0,9 ; 1,3]                  | 12              | 14<br>[10 : 17]              | 0,2 %<br>[0,1 ; 0,2]                  |
| 3M           | 15,4 °C       | 183             | 66<br>[53 : 78]              | 2,3 %<br>[1,8 ; 2,7]                  | 24,3 °C           | 37              | 35<br>[27 : 42]              | 1,2 %<br>[0,9 ; 1,5]                  | 20              | 6<br>[2 : 9]                 | 0,2 %<br>[0,1 ; 0,3]                  |
| MRN          | 11,1 °C       | 183             | 77<br>[61 : 92]              | 1,9 %<br>[1,5 ; 2,2]                  | 18,3 °C           | 37              | 47<br>[40 : 50]              | 1,2 %<br>[1 ; 1,3]                    | 0               | 0                            | 0 %                                   |

Lecture du tableau : à la MEL, les jours où la température moyenne dépasse 11,5 °C sont considérés comme des jours chauds. Pendant ces jours (183 par an en moyenne), la température est responsable de 149 décès [intervalle de confiance 119 : 179]. Les températures observées pendant les jours les plus chauds (>19 °C, soit 37 jours par an en moyenne) sont responsables en moyenne de 92 décès. Parmi ces décès, 14 sont observés pendant les périodes de canicule telles que définies par les seuils du système d'alerte canicule et santé.

### 5.3.3 Analyses de sensibilité

#### Choix de la relation exposition-risque

L'utilisation d'une relation non recentrée, construite sur l'ensemble des villes ou par type de climat, a peu d'influence sur l'estimation du nombre de décès attribuable à la chaleur (Tableau 40a).

**Tableau 40a. Nombre annuel de décès attribuables à la chaleur, selon le choix de la relation exposition risque**

|     | Jours chauds       |                 |                       | Jours très chauds |                 |                       | Jours de canicule |                 |                       |
|-----|--------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|
|     | RR recentré        | RR combiné      | RR par type de climat | RR recentré       | RR combiné      | RR par type de climat | RR recentré       | RR combiné      | RR par type de climat |
| MEL | 149<br>[119 : 179] | 159 [138 : 180] | 151<br>[126 : 176]    | 92<br>[76 : 105]  | 98 [89 : 106]   | 94<br>[80 : 108]      | 14 [10 : 17]      | 17<br>[15 : 19] | 17<br>[14 : 21]       |
| 3M  | 66<br>[53 : 78]    | 71<br>[66 : 79] | 58<br>[32 : 81]       | 35<br>[27 : 42]   | 42<br>[38 : 45] | 37<br>[25 : 47]       | 6<br>[2 : 9]      | 9<br>[8 : 10]   | 6<br>[2 : 9]          |
| MRN | 77<br>[61 : 92]    | 73<br>[64 : 83] | 96<br>[77 : 116]      | 47<br>[40 : 50]   | 45<br>[41 : 49] | 52<br>[47 : 60]       | 0                 | 0               | 0                     |

#### Choix du nombre de jours pour calculer les effets retardés

L'analyse sur 10 jours après l'exposition plutôt que 3 jours conduit à réduire de manière importante le nombre de décès attribuable à la chaleur pendant les jours chauds et très chauds. Par contre, ce choix n'a pas d'incidence sur le nombre de décès attribuables à la chaleur pendant les canicules (Tableau 40b). Cela suggère que les décès ne sont anticipés que de quelques jours pour les températures non-extrêmes.

**Tableau 40b. Nombre annuel de décès attribuables à la chaleur, selon le choix de la relation exposition risque**

|     | Jours chauds    |               | Jours très chauds |              | Jours de canicule |             |
|-----|-----------------|---------------|-------------------|--------------|-------------------|-------------|
|     | 0-3 jours       | 0-10 jours    | 0-3 jours         | 0-10 jours   | 0-3 jours         | 0-10 jours  |
| MEL | 149 [119 : 179] | 17 [-34 : 69] | 92 [76 : 105]     | 45 [36 : 59] | 14 [10 : 17]      | 12 [7 : 16] |
| 3M  | 66 [53 : 78]    | 17 [-4 : 37]  | 35 [27 : 42]      | 23 [19 : 28] | 6 [2 : 9]         | 5 [-1 : 9]  |
| MRN | 77 [61 : 92]    | 32 [7 : 57]   | 47 [40 : 50]      | 22 [17 : 27] | 0                 | 0           |

## 5.4 Discussion

### 5.4.1 Des effets de la chaleur observés à partir de températures modérées

Les résultats montrent un impact important de la chaleur sur la mortalité au regard du faible nombre de jours concernés : les températures supérieures au percentile 50 représentent environ 2 % de la mortalité dans les métropoles. Cependant, la majorité de l'impact est associée à des températures plus élevées, supérieures aux percentiles 90, et observées sur un nombre très faible de jours. On note également pendant la période d'étude une contribution très faible des canicules telles que définies par le plan de gestion des vagues de chaleur, dû au faible nombre de jours concernés.

### 5.4.2 Des incertitudes multiples

La RER est construite localement et l'ÉQIS reprend les mêmes données environnementales et sanitaires pour les unités urbaines. Il n'y a donc pas d'incertitude associée à sa transposabilité, et l'IC95 % de la relation fournit une estimation de l'incertitude associée à la RER dans les communes des unités urbaines. L'application de la RER à l'ensemble de la MEL, en intégrant des communes hors unités urbaines, introduit une incertitude a priori modérée.

Le choix du délai sur lequel estimer l'impact joue par contre de manière importante sur les résultats : en considérant 10 jours après l'exposition plutôt que 3, le nombre de décès attribuable à la chaleur diminue fortement, en lien avec la diminution de la valeur de la relation pour des chaleurs modérées. Ceci s'explique par la prise en compte dans le calcul d'une augmentation du risque de décès et de la mortalité sur les premiers jours, suivi par une sous-mortalité les jours suivants. Dans l'analyse principale, le choix a été fait de se concentrer sur les premiers jours, pour être cohérent avec les analyses des effets à court terme de la pollution de l'air, qui ne prennent pas en compte ces effets retardés. Pour la chaleur, une diminution de la mortalité entre 10 et 21 jours après l'exposition peut être observée. Une hypothèse est que les personnes décédées à cause d'une exposition à la chaleur modérée sont très fragiles, et que leur décès n'est avancé que de quelques jours, ce qui conduit à une sous-mortalité les jours suivants (« effets moisson »). Cette hypothèse reste toutefois discutée, avec des auteurs proposant que la perte d'espérance de vie à cause de la chaleur soit plutôt de plusieurs semaines à années.

Il n'a pas été possible de construire un scénario îlot de chaleur urbain suffisamment robuste à partir des données disponibles pour cette étude. La démarche serait cependant possible, à condition de construire des RER à partir de séries de températures spatialisées, et non de températures mesurées uniquement aux stations de Météo-France.

### 5.4.3 Lien avec les autres déterminants

La littérature indique l'existence probable d'une synergie entre pollution de l'air et température, i.e. un effet plus important de la température sur la santé lorsque l'air est plus pollué (23, 185), et un effet plus important de la pollution sur la santé lorsque la température est plus élevée (23, 186). Améliorer la qualité de l'air permettrait alors de réduire en partie l'impact de la chaleur sur la santé, mais dans des proportions qui demeurent a priori limitées. La présence de végétation peut par ailleurs réduire la température, et donc l'impact sur la santé (30, 58).

Il existe peu d'études explorant les interactions entre bruit et températures, mais la chaleur ayant un effet sur le sommeil (187-189), sur la santé mentale (190), et sur la capacité d'apprentissage, des interactions avec le bruit sur ces effets de santé sont probables. Le bruit peut également être un frein à la mise en œuvre de mesures de prévention pendant les vagues de chaleur (par exemple, ouverture des fenêtres la nuit limitée par le bruit).

Enfin, si la chaleur peut ponctuellement limiter le recours aux mobilités actives, notamment à la marche en l'absence de voies ombragées, et aux transports en commun, une activité physique régulière tout au long de l'année peut contribuer à une meilleure capacité de thermorégulation, et in fine à un impact moindre de la chaleur. On dispose cependant de peu de travaux examinant les liens entre ces deux déterminants de la santé.

Globalement, les travaux explorant les impacts conjoints de la chaleur et d'autres expositions environnementales et comportementales demeurent peu nombreux.

### 5.4.4 Inégalités sociales

Les inégalités sociales n'ont pas été prises en compte dans cette ÉQIS puisque les résultats ne sont pas spatialisés. Cependant les personnes souffrant de pathologies chroniques, les personnes isolées socialement, n'ayant pas accès à des environnements frais, ou à des moyens de transport, et de manière générale les personnes plus défavorisées économiques présentent des risques plus importants vis-à-vis de la chaleur (191). Les inégalités sociales de santé sont un déterminant majeur du risque chaleur.

#### 5.4.5 Analyse de la faisabilité et de la pertinence

Ces ÉQIS sont faisables en agrégé à partir des données de température mesurées par Météo-France. Les RER construites pour les villes françaises permettent de calculer avec une bonne confiance un nombre de décès attribuables à la chaleur. Elles mettent en avant un impact important, en dépit du faible nombre de jours concernés.

Une limite importante est l'échelle spatiale d'analyse : pour le moment, ces relations sont construites et s'appliquent à des zones agrégées. Il est alors impossible d'estimer les différences d'impact selon les zones, la défaveur sociale, ou de tester des scénarios sur les îlots de chaleur urbains par exemple. La construction de relations expositions-risques applicables à des échelles fines sera indispensable pour affiner ces ÉQIS sur le plan géographique.

## 6. POLLUTION DE L'AIR

### 6.1 Principaux effets sur la santé de la pollution de l'air ambiant

La pollution de l'air extérieur, dit air ambiant, peut être induite par de nombreux polluants différents, particulaires et gazeux, nocifs pour la santé humaine ou l'intégrité des écosystèmes. Les polluants les plus classiquement étudiés du point de vue de la santé sont les particules fines (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>), l'ozone (O<sub>3</sub>), et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>).

La pollution de l'air a des effets systémiques sur l'organisme, avec des impacts établis sur la mortalité (192-195), la santé respiratoire et cardiovasculaire (196), le développement de maladies chroniques comme le diabète (197-199), le cancer (200, 201), et certaines maladies neurodégénératives (202, 203). Elle affecte également la santé reproductive, périnatale, et le développement de l'enfant (178, 204). On distingue classiquement des effets à court terme, et à long terme. Les effets à court terme sont des effets qui surviennent dans les quelques jours suivant une exposition à la pollution. Ils traduisent le fait que la pollution de l'air extérieur est responsable d'aggravations aiguës de l'état de santé ou d'exacerbations de pathologies (ou maladies) chroniques. Ces aggravations peuvent se manifester par des symptômes pouvant conduire à des recours aux soins, des hospitalisations, voire, dans les cas les plus graves des décès. Les effets à long terme sont des effets qui peuvent être définis comme la contribution de l'exposition à la pollution de l'air extérieur au développement de pathologies chroniques (respiratoires, cardiovasculaires, neurologiques...). Ces pathologies vont se traduire par des symptômes cliniques tout au long de la vie, et pourront, dans les cas les plus graves, conduire au décès.

Ces effets, à court et à long terme, ne sont pas totalement indépendants car la plupart des effets à court terme sont inclus dans les effets à long terme qui résultent de mécanismes physiopathologiques complexes, conduisant à un processus progressif de genèse de la pathologie.

La diversité des effets sanitaires induits, l'impossibilité d'éviter toute exposition, et pour la plupart des polluants, l'absence de seuil au-dessous duquel aucun effet ne serait constaté, conduit à un impact en termes de santé publique considérable. Les particules fines sont responsables de près de 40 000 décès par an en France (205) et constituent l'un des principaux déterminants environnementaux de la santé.

L'OMS recommande des valeurs guides à ne pas dépasser pour protéger la santé ([Tableau 41](#)) (206).

**Tableau 41. Valeurs guides annuelles de l'Organisation Mondiale de la Santé pour la pollution de l'air ambiant**

|                   | Court terme<br>Moyenne sur 24 heures (ou maximum journalier pour l'ozone) | Long terme<br>Moyennes annuelles            |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| PM <sub>2,5</sub> | 15 µg/m <sup>3</sup>                                                      | 5 µg/m <sup>3</sup>                         |
| PM <sub>10</sub>  | 45 µg/m <sup>3</sup>                                                      | 15 µg/m <sup>3</sup>                        |
| NO <sub>2</sub>   | 20 µg/m <sup>3</sup>                                                      | 10 µg/m <sup>3</sup>                        |
| O <sub>3</sub>    | 100 µg/m <sup>3</sup> en moyenne sur 8 heures                             | 60 µg/m <sup>3</sup> en moyenne saisonnière |

### 6.2 Méthode

#### 6.2.1 Couples et relations exposition-risque

Compte tenu du grand nombre de couples pouvant être étudiés, seuls les polluants les plus mesurés et étudiés ont été retenus : PM<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>. Les PM<sub>10</sub> n'ont pas été retenues car les concentrations atmosphériques de ces particules sont très corrélées et en grande partie incluses dans celles des PM<sub>2,5</sub>.

De plus, il existe un risque de double compte de leur impact du fait de leur effet commun. Le plus grand nombre d'études étant disponible pour les PM<sub>2,5</sub>, il a été décidé de privilégier cet indicateur.

Les couples polluants-effets sur la santé qui ont été retenus sont ceux pour lesquels un lien robuste de causalité a été établi par les études épidémiologiques (4, 206). La sélection s'est appuyée en particulier sur des travaux en cours au niveau européen dans le cadre du projet EMAPEC (*Estimation of Morbidity from Air Pollution and its Economic Costs*) coordonné par l'OMS. L'objectif de ce projet est d'établir une méthodologie pour estimer les coûts économiques de la morbidité liée à l'exposition à la pollution atmosphérique extérieure dans une population et de tester son application à différentes échelles géographiques (nationale, régionale et mondiale) (207).

Les couples et RER retenus pour les effets à court terme sont détaillés dans le [Tableau 42](#). Les effets sur la santé retenus sont la mortalité non accidentelle et les hospitalisations pour causes respiratoires et cardiovasculaires. Des relations robustes existent également pour la mortalité pour causes respiratoires ou cardiovasculaires, mais ces causes n'ont pas été retenues car elles sont déjà incluses dans la mortalité non accidentelle.

Les couples et RER retenus pour les effets à long terme sont détaillés dans le [Tableau 43](#). À noter que pour l'incidence des AVC et des cancers du poumon, les études épidémiologiques considèrent des populations de 35 ans et plus, alors que pour l'incidence de l'asthme, les analyses se concentrent sur les enfants.

**Tableau 42. Couples et relations exposition-risque retenus pour les effets à court terme de la pollution de l'air extérieur**

| Événements de santé                                          | Code CIM-10 | Âge  | Polluant          | RER pour 10 µg/m <sup>3</sup><br>[intervalle de confiance à 95 %] | Référence                            | RER pour analyse de sensibilité                                                                        |
|--------------------------------------------------------------|-------------|------|-------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mortalité non accidentelle                                   | A00-R99     | Tous | PM <sub>2,5</sub> | Relation log-linéaire<br>1,0063<br>[1,0025-1,01009]               | Liu <i>et al.</i> ,<br>2019 (208)    |                                                                                                        |
|                                                              |             |      | NO <sub>2</sub>   | Relation log-linéaire<br>1,0075<br>[1,0040-1,011]                 | Corso <i>et al.</i> ,<br>2019 (209)  |                                                                                                        |
| Hospitalisation pour causes respiratoires                    | J00-J99     | Tous | O <sub>3</sub>    | Relation log-linéaire<br>1,0075<br>[1,003-1,012]                  | Walton <i>et al.</i> ,<br>2014 (210) | <120 µg/m <sup>3</sup> : 1,000 [0,998-1,003]<br>≥ 120 µg/m <sup>3</sup> : 1,035 [1,024-1,046]<br>(211) |
|                                                              |             | Tous | NO <sub>2</sub>   | Relation log-linéaire<br>1,018<br>[1,0115-1,0245]                 | HRAPIE, 2013<br>(212)                | <20 µg/m <sup>3</sup> : 1,064 [1,051-1,077]<br>≥ 20 µg/m <sup>3</sup> : 1,001 [0,995-1,007]<br>(211)   |
| Hospitalisation pour causes cardiovasculaires (incluant AVC) | I00-I99     | Tous | PM <sub>2,5</sub> | Relation log-linéaire<br>1,0091<br>[1,0017-1,0166]                | HRAPIE, 2013<br>(212)                | 1,009 [1,0026-1,0153] Atkinson, 2014<br>(213)                                                          |

**Tableau 43. Couples et relations exposition-risque retenus pour les effets à long terme de la pollution de l'air extérieur**

| Événements de santé           | Code CIM-10 | Âge      | Polluant          | RER pour 10 µg/m <sup>3</sup><br>[intervalle de confiance à 95 %] | Références                        | RER pour analyse de sensibilité            |
|-------------------------------|-------------|----------|-------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|
| Mortalité totale              | A00-Y98     | ≥ 30 ans | PM <sub>2,5</sub> | 1,15 [1,05-1,25]                                                  | Pascal <i>et al.</i> , 2016 (214) | 1,07 [1,03-1,11]<br>(Chen, 2020) (192)     |
|                               |             |          | NO <sub>2</sub>   | 1,023 [1,008-1,037]                                               | COMEAP, 2018 (215)                | 1,02 [1,01-1,04]<br>(Huangfu, 2020) (195)  |
| Incidence des AVC             | I60-I64     | ≥ 35 ans | PM <sub>2,5</sub> | 1,13 [1,04-1,23]                                                  | Scheers, 2015 (216)               | 1,16 [1,12-1,20]<br>(Yuan, 2019) (217)     |
| Incidence du cancer du poumon | C34         | ≥ 35 ans | PM <sub>2,5</sub> | 1,09 [1,04-1,14]                                                  | Hamra, 2014 (218)                 | 1,16 [1,10-1,23]<br>(Yu, 2021) (219)       |
| Incidence de l'asthme         |             | 0-17 ans | NO <sub>2</sub>   | 1,13 [1,05-1,18]                                                  | Khreis, 2017 (220)                | 1,10 (1,05; 1,18)*<br>(Khreis, 2017) (220) |

\*L'article de Mölter *et al* 2015 (221) basé sur la prévalence et non l'incidence a été retiré de la méta-analyse

## 6.2.2 Données de santé

### Mortalité

Pour les impacts à court terme, les données journalières de mortalité non accidentelle tous âges (Classification internationale des maladies - 10e révision, CIM-10 : A00-R99) ont été obtenues auprès du Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès (CépiDc-Inserm) pour les années les plus récentes disponibles (2015-2017).

Pour les impacts et le poids total à plus long terme de la pollution, les données de mortalité totale (CIM-10 : A00-Y98) annuelle toutes causes et par âge chez les 30 ans et plus à la commune ont également été obtenues auprès du CépiDc pour les années les plus récentes disponibles (2015-2017).

### Hospitalisations pour causes cardiovasculaires et respiratoires

Les données journalières d'hospitalisation par codes postaux ont été obtenues via le Système national des données de santé (SNDS) à partir de la base de données du PMSI (Programme de médicalisation des systèmes d'information) en retenant les codes CIM10 listés dans les [Tableau 42](#) et [Tableau 43](#). Seules les hospitalisations non programmées doivent être incluses, elles sont identifiées à partir d'une liste d'unités médicales détaillées en Annexe 4.

Le lieu de résidence de la personne hospitalisée est identifié dans le PMSI par les codes postaux de résidence ou sur les codes PMSI (lorsque les communes sont trop petites pour le respect de la protection des données individuelles). Les codes postaux couvrent le plus souvent un ensemble de communes. Lorsque cela est le cas, et afin de pouvoir extraire les effectifs d'hospitalisation par commune, le lieu de résidence a été identifié à partir des communes de résidence renseignées pour la même personne dans les tables des consommateurs par année du SNDS (table regroupant l'ensemble des personnes ayant eu un recours aux soins remboursé par l'Assurance maladie, autre que les hospitalisations).

### Incidence du cancer du poumon

En France, il n'existe pas de registre national du cancer, en revanche des registres de cancers généraux ou spécialisés recueillent des informations sur différentes localisations de cancers au niveau départemental ou infra départemental.

Dans cette étude, seul le département de l'Hérault possède un registre général. Pour 3M, l'incidence par commune a été calculée en utilisant les données de ce registre. Pour la MEL, un registre est également disponible mais il ne couvre pas la totalité de la zone. Les données du registre ont été utilisées pour les communes couvertes par le registre. Les analyses n'ont pas été réalisées dans les communes non couvertes. Enfin, pour la MRN, il n'existe pas de registre du cancer. L'incidence départementale moyenne 2007-2018 estimée par Santé publique France pour la Seine-Maritime a été utilisée pour l'ensemble des communes de la zone. Ces données sont issues du portail Geodes (222).

### Incidence de l'AVC

Les données d'incidence annuelle de l'AVC sont estimées à partir des hospitalisations pour les codes CIM10 I60-I64 identifiées PMSI. Ces données sont disponibles à partir de 2006. Un cas incident sur la période d'étude correspond à une personne n'ayant pas fait d'AVC entre 2006 et la période d'étude. Tout individu ayant fait un premier AVC avant 2006 est compté comme incident et conduit à une surestimation de l'incidence. La majorité des personnes faisant un AVC sont hospitalisées. Cependant une sous-estimation de cette incidence est possible car entre 1 et 3 % décèdent avant leur arrivée à l'hôpital et les résidents d'établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes ne sont pas systématiquement hospitalisés.

## Incidence de l'asthme

Dans la majorité des études épidémiologiques fournissant les RER, les personnes asthmatiques sont identifiées si un des trois critères suivants ou une combinaison de ces critères s'applique (déclaré par questionnaire) : 1) Asthme diagnostiqué par un médecin, 2) Respiration sifflante dans les douze derniers mois, 3) Prescription de médicaments antiasthmatiques dans les douze derniers mois.

Dans notre étude, l'incidence communale de l'asthme est estimée à partir des données de délivrances de médicaments enregistrées dans le SNDS pour l'ensemble des assurés des caisses d'assurance maladie.

La définition d'un cas incident d'asthme se fait comme suit : au moins 3 dates différentes dans l'année de délivrance d'au moins un médicament de la liste de médicaments préétablie ET strictement moins de 3 dates différentes de délivrance d'au moins un médicament de la liste considérée observées durant les années antérieures (jusqu'à 3 ans).

Voici les quatre situations considérées avec pour exemple l'année de référence 2019 (logigramme en Annexe 5) :

- situation n° 1 : Pour les individus d'âge atteint dans l'année de 1 an, sont considérés comme cas, tous les cas ayant au moins 3 dates de délivrance dans l'année ;
- situation n° 2 : Pour les individus d'âge atteint dans l'année de 2 ans, sont considérés comme cas, uniquement ceux qui ont eu strictement moins de 3 dates de délivrance en 2018 ;
- situation n° 3 : Pour les individus d'âge atteint dans l'année de 3 ans, sont considérés comme cas, uniquement ceux qui ont eu strictement moins de 3 dates de délivrance en 2018 et 2017 ;
- situation n° 4 : Pour les individus d'âge atteint dans l'année strictement supérieur à 3 ans, sont considérés comme cas uniquement ceux qui ont eu strictement moins de 3 dates de délivrance en 2018, 2017 et 2016.

### 6.2.3 Données d'exposition

#### Données des stations de mesures

Pour les effets à court terme, les études épidémiologiques utilisent le plus souvent des données journalières de concentration dans l'air ambiant mesurées pour une ou plusieurs stations de mesure, pour calculer les indicateurs d'exposition. Les stations utilisées dans chaque zone sont listées dans le [Tableau 44](#). Les indicateurs d'exposition sont calculés en moyennant les données journalières de concentration mesurées aux stations selon la méthode décrite dans le guide de Santé publique France (4). Les stations urbaines sont utilisées pour calculer les moyennes sur 24 heures des concentrations de PM<sub>2,5</sub> et de NO<sub>2</sub> (209, 223), et les stations urbaines et périurbaines les maximums journaliers des moyennes sur 8 heures des concentrations d'ozone (224).

**Tableau 44. Nombre et noms des stations utilisées pour le calcul de l'indicateur d'exposition dans chacune des zones**

|     | PM <sub>2,5</sub>      | NO <sub>2</sub>                                                                         | O <sub>3</sub>                                                                         |
|-----|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| MEL | 1<br>Fives             | 1<br>Fives                                                                              | 2<br>Salomé<br>Wattignies                                                              |
| 3M  | 1<br>Près-Arènes       | 2<br>Près-Arène<br>Chaptal                                                              | 3<br>Près-Arène<br>Lattes<br>St-Gely                                                   |
| MRN | 1<br>Palais de Justice | 3<br>Palais de Justice<br>Centre hospitalier spécialisé<br>du Rouvray<br>Petit Quevilly | 3<br>Palais de Justice centre<br>hospitalier spécialisé du<br>Rouvray<br>Mesnil-Esnard |

## Données modélisées

Pour les effets à long terme, les études incluses dans le calcul de la RER sont le plus souvent des études de cohortes estimant les concentrations annuelles moyennes à proximité du domicile de chaque participant, à partir soit de modèles chimie-transport, soit de land-use regression model (192, 225, 226).

Les concentrations annuelles modélisées par mailles sur la zone d'étude ont été fournies, pour la MEL par ATMO Hauts-de-France, pour 3M par ATMO Occitanie, et pour la MRN par ATMO Normandie. Ces données ont été utilisées pour calculer une concentration moyenne à l'Iris, à l'aide d'une pondération sur les surfaces de recouvrement mailles/Iris, et d'une pondération sur la population estimée à la maille du carroyage Insee (200 m). Les concentrations à l'Iris ont ensuite été moyennées pour créer un indicateur d'exposition à la commune. L'objectif est d'obtenir un indicateur qui soit révélateur de l'exposition des résidents de la commune, en donnant davantage de poids aux niveaux de polluants modélisés dans les zones densément peuplées que dans les zones de faible densité résidentielle. La modélisation étant réalisée sur une résolution très fine, et les niveaux de polluants assez corrélés à certains types d'occupation du sol (infrastructures routières par exemple), il n'est pas forcément surprenant que l'indicateur calculé de cette façon produise une image différente de celle qui découlerait d'un calcul simple de la concentration moyenne d'un polluant réalisé sur l'ensemble du territoire de la commune de façon homogène (les mailles du modèle ayant alors toutes le même poids dans le calcul de la moyenne, modulo celles qui sont en limites de commune, dont le poids dépend de la proportion de surface de la maille prise dans une commune donnée – méthode de calcul de la concentration moyenne dite « au prorata de la surface »).

### 6.2.4 Équation

On estime la modification du risque de mortalité à partir des RER exprimés pour  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , et du différentiel de concentration (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) entre le niveau de référence et le niveau cible du scénario,  $\Delta x$  :

$$RR = e^{\ln(RER) \times \Delta x / 10}$$

Le nombre de cas attribuable est ensuite calculé à partir de l'équation détaillée précédemment. Les équations sont décrites en détail dans les guides ÉQIS (3).

### 6.2.5 Scénarios

#### Atteinte de valeurs cibles

Dans ce type de scénario, toutes les concentrations supérieures à la valeur cible sont ramenées à cette valeur cible. Les valeurs cibles ont été choisies à partir des recommandations de l'OMS ([Tableau 45](#)). En l'absence de valeurs proposées pour les effets à court terme entrant dans les gammes des concentrations journalières observées, le choix a été fait d'appliquer les valeurs cibles proposées par l'OMS, bien que ces valeurs cibles soient proposées pour des données annuelles et des effets à long terme. Ces valeurs de l'OMS sont utilisées ici par convenance, mais en dehors de leur domaine d'application. Il ne s'agit donc pas d'un scénario de respect des recommandations de l'OMS.

Les résultats pour les valeurs cibles 1 sont présentés en analyses principales, et les autres valeurs cibles sont présentées en Annexe 7.

**Tableau 45. Synthèse des valeurs cibles utilisées dans les scénarios d'atteinte de valeurs cibles**

| Polluant                              | Valeur cible 1<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Valeur cible 2<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Valeur cible 3 pour les effets à court terme uniquement<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Ozone (max des moyennes sur 8 heures) | 60                                             | 120                                            | 100                                                                                     |
| NO <sub>2</sub>                       | 10                                             | 20                                             | 25                                                                                      |
| PM <sub>2,5</sub>                     | 5                                              | 10                                             | 15                                                                                      |

### Atteinte d'une valeur observée dans les communes de même densité

Dans ce scénario, la valeur cible correspond au percentile 10 ou au percentile 50 de la distribution des concentrations mesurées dans les communes de même densité de population de chaque zone (Tableau 46).

Les résultats pour les percentiles 10 sont présentés en analyses principales, et le percentile 50 en Annexe 7.

**Tableau 46. Synthèse des P10 et P50 de concentrations communales de PM<sub>2,5</sub> et NO<sub>2</sub> par densité de population ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

|     | PM <sub>2,5</sub> |      |                |      |            |      | NO <sub>2</sub> |      |                |      |            |      |
|-----|-------------------|------|----------------|------|------------|------|-----------------|------|----------------|------|------------|------|
|     | Denses            |      | Intermédiaires |      | Peu denses |      | Denses          |      | Intermédiaires |      | Peu denses |      |
|     | P10               | P50  | P10            | P50  | P10        | P50  | P10             | P50  | P10            | P50  | P10        | P50  |
| MEL | 13,7              | 14,0 | 13,4           | 13,9 | 13,1       | 14,0 | 18,6            | 20,9 | 16,1           | 20,6 | 14,6       | 21,0 |
| 3M  | 10,4              | 11,1 | 9,6            | 10,2 | 9,2        | 9,4  | 11,9            | 16,9 | 7,8            | 10,6 | 6,4        | 7,5  |
| MRN | 10,0              | 10,2 | 9,5            | 9,8  | 9,2        | 9,4  | 14,3            | 16,6 | 11,4           | 12,8 | 9,8        | 10,7 |

## 6.2.6 Évaluation des incertitudes

Afin de ne pas multiplier les résultats, les analyses de sensibilité sont présentées uniquement pour le scénario de respect de la valeur guide recommandée par l'OMS.

### Influence des RER

Les RER alternatives proposées dans les Tableau 42 et Tableau 43 sont utilisées pour estimer l'incertitude induite par le choix du RER.

### Influence de la méthode d'estimation de l'exposition

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour déterminer l'incidence des données de population utilisées dans la pondération de la concentration d'exposition sur les résultats finaux. Ainsi, les données de population au bâti estimées par l'Ineris ont été utilisées à la place des estimations de population de l'Insee, en appliquant la même démarche. Dans un SIG, il s'agissait de moyenner par Iris les valeurs des mailles de la grille de modélisation des concentrations intersectant des bâtis en les pondérant par les valeurs des tailles de population de ces bâtis.

### Influence de l'échelle d'analyse

Une analyse de sensibilité a été réalisée en réalisant les calculs à l'Iris plutôt qu'à la commune pour la mortalité uniquement.

## 6.3 Résultats

### 6.3.1 Données d'exposition

#### Concentrations journalières

Sur la période d'étude de 2015-2017, les concentrations journalières de PM<sub>2,5</sub> sont en moyenne de 14,9 µg/m<sup>3</sup> à la MEL, 9,4 µg/m<sup>3</sup> à 3M et 10,9 µg/m<sup>3</sup> à la MRN. Pour le NO<sub>2</sub>, ces concentrations sont respectivement de 26,3 ; 23,1 et 20,3 µg/m<sup>3</sup>. Les maximums journaliers des concentrations (sur 8 heures) d'ozone sont en moyenne de 68,5 µg/m<sup>3</sup> à la MEL, 83,8 µg/m<sup>3</sup> à 3M et 68,5 µg/m<sup>3</sup> à la MRN (Tableau 47).

**Tableau 47. Distribution des concentrations journalières en PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> aux stations de mesures (µg/m<sup>3</sup>)**

| Zone | Polluant          | Min  | P25  | Médiane | Moyenne | P75  | Max.  | Valeurs manquantes |
|------|-------------------|------|------|---------|---------|------|-------|--------------------|
| MEL  | PM <sub>2,5</sub> | 3,7  | 8,1  | 12,0    | 14,9    | 18,5 | 83,9  | 97                 |
|      | NO <sub>2</sub>   | 4,6  | 17,0 | 24,4    | 26,3    | 33,5 | 70,3  | 40                 |
|      | O <sub>3</sub>    | 0,6  | 52,7 | 68,1    | 68,5    | 82,7 | 191,4 | 6                  |
| 3M   | PM <sub>2,5</sub> | 1,0  | 5,0  | 8,0     | 9,4     | 12,0 | 42    | 123                |
|      | NO <sub>2</sub>   | 4,5  | 15,6 | 21,5    | 23,1    | 28,9 | 65,0  | 0                  |
|      | O <sub>3</sub>    | 22,2 | 68,3 | 83,8    | 83,8    | 99,9 | 166,1 | 0                  |
| MRN  | PM <sub>2,5</sub> | 0,3  | 5,5  | 8,2     | 10,9    | 13,7 | 83,7  | 74                 |
|      | NO <sub>2</sub>   | 3,8  | 12,7 | 17,9    | 20,3    | 26,3 | 68,3  | 0                  |
|      | O <sub>3</sub>    | 2,7  | 54,5 | 67,0    | 68,5    | 82,0 | 166,7 | 0                  |

#### Concentrations annuelles

Les concentrations communales annuelles moyennes de PM<sub>2,5</sub> sont de 13,9 µg/m<sup>3</sup> à la MEL, 10,3 µg/m<sup>3</sup> à 3M et 9,8 µg/m<sup>3</sup> à la MRN. Les concentrations annuelles moyennes de NO<sub>2</sub> sont de 21,0 µg/m<sup>3</sup> à la MEL, 11,8 µg/m<sup>3</sup> à 3M et 13,1 µg/m<sup>3</sup> à la MRN (Tableau 48).

**Tableau 48. Distribution des concentrations annuelles moyennes de PM<sub>2,5</sub> et de NO<sub>2</sub> par classes de densité des communes (2017-2019)**

|     |                                        | Denses |         |      | Intermédiaires |         |      | Peu denses |         |      |
|-----|----------------------------------------|--------|---------|------|----------------|---------|------|------------|---------|------|
|     |                                        | P10    | Moyenne | P90  | P10            | Moyenne | P90  | P10        | Moyenne | P90  |
| MEL | PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) | 13,7   | 14,0    | 14,3 | 13,4           | 13,9    | 14,4 | 13,1       | 13,9    | 14,4 |
|     | NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )   | 18,6   | 20,9    | 23,2 | 16,1           | 21,1    | 28,0 | 14,6       | 20,6    | 27,3 |
| 3M  | PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) | 10,4   | 11,1    | 11,7 | 9,6            | 10,3    | 10,8 | 9,2        | 9,4     | 9,6  |
|     | NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )   | 11,9   | 16,6    | 21,0 | 7,8            | 11,2    | 14,6 | 6,4        | 7,4     | 8,3  |
| MRN | PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) | 10,0   | 10,3    | 10,8 | 9,5            | 9,8     | 10,1 | 9,2        | 9,4     | 9,7  |
|     | NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )   | 14,3   | 16,9    | 20,3 | 11,4           | 13,0    | 14,8 | 9,8        | 11,2    | 13,3 |

Les profils de distribution des concentrations de PM<sub>2,5</sub> et NO<sub>2</sub> par quintile de défaveur social sont très variables selon la zone et le type d'Iris (Figure 14, Figure 15).

Figure 14. Concentrations de PM<sub>2,5</sub> annuelles moyennes par type de communes et quintiles de défaveur sociale

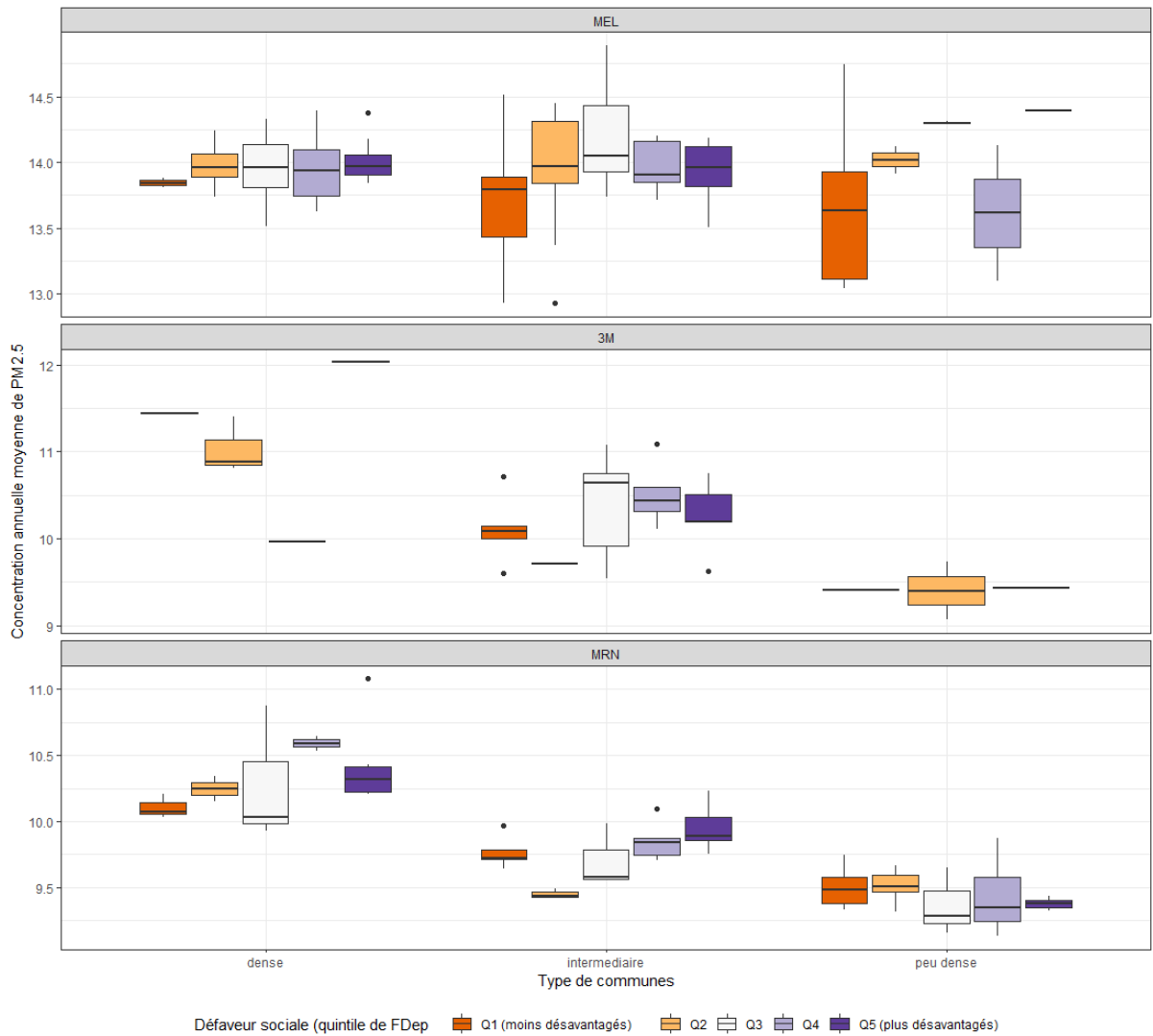
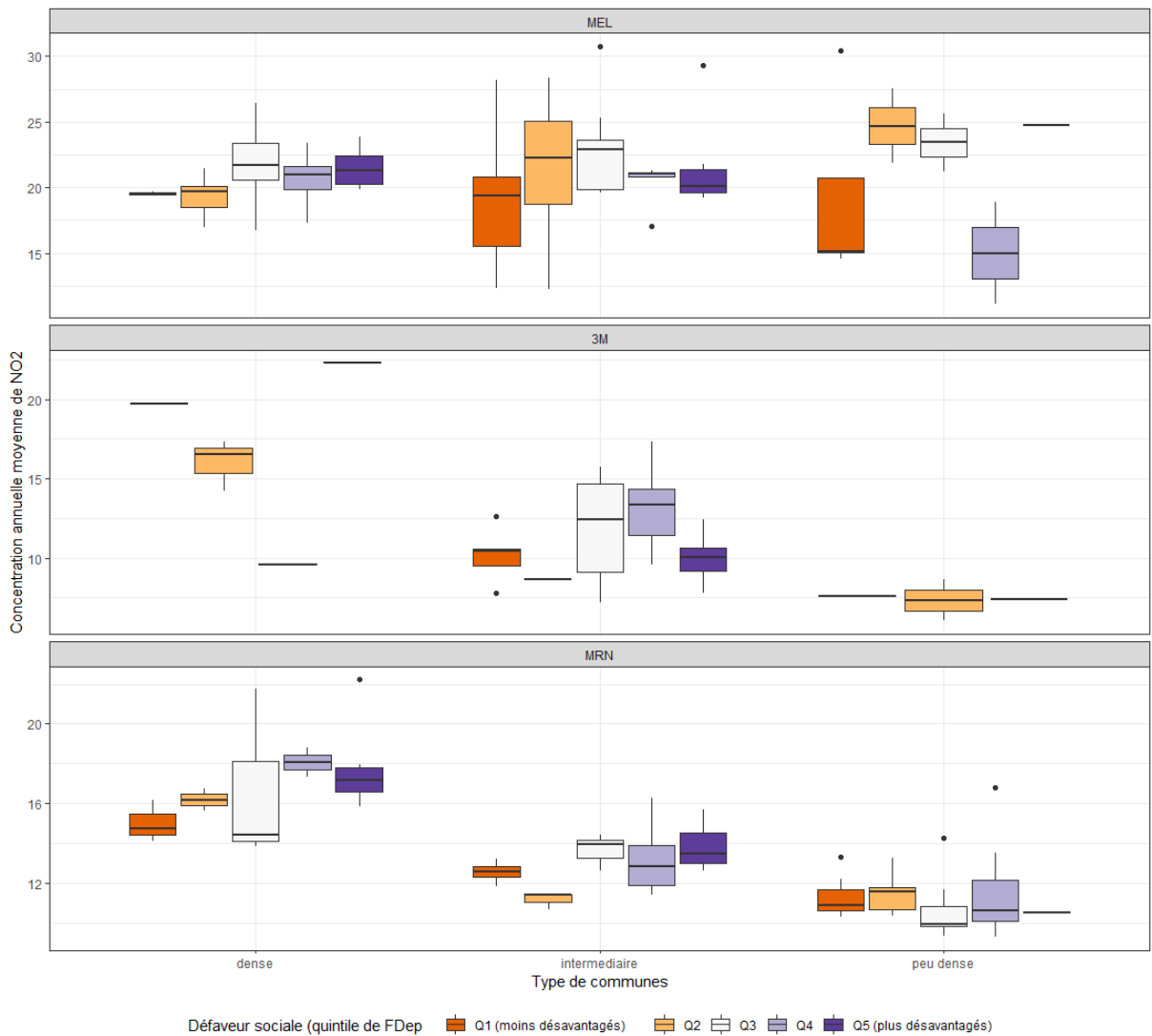


Figure 15. Concentrations de NO<sub>2</sub> annuelles moyennes par type de communes et quintiles de défaveur sociale



**Part de population exposée à des concentrations annuelles supérieures aux valeurs guides de l'OMS et réglementaires**

Dans les trois zones, 100 % de la population est exposée à des concentrations annuelles de PM<sub>2,5</sub> supérieures à la valeur recommandée par l'OMS (5 µg/m<sup>3</sup>). Une majorité de la population demeure également exposée à des valeurs annuelles supérieures à 10 µg/m<sup>3</sup> dans toutes les métropoles. La majorité de la population est également exposée à des valeurs annuelles de NO<sub>2</sub> dépassant la valeur recommandée par l'OMS (Tableau 49).

Tableau 49. Nombre de communes et nombre d'habitants exposés à des concentrations annuelles de PM<sub>2,5</sub> ou de NO<sub>2</sub> supérieures aux valeurs recommandées l'OMS

|     | PM <sub>2,5</sub>     |                  |                        |                  | NO <sub>2</sub>        |                  |                        |                |
|-----|-----------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|----------------|
|     | ≥ 5 µg/m <sup>3</sup> |                  | ≥ 10 µg/m <sup>3</sup> |                  | ≥ 10 µg/m <sup>3</sup> |                  | ≥ 20 µg/m <sup>3</sup> |                |
|     | N communes (%)        | Population (%)   | N communes (%)         | Population (%)   | N communes (%)         | Population (%)   | N communes (%)         | Population (%) |
| MEL | 90 (100%)             | 1 143 777 (100%) | 90 (100%)              | 1 143 777 (100%) | 90 (100%)              | 1 143 777 (100%) | 55 (61%)               | 917 516 (80%)  |
| 3M  | 31 (100%)             | 465 042 (100%)   | 21 (68%)               | 433 871 (93%)    | 18 (58%)               | 415 703 (89%)    | 1 (3%)                 | 281 458 (61%)  |
| MRN | 71 (100%)             | 489 758 (100%)   | 18 (25%)               | 359 131 (73%)    | 64 (90%)               | 481 830 (98%)    | 2 (3%)                 | 132 357 (27%)  |

## 6.3.2 Données de santé

### Mortalité toutes causes et non accidentelles

Le taux annuel moyen de décès non-accidentels tous âges pour 100 000 habitants, est de 687 à la MEL, 623 à la 3M et de 846 à la MRN ([Tableau 50](#)).

Le taux annuel moyen des décès toutes causes chez les 30 ans et plus, pour 100 000 habitants, est de 1 266 à la MEL, 1 134 à la 3M et de 1 464 à la MRN ([Tableau 51](#)).

### Hospitalisations pour causes respiratoires et cardiovasculaires

Le taux annuel d'hospitalisations pour causes respiratoires pour 100 000 habitants est de 973 à la MEL, 646 à 3M et 1 012 à la MRN. Pour les causes cardiovasculaires, il est respectivement de 1 283, 1 464 et 2 018 ([Tableau 50](#)).

**Tableau 50. Effectifs et taux pour 100 000 habitants des données de santé mobilisées pour les effets à court terme (moyenne 2015-2017)**

|     | Mortalité non accidentelle |                             | Hospitalisations pour causes respiratoires |                             | Hospitalisations pour causes cardiovasculaires |                             |
|-----|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|
|     | Nombre                     | Taux pour 100 000 habitants | Nombre                                     | Taux pour 100 000 habitants | Nombre                                         | Taux pour 100 000 habitants |
| MEL | 7 863                      | 687                         | 11 134                                     | 973                         | 14 669                                         | 1 283                       |
| 3M  | 2 896                      | 623                         | 3 003                                      | 646                         | 6 810                                          | 1 464                       |
| MRN | 4 145                      | 846                         | 4 958                                      | 1 012                       | 9 883                                          | 2 018                       |

### Incidence de cancers du poumon

Sur la période, le nombre moyen annuel de cancer du poumon chez les 35 ans et plus, est de 443 sur 64 communes de la MEL couvertes par un registre du cancer, 322 à la 3M et estimé à 858 à la MRN. Ceci correspond à des taux pour 100 000 habitants respectivement de 125, 137 et 120 ([Tableau 51](#)).

### Incidence de l'AVC

Le nombre moyen annuel d'AVC incident sur la période 2017-2019 chez les 35 ans et plus est de 1 535 à la MEL, 555 à la 3M et 708 à la MRN. Ceci correspond à des taux pour 100 000 habitants respectivement de 264, 226 et 263 ([Tableau 51](#)).

### Incidence de l'asthme chez l'enfant

Le nombre moyen annuel de cas d'asthme incidents sur la période 2017-2019 chez les enfants est de 4 029 à la MEL, 2 101 à la 3M et 2 321 à la MRN([Tableau 51](#)).

**Tableau 51. Effectifs et taux pour 100 000 habitants des données de santé mobilisées pour les effets à long terme (moyenne 2015-2017)**

|     | Mortalité totale 30 ans et plus |                             | Incidence de cancers du poumon 35 ans et plus |                             | Incidence des AVC 35 ans et plus |                             | Incidence de l'asthme 0-17 ans |                             |
|-----|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
|     | Nombre                          | Taux pour 100 000 habitants | Nombre                                        | Taux pour 100 000 habitants | Nombre                           | Taux pour 100 000 habitants | Nombre                         | Taux pour 100 000 habitants |
| MEL | 8 273                           | 1 266                       | 443*                                          | 125                         | 1 535                            | 264                         | 4 029                          | 1 456                       |
| 3M  | 3 053                           | 1 134                       | 322**                                         | 137                         | 555                              | 226                         | 2 101                          | 2 222                       |
| MRN | 4 354                           | 1 464                       | 858***                                        | 120                         | 708                              | 263                         | 2 321                          | 2 232                       |

\* à partir d'un registre couvrant 64 communes

\*\* à partir d'un registre couvrant l'ensemble des communes

\*\*\* estimation départementale

### 6.3.3 Effets à court terme de la pollution de l'air sur la santé

#### Bénéfices sur les hospitalisations respiratoires et cardiovasculaires si les concentrations journalières d'O<sub>3</sub> ne dépassaient pas 60 µg/m<sup>3</sup>

Si les concentrations journalières d'O<sub>3</sub> ne dépassaient jamais 60 µg/m<sup>3</sup>, 1,1 % des hospitalisations pour causes respiratoires seraient évitées chaque année à la MEL et la MRN, et 1,9 % à 3M (Tableau 52).

**Tableau 52. Bénéfices pour les hospitalisations respiratoires (effets à court terme) si les concentrations journalières d'O<sub>3</sub> ne dépassaient pas 60 µg/m<sup>3</sup>**

|     | 60 µg/m <sup>3</sup>                        |                                               |                                           |
|-----|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|
|     | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Nombre d'hospitalisations évitables [IC 95 %] | Fraction d'hospitalisations évitables (%) |
| MEL | 235                                         | 126 [51 : 202]                                | 1,1 [0,5 : 1,8]                           |
| 3M  | 307                                         | 58 [23 : 92]                                  | 1,9 [0,8 : 3,1]                           |
| MRN | 235                                         | 52 [21 : 83]                                  | 1,1 [0,4 : 1,7]                           |

Lecture du tableau : à la MEL, l'ozone dépasse 60 µg/m<sup>3</sup> en moyenne 235 jours par an. Si ces jours-là les concentrations ne dépassaient pas 60 µg/m<sup>3</sup>, 126 décès seraient évités chaque année (intervalle de confiance à 95 % [51 : 202]), ce qui correspond à 1,1 % de la mortalité annuelle sur la MEL.

#### Bénéfices sur la mortalité et les hospitalisations si les concentrations journalières de NO<sub>2</sub> ne dépassaient pas 10 µg/m<sup>3</sup>

Si les concentrations journalières de NO<sub>2</sub> ne dépassaient pas 10 µg/m<sup>3</sup>, 1,2 % de la mortalité non accidentelle serait évitée à la MEL, 1,0 % à 3M et 0,8 % à la MRN. Ceci permettrait également d'éviter 2,9 % des hospitalisations pour causes respiratoires à la MEL, 2,3 % à 3M et 1,9 % à la MRN (Tableau 53).

**Tableau 53. Bénéfices pour la mortalité (effets à court terme) et les hospitalisations respiratoires (effets à court terme) si les concentrations journalières de NO<sub>2</sub> ne dépassaient pas 10 µg/m<sup>3</sup>**

|     | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Mortalité                |                                       | Hospitalisations respiratoires |                       |
|-----|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
|     |                                             | Décès évitable [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Nombre évitable [IC 95 %]      | Fraction évitable (%) |
| MEL | 339                                         | 96 [51 : 140]            | 1,2 [0,7 : 1,8]                       | 323 [208 : 437]                | 2,9 [1,9 : 3,9]       |
| 3M  | 340                                         | 28 [15 : 42]             | 1,0 [0,5 : 1,4]                       | 70 [45 : 95]                   | 2,3 [1,5 : 3,2]       |
| MRN | 321                                         | 33 [17 : 48]             | 0,8 [0,4 : 1,2]                       | 93 [60 : 126]                  | 1,9 [1,2 : 2,6]       |

#### Bénéfices sur la mortalité et les hospitalisations si les concentrations journalières de PM<sub>2,5</sub> ne dépassaient pas 5 µg/m<sup>3</sup>

Si les concentrations journalières de PM<sub>2,5</sub> ne dépassaient pas 5 µg/m<sup>3</sup>, 0,6 % de la mortalité non accidentelle serait évitée à la MEL, 0,3 % à 3M et 0,4 % à la MRN. Ceci permettrait également d'éviter 0,9 % des hospitalisations pour causes cardiovasculaires à la MEL, 0,5 % à 3M et 0,6 % à la MRN (Tableau 54).

**Tableau 54. Bénéfices pour la mortalité (effets à court terme) si les concentrations journalières de PM<sub>2,5</sub> ne dépassaient pas 5 µg/m<sup>3</sup>**

|     | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Mortalité                |                                       | Hospitalisations cardiovasculaires |                       |
|-----|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
|     |                                             | Décès évitable [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Nombre évitable [IC 95 %]          | Fraction évitable (%) |
| MEL | 326                                         | 50 [20 : 79]             | 0,6 [0,3 : 1,0]                       | 133 [25 : 242]                     | 0,9 [0,2 : 1,7]       |
| 3M  | 256                                         | 9 [4 : 15]               | 0,3 [0,1 : 0,5]                       | 32 [6 : 58]                        | 0,5 [0,1 : 0,9]       |
| MRN | 270                                         | 16 [7 : 26]              | 0,4 [0,2 : 0,6]                       | 56 [11 : 103]                      | 0,6 [0,1 : 1,0]       |

### 6.3.4 Effets à long terme de la pollution de l'air sur la santé : bénéfices du respect des valeurs guides par l'OMS

#### Bénéfices du respect de la valeur guide de l'OMS de 5 µg/m³ pour les PM<sub>2,5</sub>

Le respect de la valeur guide de l'OMS (5 µg/m³) pour les concentrations en PM<sub>2,5</sub> permettrait, via la réduction des effets à long terme de la pollution, de diminuer la mortalité annuelle de 11,7 % à la MEL, 8,6 % à 3M, et 7,1 % à la MRN. Cela permettrait également de diminuer de 7,3 % l'incidence des cancers du poumon à la MEL, 5,4 % à 3M et 4,4 % à la MRN, et de 10,3 % l'incidence des AVC annuelle à la MEL, de 7,5 % à 3M et de 6,2 % à la MRN (Tableau 55).

**Tableau 55. Bénéfices pour la mortalité (effets à long terme), l'incidence des cancers du poumon et l'incidence des AVC si les concentrations annuelles de PM<sub>2,5</sub> ne dépassaient pas 5 µg/m³**

|     | Mortalité                 |                                       | Cancer du poumon*           |                       | AVC                         |                       |
|-----|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
|     | Décès évitables [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Nombres évitables [IC 95 %] | Fraction évitable (%) | Nombres évitables [IC 95 %] | Fraction évitable (%) |
| MEL | 971 [353 : 1 494]         | 11,7 [4,3 : 18,0]                     | 33 [15 : 48]                | 7,3 [3,4 : 10,9]      | 159 [53 : 259]              | 10,3 [3,4 : 16,9]     |
| 3M  | 262 [94 : 407]            | 8,6 [3,1 : 13,3]                      | 17 [8 : 26]                 | 5,4 [2,5 : 8,0]       | 42 [14 : 69]                | 7,5 [2,5 : 12,4]      |
| MRN | 310 [111 : 484]           | 7,1 [2,5 : 11,1]                      | 2 [1 : 4]                   | 4,4 [2,0 : 6,7]       | 44 [15 : 73]                | 6,2 [2,0 : 10,3]      |

Lecture du tableau : à la MEL, si toutes les communes avaient une concentration annuelle moyenne de PM<sub>2,5</sub> inférieure ou égale à 5 µg/m³, 971 décès seraient évités chaque année, ce qui représente 11,7 % de la mortalité annuelle de la MEL.

\* pour la MEL : à partir des données du registre des cancers de Lille qui couvrent 64 communes de la zone ; 3M : données du registre des cancers de l'Hérault ; MRN : incidence départementale estimée.

#### Bénéfices du respect de la valeur guide de l'OMS de 10 µg/m³ pour le NO<sub>2</sub>

Le respect de la nouvelle valeur guide de l'OMS (seuil à 10 µg/m³) permettrait de diminuer chaque année de l'ordre de 2,4 % la mortalité annuelle chez les 30 ans et plus à la MEL, 1,9 % à la 3M et 1,5 % à la MRN, et d'éviter 12,2 % des cas incidents d'asthme chez l'enfant à la MEL, 9,7 % à 3M, et 7,6 % à la MRN (Tableau 56).

**Tableau 56. Bénéfices pour la mortalité (effets à long terme) et l'incidence de l'asthme chez l'enfant si les concentrations annuelles de NO<sub>2</sub> ne dépassaient pas 10 µg/m³**

|     | Mortalité                 |                                       | Asthme chez l'enfant        |                       |
|-----|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
|     | Décès évitables [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Nombres évitables [IC 95 %] | Fraction évitable (%) |
| MEL | 200 [71 : 318]            | 2,4 [0,9 : 3,8]                       | 485 [202 : 642]             | 12,3 [5,1 : 16,1]     |
| 3M  | 58 [21 : 92]              | 1,9 [0,7 : 3,0]                       | 203 [84 : 268]              | 9,7 [4,0 : 12,9]      |
| MRN | 65 [23 : 103]             | 1,5 [0,5 : 2,3]                       | 181 [75 : 241]              | 7,6 [3,1 : 10,1]      |

### 6.3.5 Effets à long terme de la pollution de l'air sur la santé : bénéfices du respect des concentrations observées dans les 10 % des communes les moins polluées de chaque zone

Si aucune commune ne dépassait les concentrations de PM<sub>2,5</sub> observées dans les 10 % de communes de même densité les moins polluées, 32 décès seraient évités chaque année à la MEL, 53 à la 3M, et 28 à la MRN (Tableau 57). Si en effectif les bénéfices sont plus importants dans les zones denses qui rassemblent davantage de population, en relatif, les bénéfices les plus importants seraient observés dans les communes intermédiaires et peu denses, où les baisses de PM<sub>2,5</sub> seraient plus importantes. Les bénéfices seraient d'un ordre de grandeur similaire en diminuant les niveaux de NO<sub>2</sub> (Tableau 58).

**Tableau 57. Bénéfices pour la mortalité (effets à long terme) si les concentrations annuelles de PM<sub>2,5</sub> ne dépassaient pas le percentile 10 des concentrations modélisées dans les communes de même densité**

|     | Denses       |                           |                                       | Intermédiaires |                           |                                       | Peu denses   |                           |                                       |
|-----|--------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------------|---------------------------------------|
|     | Valeur cible | Décès évitables [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Valeur cible   | Décès évitables [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Valeur cible | Décès évitables [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) |
| MEL | 13,7         | 20 [7 : 32]               | 0,3 [0,1 : 0,5]                       | 13,4           | 11 [4 : 18]               | 0,8 [0,3 : 1,2]                       | 13,1         | 1 [0 : 2]                 | 0,9 [0 : 1,8]                         |
| 3M  | 10,4         | 43 [15 : 68]              | 2,0 [0,7 : 3,1]                       | 9,6            | 10 [4 : 16]               | 1,2 [0,5 : 1,9]                       | 9,2          | <1                        | <0,5                                  |
| MRN | 10,0         | 21 [7 : 33]               | 0,7 [0,2 : 1,12]                      | 9,5            | 6 [2 : 10]                | 0,6 [0,2 : 0,9]                       | 9,2          | 1 [0 : 2]                 | 0,3 [0 : 0,6]                         |

**Tableau 58. Bénéfices pour la mortalité (effets à long terme) si les concentrations annuelles de NO<sub>2</sub> ne dépassaient pas le percentile 10 des communes de même densité**

|     | Denses       |                           |                                       | Intermédiaires |                           |                                       | Peu denses   |                           |                                       |
|-----|--------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------------|---------------------------------------|
|     | Valeur cible | Décès évitables [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Valeur cible   | Décès évitables [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Valeur cible | Décès évitables [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) |
| MEL | 18,6         | 33 [12 : 53]              | 0,5 [0,2 : 0,8]                       | 16,1           | 16 [6 : 25]               | 1,1 [0,4 : 1,7]                       | 14,6         | 1 [0 : 2]                 | 0,9 [0 : 1,8]                         |
| 3M  | 11,9         | 45 [16 : 71]              | 2,1 [0,7 : 3,3]                       | 7,8            | 8 [3 : 13]                | 1,0 [0,4 : 1,6]                       | 6,4          | <1                        | <0,5                                  |
| MRN | 14,3         | 27 [10 : 43]              | 0,9 [0,3 : 1,5]                       | 11,4           | 5 [2 : 8]                 | 0,5 [0,2 : 0,8]                       | 9,8          | 1 [0 : 2]                 | 0,3 [0,0 : 0,6]                       |

### 6.3.6 Analyses de sensibilité

#### Influence des RER sur les effets à court terme

Le choix des RR joue un rôle déterminant dans les résultats d'une ÉQIS. Des analyses de sensibilité ont été réalisées pour mieux comprendre l'influence de ce facteur.

Pour le NO<sub>2</sub>, l'application d'une RER alternative (211) pour les hospitalisations respiratoires, au lieu d'un risque linéaire (212), conduit à des estimations de bénéfice dix fois plus faibles (Tableau 59).

Pour l'O<sub>3</sub>, l'application d'une RER par morceau (211) pour les hospitalisations respiratoires, au lieu d'un risque linéaire (210), conduit à des estimations huit fois plus élevées (Tableau 59).

#### Influence des RER sur les effets à long terme

Pour la mortalité attribuable aux PM<sub>2,5</sub> : l'application d'un RR de 1,07 [1,03 ; 1,11] (192), calculé pour la région européenne dans le cadre d'une méta-analyse plus récente de 2020, conduite pour la mise à jour des valeurs-guide de qualité de l'air de l'OMS, au lieu de 1,15 [1,05 ; 1,25] (214), conduit à des estimations 2 fois plus faibles (Tableau 60).

Pour le NO<sub>2</sub>, l'application d'un RR de 1,02 [1,01 ; 1,04] (195) issu d'une méta-analyse récente au lieu de 1,023 [1,008 ; 1,037] (215), conduit naturellement à des estimations similaires, quel que soit le seuil considéré (Tableau 60).

Pour les PM<sub>2,5</sub>, l'application d'un RR de 1,16 [1,12 ; 1,20] (217) pour l'incidence des AVC, au lieu de 1,13 [1,04 ; 1,23] (216), conduit à des estimations plus élevées. Et l'application d'un RR de 1,16 [1,10 ; 1,23] (219) pour l'incidence du cancer du poumon, au lieu de 1,09 [1,04 ; 1,14] (218), conduit à des estimations 2 fois plus élevées.

Pour le NO<sub>2</sub>, l'application d'un RR de 1,10 [1,05 ; 1,18] (220) pour l'incidence de l'asthme chez l'enfant, au lieu de 1,13 [1,05 ; 1,18] (220), conduit à des estimations plus faibles.

**Tableau 59. Influence du RR sur l'estimation des hospitalisations évitables [IC95 %]**

|                 |                                | RR                                                                                                             | Valeur cible<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | MEL                      |      | 3M                 |      | MRN                    |      |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------|------|--------------------|------|------------------------|------|
|                 |                                |                                                                                                                |                                              | Nombre évitable          | %    | Nombre évitable    | %    | Nombre évitable        | %    |
| NO <sub>2</sub> | Hospitalisations respiratoires | 1,018<br>[1,0115:1,0245]                                                                                       | 10                                           | 323<br>[208 : 437]       | 2,9  | 70<br>[45 : 95]    | 2,3  | 93<br>[60 : 126]       | 1,9  |
|                 |                                | Break point : 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ :<br>Avant : 1,064 [1,051 : 1,077]<br>Après : 1,001 [0,995 : 1,007]  |                                              | 2 594<br>[1 927 : 3 237] | 23,3 | 693<br>[527 : 853] | 21,1 | 1 065<br>[818 : 1 304] | 21,5 |
| O <sub>3</sub>  | Hospitalisations respiratoires | 1,0075<br>[1,003 : 1,012]                                                                                      | 60                                           | 126<br>[51 : 202]        | 1,1  | 58<br>[23 : 92]    | 1,9  | 52<br>[21 : 83]        | 1,1  |
|                 |                                | Break point : 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ :<br>Avant : 1,000 [0,998 : 1,003]<br>Après : 1,035 [1,024 : 1,046] |                                              | 78<br>[0 - 213]          | 0,7  | 13<br>[0 - 73]     | 0,4  | 16<br>[0 - 70]         | 0,3  |

**Tableau 60. Influence du RR sur l'estimation des décès et incidence évitables [IC95 %]**

|                   |                                     | RR                       | Seuil de référence<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | MEL               |      | 3M              |     | MRN             |     |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------|-------------------|------|-----------------|-----|-----------------|-----|
|                   |                                     |                          |                                                    | Nombre évitable   | %    | Nombre évitable | %   | Nombre évitable | %   |
| PM <sub>2,5</sub> | Mortalité totale                    | 1,15<br>[1,05 : 1,25]    | 5                                                  | 971 [353 : 1 494] | 11,7 | 262 [94 : 407]  | 8,6 | 310 [111 : 484] | 7,1 |
|                   |                                     | 1,07<br>[1,03 : 1,11]    |                                                    | 485 [216 : 736]   | 5,9  | 130 [57 : 198]  | 4,2 | 153 [67 : 233]  | 3,5 |
|                   | Incidence AVC                       | 1,13<br>[1,04 : 1,23]    |                                                    | 159 [53 : 259]    | 10,3 | 42 [14 : 69]    | 7,5 | 44 [15 : 73]    | 6,2 |
|                   |                                     | 1,16<br>[1,12 : 1,20]    |                                                    | 190 [148 : 230]   | 12,4 | 51 [39 : 61]    | 9,0 | 53 [41 : 65]    | 7,5 |
|                   | Incidence cancer du poumon          | 1,09<br>[1,04 : 1,14]    |                                                    | 33 [15 : 48]      | 7,3  | 17 [8 : 26]     | 5,4 | 2 [1 : 4]       | 4,4 |
|                   |                                     | 1,16<br>[1,10 : 1,23]    |                                                    | 55 [36 : 74]      | 12,3 | 29 [19 : 40]    | 9,0 | 4 [3 : 6]       | 7,5 |
| NO <sub>2</sub>   | Mortalité totale                    | 1,023<br>[1,008 : 1,037] | 10                                                 | 200 [71 : 318]    | 2,4  | 58 [21 : 92]    | 1,9 | 65 [23 : 103]   | 1,5 |
|                   |                                     | 1,02<br>[1,01 : 1,04]    |                                                    | 175 [88 : 342]    | 2,0  | 51 [26 : 100]   | 1,6 | 56 [28 : 111]   | 1,3 |
|                   | Incidence de l'asthme chez l'enfant | 1,13<br>[1,05 : 1,18]    |                                                    | 485 [202 : 642]   | 12,2 | 203 [84 : 268]  | 9,7 | 181 [75 : 241]  | 7,6 |
|                   |                                     | 1,10<br>[1,05 : 1,18]    |                                                    | 384 [202 : 642]   | 9,6  | 160 [84 : 268]  | 7,6 | 143 [75 : 241]  | 6,0 |

## Estimation de l'exposition

L'estimation des concentrations d'exposition en utilisant les données de population au bâti plutôt qu'au carroyage Insee a une influence très faible sur les résultats de l'ÉQIS ([Tableau 61](#)).

**Tableau 61. Influence d'une exposition estimée à partir des données de population au bâti plutôt qu'au carroyage Insee sur l'estimation des bénéfices de respect des valeurs guides de l'OMS**

| Si les PM <sub>2,5</sub> ne dépassent pas 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |                             |                           | Si le NO <sub>2</sub> ne dépasse pas 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |                           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------|
|                                                                      | Données pondérées à l'Insee | Données pondérées au bâti | Données pondérées à l'Insee                                      | Données pondérées au bâti |
| MEL                                                                  | 971 [353 : 1 494]           | 971 [336 : 1 429]         | 200 [71 : 318]                                                   | 197 [70 : 312]            |
| 3M                                                                   | 262 [94 : 407]              | 257 [92 : 400]            | 58 [21 : 92]                                                     | 54 [19 : 85]              |
| MRN                                                                  | 310 [111 : 484]             | 308 [110 : 481]           | 65 [23 : 103]                                                    | 61 [21 : 97]              |

De même l'estimation des concentrations d'exposition à l'Iris modifie peu les résultats par rapport à une analyse à la commune. En passant à l'Iris, l'exposition de la population est moins lissée qu'à la commune, mais l'analyse nécessite également de faire des hypothèses de désagrégation des données de santé à l'Iris qui induise une incertitude supplémentaire ([Tableau 62](#)).

Tableau 62. Influence d'une ÉQIS réalisée à l'IRIS plutôt qu'à la commune

|     | Si les PM <sub>2,5</sub> ne dépassent pas 5 µg/m <sup>3</sup> |                     | Si le NO <sub>2</sub> ne dépasse pas 10 µg/m <sup>3</sup> |                   |
|-----|---------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------|
|     | Analyses à la commune                                         | Analyses à l'Iris   | Analyses à la commune                                     | Analyses à l'Iris |
| MEL | 971 [353 : 1 494]                                             | 1 006 [366 : 1 549] | 200 [71 : 318]                                            | 205 [72 : 234]    |
| 3M  | 262 [94 : 407]                                                | 281 [101 : 437]     | 58 [21 : 92]                                              | 62 [22 : 99]      |
| MRN | 310 [111 : 484]                                               | 319 [14 : 499]      | 65 [23 : 103]                                             | 63 [22 : 99]      |

## 6.4 Discussion

### 6.4.1 Des bénéfices potentiellement importants sur la mortalité et la morbidité

Les résultats soulignent que les bénéfices sur la santé d'une baisse de la pollution atmosphérique à long terme peuvent être importants et sont très supérieurs aux bénéfices à court terme.

Les résultats retrouvés sont cohérents avec les précédentes ÉQIS réalisées sur la pollution de l'air en France (205, 227). Cette ÉQIS explore également pour la première fois les impacts sur l'incidence des AVC, des cancers du poumon et de l'asthme chez l'enfant. Une amélioration de la qualité de l'air permettrait d'éviter un nombre conséquent de ces pathologies.

Les résultats soulignent également l'intérêt de scénarios plus ambitieux (respect des valeurs recommandées par l'OMS par exemple) que le respect des valeurs des directives européennes et françaises, qui sont de fait déjà largement respectées dans la majorité des communes des zones d'études. Les valeurs recommandées par l'OMS peuvent paraître basses au regard des niveaux de PM<sub>2,5</sub> actuellement observées. Sur la période d'étude, aucune station de mesure urbaine en France hexagonale ne présentait de concentration annuelle inférieure à la recommandation, selon les données du site Geod'air. Cependant sur les années plus récentes les niveaux ont baissé et en 2023, la moyenne des concentrations annuelles des stations urbaines était de 9 µg/m<sup>3</sup> contre 12 en 2016. Les efforts sont donc encore importants pour atteindre ces valeurs.

### 6.4.2 Incertitudes

Les résultats des analyses de sensibilité soulignent que le choix des RER est déterminant, comme l'indique le guide ÉQIS-PA de Santé publique France. Il convient, de calculer ces RER dans les conditions les plus proches possibles de celles de la population sur laquelle l'ÉQIS va être réalisée, tout en étant suffisamment robuste.

L'estimation des concentrations par modélisation présente également des incertitudes, et peut être différente de la méthode utilisée dans les études fournissant les RER. Cette incertitude n'a pas pu être évaluée.

### 6.4.3 Liens avec les autres déterminants

Comme discuté dans les chapitres précédents, de nombreuses interactions peuvent exister entre la pollution de l'air et les autres déterminants. La littérature suggère une interaction entre les effets à court terme de la pollution de l'air, et la chaleur, sur la mortalité : le risque de décès associé à la température est plus élevé lorsque les concentrations de PM<sub>2,5</sub> sont plus élevées (185, 224, 228), et réciproquement le risque de décès associé au polluant de l'air est plus élevé lorsque les températures sont plus élevées (224, 229). Ces synergies n'ont pas été prises en compte dans cette ÉQIS, mais pourraient conduire à des impacts liés à la chaleur et à la pollution de l'air plus élevé que ceux estimés actuellement.

La littérature n'indique par ailleurs pas d'interaction entre pollution de l'air et bruit sur la mortalité (230).

Les actions visant à réduire la pollution de l'air ciblant les mobilités motorisées permettraient également de réduire le bruit, la contribution des routes à l'îlot de chaleur urbain, de promouvoir l'activité physique, et de libérer de l'espace pour végétaliser.

En ville, la végétation peut contribuer à améliorer ou à dégrader la qualité de l'air, selon le type d'espèces (231) et la topographie (232). Elle émet également des composés chimiques qui peuvent interférer avec la pollution de l'air (232).

À l'inverse, la pollution de l'air affecte la santé de la végétation, et peut ainsi diminuer la capacité de cette végétation à protéger la santé humaine. Des études suggèrent également des effets négatifs de la pollution de l'air sur la santé des oiseaux (233), ou des insectes (234).

#### 6.4.4 Liens avec les inégalités sociales de santé

Dans cette ÉQIS, le FDep a été utilisé uniquement pour décrire les résultats, aucun RER différent n'a été utilisé selon le niveau de Fdep. Un travail de recherche sur la pollution de l'air en Île-de-France a exploré l'utilisation de RER par niveau socio-économique obtenu en Italie (235). Cette possibilité n'a pas été reprise ici, car l'incertitude liée à la transposabilité de ces RER dans le contexte français nous paraissait trop importante.

La stratification des résultats par quintile de FDep montre que l'amélioration de la qualité de l'air bénéficierait de manière relativement égale à l'ensemble des Iris, quelle que soit la défaveur sociale. À la MEL et la MRN, les fractions de mortalité évitables si les PM<sub>2,5</sub> ou le NO<sub>2</sub> respectaient les valeurs guides de l'OMS sont d'un ordre de grandeur similaire pour tous les quintiles de défaveur sociale (Tableau 63, Tableau 64). À 3M, l'amélioration des PM<sub>2,5</sub> conduirait à un bénéfice plus élevé pour les Iris plus défavorisés (9,1 % vs 7,5 % dans les autres Iris).

Des relations différentes auraient pu être retrouvées avec d'autres indicateurs de défaveur sociale, par exemple l'EDI, ou des indicateurs non-composites de défaveur.

Au-delà d'une différence possible d'exposition sociale, la défaveur sociale pourrait aussi, à exposition équivalente, se traduire par des risques plus importants pour la santé. Ceci ne peut cependant pas être pris en compte dans les ÉQIS, en l'absence de RER robustes différenciées selon la défaveur sociale.

**Tableau 63. Décès évitables chaque année si les Iris respectaient la valeur-guide de l'OMS pour les PM<sub>2,5</sub>, stratification par quintiles de défaveur sociale**

| Communes moins défavorisés<br>(1 <sup>er</sup> quintile) |                           |                                    | 2 <sup>e</sup> quintile   |                                    | 3 <sup>e</sup> quintile   |                                    | 4 <sup>e</sup> quintile   |                                    | Communes plus défavorisés<br>(5 <sup>e</sup> quintile) |                                    |
|----------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|
|                                                          | Décès évités<br>[IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités<br>[IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités<br>[IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités<br>[IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités [IC 95 %]                                 | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL                                                      | 78<br>[28 : 121]          | 11,7<br>[4,1 : 17,9]               | 70<br>[26 : 109]          | 11,7<br>[4,3 : 18,2]               | 87<br>[32 : 134]          | 11,4<br>[4,4 : 18,3]               | 344<br>[125 : 529]        | 11,7<br>[4,2 : 18,0]               | 389<br>[141 : 560]                                     | 11,7<br>[4,2 : 18,1]               |
| 3M                                                       | 16<br>[6 : 25]            | 7,4<br>[2,8 : 11,5]                | 28<br>[10 : 44]           | 7,9<br>[2,8 : 12,4]                | 23<br>[8 : 36]            | 7,3<br>[2,5 : 11,5]                | 15<br>[5 : 24]            | 7,4<br>[2,5 : 11,8]                | 179<br>[64 : 277]                                      | 9,1<br>[3,3 : 14,1]                |
| MRN                                                      | 40<br>[14 : 62]           | 6,8<br>[2,4 : 10,6]                | 19<br>[7 : 29]            | 6,8<br>[2,5 : 10,3]                | 78<br>[28 : 121]          | 7,6<br>[2,7 : 11,8]                | 58<br>[21 : 90]           | 7,1<br>[2,6 : 11,0]                | 116<br>[41 : 181]                                      | 7,1<br>[2,5 : 11,0]                |

**Tableau 64. Décès évitables chaque année si les Iris respectaient la valeur-guide de l'OMS pour le NO<sub>2</sub>, stratification par quintiles de défaveur sociale**

| Communes moins défavorisées (1 <sup>er</sup> quintile) |                        |                                    | 2 <sup>e</sup> quintile |                                    | 3 <sup>e</sup> quintile |                                    | 4 <sup>e</sup> quintile |                                    | Communes plus défavorisées (5 <sup>e</sup> quintile) |                                    |
|--------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------|
|                                                        | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités [IC 95 %]  | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités [IC 95 %]  | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités [IC 95 %]  | Fraction de mortalité évitable (%) | Décès évités [IC 95 %]                               | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL                                                    | 14<br>[5 : 22]         | 2,1<br>[0,7 : 3,3]                 | 15<br>[5 : 24]          | 2,5<br>[0,8 : 4,0]                 | 20<br>[7 : 31]          | 2,5<br>[0,8 : 4,0]                 | 70<br>[25 : 111]        | 2,4<br>[0,8 : 3,8]                 | 81<br>[29 : 128]                                     | 2,4<br>[0,8 : 3,8]                 |
| 3M                                                     | 2<br>[1 : 3]           | 0,9<br>[0 : 1,4]                   | 5<br>[2 : 8]            | 1,4<br>[0,6 : 2,3]                 | 2<br>[1 : 3]            | 0,6<br>[0,3 : 1,0]                 | 2<br>[1 : 3]            | 1,0<br>[0,5 : 1,5]                 | 48<br>[17 : 76]                                      | 2,4<br>[0,9 : 3,9]                 |
| MRN                                                    | 6<br>[2 : 9]           | 1,0<br>[0,3 : 1,5]                 | 2<br>[1 : 4]            | 0,7<br>[0,4 : 1,4]                 | 23<br>[8 : 37]          | 2,2<br>[0,8 : 3,6]                 | 10<br>[4 : 16]          | 1,2<br>[0,5 : 1,9]                 | 23<br>[8 : 37]                                       | 1,7<br>[0,5 : 2,3]                 |

#### 6.4.5 Analyse de la faisabilité et de la pertinence

La réalisation d'ÉQIS de la pollution de l'air ne pose pas de difficulté particulière de faisabilité, tant au niveau de la disponibilité des données environnementales, que des effets sur la santé. Les guides de Santé publique France détaillent chaque étape de la méthode (4). La littérature scientifique fournit désormais un très grand nombre de RER potentielles, ce qui peut complexifier la sélection, les guides ne reprenant pas les publications les plus récentes. Cependant, les projets internationaux menés par l'OMS tels que HRAPIE (212) et COMEAP (215) aident à identifier les relations le plus robustes, et les plus adaptées à un contexte européen. Les analyses portant sur la morbidité sont cependant limitées par l'accès aux données de santé, en particulier pour les cancers du poumon pour lesquels il est nécessaire d'utiliser des données estimées au niveau départemental en l'absence de registre local.

Les analyses des effets à court terme sont aujourd'hui réalisées sur une échelle géographique agrégée, compte tenu des méthodes utilisées dans les études épidémiologiques sources, mais également de l'absence de données de pollution journalières spatialisées.

Les analyses dans cette ÉQIS ont été menées sous AirQ+ et sous R. Les résultats sont identiques, mais AirQ+ apparaît moins ergonomique lorsqu'il faut mener des analyses sur un grand nombre de communes simultanément.

## 7. BRUIT DES TRANSPORTS

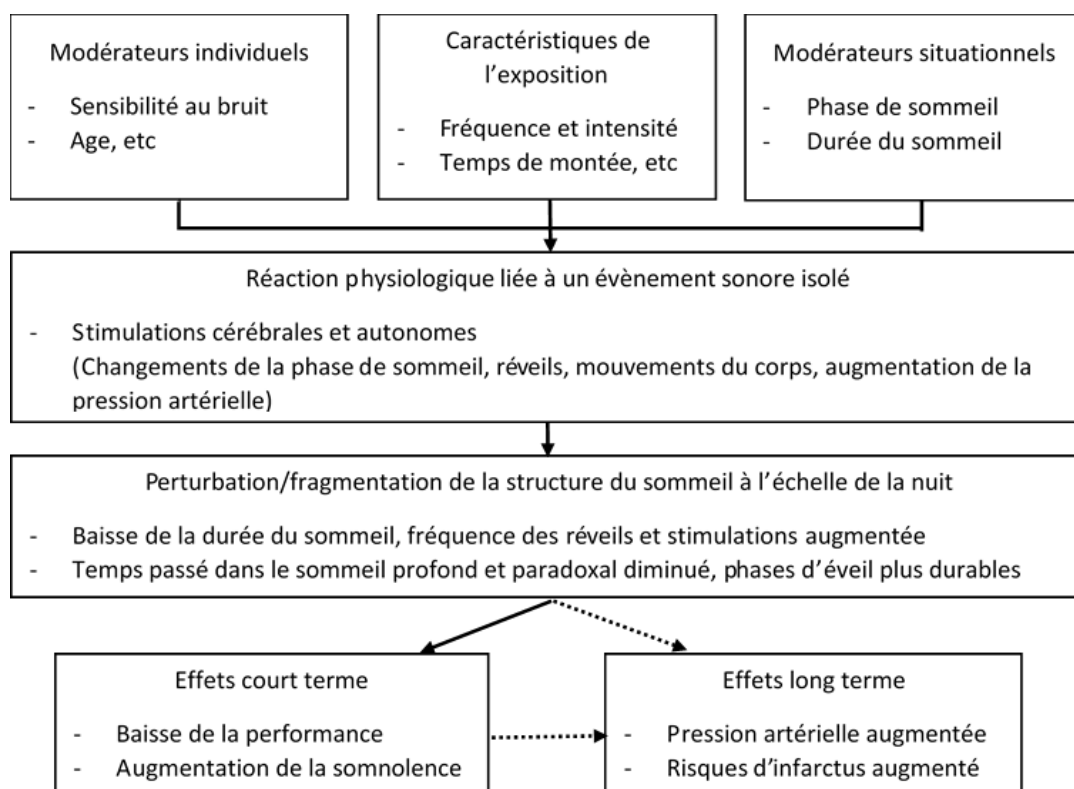
### 7.1 Principaux effets du bruit des transports sur la santé

Le bruit dans l'environnement est défini par la commission européenne comme un « *son extérieur non désiré ou nuisible résultant d'activités humaines* » (236).

Il figure parmi les risques environnementaux les plus importants pour la santé physique, mentale et le bien-être, associé à un fardeau des maladies le plus important en Europe, après la pollution de l'air (237, 238). Le bruit peut causer des effets auditifs comme la perte de l'audition ou des acouphènes mais également des effets non auditifs. Il agit comme un facteur de stress non spécifique et il en résulte des perturbations psychologiques, physiologiques, de l'homéostasie de l'organisme et l'augmentation de la charge allostatique (239, 240).

Le bruit des transports (trafic routier, ferroviaire et aérien) est principalement associé à des effets extra-auditifs subjectifs (gêne, attitudes et comportements) et extra-auditifs objectifs (troubles du sommeil, cardiovasculaires, endocriniens, immunitaires). Les effets à court terme répétés sur la gêne et le sommeil sont à l'origine d'effets à plus long terme, notamment cardiovasculaires (Figure 16) (241). Les effets vont dépendre des caractéristiques du bruit, notamment son aspect événementiel mais aussi de caractéristiques individuelles comme la sensibilité au bruit.

**Figure 16. Effets du bruit routier sur le sommeil (traduit et adapté de (241))**



## 7.2 Méthode

### 7.2.1 Couples et relations exposition-risque

Les études épidémiologiques utilisent le plus classiquement les indicateurs de bruit mesuré la nuit ( $L_{\text{night}}$  = niveau de bruit moyen exprimé en dB(A) entre 22 heures et 6 heures) et sur 24 heures ( $L_{\text{den}}$  = niveau de bruit moyen sur 24 heures avec une majoration de 5 dB entre 18 heures et 22 heures et de 10 dB entre 22 heures et 6 heures).

Les travaux publiés par l'OMS et l'Institut national pour la santé publique et l'environnement des Pays-Bas (*Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu*, RIVM) sur le bruit des transports routier et ferroviaire ont servi de base à la sélection des couples et relations rapportés dans le [Tableau 65](#) (242, 243). La relation la plus robuste concerne le bruit routier et l'incidence des cardiopathies ischémiques, considérée de haute qualité par l'OMS. Pour les autres couples présentés dans le [Tableau 65](#), la preuve de l'association est qualifiée de modérée par l'OMS. Les relations expositions-risques recommandées par l'OMS ont été retenues en analyse principale, et, lorsqu'elles existent, des relations plus récentes ont été retenues en analyse de sensibilité.

L'impact du bruit du transport aérien a été exclu de l'étude après échange avec les trois métropoles : le bruit aérien ne concerne qu'une très faible part de la population de chaque territoire, et soulève des enjeux qui méritent des études *ad hoc*.

**Tableau 65. Couples et relations retenus pour le bruit des transports routiers et ferroviaires**

| Événement de santé                                  | Population               | Source de bruit        | Indicateur d'exposition          | Relation exposition-risque                                              | Référence                          | Autre relation pour analyse de sensibilité                                              |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Incidence de cardiopathies ischémiques              | Adultes (30 ans et plus) | Routier                | $L_{\text{den}}$ <sup>9</sup>    | Relation log-linéaire, 1,08 [1,04 ; 1,15] (au-delà de 53 dB) pour 10 dB | Kempen <i>et. al.</i> , 2018 (242) | Relation log-linéaire, RER 1,03 [1,00 ; 1,05] pour 10 dB Hao <i>et.al.</i> , 2022 (244) |
| Mortalité prématurée pour cardiopathies ischémiques | Adultes (30 ans et plus) | Routier                | $L_{\text{den}}$                 | Relation log-linéaire, 1,05 [0,97 ; 1,13] (au-delà de 53 dB) pour 10 dB | Kempen <i>et. al.</i> , 2018 (242) | Relation log-linéaire, RER 1,03 [0,99 ; 1,08] pour 10 dB Cai <i>et.al.</i> , 2021 (245) |
| Perturbation du sommeil                             | Adultes (30 ans et plus) | Routier<br>Ferroviaire | $L_{\text{night}}$ <sup>10</sup> | Équations détaillées ci-dessous                                         | Basner <i>et. al.</i> , 2018 (246) | Smith <i>et.al.</i> , 2022 (247), équations détaillées ci-dessous                       |
| Gêne                                                | Adultes (30 ans et plus) | Routier<br>Ferroviaire | $L_{\text{den}}$                 | Équations détaillées ci-dessous                                         | Guski <i>et. al.</i> , 2017 (248)  |                                                                                         |

### 7.2.2 Données de santé

#### Mortalité par cardiopathie ischémique

Les données annuelles de mortalité par cardiopathies ischémiques (Classification internationale des maladies - 10<sup>e</sup> révision, CIM-10 : I20-I25) pour les personnes âgées de 30 ans ou plus ont été obtenues auprès du Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès (CépiDc-Inserm) pour les années les plus récentes disponibles (2015-2017), à la commune (code Insee).

#### Incidence des cardiopathies ischémiques

Les données d'incidence des cardiopathies ischémiques ont été estimées à travers les hospitalisations. Ces données ont été obtenues à partir de la base de données du Programme de médicalisation des systèmes d'information (PMSI) via le SNDS. Un algorithme développé par Santé publique France a permis d'extraire les hospitalisations pour les codes CIM-10 I20 à I25 pour chaque

<sup>9</sup> Niveau de bruit moyen sur 24 heures avec une majoration de 5 dB entre 18 heures et 22 heures et de 10 dB entre 22 heures et 6 heures.

<sup>10</sup> Niveau de bruit moyen exprimé en dB(A) entre 22 heures et 6 heures.

année. Ces données ne sont cependant disponibles qu'à partir de 2006. Pour une année donnée, l'incidence a été calculée en excluant les patients ayant eu un premier événement dans les onze ans précédents : l'incidence de 2017 est calculée en excluant les personnes ayant eu une précédente cardiopathie ischémique entre 2006 et 2016, celle de 2018 en excluant 2007-2017, et celle de 2019 entre 2008-2018. Les trois valeurs ont ensuite été moyennées pour obtenir une incidence sur 2017-2019. Cependant, tout individu ayant eu une première hospitalisation pour cardiopathie ischémique plus de onze ans avant a été compté comme incident et conduit à une surestimation de l'incidence.

## Fortes perturbations du sommeil et gêne

Les relations exposition-effet permettent de calculer directement le nombre de personnes ayant des perturbations du sommeil ou la gêne, à partir du niveau de bruit.

### 7.2.3 Données d'exposition

Dans les études épidémiologiques sources, les indicateurs d'exposition privilégiés sont le  $L_{night}$  et le  $L_{den}$  en dB(A) (242, 246, 248, 249).

Les données de bruit environnemental sont le plus souvent modélisées par sources. La méthode européenne harmonisée CNOSSOS-EU<sup>11</sup> est souvent utilisée, voire obligatoire dans le cadre de l'application de la Directive 49/2002/CE relative à l'évaluation du bruit (236, 250). Classiquement, ces modèles combinent des données d'infrastructures, de trafic, de prises en compte des revêtements, et de signature acoustique du matériel. Des données de mesures peuvent être utilisées pour caler le modèle.

La directive européenne impose la réalisation tous les cinq ans d'une évaluation des niveaux de bruit liés au trafic routier, ferroviaire et aérien dans les agglomérations de plus de 100 000 habitants (236). Ces données permettent d'obtenir directement par tranche de 5 dB le nombre de personnes exposées. Ces classes d'exposition débutent à 55 dB jusqu'à 75 dB et plus pour le  $L_{den}$  et entre 50 et 70 dB pour le  $L_{night}$ . Les niveaux d'exposition des populations au bruit sont cartographiés au niveau des façades des bâtiments, puis croisés avec des hypothèses de répartition de la population par bâtiment (fourni par le Cerema à l'échelle nationale, basé sur la bd Topo).

Pour chaque zone, les données de la cartographie stratégique du bruit sont utilisées (2022-2023). Les données de trafic moyen journalier annuel (TMJA) ayant été utilisées pour les modélisations sont de 2018. Les données d'exposition utilisées dans cette étude sont celles établies à l'échelle de la commune.

Une méthode est proposée par l'Agence Européenne de l'Environnement pour répartir la population exposée par dB au sein d'une classe d'exposition de 5 dB et estimer la population pour les classes < 55 dB pour le routier et le ferroviaire (251).

### 7.2.4 Équations

Pour la mortalité et l'incidence de cardiopathies ischémiques, l'équation de fraction attribuable (comme décrit au chapitre 0 2.9 Équation) s'applique.

Pour le sommeil et la gêne, les équations permettant d'obtenir le pourcentage de la population ayant une forte perturbation du sommeil ou forte gêne par le bruit routier et ferroviaire sont reportées dans le [Tableau 66](#). Les équations sont issues de régressions à partir de données collectées par questionnaires dans les études sources, et les coefficients n'ont pas de sens particulier.

Les calculs ont été réalisés à l'échelle de la commune.

---

<sup>11</sup> Common NOise aSSessment methOdS in Europe.

**Tableau 66. Formules permettant d'obtenir le pourcentage de la population ayant une forte perturbation du sommeil ou gênée par le bruit routier, ferroviaire et aérien**

| Effets sanitaires                                                          | Source de bruit | Indicateur de bruit | Équation                                                                                         | Référence                            | Sensibilité                                                                               | Référence                           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Fortes perturbations du sommeil (HSD, <i>Highly sleep disorder</i>)</b> | Routier         | $L_{night}$         | $\%HSD$<br>$= 19,4312$<br>$- (0,9336$<br>$\times Ln)$<br>$+ (0,0126$<br>$\times Ln^2)$           | Basner <i>et al.</i> ,<br>2018 (246) | $\%HSD$<br>$= 31,18323$<br>$- (1,47351$<br>$\times Ln)$<br>$+ (0,01851$<br>$\times Ln^2)$ | Smith <i>et al.</i> ,<br>2022 (247) |
|                                                                            | Ferroviaire     | $L_{night}$         | $\%HSD$<br>$= 67,5406$<br>$- (3,1852$<br>$\times Ln)$<br>$+ (0,0391$<br>$\times Ln^2)$           | Basner <i>et al.</i> ,<br>2018 (246) | $\%HSD$<br>$= 63,56140$<br>$- (3,00711$<br>$\times Ln)$<br>$+ (0,03717$<br>$\times Ln^2)$ | Smith <i>et al.</i> ,<br>2022 (247) |
| <b>Forte gêne (HA, <i>High Annoyance</i>)</b>                              | Routier         | $L_{den}$           | $\%HA$<br>$= 78,927$<br>$- (3,1162$<br>$\times L_{den})$<br>$+ (0,0342$<br>$\times L_{den}^2)$   | Guski <i>et al.</i> ,<br>2017 (248)  |                                                                                           |                                     |
|                                                                            | Ferroviaire     | $L_{den}$           | $\%HA$<br>$= 38,1596$<br>$- (2,05538$<br>$\times L_{den})$<br>$+ (0,0285$<br>$\times L_{den}^2)$ | Guski <i>et al.</i> ,<br>2017 (248)  |                                                                                           |                                     |

## 7.2.5 Scénario

L'OMS recommande dans ses lignes directrices des seuils à ne pas dépasser pour le bruit des transports routiers et ferroviaires, pour les indicateurs  $L_{den}$  et  $L_{night}$  (243) (Tableau 67).

Pour l'ÉQIS, le scénario commun considère que 100 % de la population est exposée à des niveaux de bruit inférieurs aux seuils de l'OMS en  $L_{den}$  et  $L_{night}$ .

**Tableau 67 - Seuils OMS (dB) pour le bruit des transports (243)**

| Source      | $L_{den}$ | $L_{night}$ |
|-------------|-----------|-------------|
| Routier     | 53        | 45          |
| Ferroviaire | 54        | 44          |

## 7.3 Résultats

### 7.3.1 Données d'exposition

La part de la population exposée à au moins 55 dB  $L_{den}$  et plus de 50 dB  $L_{night}$  (limites minimales des catégories d'exposition remontées dans le cadre de la Directive Européenne 49/2002/CE) pour le bruit routier et ferroviaire est présentée dans le Tableau 68.

La part de la population exposée à 55 dB et plus de bruit routier et ferroviaire sur 24 heures est plus importante à la MEL. La MRN vient en deuxième pour le bruit ferroviaire et la 3M pour le bruit routier. La part de la population exposée à plus de 50 dB de bruit routier et ferroviaire la nuit est également plus importante à la MEL. On retrouve également une plus grande exposition au bruit ferroviaire la nuit à la MRN qu'à 3M, et à l'inverse, une plus grande exposition au bruit routier la nuit à 3M qu'à la MRN.

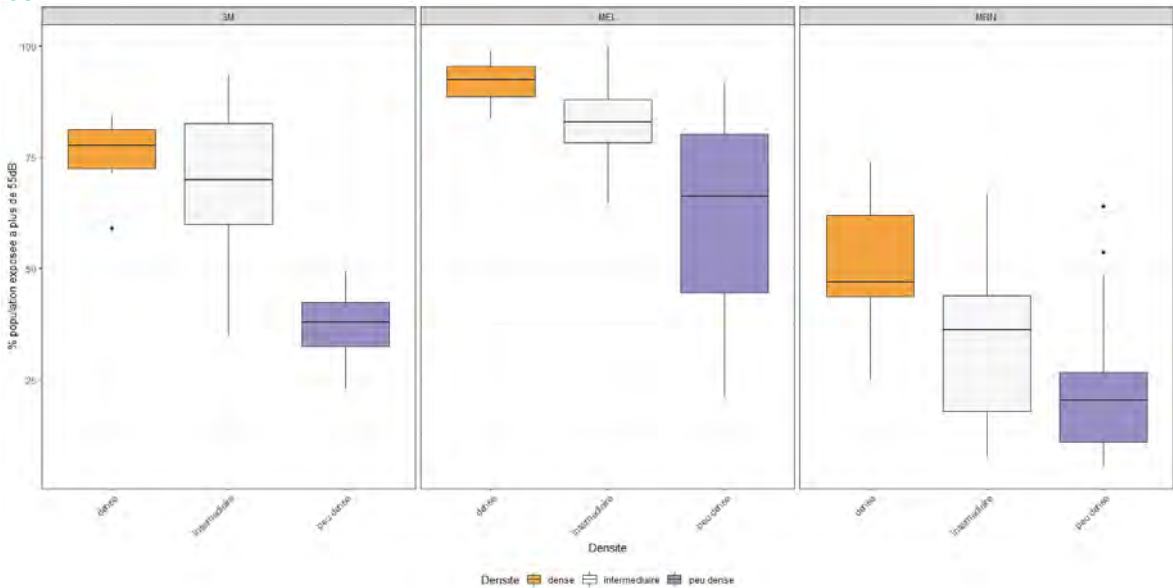
Tableau 68. Part de la population exposée à au moins 55 dB L<sub>den</sub> et 50 dB L<sub>night</sub> aux bruits routier et ferroviaire

| Routier |        |        | Ferroviaire |        |
|---------|--------|--------|-------------|--------|
|         | Lden   | Lnight | Lden        | Lnight |
| MEL     | 90,3 % | 58,5 % | 17,5 %      | 13,8 % |
| 3M      | 76,5 % | 36,0 % | 4,4 %       | 2,7 %  |
| MRN     | 46,8 % | 15,5 % | 10,9 %      | 11,9 % |

Les profils de distribution de la part de la population exposée selon la densité et l'indice de défaveur sociale de la commune sont présentés ci-dessous uniquement pour le bruit routier pondéré sur 24 heures (L<sub>den</sub>), les parts de population exposées à plus de 55 dB L<sub>den</sub> étant les plus fortes.

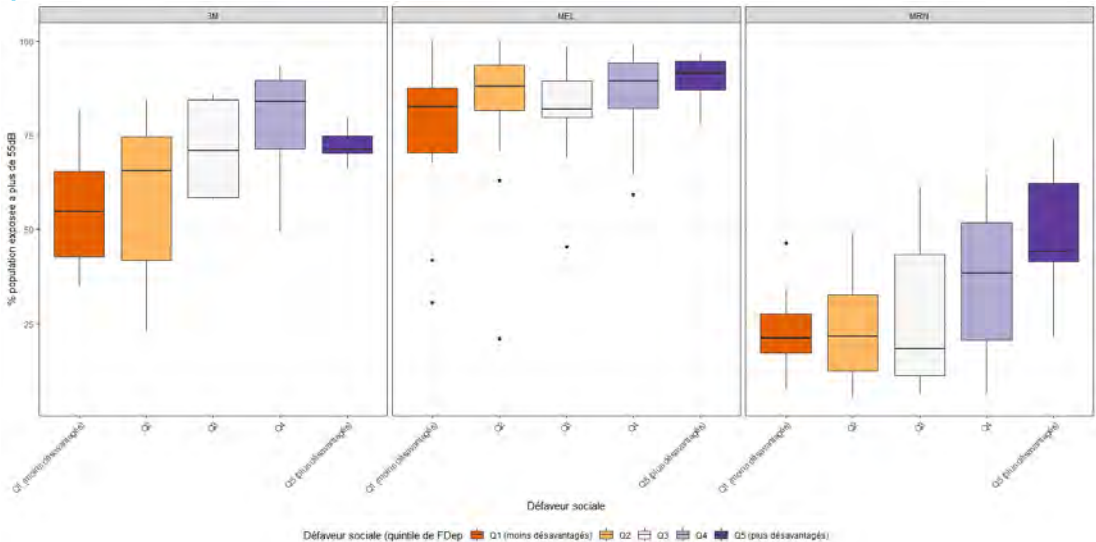
Dans la plupart des communes peu denses des trois agglomérations, la part de la population exposée à au moins 55 dB L<sub>den</sub> de bruit routier est plus faible que pour les communes denses et intermédiaires (Figure 17).

Figure 17. Part de la population exposée à un niveau de bruit routier supérieur à 55 dB L<sub>den</sub> selon le type de commune



Pour la MRN et 3M, il y a plus de personnes exposées à plus de 55 dB L<sub>den</sub> dans les communes plus défavorisées que dans les communes plus favorisées (Figure 18). Pour la MEL, les parts de la population restent élevées pour tous les quintiles de défaveur sociale.

Figure 18. Part de la population exposée à un niveau de bruit routier supérieur à 55 dB L<sub>den</sub>, selon le quintile de défaveur sociale



### 7.3.2 Données de santé

Sur la période 2015-2017, le taux annuel moyen de décès par cardiopathies ischémiques (I20-I25, CIM-10) chez les personnes âgées de 30 ans et plus pour 100 000 habitants est de 33 à la MEL, 41 à la 3M et 49 à la MRN (Tableau 69).

Pour le taux d'incidence des hospitalisations pour cardiopathies ischémiques (I20-I25, CIM-10) chez les personnes âgées de 30 ans et plus pour 100 000 habitants est de 212 à la MEL, 330 à la 3M et 314 à la MRN.

**Tableau 69. Effectifs et taux pour 100 000 habitants (30 ans et plus) de la mortalité et incidence pour cardiopathies ischémiques (I20-I25, CIM-10)**

|     | Mortalité par cardiopathie ischémique<br>(moyenne 2015-2017) |                             | Incidence des hospitalisations pour cardiopathie ischémique<br>(moyenne 2017-2019) |                             |
|-----|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
|     | Nombre                                                       | Taux pour 100 000 habitants | Nombre                                                                             | Taux pour 100 000 habitants |
| MEL | 213                                                          | 33                          | 1 400                                                                              | 212                         |
| 3M  | 111                                                          | 41                          | 924                                                                                | 330                         |
| MRN | 147                                                          | 49                          | 943                                                                                | 314                         |

### 7.3.3 Effets du bruit routier et ferroviaire sur la santé : bénéfices du respect des valeurs guides OMS

#### Bénéfices sur la mortalité et l'incidence par cardiopathies ischémiques du respect des valeurs guides OMS pour le bruit routier

Si l'ensemble de la population âgée de 30 ans et plus était exposée à moins de 53 dB Lden de bruit routier, 3,7 % de la mortalité par cardiopathies ischémiques serait évitée à la MEL (8 décès), 2,9 % à la 3M (3 décès) et 1,4 % à la MRN (2 décès). Ces décès par cardiopathies ischémiques évitables représentent par ailleurs 0,10 % de la mortalité toutes causes à la MEL et 3M et 0,05 % à la MRN.

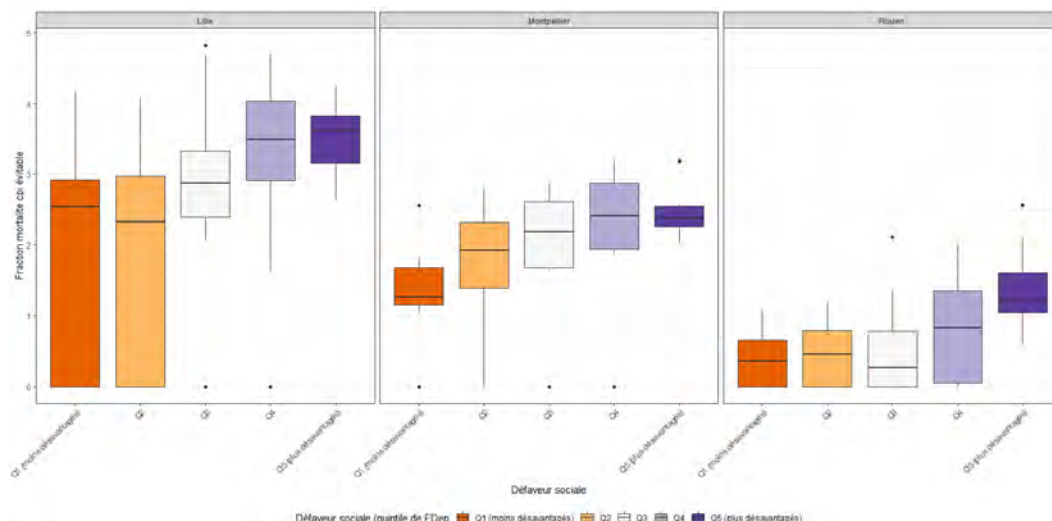
**Tableau 70. Bénéfices sur la mortalité et l'incidence par cardiopathies ischémiques du respect des valeurs guides OMS pour le bruit routier (53 dB Lden)**

|     | Mortalité par cardiopathie ischémique |                                                     | Incidence des hospitalisations pour cardiopathie ischémique |                                                        |
|-----|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|     | Décès évitables<br>[IC 95 %]          | Fraction de la mortalité* évitable<br>[IC 95 %] (%) | Hospitalisations évitables<br>[IC 95 %]                     | Fraction des hospitalisations* évitables [IC 95 %] (%) |
| MEL | 8 [0 ; 20]                            | 3,7 [0 ; 9]                                         | 85 [44 ; 152]                                               | 5,8 [3 ; 10,3]                                         |
| 3M  | 3 [0 ; 8]                             | 2,9 [0 ; 7,1]                                       | 41 [21 ; 74]                                                | 4,4 [2,2 ; 7,9]                                        |
| MRN | 2 [0 ; 5]                             | 1,4 [0 ; 3,6]                                       | 22 [11 ; 40]                                                | 2,2 [1,1 ; 4]                                          |

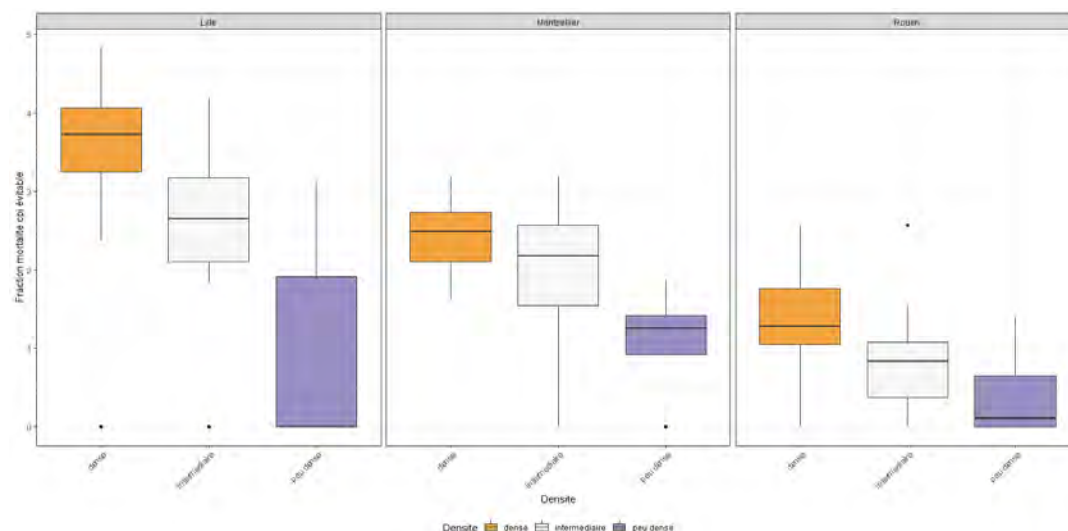
Lecture du tableau : à la MEL, si aucun habitant n'était exposé à plus de 53 dB Lden, 8 décès par cardiopathie ischémique seraient évités chaque année. Ceci représente 3,7 % de la mortalité pour cardiopathie ischémique à la MEL.

La stratification des résultats par quintile de FDep met en évidence un gradient dans la part attribuable au bruit routier dans l'incidence et la mortalité par cardiopathies ischémiques. Les communes les plus défavorisées sont en moyenne plus impactées par le bruit routier, mais avec un écart qui reste faible (Figure 19). Les communes les plus denses sont également plus impactées (Figure 20). Des gradients similaires sont observés pour les hospitalisations (Figure 21, Figure 22).

**Figure 19. Fraction de la mortalité par cardiopathies ischémiques évitée si le bruit routier ne dépassait pas la valeur recommandée par l'OMS, selon le quintile de défaveur sociale**



**Figure 20. Fraction de la mortalité par cardiopathies ischémiques évitée si le bruit routier ne dépassait pas les valeurs recommandées par l'OMS, selon la densité**



**Figure 21. Fraction d'hospitalisations pour cardiopathies ischémiques évitée si le bruit routier ne dépassait pas la valeur recommandée par l'OMS, selon le quintile de défaveur sociale**

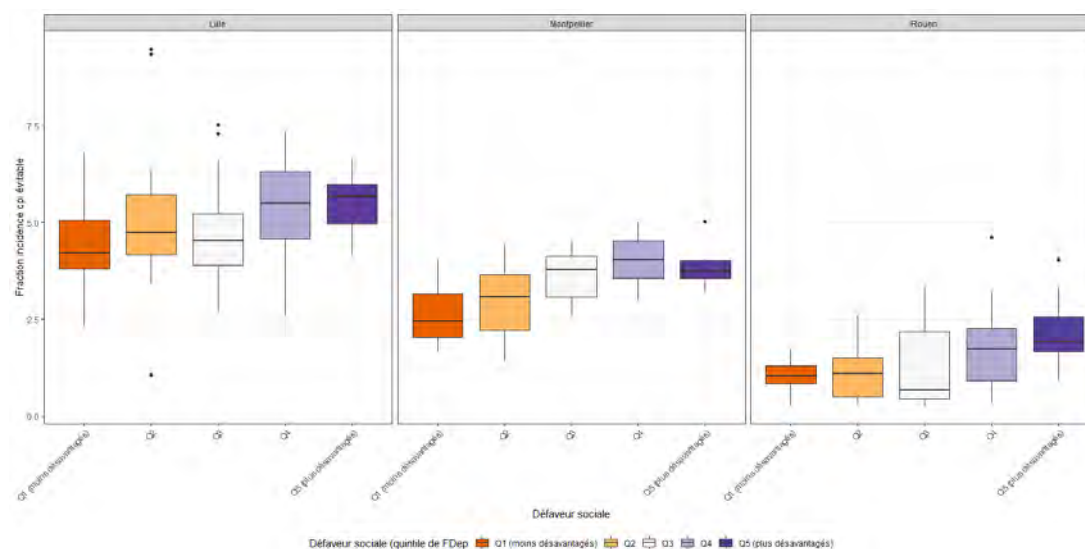
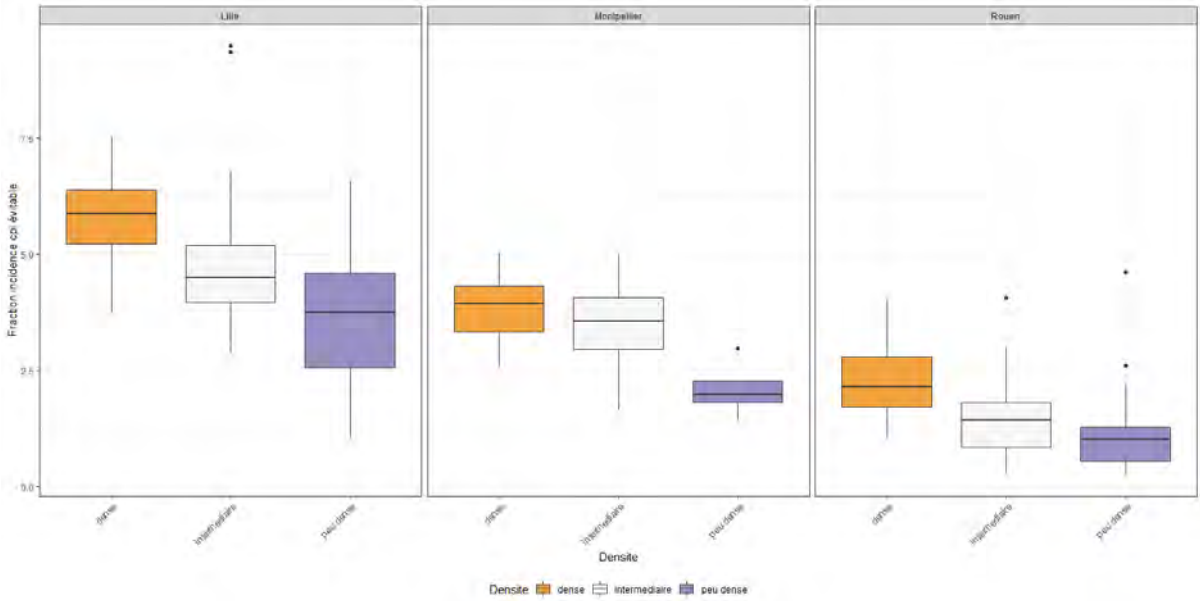


Figure 22. Fraction d'hospitalisations pour cardiopathies ischémiques évitée si le bruit routier ne dépassait pas la valeur recommandée par l'OMS, selon la densité



**Bénéfices sur les fortes perturbations du sommeil du respect des valeurs guides OMS pour le bruit routier et ferroviaire**

Si les valeurs guides OMS pour le bruit routier (53 dB  $L_{den}$ ) étaient respectées, de fortes perturbations du sommeil seraient évitées pour 1,8 % de la population de la MEL, 1,0 % de la 3M et 0,4 % de la MRN (Tableau 71). Pour le bruit ferroviaire, si l'ensemble de la population était exposée à des niveaux de bruits inférieurs aux valeurs guides OMS (54 dB  $L_{den}$ ), de fortes perturbations du sommeil seraient évitées pour 1,3 % de la population de la MEL, 0,4 % de la 3M et 1,5 % de la MRN.

Tableau 71. Bénéfices sur les fortes perturbations du sommeil du respect des valeurs guides OMS pour le bruit routier et ferroviaire

|     | Bruit routier                                                       |                           | Bruit ferroviaire                                                   |                           |
|-----|---------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------|
|     | Nombre de personnes avec de fortes perturbations du sommeil évitées | Part de la population (%) | Nombre de personnes avec de fortes perturbations du sommeil évitées | Part de la population (%) |
| MEL | 11 672                                                              | 1,8                       | 6 640                                                               | 1,3                       |
| 3M  | 2 780                                                               | 1,0                       | 722                                                                 | 0,4                       |
| MRN | 1 293                                                               | 0,4                       | 2 813                                                               | 1,5                       |

Il semble y avoir une légère augmentation de la part de la population dont le sommeil est fortement perturbé par le bruit routier dans les communes les plus denses et plus défavorisées (Figure 23, Figure 24). Il ne semble pas y avoir de gradient selon la densité et le quintile de défaveur sociale concernant l'impact du bruit ferroviaire sur les fortes perturbations du sommeil (Figure 25, Figure 26).

Figure 23. Part de la population avec de fortes perturbations du sommeil évitées si le bruit routier ne dépassait pas la valeur recommandée par l'OMS, selon le quintile de défaveur sociale de la commune

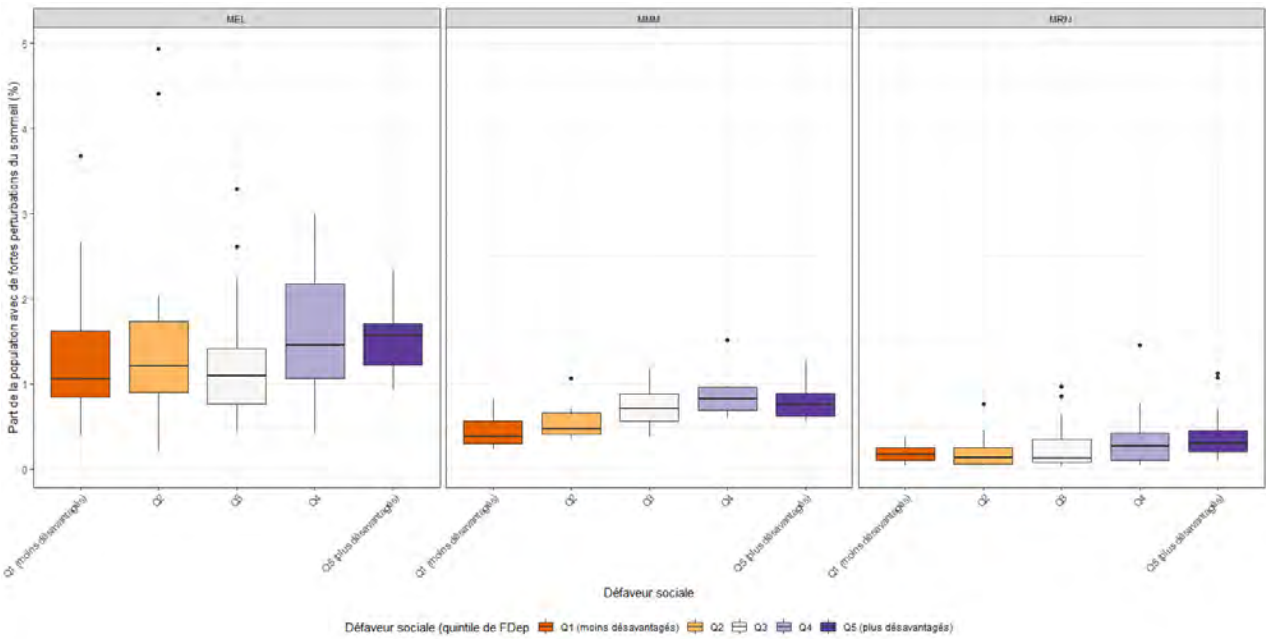
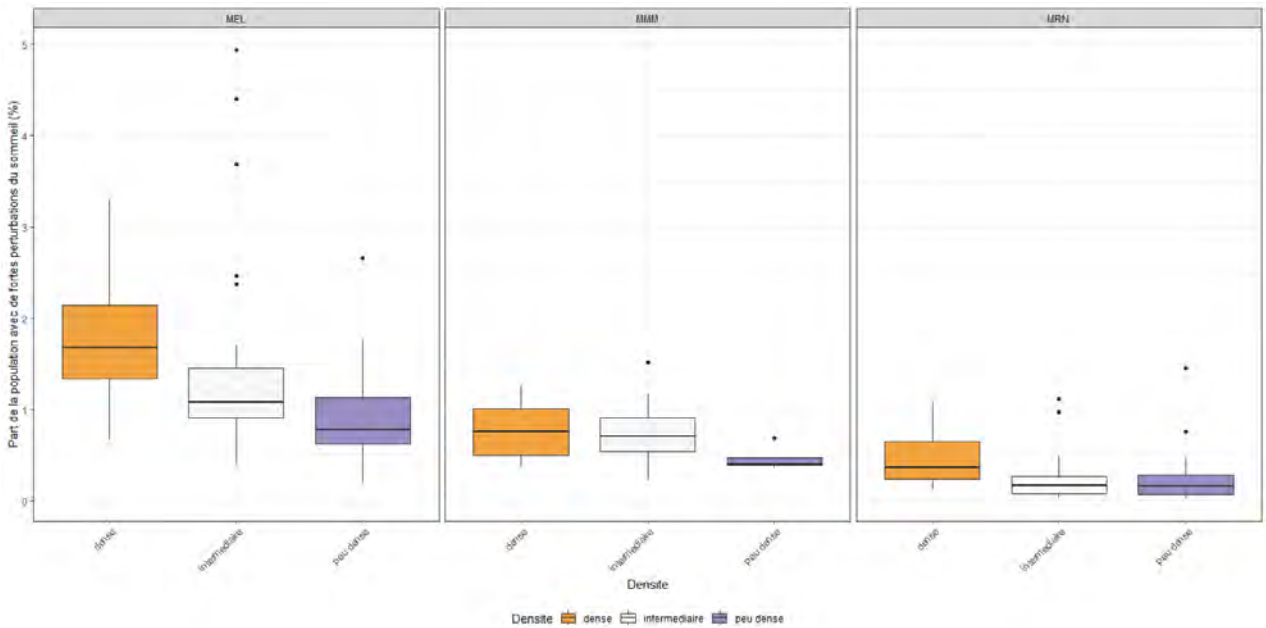
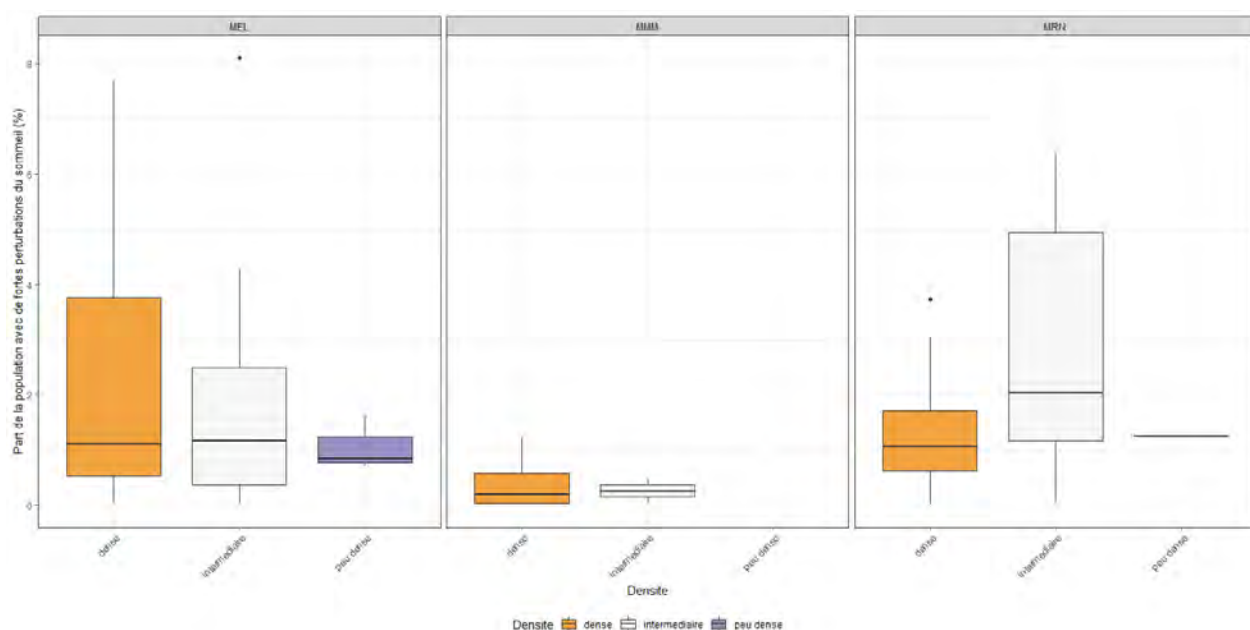


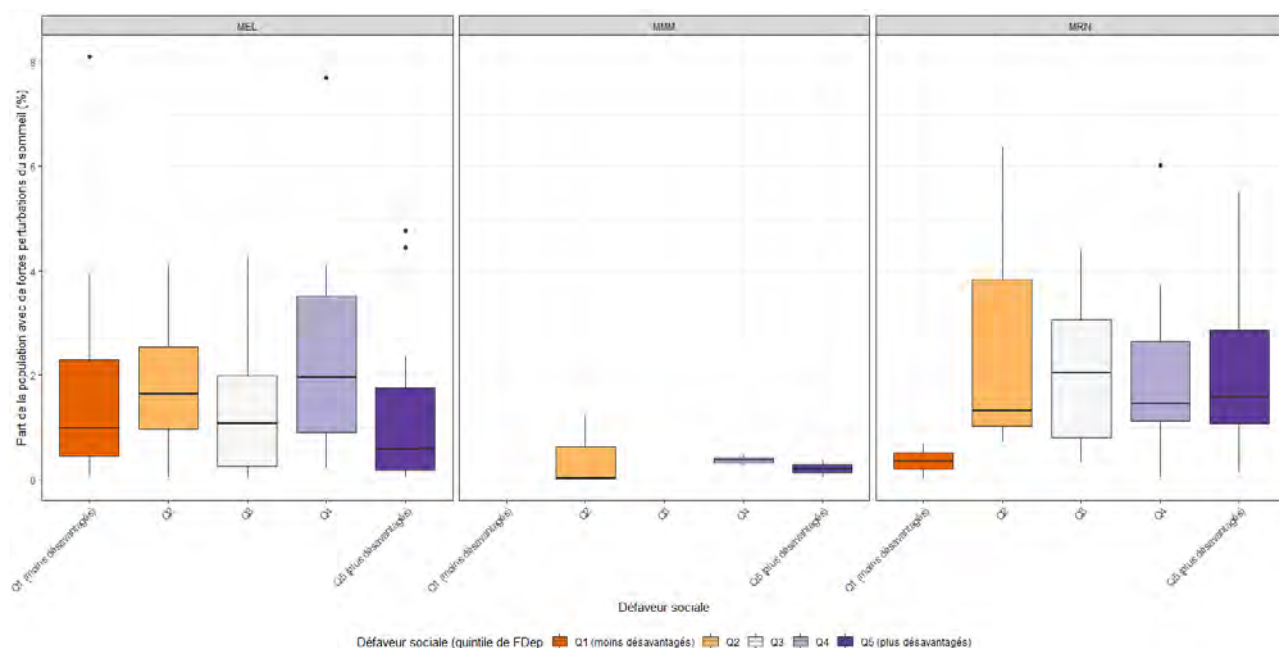
Figure 24. Part de la population avec de fortes perturbations du sommeil évitées si le bruit routier ne dépassait pas la valeur recommandée par l'OMS, selon la densité



**Figure 25. Part de la population avec des fortes perturbations du sommeil évitées si le bruit ferroviaire ne dépassait pas la valeur recommandée par l'OMS, selon la densité**



**Figure 26. Part de la population avec des fortes perturbations du sommeil évitées si le bruit ferroviaire ne dépassait pas la valeur recommandée par l'OMS, par quintile de défaveur sociale**



## Bénéfices sur la forte gêne associés au respect des valeurs guides OMS pour le bruit routier et ferroviaire

Si les valeurs guides OMS pour le bruit routier (45 dB  $L_{den}$ ) étaient respectées, les fortes gênes seraient évitées pour 6,7 % de la population de la MEL, 4,8 % de la 3M et 2,2 % de la MRN (Tableau 72). Pour le bruit ferroviaire, si l'ensemble de la population est exposé à des niveaux de bruits inférieurs aux valeurs guide OMS (44 dB  $L_{den}$ ) les fortes gênes seraient évitées pour 1,5 % de la population de la MEL, 0,7 % de la 3M et 1,6 % de la MRN.

Tableau 72. Bénéfices sur la forte gêne du respect des valeurs guides OMS pour le bruit routier et ferroviaire

|     | Bruit routier                             |                           | Bruit ferroviaire                         |                           |
|-----|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|
|     | Nombre de personnes ayant de fortes gênes | Part de la population (%) | Nombre de personnes ayant de fortes gênes | Part de la population (%) |
| MEL | 44 306                                    | 6,7                       | 7 745                                     | 1,5                       |
| 3M  | 13 112                                    | 4,8                       | 1 306                                     | 0,7                       |
| MRN | 6 761                                     | 2,2                       | 3 024                                     | 1,6                       |

Il semble y avoir une légère augmentation de la part de la population avec une forte gêne due au bruit routier dans les communes les plus denses et plus défavorisées (Figure 27, Figure 28). Il ne semble pas y avoir de gradient selon la densité et le quintile de défaveur sociale concernant l'impact du bruit ferroviaire sur la forte gêne (Figure 29, Figure 30).

Figure 27. Part de la population avec une forte gêne évitée si le bruit routier ne dépassait pas la valeur recommandée par l'OMS, selon le quintile de défaveur sociale

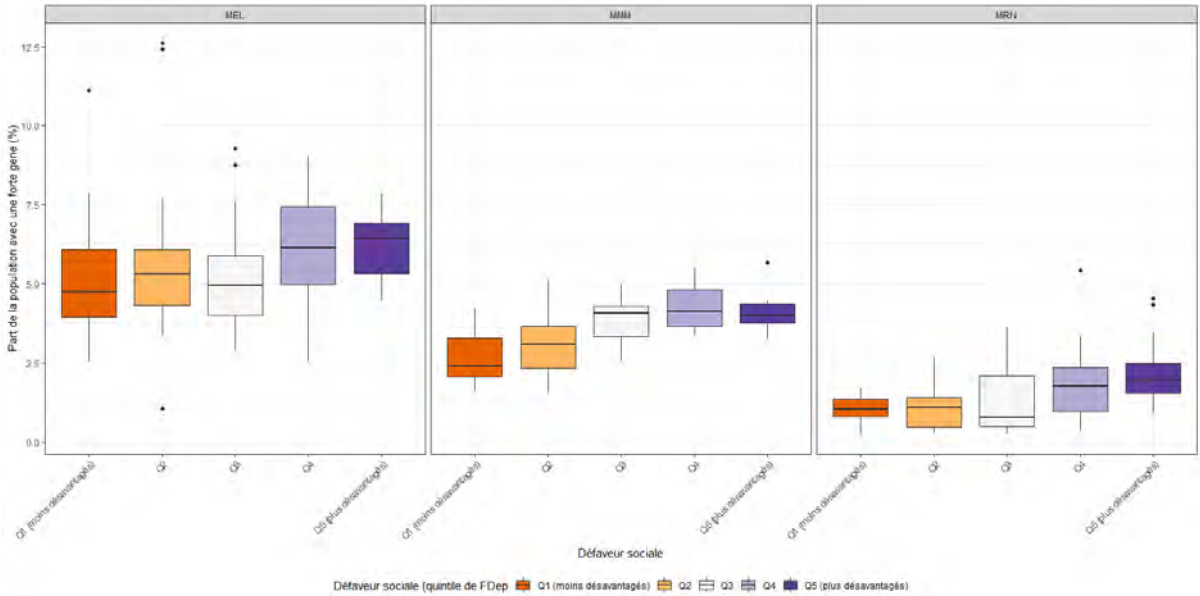
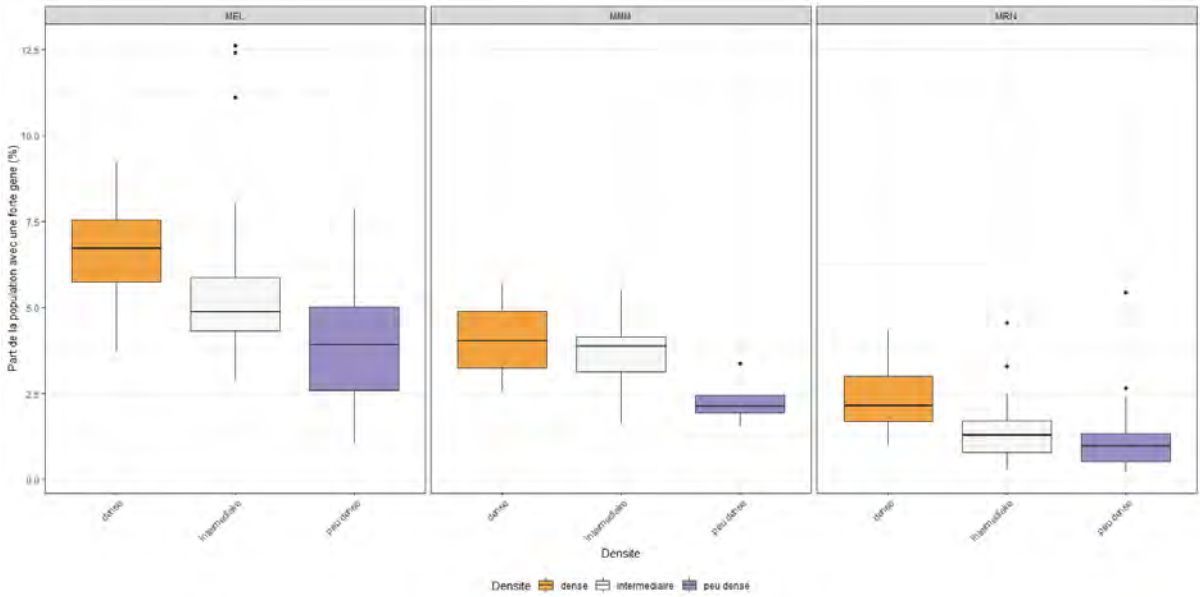
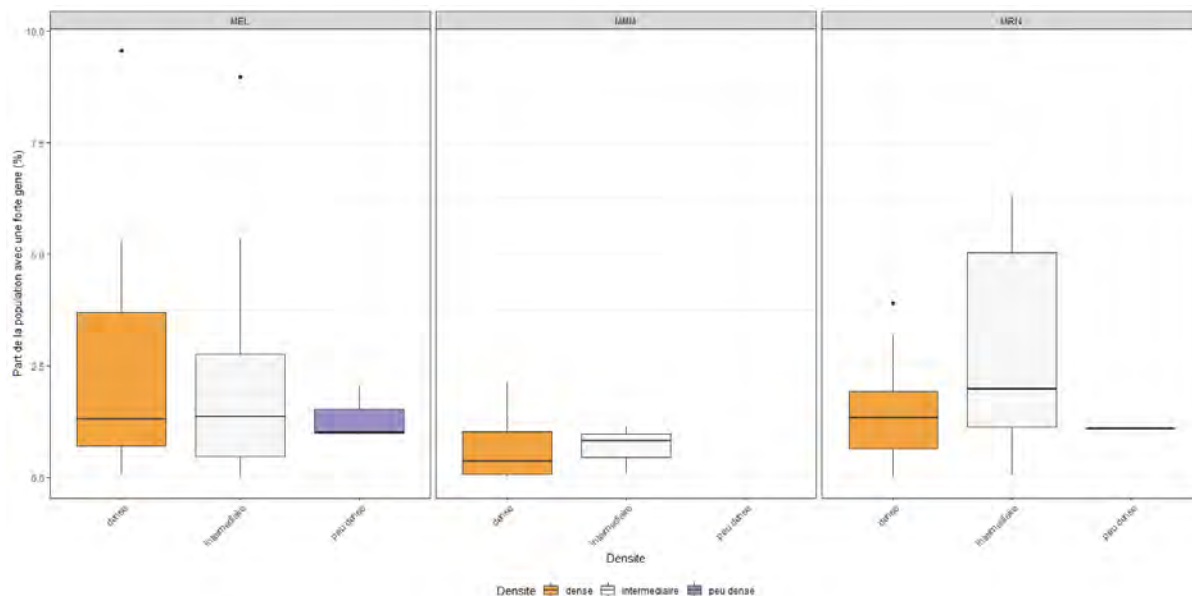


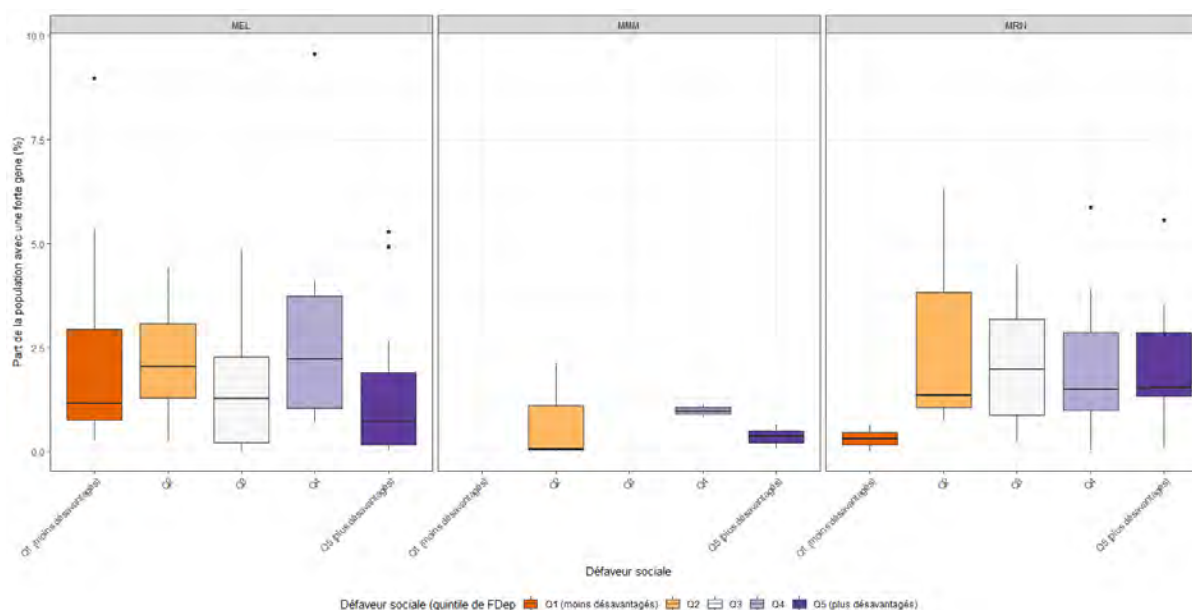
Figure 28. Part de la population avec une forte gêne évitée si le bruit routier ne dépassait pas la valeur recommandée par l'OMS, selon la densité



**Figure 29. Part de la population avec une forte gêne évitée si le bruit ferroviaire ne dépassait pas la valeur recommandée par l'OMS, selon la densité**



**Figure 30. Part de la population avec une forte gêne évitée si le bruit ferroviaire ne dépassait pas la valeur recommandée par l'OMS, selon le quintile de défaveur sociale**



### 7.3.4 Analyse de sensibilité : influence des RER

Le choix des RER, joue un rôle déterminant dans les résultats d'une ÉQIS. Des analyses de sensibilité ont été réalisées pour mieux comprendre l'influence de ce facteur. Le [Tableau 73](#) résume les résultats présentés ci-dessous et les analyses de sensibilité réalisées avec une autre RER.

Les RER testées en sensibilité pour le bruit routier et les cardiopathies ischémiques (mortalité et incidence des hospitalisations) présentent des estimations près de deux fois plus faibles que les RER recommandées par l'OMS et utilisées en analyse principale.

Pour les fortes perturbations du sommeil et le bruit routier, les relations utilisées en sensibilité conduisent également à des estimations deux à trois fois plus faibles que les relations

recommandées par l'OMS en analyse principale. En revanche, ces estimations sont similaires en analyse principale et de sensibilité pour le bruit ferroviaire.

**Tableau 73. Influence du RER sur l'estimation des effets de santé évitables**

| Indicateur de santé                                         | RER                                         | Réf   | MEL             |            | 3M              |     | MRN             |            |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------|-----------------|------------|-----------------|-----|-----------------|------------|
|                                                             |                                             |       | Nombre évitable | %          | Nombre évitable | %   | Nombre évitable | %          |
| Mortalité par cardiopathies ischémiques                     | 1,05 [0,97 ; 1,13]                          | (252) | 8 [0 ; 20]      | <b>3,7</b> | 3 [0 ; 8]       | 2,9 | 2 [0 ; 5]       | <b>1,4</b> |
|                                                             | 1,03 [0,99 ; 1,08]                          | (245) | 5 [0 ; 13]      | <b>2,2</b> | 2 [0 ; 5]       | 1,7 | 1 [0 ; 3]       | <b>0,9</b> |
| Incidence des hospitalisations pour cardiopathie ischémique | 1,08 [1,04 ; 1,15]                          | (252) | 85 [44 ; 152]   | <b>5,8</b> | 41 [21 ; 74]    | 4,4 | 22 [11 ; 40]    | <b>2,2</b> |
|                                                             | 1,03 [1,00 ; 1,05]                          | (244) | 33 [0 ; 54]     | <b>2,2</b> | 16 [0 ; 26]     | 1,7 | 8 [0 ; 14]      | <b>0,8</b> |
| Fortes perturbations du sommeil – bruit routier             | %HSD = 19,4312-(0,9336×Ln)+(0,0126×Ln^2)    | (246) | 11 672          | <b>1,8</b> | 2 780           | 1,0 | 1 293           | <b>0,4</b> |
|                                                             | %HSD = 31,18323-(1,47351×Ln)+(0,01851×Ln^2) | (247) | 4 297           | <b>0,7</b> | 972             | 0,4 | 442             | <b>0,1</b> |
| Fortes perturbations du sommeil – bruit ferroviaire         | %HSD = 67,5406-(3,1852×Ln)+(0,0391×Ln^2)    | (246) | 6 640           | <b>1,3</b> | 722             | 0,4 | 2 813           | <b>1,5</b> |
|                                                             | %HSD = 63,56140-(3,00711×Ln)+(0,03717×Ln^2) | (247) | 6 504           | <b>1,2</b> | 705             | 0,4 | 2 750           | <b>1,4</b> |

## 7.4 Discussion

### 7.4.1 Des impacts évitables pour un grand nombre d'habitants

La quantification des impacts sur la mortalité étant restreinte à la mortalité par cardiopathie ischémique, les ordres de grandeur ne sont pas directement comparables aux impacts des autres déterminants de ce rapport qui utilise la mortalité toutes causes ou non accidentelles. Le respect des valeurs guides OMS pour les niveaux de bruit routier permettrait d'éviter entre 1,4 et 3,7 % de la mortalité par cardiopathie ischémique selon la métropole, fraction non négligeable bien que représentant un faible nombre de décès.

Par ailleurs, les impacts du bruit routier et ferroviaire évitables en respectant les valeurs guides OMS, sur les fortes perturbations du sommeil et la forte gêne peuvent concerner jusqu'à près de 7 % de la population. Le respect de ces valeurs guides contribuerait à améliorer la qualité de vie et de sommeil d'un grand nombre d'habitants et limiter des effets sur la santé conséquente de ces perturbations.

Les résultats mettent également en évidence un gradient important selon la défaveur sociale, indiquant des bénéfices plus importants dans les communes plus denses et plus défavorisées.

### 7.4.2 Incertitudes

#### Données d'exposition

La modélisation des niveaux de bruit comporte des incertitudes qui ne sont pas quantifiées. Par ailleurs, la production de résultats par tranche de 5 dB oblige à faire des hypothèses sur la répartition de la population par dB par une méthode développée par l'AEE. Cette méthode tient compte du gradient de population exposée aux tranches supérieures et inférieures afin de les répartir par tranche d'un dB. Cependant il n'est pas possible de savoir si cette répartition est conforme à la répartition « réelle » au sein de la tranche de 5 dB. De plus ces résultats exprimés par tranche de 5 dB donnent la population exposée arrondie à la centaine.

## Données de santé

Concernant l'incidence des cardiopathies ischémiques, il n'a été possible de l'approcher que par les hospitalisations, ce qui peut conduire à une sous-estimation du nombre de cas. Cette incidence est calculée sur une période de onze ans, ce qui peut conduire à une surestimation du nombre de cas (les personnes qui auraient eu une première pathologie il y a plus de onze ans, puis une seconde pendant la période d'étude sont comptées comme de nouveaux cas, alors qu'ils ne le sont en fait pas). Cependant, il n'est pas possible de prendre une période plus longue, les données n'étant disponibles qu'à partir de 2006. Par ailleurs, il n'a pas été possible de construire l'incidence de manière parfaitement équivalente à la définition de l'étude fournissant la relation exposition/effet : la méta-analyse retenue agrège des résultats provenant d'études utilisant des définitions très variables, et parfois non-explicitées. Ceci génère une incertitude concernant la transposabilité de la relation exposition / effet, qui n'est ni quantifiable ni qualifiable.

## Choix des RER et du scénario

Le choix des RER et du scénario repose sur les recommandations formulées en 2018 par l'OMS. Ces recommandations n'ont pas été mises à jour depuis, bien que la littérature sur les effets du bruit des transports sur la santé se soit enrichie. Ainsi, le choix des couples exposition / effet, des RER et les seuils de recommandations pourraient être revus à la lumière de la littérature récente.

Concernant les RER pour le sommeil et la gêne, les courbes recommandées par l'OMS reposent sur des questionnaires réalisés auprès de populations européennes mais aussi asiatiques. Les contextes d'exposition et la sensibilité au bruit peuvent largement varier selon les différents pays, voire à une échelle géographique plus fine. Ces RER appliquées pourraient ne pas correspondre complètement au contexte de ces trois agglomérations.

De plus, des effets du bruit des transports existent en dessous des seuils pour le scénario utilisé et ne retranscrivent pas l'ensemble de l'effet du bruit des transports sur la santé, notamment pour le sommeil et la gêne.

### 7.4.3 Lien avec les autres déterminants

Comme discuté dans les chapitres précédents, de nombreuses interactions peuvent exister entre le bruit et les autres déterminants.

L'exposition au bruit des transports peut être reliée à des sources communes aux autres déterminants, comme les modes de transports pouvant générer de la pollution de l'air et du bruit, alors que la végétation permettrait un effet masquant sur ces sources de bruit. Certains types d'urbanisation dense peuvent venir augmenter les niveaux de bruit et l'effet îlot de chaleur urbain. Le bruit dans l'environnement peut venir également affecter la faune des espaces végétalisés et éventuellement en réduire leur qualité, notamment en termes d'environnement sonore.

À moyen terme, les politiques de mobilités pourraient également conduire à une modification de ces interactions entre les différentes nuisances avec par exemple, une réduction du bruit du trafic routier (moins de voitures thermiques) mais une augmentation du trafic ferroviaire (augmentation du fret). Ces interactions et évolutions possibles n'ont pas été prises en compte dans cette ÉQIS.

### 7.4.4 Évaluation de la faisabilité et de la pertinence

Les données d'exposition au bruit des transports utilisées dans cette étude se conforment au cadre imposé par la directive européenne et comportent plusieurs limites pour leur utilisation dans le cadre d'une ÉQIS. Le seuil d'effet du bruit identifié dans la littérature étant à 53 dB selon l'OMS, il n'est pas possible de quantifier l'ensemble des impacts du bruit pour les populations exposées en deçà de 55 dB  $L_{den}$ , les données n'étant pas rapportées. De plus, ces données par tranche de 5 dB

supposent des hypothèses sur la répartition de la population et limitent la possibilité de construire des scénarios alternatifs. L'absence de données sur la répartition de l'ensemble de la population exposée au bruit des transports de manière fine, permet difficilement d'établir des scénarios reposant sur un changement dans la répartition de l'exposition dans la population comme réalisé sur la pollution de l'air (cf. 0 6.2 Méthode).

L'extension de la littérature sur les effets du bruit des transports sur la santé depuis les méta-analyses réalisées par l'OMS décrit de nombreux autres effets sur la santé, comme le diabète de type 2 (253) (254) ou même la mortalité non accidentelle ou pour causes cardio-vasculaires et respiratoires (253, 254). De nouvelles revues systématiques permettant de qualifier de nouvelles RER et mieux quantifier les forces de ces associations permettraient de mieux décrire l'impact du bruit des transports dans le cadre d'ÉQIS.

Malgré ces limites, les ÉQIS bruit des transports sont faisables et pertinentes. Des données environnementales et sanitaires sont disponibles, des RER issues de méta-analyses ont été validées par l'OMS et il est possible de construire un scénario « valeur cible ». L'exposition au bruit des transports et ses impacts sanitaires touchent une part non négligeable des populations urbaines, il reste pertinent de décrire ces impacts. Des données d'exposition plus précises et complètes et une mise à jour des RER permettront d'améliorer la qualité des futures ÉQIS.

## 8. CONCLUSION

### 8.1 Pertinence des évaluations quantitatives des impacts sur la santé

Pour la première fois, cette étude pilote a mené pour trois métropoles françaises des ÉQIS portant sur les espaces verts, les mobilités actives, la chaleur, le bruit et la pollution de l'air. Pour chacun de ces déterminants, la démarche d'ÉQIS a permis de combiner des données locales d'environnement et de santé à des relations expositions-risques issues de la littérature internationale. Plusieurs scénarios ont été testés et illustrent la diversité des utilisations possibles des ÉQIS.

L'ÉQIS permet notamment d'insister, grâce à la quantification, sur des déterminants qui ne sont pas spontanément perçus comme majeurs pour la santé. Si l'impact de la pollution de l'air est désormais bien connu (notamment grâce à de précédentes ÉQIS), et celui de la chaleur de plus en plus considéré, les actions sur le bruit, les espaces verts et les mobilités actives sont beaucoup moins identifiées comme des actions de santé. Or, les résultats montrent des bénéfices pour la santé potentiellement importants, d'un ordre de grandeur comparable à ceux associés à une baisse la pollution de l'air. Ces résultats sont donc intéressants pour inciter les scientifiques et les acteurs locaux à avoir une approche globale de la santé environnementale en milieu urbain, mais également pour promouvoir l'adaptation à la chaleur (compte tenu des impacts importants), et des actions ambitieuses sur les mobilités actives et la végétalisation des villes.

Les résultats des différentes ÉQIS concernant différents déterminants ne peuvent pas être sommés pour avoir une idée des bénéfices totaux sur la santé. D'une part, l'évolution d'un déterminant peut en faire évoluer un autre, et d'autre part, les effets sur la santé considérés peuvent être influencés simultanément par plusieurs déterminants. En sommant les résultats on risque donc de surestimer les bénéfices, sans pouvoir estimer l'ordre de grandeur de cette surestimation. Cependant, il n'est pas non plus pertinent d'utiliser les résultats pour viser l'action sur un seul déterminant mais avoir une approche globale intégratrice des environnements favorables à la santé. Dans un contexte de planification de plus en plus intégrée des différents champs de l'urbanisme favorable à la santé, le travail réalisé et les données montrent les interactions et liens entre les différents déterminants et leur potentielle synergie.

Au sein des métropoles, l'exercice de cette étude pilote a permis de générer de nombreuses discussions entre les coauteurs de l'étude sur comment intégrer la santé dans les politiques publiques et de participer à l'acculturation des différents services aux questions de santé publique quand les compétences commencent à être intégrées. Toutefois, il apparaît essentiel d'accompagner les résultats et leur interprétation pour faciliter leur compréhension et leur acceptabilité par les décideurs locaux.

### 8.2 Faisabilité des évaluations quantitatives des impacts sur la santé

#### 8.2.1 Des ÉQIS faisables pour tous les déterminants, mais avec des incertitudes variables

Des ÉQIS ont pu être réalisées pour l'ensemble des déterminants inclus dans l'étude. Elles sont toutes associées à des incertitudes et des limites propres qui sont détaillées dans les discussions des chapitres correspondants à chaque déterminant.

On peut noter deux enjeux communs à tous les déterminants et directement liés aux connaissances épidémiologiques :

- Le choix de la relation exposition-risque est un élément central de l'ÉQIS. Il devrait s'appuyer sur des études robustes adaptées au contexte français. Or, pour les espaces verts, le bruit, et les mobilités actives, il n'existe pas d'études françaises, peu d'études européennes, et peu d'options pour les relations expositions-risques. Ceci n'empêche pas la réalisation de l'ÉQIS, mais introduit une incertitude plus grande pour les résultats en matière d'espaces verts, de bruit et de mobilités actives, par rapport à la pollution de l'air et à la chaleur pour lesquelles on dispose de plus d'études fournissant des RER.
- Un hiatus entre les informations environnementales utiles aux décideurs pour les scénarios, et les informations utilisées par les études épidémiologiques. Typiquement, le NDVI utilisé dans les études épidémiologiques sur la végétation a peu de sens pour les acteurs des métropoles. Les MET utilisés dans les études épidémiologiques sur la mobilité nécessitent de nombreuses hypothèses pour être appliquées à des scénarios sur les parts modales.

### 8.2.2 Des données locales nombreuses, mais nécessitant un traitement important

L'étude pilote a mis en évidence l'existence d'un nombre important de bases de données environnementales pertinentes, mais qui ne sont pas directement utilisables pour les ÉQIS. Notamment :

- pour la pollution de l'air, les données sont nombreuses mais doivent être ramenées à une échelle communale pour l'analyse des effets à long terme ;
- pour la chaleur, il y a peu de données décrivant l'îlot de chaleur urbain spatialisé sur des échelles de temps assez longues. Mais de toute façon, ces données n'auraient pas été exploitables car il n'existe pas aujourd'hui de RER appropriée pour des ÉQIS spatialisées ;
- pour le bruit, les données collectées dans le cadre de la directive EU manquent de précision réaliser une ÉQIS fiable ;
- pour les espaces verts, les données de NDVI doivent être ramenées à l'échelle de l'Iris ou de la commune ;
- les enquêtes ménages-déplacements fournissent un grand nombre de données sur les mobilités actives, à condition d'avoir accès aux fichiers de résultats complets, et non uniquement aux documents de synthèse.

### 8.2.3 Des analyses qui demeurent complexes à mettre en œuvre

À l'exception de la chaleur, les équations des ÉQIS ne nécessitent pas de compétences statistiques et mathématiques approfondies pour être utilisées. La préparation des données d'entrée de l'équation (données d'exposition, de santé, scénarios) implique par contre des traitements de données, y compris via des approches de SIG et des approches statistiques importants. Il s'agit d'un travail analytique complexe, auquel il faut ajouter la sélection des relations expositions-risques, et la construction des scénarios et l'interprétation des résultats. Au terme de l'étude de faisabilité, il n'apparaît pas possible de proposer des outils simples et faciles d'utilisation pour reproduire les analyses réalisées dans ce rapport. L'OMS propose de tels outils pour l'air (AirQ+), les mobilités (Heat), et prépare un outil pour les espaces verts. Ces outils sont faciles d'utilisation, dans le sens où les équations sont programmées, et les RER pré-choisies, mais impliquent néanmoins un temps de formation et d'appropriation. De plus, ils sont peu adaptés pour des approches spatialisées nécessitant de réaliser les calculs sur un grand nombre de communes ou d'Iris.

Certaines données de santé, notamment de recours aux soins et d'incidence, ne sont également pas disponibles directement, et mobilisent une expertise pour la définition des algorithmes d'extractions et de traitement des données du SNDS.

Par ailleurs, cette phase pilote a mis en évidence la nécessité de prévoir un temps long à la définition des besoins en termes de données environnementales et l'identification des données disponibles.

L'élaboration des scénarios est également une étape cruciale. Pour cette phase pilote, il a été décidé de s'appuyer uniquement sur des données déjà disponibles, et de ne pas produire de données ad hoc. La planification de la production de données environnementales spécifiques pour de futures ÉQIS pourrait faciliter la création de scénarios, et en particulier de scénarios croisés.

#### 8.2.4 L'impossibilité de conduire des ÉQIS croisant plusieurs déterminants autour d'un même scénario

Lors de cette phase pilote, il n'a pas été identifié de données permettant de manière satisfaisante de décliner un scénario sur plusieurs déterminants, par manque de données environnementales. Or, la démarche ÉQIS pourrait être mobilisée pour évaluer de manière intégrée une intervention, par exemple un scénario d'aménagement, ou un PCAET. Mais cela implique de produire des données environnementales spécifiques.

À défaut de produire des scénarios croisés, une réflexion a été commencée sur la construction d'un score de multi-exposition, pour décrire les résultats des différentes ÉQIS. La méthode envisagée s'appuyait sur une approche proposée par S.Host *et al.* (255). Elle n'a toutefois pas été poursuivie car il est apparu que cela apportait peu d'information. Plusieurs équipes de recherche travaillent par ailleurs à des scores de multi-expositions dans différents cadres, indépendamment d'un objectif d'ÉQIS.

Enfin, comme précisé au début de notre discussion, aucune RER intégrant les risques associés à plusieurs déterminants n'a été identifiée. Les résultats des ÉQIS réalisées ne peuvent donc être additionnés.

### 8.3 Perspectives pour le développement des ÉQIS en France

#### 8.3.1 Un outil tourné vers l'interdisciplinarité et l'intersectorialité

Ce projet pilote a été construit comme une expérience nationale nourrie par les connaissances locales. Les réflexions ont été alimentées par de nombreux échanges avec les experts techniques des métropoles, et des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air. Au cours de l'étude, plusieurs autres acteurs pertinents ont été identifiés pour apporter un regard critique sur les données environnementales, sanitaires ou sur la méthode, comme BruitParif, Acoucity, le Cerema, les Observatoires Régionaux de la Santé, le réseau ville-santé de l'OMS, et des chercheurs universitaires. Afin de faciliter le partage de données et de savoir pour de futures ÉQIS, il serait intéressant de mettre en place un réseau d'acteurs interdisciplinaires autour de cet outil, selon des modalités qui restent à définir.

#### 8.3.2 Des besoins de recherche en épidémiologie

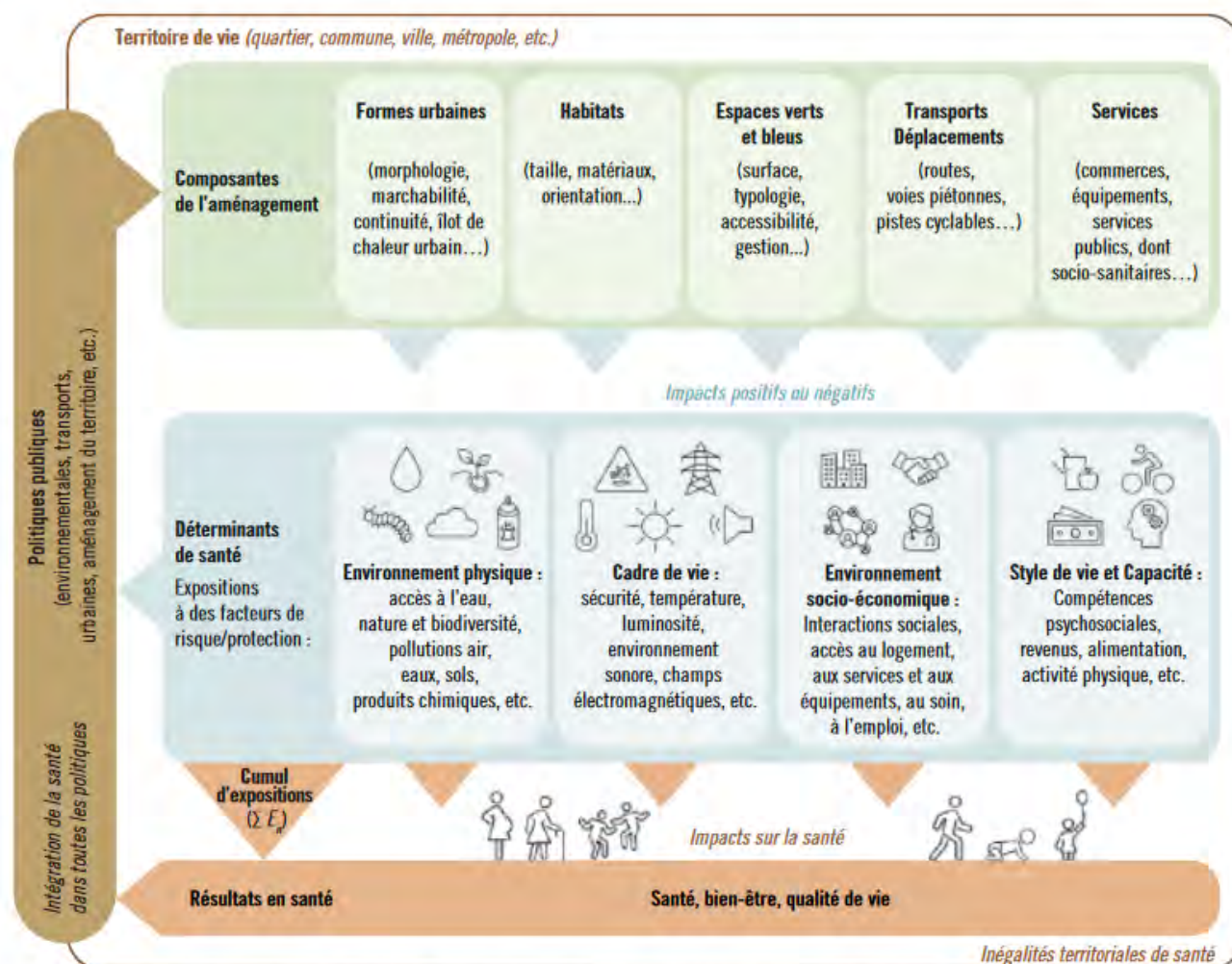
Comme indiqué précédemment, la production de relations exposition-risques adaptées à la France serait importante pour réduire les incertitudes des ÉQIS. En particulier, sur le bruit, les espaces verts et les mobilités, où peu de travaux sont disponibles.

Des RER combinant plusieurs expositions seraient également utiles, ainsi que des RER intégrant la défaveur sociale.

## 8.4 Perspectives pour la santé publique

Malgré les incertitudes et les besoins de développement méthodologiques complémentaires discutés précédemment, cette étude illustre l'intérêt de l'ÉQIS comme un outil d'appui à la décision pour encourager des environnements favorables à la santé. Les facteurs de risque omniprésents en milieu urbain que sont la pollution de l'air et le bruit sont associés à des impacts sur la mortalité et la morbidité importants. À l'inverse, l'action sur des déterminants favorables à la santé comme les espaces verts urbains et les mobilités actives pourraient permettre d'éviter un grand nombre de décès prématurés chaque année. Les ÉQIS pourraient notamment être utilisées dans une démarche d'urbanisme favorable à la santé, visant à tenir compte systématiquement et simultanément des conséquences sur la santé et sur l'environnement de tout projet d'urbanisme (256), en contribuant à avoir une vision systémique (Figure 31). L'objectif *in fine* est d'objectiver autant que possible des politiques urbaines favorables à la santé, mais également à la protection de la biodiversité et à l'adaptation et l'atténuation du changement climatique.

**Figure 31 – Modèle conceptuel pour aborder les différentes composantes d'un territoire de vie selon une approche systémique (256)**



**Source :** adapté de productions internes de l'EHESP – groupe UrbASET et Réseau français des Villes-Santés (RFVS), 2022.

# Annexe 1 - NDVI moyen des types de végétations

| Type d'espace       | Source                                                                                       | Définition                                                                                                                                                                                                                                                                                     | NDVI moyen<br>[IC 95 %] |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Forêt et bois       | BD TOPO IGN (forêts)                                                                         | « Terrain d'une superficie de plus de 5 000 m <sup>2</sup> avec un taux de recouvrement absolu des arbres supérieur ou égal à 10 % sur une largeur d'au moins 20 m avec des arbres atteignant ou pouvant atteindre une hauteur supérieure à 5 m in situ. À l'exception des vergers cultivés. » | 0,53 [0,35 : 0,71]      |
|                     | Végétation fine de la métropole de Montpellier (bois)                                        | « Éléments arborés d'une surface supérieure à 500 m <sup>2</sup> et d'une hauteur supérieure à 3 m »                                                                                                                                                                                           | 0,62 [0,48 : 0,76]      |
|                     | Corine Land Cover (forêts)                                                                   | « Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et des arbustes en sous-étages [...] »                                                                                                                                                           | 0,63 [0,53 : 0,73]      |
|                     | OSO (forêt)                                                                                  | « Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et des arbustes en sous-étages [...] »                                                                                                                                                           | 0,68 [0,54 : 0,82]      |
|                     | OSM                                                                                          | Forêt et bois                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0,55 [0,33 : 0,77]      |
| Vergers et vignes   | BD TOPO IGN                                                                                  | « Zone de plantation d'arbres hors du peuplement forestier »                                                                                                                                                                                                                                   | 0,48 [0,30 : 0,66]      |
|                     | Corine Land Cover (oliveraies incluses)                                                      | « Parcelles plantées d'arbres fruitiers [de vignes] ou d'arbustes fruitiers : cultures pures ou mélange d'espèces fruitières, arbres fruitiers en association avec des surfaces toujours en herbe »                                                                                            | 0,48 [0,32 : 0,64]      |
|                     | OSO                                                                                          | « Parcelles plantées d'arbres fruitiers [de vignes] ou d'arbustes fruitiers : cultures pures ou mélange d'espèces fruitières, arbres fruitiers en association avec des surfaces toujours en herbe »                                                                                            | 0,50 [0,32 : 0,68]      |
| Alignement d'arbres | BD TOPO IGN                                                                                  | « Zone de culture de peuplier »                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,67 [0,53 : 0,81]      |
|                     | Végétation fine de la Métropole de Montpellier (arbres et arbustes, formations plus isolées) | « Éléments arborés linéaires d'une largeur maximale de 20 m, d'une surface supérieure à 500 m <sup>2</sup> et d'une hauteur supérieure à 3 m »                                                                                                                                                 | 0,45 [0,23 : 0,67]      |
|                     | OSM                                                                                          | Arbres et arbres d'alignement                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0,40 [0,14 : 0,66]      |
| Herbe et prairies   | Végétation fine de la Métropole de Montpellier (herbe)                                       | « Éléments herbacés d'une surface supérieure à 5 m <sup>2</sup> »                                                                                                                                                                                                                              | 0,41 [0,11 : 0,71]      |
|                     | Corine Land Cover (herbe et prairies)                                                        | « Herbage de faible productivité non soumis ou peu soumis à l'influence de l'homme »                                                                                                                                                                                                           | 0,48 [0,32 : 0,64]      |
|                     |                                                                                              | « Surface enherbée dense de composition floristique constituée principalement de graminées, non incluses dans un assolement [...] »                                                                                                                                                            |                         |
|                     | OSO (herbe et prairies)                                                                      | « Herbage de faible productivité non soumis ou peu soumis à l'influence de l'homme »                                                                                                                                                                                                           | 0,48 [0,24 : 0,72]      |
|                     |                                                                                              | « Surface enherbée dense de composition floristique constituée principalement de graminées, non incluses dans un assolement [...] »                                                                                                                                                            |                         |
| Zones agricoles     | OSM                                                                                          | Herbe et prairies                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,40 [0,16 : 0,64]      |
|                     | Corine Land Cover (cultures et agricultures)                                                 | « Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des zones naturelles ou semi-naturelles [...] »                                                                                                                                                                                         | 0,48 [0,38 : 0,58]      |
|                     | OSO (cultures)                                                                               | « Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des zones naturelles ou semi-naturelles [...] »                                                                                                                                                                                         | 0,43 [0,29 : 0,57]      |
| Végétation sèche    | Corine Land Cover (végétation slérophylle+landes+végétation clairsemée »)                    | « Végétation arbustive persistante. Y compris maquis, matorrals et garrigues »<br>« Formations végétales basses et fermées, composées principalement de buissons, d'arbustes et de plantes herbacées »                                                                                         | 0,56 [0,40 : 0,72]      |
|                     | OSO (landes ligneuses)                                                                       | « Végétation arbustive persistante. Y compris maquis, matorrals et garrigues »<br>« Formations végétales basses et fermées, composées principalement de buissons, d'arbustes et de plantes herbacées »                                                                                         | 0,50 [0,26 : 0,74]      |

## Annexe 2 - Résultats complémentaires pour les ÉQIS sur les espaces verts

### Bénéfices si tous les Iris d'une zone d'étude atteignent au moins le P50 du NDVI sur la zone

Si les 50 % d'Iris les moins végétalisés atteignaient la valeur médiane (P50) du NDVI dans la zone, 146 [110 : 219] décès, soit 1,8 % de la mortalité annuelle de la MEL serait évitable, 37 [27 : 55] décès (1,2 %) à 3M, et 104 [78 : 155] décès (2,4 %) à la MRN.

### Décès évitables chaque année si les Iris atteignent au moins le P50 de chaque zone

| Si tous les Iris atteignent au moins le P50 de la distribution de NDVI |                      |                        |                                    |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|
|                                                                        | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL                                                                    | 0,48                 | 146 [110 : 219]        | 1,8 [1,3 : 2,7]                    |
| 3M                                                                     | 0,38                 | 37 [27 : 55]           | 1,2 [0,9 : 1,8]                    |
| MRN                                                                    | 0,53                 | 104 [78 : 155]         | 2,4 [1,8 : 3,6]                    |

### Bénéfices si tous les Iris d'une zone d'étude atteignaient au moins le P50 du NDVI des Iris de même densité

Si les 50 % d'Iris denses les moins végétalisés atteignaient la valeur médiane (P50) du NDVI des Iris denses, 1,7 [1,3 : 2,5] % de la mortalité annuelle de la MEL serait évitable, 1,3 [1,0 : 1,9] % à 3M, et 1,6 [1,2 : 2,4] % à la MRN. Les ordres de grandeurs seraient identiques dans les Iris intermédiaires, et très faibles dans les Iris peu denses (la distribution de NDVI est moins étendue dans ces zones, et la population concernée plus faible).

### Décès évitables chaque année si les Iris atteignaient au moins le P90 des Iris de même densité

| Iris denses |                      |                        |                                    | Iris intermédiaires  |                        |                                    | Iris peu denses      |                        |                                    |
|-------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|
|             | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL         | 0,46                 | 112 [84 : 168]         | 1,7 [1,3 : 2,5]                    | 0,59                 | 25 [18 : 37]           | 1,7 [1,3 : 2,6]                    | 0,60                 | 1 [0 : 1]              | 0,3 [0,2 : 0,4]                    |
| 3M          | 0,37                 | 27 [20 : 41]           | 1,3 [1,0 : 1,9]                    | 0,42                 | 10 [7 : 14]            | 1,2 [0,9 : 1,8]                    | 0,50                 | 1 [0 : 1]              | 0,6 [0,5 : 0,9]                    |
| MRN         | 0,46                 | 47 [35 : 70]           | 1,6 [1,2 : 2,4]                    | 0,56                 | 18 [13 : 26]           | 1,8 [1,4 : 2,7]                    | 0,67                 | 5 [3 : 7]              | 1,1 [0,8 : 1,6]                    |

### Bénéfices si tous les Iris d'une zone d'étude atteignaient au moins le P50 ou le P90 du NDVI des Iris les plus favorisés de même densité

Si tous les Iris denses atteignaient au moins la valeur de NDVI observée dans la moitié des Iris denses les plus favorisés socialement, la mortalité évitable chaque année serait de l'ordre de 2,3 % à la MEL, 1,8 % à 3M, et 3,4 % à la MRN. À 3M et la MRN, les bénéfices seraient plus marqués dans les Iris intermédiaires. Avec un scénario plus ambitieux d'atteinte du P90 du NDVI des Iris les plus favorisés socialement, les bénéfices seraient plus importants pour les Iris denses.

**Décès évitables chaque année si les Iris atteignaient au moins le P50 ou le P90 des Iris les plus favorisés de même densité**

| Iris denses |                      |                        |                                    | Iris intermédiaires  |                        |                                    |
|-------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|
|             | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL         | 0,49                 | 155 [1117 : 232]       | 2,3 [1,7 : 3,5]                    | 0,60                 | 28 [21 : 41]           | 2,0 [1,5 : 2,9]                    |
| 3M          | 0,39                 | 38 [28 : 57]           | 1,8 [1,3 : 2,6]                    | 0,50                 | 26 [19 : 39]           | 3,2 [2,4 : 4,8]                    |
| MRN         | 0,54                 | 100 [75 : 148]         | 3,4 [2,5 : 5,0]                    | 0,71                 | 58 [44 : 86]           | 5,9 [4,5 : 8,8]                    |
| P90         |                      |                        |                                    |                      |                        |                                    |
| Iris denses |                      |                        |                                    | Iris intermédiaires  |                        |                                    |
|             | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL         | 0,61                 | 418 [315 : 620]        | 6,2 [4,7 : 9,3]                    | 0,63                 | 42 [63 : 63]           | 3,0 [2,2 : 4,4]                    |
| 3M          | 0,49                 | 112 [84 : 166]         | 5,2 [3,4 : 6,8]                    | 0,54                 | 37 [28 : 55]           | 4,5 [3,4 : 6,8]                    |
| MRN         | 0,66                 | 208 [157 : 307]        | 7,0 [5,3 : 10,4]                   | 0,79                 | 84 [64 : 124]          | 8,6 [6,5 : 12,7]                   |

**Bénéfices si tous les Iris atteignent une valeur cible de NDVI associée au respect de la recommandation de l'OMS**

Si tous les Iris atteignaient au moins la valeur de NDVI observée dans les ¾ des Iris (P75) où plus de 90 % de la population réside à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 ha, la mortalité évitable chaque année serait de l'ordre de 3,5 % à la MEL, 2,9 % à 3M, et 6,2 % à la MRN.

**Décès évitables chaque année si les Iris atteignaient au moins le P75 de NDVI observé dans les Iris où plus de 90 % de la population résident à moins de 300 m d'un espace vert urbain de plus de 0,5 hectare**

| Tous les Iris |                      |                        |                                    | Iris denses          |                        |                                    |
|---------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|
|               | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) | Valeur cible de NDVI | Décès évités [IC 95 %] | Fraction de mortalité évitable (%) |
| MEL           | 0,55                 | 288 [217 : 429]        | 3,5 [2,6 : 5,2]                    | 0,53                 | 229 [172 : 341]        | 3,4 [2,6 : 5,1]                    |
| 3M            | 0,44                 | 86 [65 : 129]          | 2,9 [2,1 : 4,3]                    | 0,40                 | 44 [33 : 66]           | 2,1 [1,5 : 3,1]                    |
| MRN           | 0,67                 | 268 [203 : 397]        | 6,2 [4,7 : 9,1]                    | 0,63                 | 177 [134 : 262]        | 6,0 [4,5 : 8,9]                    |

## Annexe 3 - Détail par bassin des EMD des bénéfices liés à une augmentation des parts modales de la marche ou du vélo

**Mortalité évitée si la part modale de la marche pour les 30 ans et plus atteignait 90 % sur les trajets de moins de 1 km, détail par bassin – MEL**

| Bassin                 | Part modale actuelle de la marche (%) | Nombre actuel de déplacement à pied (en moyenne) | Nombre de déplacements à pied sous le scénario | Temps additionnel moyen de marche par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Couronne Nord          | 73                                    | 3,5                                              | 4,5                                            | 6                                                | 24 [6 :42]             | 2,2                                |
| Couronne Sud           | 76                                    | 4,8                                              | 5,4                                            | 7                                                | 21 [5 :35]             | 2,5                                |
| Territoire Est         | 79                                    | 4,8                                              | 5,4                                            | 5                                                | 11 [3 :19]             | 1,7                                |
| Territoire Lillois     | 87                                    | 5,4                                              | 5,4                                            | 1                                                | 7 [2 :11]              | 0,5                                |
| Territoire Roubaisien  | 73                                    | 3,5                                              | 4,5                                            | 7                                                | 42 [10 : 71]           | 2,4                                |
| Territoire Tourquenais | 74                                    | 3,5                                              | 4,5                                            | 7                                                | 29 [7 :49]             | 2,4                                |
| Vallée de la Lys       | 76                                    | 4,8                                              | 5,4                                            | 7                                                | 17 [4 :29]             | 2,3                                |
| Weppes                 | 64                                    | 3,6                                              | 5,4                                            | 12                                               | 22 [5 :38]             | 4,0                                |

**Mortalité évitée si la part modale de la marche pour les 30 ans et plus atteignait 90 % sur les trajets de moins de 1 km, détail par bassin – 3M**

| Bassin                | Part modale actuelle de la marche (%) | Nombre actuel de déplacement à pied (en moyenne) | Nombre de déplacements à pied sous le scénario | Temps additionnel moyen de marche par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Cadoule et Béranger   | 55                                    | 3,3                                              | 5,4                                            | 13                                               | 10 [2 :18]             | 4,5                                |
| Littoral              | 63                                    | 3,2                                              | 4,5                                            | 10                                               | 10 [2 :17]             | 3,5                                |
| Montpellier           | 83                                    | 5,0                                              | 5,4                                            | 3                                                | 18 [4 :31]             | 1,1                                |
| Piémonts et Garrigues | 45                                    | 2,7                                              | 5,4                                            | 23                                               | 14 [3 :25]             | 7,6                                |
| Plaine Ouest          | 67                                    | 4,7                                              | 6,3                                            | 11                                               | 10 [2 :18]             | 3,7                                |
| Vallée du Lez         | 49                                    | 2,9                                              | 5,4                                            | 17                                               | 21 [5 :35]             | 5,8                                |

**Mortalité évitée si la part modale de la marche pour les 30 ans et plus atteignait 90 % sur les trajets de moins de 1 km, détail par bassin – MRN**

| Bassin                 | Part modale actuelle de la marche (%) | Nombre actuel de déplacement à pied (en moyenne) | Nombre de déplacements à pied sous le scénario | Temps additionnel moyen de marche par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Austreberthe           | 72                                    | 4,2                                              | 5,4                                            | 8                                                | 5 [1 :9]               | 2,6                                |
| Boucle RD Elbeuf       | 36                                    | 2                                                | 4,5                                            | 22                                               | 14 [3 :23]             | 7,5                                |
| Elbeuf Rive Gauche     | 71                                    | 4,2                                              | 5,4                                            | 8                                                | 12 [3 :20]             | 2,9                                |
| Plateaux Est - Aubette | 59                                    | 3,6                                              | 5,4                                            | 14                                               | 21 [5 :37]             | 4,6                                |
| Plateaux Nord - Cailly | 71                                    | 4,2                                              | 5,4                                            | 9                                                | 30 [7 :51]             | 3,0                                |
| Rive Gauche Sud-Est    | 63                                    | 3                                                | 4,5                                            | 10                                               | 12 [3 :21]             | 3,5                                |
| Rive Gauche Sud-Ouest  | 74                                    | 3,5                                              | 4,5                                            | 7                                                | 9 [2 :15]              | 2,3                                |
| Rouen                  | 82                                    | 4                                                | 4,5                                            | 3                                                | 9 [2 :15]              | 1,0                                |
| Sotteville - Petit-Q   | 82                                    | 4                                                | 4,5                                            | 3                                                | 6 [1 :10]              | 1,1                                |

**Mortalité évitée si la part modale du vélo pour les 30 ans et plus atteignait 12 % sur les trajets de 3 à 5 km – détail par bassin, MEL**

| Bassin                 | Part modale actuelle du vélo | Nombre actuel de déplacement à vélo (en moyenne) | Nombre de déplacements à vélo sous le scénario (en moyenne) | Temps additionnel moyen de vélo par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Couronne Nord          | 0,02                         | 0,12                                             | 0,72                                                        | 8                                              | 50 [12 : 85]           | 4,4                                |
| Couronne Sud           | 0,01                         | 0,04                                             | 0,48                                                        | 8                                              | 40 [9 : 68]            | 4,8                                |
| Territoire Est         | 0,04                         | 0,24                                             | 0,72                                                        | 6                                              | 24 [6 : 40]            | 3,7                                |
| Territoire Lillois     | 0,07                         | 0,35                                             | 0,6                                                         | 5                                              | 37 [9 : 64]            | 2,6                                |
| Territoire Roubaisien  | 0,01                         | 0,05                                             | 0,6                                                         | 9                                              | 94 [22 : 161]          | 5,4                                |
| Territoire Tourquenois | 0,01                         | 0,05                                             | 0,6                                                         | 11                                             | 74 [18 : 127]          | 6,3                                |
| Vallée de la Lys       | 0,01                         | 0,06                                             | 0,72                                                        | 10                                             | 41 [10 : 70]           | 5,5                                |
| Weppes                 | 0,03                         | 0,12                                             | 0,48                                                        | 6                                              | 18 [4 : 31]            | 3,2                                |

**Mortalité évitée si la part modale du vélo pour les 30 ans et plus atteignait 12 % sur les trajets de 3 à 5 km – détail par bassin, 3M**

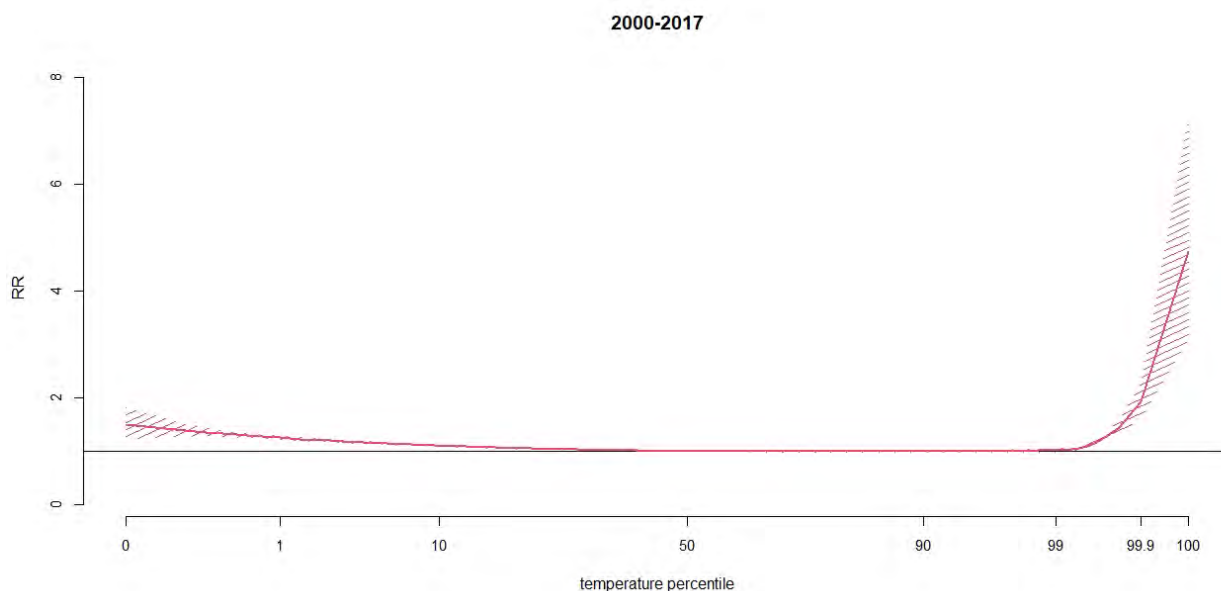
| Bassin                | Part modale actuelle du vélo | Nombre actuel de déplacement à vélo (en moyenne) | Nombre de déplacements à vélo sous le scénario (en moyenne) | Temps additionnel moyen de vélo par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|-----------------------|------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Cadoules et Béranger  | 0                            | 0                                                | 0,7                                                         | 17                                             | 22 [5 : 38]            | 9,5                                |
| Littoral              | 0                            | 0                                                | 0,7                                                         | 15                                             | 23 [5 : 39]            | 8,4                                |
| Montpellier           | 0,05                         | 0,2                                              | 0,5                                                         | 7                                              | 67 [16 : 114]          | 3,9                                |
| Piémonts et Garrigues | 0                            | 0                                                | 0,5                                                         | 12                                             | 13 [3 : 22]            | 6,7                                |
| Plaine Ouest          | 0                            | 0                                                | 1,1                                                         | 24                                             | 38 [9 : 65]            | 13,6                               |
| Vallée du Lez         | 0,02                         | 0                                                | 0,6                                                         | 9                                              | 19 [4 : 32]            | 5,3                                |

**Mortalité évitée si la part modale du vélo pour les 30 ans et plus atteignait 12 % sur les trajets de 3 à 5 km – détail par bassin, MRN**

| Bassin                 | Part modale actuelle du vélo | Nombre actuel de déplacement à vélo (en moyenne) | Nombre de déplacements à vélo sous le scénario (en moyenne) | Temps additionnel moyen de vélo par jour (min) | Décès évités (IC 95 %) | Fraction de mortalité évitable (%) |
|------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Austreberthe           | 0                            | 0                                                | 0,8                                                         | 17                                             | 19 [5 : 33]            | 9,5                                |
| Boucle RD Elbeuf       | 0                            | 0                                                | 0,5                                                         | 10                                             | 11 [3 : 19]            | 6,0                                |
| Elbeuf Rive Gauche     | 0,01                         | 0,04                                             | 0,5                                                         | 10                                             | 24 [6 : 41]            | 5,8                                |
| Plateaux Est – Aubette | 0                            | 0                                                | 0,5                                                         | 11                                             | 29 [7 : 49]            | 6,1                                |
| Plateaux Nord – Cailly | 0                            | 0                                                | 0,6                                                         | 12                                             | 69 [16 : 118]          | 7,0                                |
| Rive Gauche Sud-Est    | 0,01                         | 0,05                                             | 0,6                                                         | 11                                             | 23 [5 : 39]            | 6,5                                |
| Rive Gauche Sud-Ouest  | 0                            | 0                                                | 0,6                                                         | 12                                             | 27 [6 : 46]            | 7,1                                |
| Rouen                  | 0,05                         | 0,2                                              | 0,5                                                         | 5                                              | 25 [6 : 43]            | 3,1                                |
| Sotteville - Petit-Q   | 0,02                         | 0,08                                             | 0,5                                                         | 9                                              | 28 [7 : 47]            | 5,2                                |

## Annexe 4 - Relations température – mortalité utilisée pour l'ÉQIS

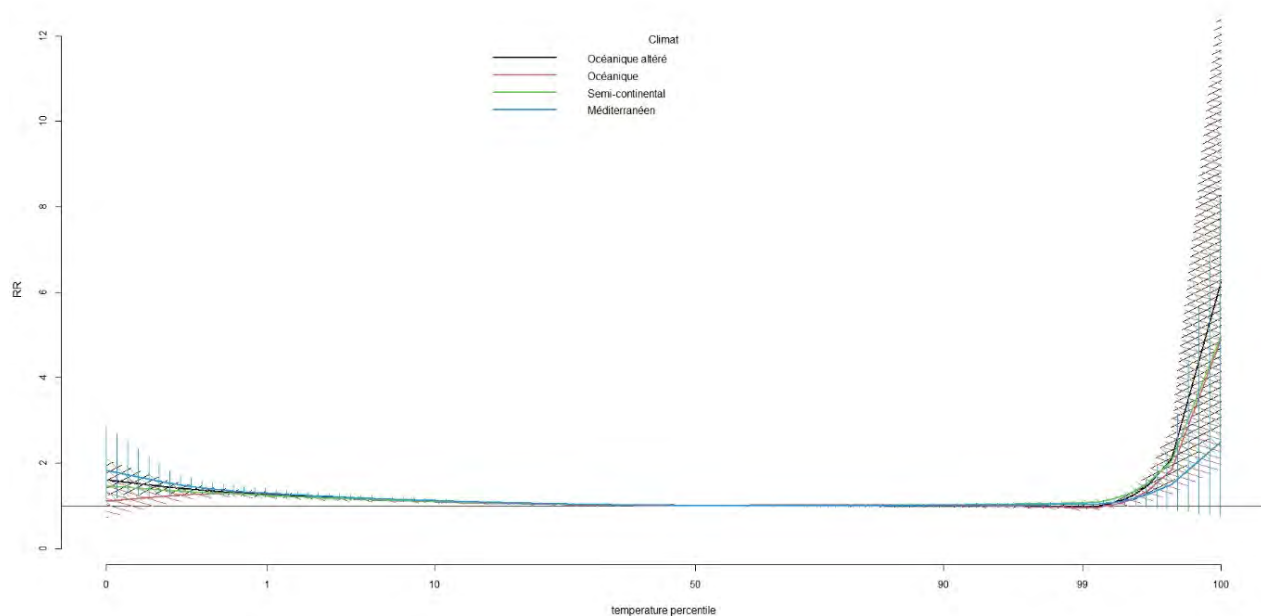
Les relations température-mortalité ont été construites pour les 20 villes du programme de surveillance climat, air et santé, pour la période 2000-2017. Une forme classique est retrouvée, avec une augmentation forte du risque de décès pour des températures dépassant les percentiles 99 de la distribution 2000-2017 des températures.



Les RR combinés cumulés sur 0-3 jours et 0-10 jours pour différents percentiles haut et bas sont détaillés ci-dessous

| Percentiles  | Température (°C) | RR 0-3 jours       | RR 0-10 jours      |
|--------------|------------------|--------------------|--------------------|
| P0.1 vs P50  | -5.06 vs 12.74   | 1.07 [1.03 : 1.11] | 1.18 [1.12 : 1.25] |
| P1 vs P50    | -1.73 vs 12.74   | 1.01 [1.00 : 1.02] | 1.11 [1.09 : 1.13] |
| P2.5 vs P50  | 0.07 vs 12.74    | 1.00 [1.00 : 1.01] | 1.09 [1.08 : 1.11] |
| P10 vs P50   | 3.92 vs 12.74    | 1.00 [1.00 : 1.00] | 1.06 [1.05 : 1.07] |
| P90 vs P50   | 21.11 vs 12.74   | 1.06 [1.05 : 1.07] | 1.01 [0.99 : 1.02] |
| P97.5 vs P50 | 24.26 vs 12.74   | 1.12 [1.11 : 1.14] | 1.04 [1.02 : 1.06] |
| P99 vs P50   | 25.81 vs 12.74   | 1.14 [1.15 : 1.19] | 1.06 [1.4 : 1.09]  |
| P99.5 vs P50 | 26.88 vs 12.74   | 1.25 [1.22 : 1.28] | 1.16 [1.13 : 1.19] |
| P99.9 vs P50 | 28.83 vs 12.74   | 1.76 [1.60 : 1.93] | 1.96 [1.70 : 2.26] |

Les RR ont également été calculés par type de climat ; pour de futures ÉQIS, il est ainsi possible d'utiliser sous le RR global, soit le RR du climat équivalent de la zone considérée. On note cependant peu de différence entre les RR par climat.

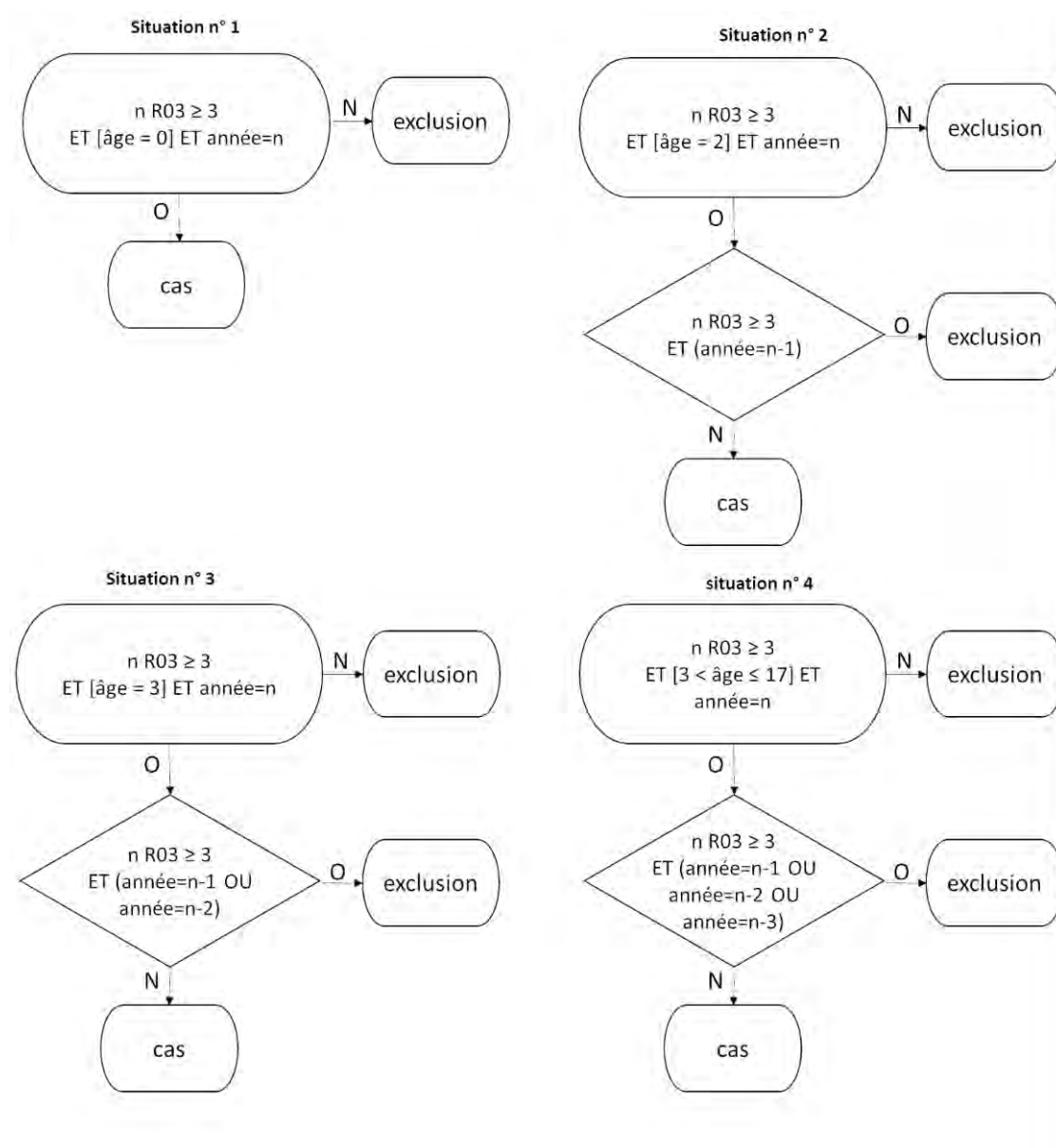


## Annexe 5 – Liste des Unités médicales incluses pour sélectionner les hospitalisations non programmées

Un séjour non programmé est un séjour en provenance des urgences (mode entrée 8 - provenance 5) et/ou dont la 1<sup>re</sup> unité médicale (UM) appartient à la liste suivante :

| Code UM | Classification de l'UM fonctionnelle                                                             | Hospitalisations cardiovasculaires | Hospitalisations respiratoires |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 01A     | Réanimation adulte hors grands brûlés                                                            | Oui                                | Oui                            |
| 01B     | Réanimation adulte grands brûlés                                                                 | Oui                                | Oui                            |
| 02A     | Soins intensifs en cardiologie =USIC                                                             | Oui                                | Oui                            |
| 02B     | Autres soins intensifs (hors UNV,USIC, néonatalogie)                                             | Oui                                | Oui                            |
| 03A     | Soins surveillance continue adulte hors grands brûlés                                            | Oui                                | Oui                            |
| 03B     | Soins surveillance continue adulte grands brûlés                                                 | Oui                                | Oui                            |
| 04      | Néonatalogie sans SI                                                                             | Oui                                | Oui                            |
| 05      | Soins intensifs en néonatalogie                                                                  | Oui                                | Oui                            |
| 06      | Réanimation néonatale                                                                            | Oui                                | Oui                            |
| 07A     | UHCD structures des urgences générales                                                           | Oui                                | Oui                            |
| 07B     | UHCD structures des urgences pédiatriques                                                        | Oui                                | Oui                            |
| 13A     | Réanimation pédiatrique hors grands brûlés                                                       | Oui                                | Oui                            |
| 13B     | Réanimation pédiatrique grands brûlés                                                            | Oui                                | Oui                            |
| 14A     | Soins surveillance continue pédiatrique hors grands brûlés                                       | Oui                                | Oui                            |
| 14B     | Soins surveillance continue pédiatrique grands brûlés                                            | Oui                                | Oui                            |
| 17      | UNV hors SI                                                                                      | Oui                                | Non                            |
| 18      | Soins intensifs en UNV                                                                           | Oui                                | Oui                            |
| 50      | Chirurgie cardiaque                                                                              | Oui                                | Non                            |
| 51      | Neurochirurgie                                                                                   | Oui                                | Non                            |
| 53      | Autre chirurgie adulte (ou chirurgie indifférenciée adulte)                                      | Oui                                | Non                            |
| 27      | Médecine gériatrique                                                                             | Oui                                | Oui                            |
| 28      | Médecine pédiatrique (hors unité d'oncologie médicale, spécialisée ou non)                       | Non                                | Oui                            |
| 29      | Autres spécialités médicales adultes (non classées ailleurs) ou unité de médecine indifférenciée | Oui                                | Oui                            |

## Annexe 6 - Logigramme pour la sélection des cas incidents d'asthme à partir de la délivrance de médicaments issue du SNDS



R03 : remboursement de « médicaments pour syndromes obstructifs des voies aériennes » (voir liste parmi classe thérapeutique ci-dessous).

## Annexe 7 - Résultats complémentaires des scénarios de réduction de la pollution de l'air

### Bénéfices sur les hospitalisations respiratoires et cardiovasculaires si les concentrations journalières d'O<sub>3</sub> ne dépassaient pas 100 µg/m<sup>3</sup> ou 120 µg/m<sup>3</sup> (court terme)

Si les concentrations journalières d'O<sub>3</sub> ne dépassaient jamais 100 µg/m<sup>3</sup>, moins de 0,5 % des hospitalisations pour causes respiratoires seraient évitées chaque année dans les métropoles (et moins de 0,1 % si les concentrations ne dépassaient jamais 120 µg/m<sup>3</sup>) (Tableau 52).

### Bénéfices pour les hospitalisations respiratoires (effets à court terme) si les concentrations journalières d'O<sub>3</sub> ne dépassaient pas 100 µg/m<sup>3</sup> ou 120 µg/m<sup>3</sup>

|     | 100 µg/m <sup>3</sup>                       |                           |                       | 120 µg/m <sup>3</sup>                       |                           |                       |
|-----|---------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
|     | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Nombre évitable [IC 95 %] | Fraction évitable (%) | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Nombre évitable [IC 95 %] | Fraction évitable (%) |
| MEL | 36                                          | 20 [8 : 33]               | 0,2 [0,1 : 0,3]       | 19                                          | 8 [3 : 13]                | 0,07[0,03 : 0,1]      |
| 3M  | 91                                          | 8 [3 : 13]                | 0,3 [0,1 : 0,4]       | 24                                          | 2 [1 : 3]                 | 0,05 [0,02 : 0,1]     |
| MRN | 32                                          | 6 [3 : 10]                | 0,1 [0,1 : 0,2]       | 15                                          | 2 [1 : 3]                 | 0,04 [0,02 : 0,1]     |

### Bénéfices sur la mortalité et les hospitalisations si les concentrations journalières de NO<sub>2</sub> ne dépassaient pas 20 ou 25 µg/m<sup>3</sup> (court terme)

Si les concentrations journalières de NO<sub>2</sub> ne dépassaient pas la valeur cible de 20 µg/m<sup>3</sup>, 0,6 % de la mortalité non accidentelle serait évitée à la MEL, 0,4 % à 3M et 0,3 % à la MRN. Ceci permettrait également d'éviter 1,5 % des hospitalisations pour causes respiratoires à la MEL, 1 % à 3M et 0,7 % à la MRN. Les bénéfices seraient environ 1,5 à 3 fois plus faibles en se limitant à la valeur de 25 µg/m<sup>3</sup>.

### Bénéfices pour la mortalité (effets à court terme) si les concentrations journalières de NO<sub>2</sub> ne dépassaient pas 20 ou 25 µg/m<sup>3</sup>

|     | 20 µg/m <sup>3</sup>                        |                          |                                       | 25 µg/m <sup>3</sup>                        |                          |                                       |
|-----|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
|     | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Décès évitable [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Décès évitable [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) |
| MEL | 228                                         | 48 [26 : 71]             | 0,6 [0,3 : 0,9]                       | 170                                         | 32 [17 : 47]             | 0,4 [0,2 : 0,6]                       |
| 3M  | 201                                         | 12 [6 : 18]              | 0,4 [0,2 : 0,6]                       | 135                                         | 7 [4 : 10]               | 0,2 [0,1 : 0,4]                       |
| MRN | 156                                         | 13 [7 : 19]              | 0,3 [0,2 : 0,5]                       | 102                                         | 7 [4 : 11]               | 0,2 [0,1 : 0,3]                       |

### Bénéfices pour les hospitalisations respiratoires (effets à court terme) si les concentrations journalières de NO<sub>2</sub> ne dépassaient pas 20 ou 25 µg/m<sup>3</sup>

|     | 20 µg/m <sup>3</sup>                        |                           |                       | 25 µg/m <sup>3</sup>                        |                           |                       |
|-----|---------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
|     | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Nombre évitable [IC 95 %] | Fraction évitable (%) | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Nombre évitable [IC 95 %] | Fraction évitable (%) |
| MEL | 228                                         | 164 [105 : 223]           | 1,5 [0,9 : 2,0]       | 170                                         | 108 [69 : 147]            | 1,0 [0,6 : 1,3]       |
| 3M  | 201                                         | 30 [19 : 40]              | 1,0 [0,6 : 1,4]       | 135                                         | 17 [11 : 24]              | 0,6 [0,4 : 0,8]       |
| MRN | 156                                         | 37 [23 : 50]              | 0,7 [0,5 : 1,0]       | 102                                         | 21 [13 : 29]              | 0,4 [0,3 : 0,6]       |

## Bénéfices sur la mortalité et les hospitalisations si les concentrations journalières de PM<sub>2,5</sub> ne dépassaient pas 10 ou 15 µg/m<sup>3</sup> (court terme)

Si les concentrations journalières de PM<sub>2,5</sub> ne dépassaient pas 10 µg/m<sup>3</sup>, 0,4 % de la mortalité non accidentelle serait évitée à la MEL, 0,1 % à 3M et 0,2 % à la MRN. Ceci permettrait également d'éviter 0,5 % des hospitalisations pour causes cardiovasculaires à la MEL, 0,2 % à 3M et 0,3 % à la MRN. Les bénéfices seraient environ deux fois plus faibles en se limitant à 15 µg/m<sup>3</sup>.

### Bénéfices pour la mortalité (effets à court terme) si les concentrations journalières de PM<sub>2,5</sub> ne dépassaient pas 10 ou 15 µg/m<sup>3</sup>

|     | 10 µg/m <sup>3</sup>                        |                          |                                       | 15 µg/m <sup>3</sup>                        |                          |                                       |
|-----|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
|     | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Décès évitable [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Décès évitable [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) |
| MEL | 206                                         | 30 [12 : 47]             | 0,4 [0,2 : 0,6]                       | 120                                         | 18 [7 : 29]              | 0,2 [0,1 : 0,4]                       |
| 3M  | 133                                         | 4 [2 : 7]                | 0,1 [0,06 : 0,1]                      | 53                                          | 2 [1 : 3]                | 0,05 [0,02 : 0,1]                     |
| MRN | 130                                         | 9 [4 : 14]               | 0,2 [0,1 : 0,3]                       | 75                                          | 5 [2 : 8]                | 0,1 [0,05 : 0,2]                      |

### Bénéfices pour les hospitalisations cardiovasculaires (effets à court terme) si les concentrations journalières de PM<sub>2,5</sub> ne dépassaient pas 10 ou 15 µg/m<sup>3</sup>

|     | 10 µg/m <sup>3</sup>                        |                           |                       | 15 µg/m <sup>3</sup>                        |                           |                       |
|-----|---------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
|     | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Nombre évitable [IC 95 %] | Fraction évitable (%) | Nombre de jours concernés en moyenne par an | Nombre évitable [IC 95 %] | Fraction évitable (%) |
| MEL | 206                                         | 80 [15 : 145]             | 0,5 [0,1 : 1,0]       | 120                                         | 48 [9 : 88]               | 0,3 [0,1 : 0,6]       |
| 3M  | 133                                         | 14 [3 : 25]               | 0,2 [0,04 : 0,4]      | 53                                          | 5 [1 : 10]                | 0,1 [0,01 : 0,1]      |
| MRN | 130                                         | 31 [6 : 56]               | 0,3 [0,1 : 0,6]       | 75                                          | 17 [3 : 32]               | 0,2 [0,03 : 0,3]      |

## Bénéfices du respect de 10 µg/m<sup>3</sup> pour les PM<sub>2,5</sub> (long terme)

Le respect de 10 µg/m<sup>3</sup> pour les concentrations en PM<sub>2,5</sub> permettrait, via la réduction des effets à long terme de la pollution, de diminuer la mortalité annuelle de 5,3 % à la MEL, 2,0 % à la 3M et 0,4 % à la MRN. Cela permettrait également de diminuer de 3,2 % l'incidence des cancers du poumon à la MEL, 1,2 % à 3M et 0,2 % à la MRN, et de 4,7 % l'incidence des AVC annuelle à la MEL, de 1,7 % à la 3M et de 0,3 % à la MRN.

### Bénéfices pour la mortalité (effets à long terme), l'incidence des cancers du poumon et l'incidence des AVC si les concentrations annuelles de PM<sub>2,5</sub> ne dépassaient pas 10 µg/m<sup>3</sup>

|      | Mortalité                 |                                       | Cancer du poumon            |                       | AVC                         |                       |
|------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
|      | Décès évitables [IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Nombres évitables [IC 95 %] | Fraction évitable (%) | Nombres évitables [IC 95 %] | Fraction évitable (%) |
| MEL* | 441 [157 : 693]           | 5,3 [1,9 : 8,4]                       | 14 [7 : 22]                 | 3,2 [1,5 : 4,9]       | 72 [23 : 120]               | 4,7 [1,5 : 7,8]       |
| 3M** | 61 [21 : 96]              | 2,0 [0,7 : 3,1]                       | 4 [2 : 6]                   | 1,2 [0,5 : 1,8]       | 10 [3 : 16]                 | 1,7 [0,5 : 2,8]       |
| MRN  | 21 [8 : 34]               | 0,4 [0,1 : 0,6]                       | 0,3 [0,1 : 0,4]             | 0,2 [0,1 : 0,3]       | 3 [1 : 5]                   | 0,3 [0,1 : 0,5]       |

\* pour le cancer du poumon, données du registre des cancers de Lille qui couvrent 64 communes de la zone.

\*\* pour le cancer du poumon, données du registre des cancers de l'Hérault.

## Bénéfices du respect de la valeur guide de l'OMS de 20 µg/m<sup>3</sup> pour les NO<sub>2</sub>

Respecter 20 µg/m<sup>3</sup> permettrait de diminuer chaque année de l'ordre de 0,4 % la mortalité annuelle chez les 30 ans et plus à la MEL, 0,2 % à 3M et 0,1 % à la MRN, et d'éviter 2,0 % des cas incidents d'asthme chez l'enfant à la MEL, 1,6 % à 3M, et 0,6 % à la MRN.

**Bénéfices pour la mortalité (effets à long terme) et l'asthme chez l'enfant si les concentrations annuelles de NO<sub>2</sub> ne dépassaient pas 20 µg/m<sup>3</sup>**

|     | Mortalité                    |                                       | Asthme chez l'enfant           |                       |
|-----|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
|     | Décès évitables<br>[IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Nombres évitables<br>[IC 95 %] | Fraction évitable (%) |
| MEL | 30 [11 : 48]                 | 0,4 [0,2 : 0,6]                       | 80 [32 : 107]                  | 2,0 [0,8 : 2,7]       |
| 3M  | 9 [3 : 14]                   | 0,2 [0,1 : 0,34]                      | 33 [13 : 44]                   | 1,6 [0,6 : 2,1]       |
| MRN | 4 [2 : 7]                    | 0,1 [0 : 0,2]                         | 15 [6 : 20]                    | 0,6 [0,3 : 0,8]       |

**Bénéfices du respect des concentrations observées dans la moitié des communes les moins polluées de chaque zone**

Tant pour les PM<sub>2,5</sub> que pour le NO<sub>2</sub>, moins de 1 % de la mortalité serait évité dans toutes les zones si aucune commune ne dépassait les concentrations des 50 % de communes les moins polluées de chaque zone.

**Bénéfices pour la mortalité (effets à long terme) si les concentrations annuelles de PM<sub>2,5</sub> ne dépassaient pas le percentile 50 des communes de même densité**

|     | Denses       |                              |                                       | Intermédiaires |                              |                                       | Peu denses   |                              |                                       |
|-----|--------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------|------------------------------|---------------------------------------|
|     | Valeur cible | Décès évitables<br>[IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Valeur cible   | Décès évitables<br>[IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Valeur cible | Décès évitables<br>[IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) |
| MEL | 14,0         | 2 [1 : 4]                    | 0                                     | 13,9           | 3 [1 : 4]                    | 0,2                                   | 14,0         | <1                           | 0,2                                   |
| 3M  | 11,1         | 23 [8 : 37]                  | 1,1                                   | 10,2           | 4 [1 : 6]                    | 0,5                                   | 9,4          | <1                           | 0,2                                   |
| MRN | 10,2         | 13 [5 : 21]                  | 0,5                                   | 9,8            | 2 [1 : 4]                    | 0,2                                   | 9,4          | <1                           | 0,1                                   |

**Bénéfices pour la mortalité (effets à long terme) si les concentrations annuelles de NO<sub>2</sub> ne dépassaient pas le percentile 50 des communes de même densité**

|     | Denses       |                              |                                       | Intermédiaires |                              |                                       | Peu denses   |                              |                                       |
|-----|--------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------|------------------------------|---------------------------------------|
|     | Valeur cible | Décès évitables<br>[IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Valeur cible   | Décès évitables<br>[IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) | Valeur cible | Décès évitables<br>[IC 95 %] | Fraction de la mortalité évitable (%) |
| MEL | 20,9         | 6 [2 : 9]                    | 0,1                                   | 20,6           | 4 [1 : 6]                    | 0,3%                                  | 21,0         | 1 [0 : 1]                    | 0,5%                                  |
| 3M  | 16,9         | 22 [8 : 34]                  | 1,0                                   | 10,5           | 4 [1 : 6]                    | 0,5%                                  | 7,5          | <1                           | 0,1%                                  |
| MRN | 16,6         | 14 [5 : 23]                  | 0,5                                   | 12,8           | 2 [1 : 4]                    | 0,2%                                  | 10,7         | <1                           | 0,1%                                  |

# RESSOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Medina S, Ballester F, Chanel O, Declercq C, Pascal M. Quantifying the health impacts of outdoor air pollution: Useful estimations for public health action. *Journal of Epidemiology and Community Health*. 2013;67(6):480-3.
2. Pascal M, Ung A, Lefranc A, Declercq C. L'évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique, un outil au service des politiques publiques : bilan des pratiques et perspectives de développement. Principales conclusions et pistes de travail issues de la première journée d'échanges Aasqa-Cire organisée par l'InVS le 4 octobre 2011. Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire; 2012.
3. Blanchard M, Host S, Medina S. Pollution atmosphérique. Guide pour la réalisation d'une évaluation quantitative des impacts sur la santé (ÉQIS). ÉQIS d'une intervention. Saint-Maurice: Santé publique France; 2019.
4. Corso M, Lagarrigue R, Medina S. Pollution atmosphérique. Guide pour la réalisation d'une évaluation quantitative des impacts sur la santé (ÉQIS). ÉQIS avec une exposition mesurée. Saint-Maurice: Santé publique France; 2019.
5. Pascal M, Yvon J-M, Medina S. Pollution atmosphérique. Guide pour la réalisation d'une évaluation quantitative des impacts sur la santé (ÉQIS). ÉQIS avec une exposition modélisée. Saint-Maurice: Santé publique France; 2019.
6. Nieuwenhuijsen MJ. Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities; A review of the current evidence. *Environment International*. 2020;140.
7. OMS. Outil d'évaluation économique des effets sanitaires (HEAT) liés à la pratique du vélo et de la marche : Méthodologie et guide de l'utilisateur sur l'évaluation de l'activité physique, de la pollution atmosphérique, des traumatismes et de l'impact carbone. 2018.
8. IGN I. Contours Iris (R) 2022 [Available from: <https://geoservices.ign.fr/contoursiris>].
9. Drevet J. Fourniture de données de population spatialisées selon la méthodologie nationale (méthodologie Majic). LCSQA; 2016.
10. Gorza M, Eilstein D. Outils élaborés dans le cadre du programme « Inégalités sociales de santé », 2013-2015 : Fiches « Variables socioéconomiques », fiches « Indices de désavantage social », éléments de compréhension de la notion de vulnérabilité en santé publique. Saint-Maurice: Santé publique France; 2018.
11. Rey G, Rican S, Jouglé E. Mesure des inégalités de mortalité par cause de décès. Approche écologique à l'aide d'un indice de désavantage social. *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*. 2011;8-9:87-90.
12. Rey G, Jouglé E, Fouillet A, Hémon D. Ecological association between a deprivation index and mortality in France over the period 1997 - 2001: Variations with spatial scale, degree of urbanicity, age, gender and cause of death. *BMC Public Health*. 2009;9.
13. Pearce N, Vandenbroucke JP, Lawlor DA. Causal Inference in Environmental Epidemiology: Old and New Approaches. *Epidemiology*. 2019;30(3):311-6.
14. Hill AB. The Environment and Disease: Association or Causation? *Journal of the Royal Society of Medicine*. 1965;58(5):295-300.
15. Pascal M, Wagner V, Corso M, Laaidi K, Ung A, Beaudeau P. Heat and cold related-mortality in 18 French cities. *Environment International*. 2018;121:189-98.
16. Nieuwenhuijsen MJ. New urban models for more sustainable, liveable and healthier cities post covid19; reducing air pollution, noise and heat island effects and increasing green space and physical activity. *Environ Int*. 2021;157:106850.

17. Knight T, Price S, Bowler D, Hookway A, King S, Konno K, *et al.* How effective is 'greening' of urban areas in reducing human exposure to ground-level ozone concentrations, UV exposure and the 'urban heat island effect'? An updated systematic review. *Environmental Evidence*. 2021;10(1).
18. Markevych I, Schoierer J, Hartig T, Chudnovsky A, Hystad P, Dzhambov AM, *et al.* Exploring pathways linking greenspace to health: Theoretical and methodological guidance. *Environmental research*. 2017;158:301-17.
19. García de Jalón S, Chiabai A, Quiroga S, Suárez C, Martínez P, Taylor T. The Potential of Green Areas Exposure on Increasing People's Physical Activity. *Environmental Science and Engineering* 2021. p. 2391-4.
20. Shuvo FK, Mazumdar S, Labib SM. Walkability and greenness do not walk together: Investigating associations between greenness and walkability in a large metropolitan city context. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(9).
21. Al Ahad MA, Sullivan F, Demšar U, Melhem M, Kulu H. The effect of air-pollution and weather exposure on mortality and hospital admission and implications for further research: A systematic scoping review. *PLoS ONE*. 2020;15(10 October).
22. Son JY, Liu JC, Bell ML. Temperature-related mortality: A systematic review and investigation of effect modifiers. *Environmental Research Letters*. 2019;14(7).
23. Anenberg SC, Haines S, Wang E, Nassikas N, Kinney PL. Synergistic health effects of air pollution, temperature, and pollen exposure: a systematic review of epidemiological evidence. *Environmental Health: A Global Access Science Source*. 2020;19(1).
24. Münzel T, Hahad O, Daiber A. Running in polluted air is a two-edged sword - Physical exercise in low air pollution areas is cardioprotective but detrimental for the heart in high air pollution areas. *European Heart Journal*. 2021;42(25):2498-500.
25. Morici G, Cibella F, Cogo A, Palange P, Bonsignore MR. Respiratory Effects of Exposure to Traffic-Related Air Pollutants During Exercise. *Frontiers in Public Health*. 2020;8.
26. Giles LV, Koehle MS, Saelens BE, Sbihi H, Carlsten C. When physical activity meets the physical environment: precision health insights from the intersection. *Environmental Health and Preventive Medicine*. 2021;26(1).
27. Hahad O, Kuntic M, Frenis K, Chowdhury S, Lelieveld J, Lieb K, *et al.* Physical activity in polluted air—net benefit or harm to cardiovascular health? A comprehensive review. *Antioxidants*. 2021;10(11).
28. Grundstein AJ, Williams CA. Heat Exposure and the General Public: Health Impacts, Risk Communication, and Mitigation Measures. *Human Health and Physical Activity During Heat Exposure. SpringerBriefs in Medical Earth Sciences* 2018. p. 29-43.
29. Heo S, Bell ML. The influence of green space on the short-term effects of particulate matter on hospitalization in the U.S. for 2000–2013. *Environmental Research*. 2019;174:61-8.
30. Pascal M, Gorla S, Wagner V, Sabastia M, Guillet A, Cordeau E, *et al.* Greening is a promising but likely insufficient adaptation strategy to limit the health impacts of extreme heat. *Environment International*. 2021;151.
31. Dzhambov AM, Markevych I, Tilov B, Arabadzhiev Z, Stoyanov D, Gatseva P, *et al.* Lower Noise Annoyance Associated with GIS-Derived Greenspace: Pathways through Perceived Greenspace and Residential Noise. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(7).
32. Dzhambov AM, Markevych I, Tilov BG, Dimitrova DD. Residential greenspace might modify the effect of road traffic noise exposure on general mental health in students. *Urban Forestry and Urban Greening*. 2018;34:233-9.

33. Crosemarie P. Inégalités environnementales et sociales : identifier les urgences, créer des dynamiques. L'avis rendu par le Conseil économique, social et environnemental (CESE). Annales des Mines - Responsabilité et environnement. 2015;79(3):26-30.
34. Sandon A. Inégalités sociales de santé et promotion de la santé. 2015.
35. Levin ML. The occurrence of lung cancer in man. (0365-3056 (Print)).
36. Jackson C, Johnson R, de Nazelle A, Goel R, de Sá T, Tainio M, *et al.* A guide to value of information methods for prioritising research in health impact modelling. 2021;10(1).
37. Europe WROf. Urban Green Spaces and Health: A Review of Evidence. 2016.
38. Pascal M, Roué-Le Gall A, Lemaire N, Diallo T. Transformer les villes pour préserver la santé des générations présentes ou futures. La Santé en action. 2022(459):5-9.
39. Semeraro T, Scarano A, Buccolieri R, Santino A, Aarrevaara E. Planning of urban green spaces: An ecological perspective on human benefits. Land. 2021;10(2):1-26.
40. INSPQ. Verdir les villes pour la santé de la population. 2017.
41. INSPQ. Les espaces verts urbains et la santé. 2011.
42. Bowler DE, Buyung-Ali LM, Knight TM, Pullin AS. A systematic review of evidence for the added benefits to health of exposure to natural environments. BMC public health. 2010;10:456-.
43. Dzhambov AM, Dimitrova DD, Dimitrakova ED. Association between residential greenness and birth weight: Systematic review and meta-analysis. Urban Forestry & Urban Greening. 2014;13(4):621-9.
44. Gascon M, Triguero-Mas M, Martínez D, Dadvand P, Rojas-Rueda D, Plasència A, *et al.* Residential green spaces and mortality: A systematic review. Environment International. 2016;86:60-7.
45. Gascon M, Triguero-Mas M, Martínez D, Dadvand P, Fornes J, Plasència A, *et al.* Mental health benefits of long-term exposure to residential green and blue spaces: a systematic review. International journal of environmental research and public health. 2015;12(4):4354-79.
46. Hamer M, Chida Y. Physical activity and risk of neurodegenerative disease: a systematic review of prospective evidence. Psychol Med. 2009;39(1):3-11.
47. Islam MZ, Johnston J, Sly PD. Green space and early childhood development: a systematic review. Reviews on environmental health. 2020.
48. James P, Banay RF, Hart JE, Laden F. A Review of the Health Benefits of Greenness. Curr Epidemiol Rep. 2015;2(2):131-42.
49. Bertrand C. Pertinence et faisabilité de réaliser en France des évaluations quantitatives des impacts sur la santé des espaces verts en milieu urbain. Paris, France: Université Paris Saclay; 2020.
50. Geneshka M, Coventry P, Cruz J, Gilbody S. Relationship between green and blue spaces with mental and physical health: A systematic review of longitudinal observational studies. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021;18(17).
51. Castro A, Gaupp-Berghausen M, Dons E, Standaert A, Laeremans M, Clark A, *et al.* Physical activity of electric bicycle users compared to conventional bicycle users and non-cyclists: Insights based on health and transport data from an online survey in seven European cities. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2019;1.
52. Mitchell R, Popham F. Effect of exposure to natural environment on health inequalities: an observational population study. Lancet. 2008;372(9650):1655-60.

53. Aerts R, Honnay O, Van Nieuwenhuysse A. Biodiversity and human health: mechanisms and evidence of the positive health effects of diversity in nature and green spaces. *British medical bulletin*. 2018;127(1):5-22.
54. Browning MHEM, Rigolon A, McAnirlin O, Yoon HV. Where greenspace matters most: A systematic review of urbanicity, greenspace, and physical health. *Landscape and Urban Planning*. 2022;217.
55. Tarzia V. European Common Indicators - Towards a Local Sustainability Profile. Milan, Italie: Ambiente Italia Research Institute; 2003 [
56. Konijnendijk CC. Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: Introducing the 3-30-300 rule. (1993-0607 (Electronic)).
57. Astell-Burt T, Feng X. Association of Urban Green Space With Mental Health and General Health Among Adults in Australia. *JAMA Network Open*. 2019;2(7):e198209-e.
58. Iungman T, Cirach M, Marando F, Pereira Barboza E, Khomenko S, Masselot P, *et al*. Cooling cities through urban green infrastructure: a health impact assessment of European cities. *The Lancet*. 2023;401(10376):577-89.
59. Bertrand C, Pascal M, Médina S. Do we know enough to quantify the impact of urban green spaces on mortality? An analysis of the current knowledge. *Public Health*. 2021;200:91-8.
60. Copernicus. Normalized Difference Vegetation Index [Available from: <https://land.copernicus.eu/global/products/NDVI>].
61. Rojas-Rueda D, Nieuwenhuijsen MJ, Gascon M, Perez-Leon D, Mudu P. Green spaces and mortality: a systematic review and meta-analysis of cohort studies. *Lancet Planet Health*. 2019;3(11):e469-e77.
62. Nieuwenhuijsen MJ, Gascon M, Martinez D, Ponjoan A, Blanch J, Garcia-Gil MM, *et al*. Air pollution, noise, blue space, and green space and premature mortality in Barcelona: A mega cohort. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(11).
63. Orioli R, Antonucci C, Scortichini M, Cerza F, Marando F, Ancona C, *et al*. Exposure to residential greenness as a predictor of cause-specific mortality and stroke incidence in the rome longitudinal study. *Environmental Health Perspectives*. 2019;127(2).
64. Callaghan A, McCombe G, Harrold A, McMeel C, Mills G, Moore-Cherry N, *et al*. The impact of green spaces on mental health in urban settings: a scoping review. *Journal of Mental Health*. 2021;30(2):179-93.
65. Hough I, Just AC, Zhou B, Dorman M, Lepeule J, Kloog I. A multi-resolution air temperature model for France from MODIS and Landsat thermal data. *Environmental Research*. 2020;183:109244.
66. BD Topo (R) [Available from: <https://geoservices.ign.fr/bdtopo>].
67. Corine Land Cover 1995 [Available from: <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>].
68. Carte d'occupation des sols du CES OSO-THEIA [Available from: <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bases-donnees/oso-theia>].
69. OpenStreetMap France [Available from: <https://www.openstreetmap.fr/>].
70. Giannico V, Spano G, Elia M, D'Este M, Sanesi G, Laforteza R. Green spaces, quality of life, and citizen perception in European cities. *Environmental Research*. 2021;196.
71. Vanaken G-J, Danckaerts M. Impact of Green Space Exposure on Children's and Adolescents' Mental Health: A Systematic Review. *International journal of environmental research and public health*. 2018;15(12):2668.

72. van den Berg M, Wendel-Vos W, van Poppel M, Kemper H, van Mechelen W, Maas J. Health benefits of green spaces in the living environment: A systematic review of epidemiological studies. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2015;14(4):806-16.
73. van den Bosch M, Ode Sang Å. Urban natural environments as nature-based solutions for improved public health - A systematic review of reviews. *Environmental research*. 2017;158:373-84.
74. Wang K, Sun Z, Cai M, Liu L, Wu H, Peng Z. Impacts of Urban Blue-Green Space on Residents' Health: A Bibliometric Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(23).
75. McDougall CW, Hanley N, Quilliam RS, Oliver DM. Blue space exposure, health and well-being: Does freshwater type matter? *Landscape and Urban Planning*. 2022;224.
76. Vilcins D, Sly PD, Scarth P, Mavoa S. Green space in health research: An overview of common indicators of greenness. *Reviews on environmental health*. 2022.
77. Pascal M, Laaidi K, Beaudeau P. Relevance of green, shaded environments in the prevention of adverse effects on health from heat and air pollution in urban areas. *Sante Publique*. 2019;31:197-205.
78. Cameron RWF, Brindley P, Mears M, McEwan K, Ferguson F, Sheffield D, *et al*. Where the wild things are! Do urban green spaces with greater avian biodiversity promote more positive emotions in humans? *Urban Ecosystems*. 2020;23(2):301-17.
79. Dushkova D, Ignatieva M. New trends in urban environmental health research: From geography of diseases to therapeutic landscapes and healing gardens. *Geography, Environment, Sustainability*. 2020;13(1):159-71.
80. Felappi JF, Sommer JH, Falkenberg T, Terlau W, Kötter T. Green infrastructure through the lens of "One Health": A systematic review and integrative framework uncovering synergies and trade-offs between mental health and wildlife support in cities. *Science of the Total Environment*. 2020;748.
81. Hung SH, Chang CY. Health benefits of evidence-based biophilic-designed environments: A review. *Journal of People, Plants, and Environment*. 2021;24(1):1-16.
82. Reyes-Riveros R, Altamirano A, De La Barrera F, Rozas-Vásquez D, Vieli L, Meli P. Linking public urban green spaces and human well-being: A systematic review. *Urban Forestry and Urban Greening*. 2021;61.
83. Huang W, Lin G. The relationship between urban green space and social health of individuals: A scoping review. *Urban Forestry and Urban Greening*. 2023;85.
84. Methorst J, Bonn A, Marselle M, Böhning-Gaese K, Rehdanz K. Species richness is positively related to mental health – A study for Germany. *Landscape and Urban Planning*. 2021;211.
85. Chen Z, Hermes J, Liu J, von Haaren C. How to integrate the soundscape resource into landscape planning? A perspective from ecosystem services. *Ecological Indicators*. 2022;141.
86. Uebel K, Marselle M, Dean AJ, Rhodes JR, Bonn A. Urban green space soundscapes and their perceived restorativeness. *People and Nature*. 2021;3(3):756-69.
87. Zhang JW, Howell RT, Iyer R. Engagement with natural beauty moderates the positive relation between connectedness with nature and psychological well-being. *Journal of Environmental Psychology*. 2014;38:55-63.
88. Stanhope J, Liddicoat C, Weinstein P. Outdoor artificial light at night: A forgotten factor in green space and health research. *Environmental Research*. 2021;197.
89. Cole HVS, Triguero-Mas M, Connolly JJT, Anguelovski I. Determining the health benefits of green space: Does gentrification matter? *Health and Place*. 2019;57:1-11.

90. Jelks NO, Jennings V, Rigolon A. Green gentrification and health: A scoping review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(3):1-23.
91. Sillman D, Rigolon A, Browning MHEM, Yoon HV, McAnirlin O. Do sex and gender modify the association between green space and physical health? A systematic review. *Environmental Research*. 2022;209.
92. The countryside charity. 2023 Local Green Spaces Report. 2023.
93. Selmi W, Weber C, Rivière E, Blond N, Mehdi L, Nowak D. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry and Urban Greening*. 2016;17:192-201.
94. Wania A, Bruse M, Blond N, Weber C. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management*. 2012;94(1):91-101.
95. Qiu Y, Zuo S, Yu Z, Zhan Y, Ren Y. Discovering the effects of integrated green space air regulation on human health: A bibliometric and meta-analysis. *Ecological Indicators*. 2021;132.
96. Labib SM, Lindley S, Huck JJ. Spatial dimensions of the influence of urban green-blue spaces on human health: A systematic review. *Environmental Research*. 2020;180.
97. Réseau français des Villes-Santé OMS. Mobilités actives au quotidien, le rôle des connectivités 2013.
98. ANSES. Actualisation des repères du PNNS - Révisions des repères relatifs à l'activité physique et à la sédentarité. Saisine n°2012-SA-0155. 2016 01/2016.
99. OMS. Lignes directrices de l'OMS sur l'activité physique et la sédentarité : en un coup d'oeil 2020.
100. Trost SG, Owen N, Bauman AE, Sallis JF, Brown W. Correlates of adults' participation in physical activity: review and update. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34(12):1996-2001.
101. Kärmeniemi M, Lankila T, Ikäheimo T, Koivumaa-Honkanen H, Korpelainen R. The Built Environment as a Determinant of Physical Activity: A Systematic Review of Longitudinal Studies and Natural Experiments. *Annals of Behavioral Medicine*. 2018;52(3):239-51.
102. Nordengen S, Andersen LB, Solbraa AK, Riiser A. Cycling is associated with a lower incidence of cardiovascular diseases and death: Part 1 - Systematic review of cohort studies with meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*. 2019;53(14):870-8.
103. Oja P, Titze S, Bauman A, de Geus B, Krenn P, Reger-Nash B, *et al*. Health benefits of cycling: A systematic review. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*. 2011;21(4):496-509.
104. Schafer C, Mayr B, Fernandez La Puente de Battre MD, Reich B, Schmied C, Loidl M, *et al*. Health effects of active commuting to work: The available evidence before GISMO. *Scand J Med Sci Sports*. 2020;30 Suppl 1:8-14.
105. Marques A, Peralta M, Henriques-Neto D, Frاسquilho D, Gouveira ÉR, Gomez-Baya D. Active commuting and depression symptoms in adults: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(3).
106. Raza W, Krachler B, Forsberg B, Sommar JN. Health benefits of leisure time and commuting physical activity: A meta-analysis of effects on morbidity. *Journal of Transport and Health*. 2020;18.
107. Dutheil F, Pelangeon S, Duclos M, Vorilhon P, Mermillod M, Baker JS, *et al*. Protective Effect on Mortality of Active Commuting to Work: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med*. 2020;50(12):2237-50.

108. Schoeppe S, Duncan MJ, Badland H, Oliver M, Curtis C. Associations of children's independent mobility and active travel with physical activity, sedentary behaviour and weight status: A systematic review. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2013;16(4):312-9.
109. UNECE. A Handbook on Sustainable Urban Mobility and Spatial Planning, Promoting Active Mobility. 2020.
110. Brand C, Götschi T, Dons E, Gerike R, Anaya-Boig E, Avila-Palencia I, *et al*. The climate change mitigation impacts of active travel: Evidence from a longitudinal panel study in seven European cities. *Global Environmental Change*. 2021;67:102224.
111. Mueller N, Rojas-Rueda D, Cole-Hunter T, de Nazelle A, Dons E, Gerike R, *et al*. Health impact assessment of active transportation: A systematic review. *Preventive Medicine*. 2015;76:103-14.
112. Mueller N, Rojas-Rueda D, Basagaña X, Cirach M, Cole-Hunter T, Dadvand P, *et al*. Urban and Transport Planning Related Exposures and Mortality: A Health Impact Assessment for Cities. *Environmental Health Perspectives*. 2017;125(1):89-96.
113. Mueller N, Rojas-Rueda D, Salmon M, Martinez D, Ambros A, Brand C, *et al*. Health impact assessment of cycling network expansions in European cities. *Preventive Medicine*. 2018;109:62-70.
114. Gerike R, de Nazelle A, Nieuwenhuijsen M, Panis LI, Anaya E, Avila-Palencia I, *et al*. Physical Activity through Sustainable Transport Approaches (PASTA): a study protocol for a multicentre project. *BMJ Open*. 2016;6(1):e009924.
115. Rojas-Rueda D, de Nazelle A, Andersen ZJ, Braun-Fahrlander C, Bruha J, Bruhova-Foltynova H, *et al*. Health Impacts of Active Transportation in Europe. *PLOS ONE*. 2016;11(3):e0149990.
116. Otero I, Nieuwenhuijsen MJ, Rojas-Rueda D. Health impacts of bike sharing systems in Europe. *Environment International*. 2018;115:387-94.
117. Giallourous G, Kouis P, Papatheodorou SI, Woodcock J, Tainio M. The long-term impact of restricting cycling and walking during high air pollution days on all-cause mortality: Health impact Assessment study. *Environment International*. 2020;140:105679.
118. Egiguren J, Nieuwenhuijsen MJ, Rojas-Rueda D. Premature Mortality of 2050 High Bike Use Scenarios in 17 Countries. *Environmental Health Perspectives*. 2021;129(12):127002.
119. Woodcock J, Givoni M, Morgan AS. Health impact modelling of active travel visions for England and Wales using an Integrated Transport and Health Impact Modelling Tool (ITHIM). *PloS One*. 2013;8(1):e51462.
120. Woodcock J, Tainio M, Cheshire J, O'Brien O, Goodman A. Health effects of the London bicycle sharing system: Health impact modelling study. *BMJ (Online)*. 2014;348.
121. Woodcock J, Abbas A, Ullrich A, Tainio M, Lovelace R, Sá TH, *et al*. Development of the Impacts of Cycling Tool (ICT): A modelling study and web tool for evaluating health and environmental impacts of cycling uptake. *PLoS Medicine*. 2018;15(7).
122. White MP, Elliott LR, Taylor T, Wheeler BW, Spencer A, Bone A, *et al*. Recreational physical activity in natural environments and implications for health: A population based cross-sectional study in England. *Preventive Medicine*. 2016;91:383-8.
123. Kelly P, Kahlmeier S, Götschi T, Orsini N, Richards J, Roberts N, *et al*. Systematic review and meta-analysis of reduction in all-cause mortality from walking and cycling and shape of dose response relationship. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 2014;11(1).
124. Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, Meckes N, Bassett DR, Tudor-Locke C, *et al*. 2011 Compendium of Physical Activities: A Second Update of Codes and MET Values. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2011;43(8):1575-81.

125. Alessio HM, Reiman T, Kemper B, von Carlowitz W, Bailer AJ, Timmerman KL. Metabolic and Cardiovascular Responses to a Simulated Commute on an E-Bike. *Translational Journal of the American College of Sports Medicine*. 2021;6(2).
126. Wen CP, Wai JPM, Tsai MK, Yang YC, Cheng TYD, Lee MC, *et al.* Minimum amount of physical activity for reduced mortality and extended life expectancy: A prospective cohort study. *The Lancet*. 2011;378(9798):1244-53.
127. Woodcock J, Franco OH, Orsini N, Roberts I. Non-vigorous physical activity and all-cause mortality: Systematic review and meta-analysis of cohort studies. *International Journal of Epidemiology*. 2011;40(1):121-38.
128. Kahlmeier S, Götschi T, Cavill N, Castro Fernandez A, Fahy N, Rojas Rueda D, *et al.* Outil d'évaluation économique des effets sanitaires (HEAT) liés à la pratique du vélo et de la marche. Méthodologie et guide de l'utilisateur sur l'évaluation de l'activité physique, de la pollution atmosphérique, des traumatismes et de l'impact carbone. Genève: WHO Europe; 2018 2018.
129. Kelly P, Kahlmeier S, Gotschi T, Orsini N, Richards J, Roberts N, *et al.* Systematic review and meta-analysis of reduction in all-cause mortality from walking and cycling and shape of dose response relationship. *Int J Behav Nutr Phys Act*. 2014;11:132.
130. Zhao Y, Hu F, Feng Y, Yang X, Li Y, Guo C, *et al.* Association of Cycling with Risk of All-cause and Cardiovascular Disease Mortality: A Systematic Review and Dose-Response Meta-analysis of Prospective Cohort Studies. *Sports Med*. 2021;51(7):1439-48.
131. CERTU. Les enquêtes déplacements « standard CERTU ». Note de présentation. 2013 01/2013.
132. Cerema, MEL. Enquête Ménages Déplacements, Lille / Métropole européenne de Lille - 2016. 2016 2016.
133. Cerema, 3M. Enquête Globale des Déplacements de l'Hérault 2012– 2015 cofinancée par le Département de l'Hérault, l'Etat, Montpellier Méditerranée Métropole, la communauté d'Agglomération du Bassin de Thau, la communauté d'Agglomération du Pays de l'Or, la communauté d'Agglomération Hérault Méditerranée et la communauté d'Agglomération Béziers Méditerranée. 2014 2014.
134. Cerema, MRN. Enquête ménages déplacements 2016-2017. Aire urbaine de Rouen et Communauté d'Agglomération Seine Eure. 2017 2017.
135. Hérin F. À propos du report modal. Les enseignements du cas parisien. *Les Cahiers scientifiques du transport*. 2017;71:99-124.
136. DRIEA, STIF, Île-de-France I. La marche. Enquête globale transport. La mobilité en Île-de-France. 2013 01/2013. Report No.: 14.
137. Amsterdam G. Amsterdamse Thermometer van de Bereikbaarheid 2021. 2021 2021.
138. Denmark CRo. Regional Cycling Report. 2012 2012.
139. écologique MdIT. Plan vélo et mobilités actives. 2018 14/09/2018.
140. Apperel D. Vélo & Territoires [Internet]2020 08/10/2020. [2021-04-14].
141. Cerema. Centre d'études et d'expertise sur les risques l'elmea. Mobilités et transports : le point sur - Série de fiches : Fiche n°32- Les seniors : un enjeu pour les politiques de déplacements. L'essentiel ; L'essentiel ; Mobilités et transports : le point sur: Cerema. Bron; 2020. p. sans pagination.
142. Ademe. Bouger autrement au quotidien. 2022.
143. ADEME. Calculateur éco-mobile.
144. Vélo & territoires. Fréquentations vélo en FRance 2022. 2022.

145. Mueller N, Rojas-Rueda D, Cole-Hunter T, de Nazelle A, Dons E, Gerike R, *et al.* Health impact assessment of active transportation: A systematic review. *Prev Med.* 2015;76:103-14.
146. Lapeyre M. Observatoire de l'accidentalité routière - Bilan statistique, analyses spatiales, enjeux, études. Montpellier, France: Montpellier Méditerranée Métropole.
147. Observatoire national interministériel de la sécurité routière 2023 [Available from: <https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/>].
148. Laumbach R, Meng Q, Kipen H. What can individuals do to reduce personal health risks from air pollution? *Journal of Thoracic Disease.* 2015;7(1):96-107.
149. Touili N, Radja K, Schembri P, Ktaish A, Zeitouni K, Chaix B, *et al.* Analysis of spatio-temporal variations in individual exposure to air pollution in the Paris region using micro-sensors. *CyberGeo.* 2022;2022.
150. Shrestha A, Mullins B, Zhao Y, Selvey LA, Rumchev K. Exposure to air pollutants among cyclists: a comparison of different cycling routes in Perth, Western Australia. *Air Quality, Atmosphere & Health.* 2020;13(9):1023-34.
151. Good N, Molter A, Ackerson C, Bachand A, Carpenter T, Clark ML, *et al.* The Fort Collins Commuter Study: Impact of route type and transport mode on personal exposure to multiple air pollutants. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* 2016;26(4):397-404.
152. Tainio M, de Nazelle AJ, Gotschi T, Kahlmeier S, Rojas-Rueda D, Nieuwenhuijsen MJ, *et al.* Can air pollution negate the health benefits of cycling and walking? *Prev Med.* 2016;87:233-6.
153. Jardim B, de Castro Neto M. Walkability Indicators in the Aftermath of the COVID-19 Pandemic: A Systematic Review. *Sustainability (Switzerland).* 2022;14(17).
154. Cerema. Centre d'études et d'expertise sur les risques IeMela. Connaissance des mobilités : hybridation des méthodes, diversification des sources : 7 - Comment réarticuler les différentes dimensions de la marche urbaine ? - Edna Hernández-González, Florian Guérin, Jérôme Monnet. In: Meissonnier J, Vincent S, Rabaud M, Kaufmann V, editors. *Rapports de recherche et rapports techniques: Cerema.* Bron; 2020. p. 174.
155. 2023 [Available from: <https://www.walkscore.com/>].
156. Réseau français des Villes-Santé de l'OMS. Mobilités actives au quotidien - Le rôle des collectivités. 2013.
157. Cerema. Centre d'études et d'expertise sur les risques IeMela. La mobilité des résidents des quartiers prioritaires de la MEL. In: Lannoy A, editor. 2018. p. 40 p.
158. Orfeuil J. La mobilité, nouvelle question sociale ? . *SociologieS [En ligne], Dossiers.* 2010.
159. CO2 I. [Available from: <https://impactco2.fr/transport>].
160. Thomas B. Evaluation quantitative des impacts sur la santé des mobilités actives - Etude pilote de développement méthodologique. Saint-Quentin-en-Yvelines, France: Université Paris-Saclay; 2022.
161. Cerema. Centre d'études et d'expertise sur les risques IeMela. Les enquêtes mobilité certifiées Cerema (EMC<sup>2</sup>) : Principes méthodologiques. In: Rabaud M, Pelata J, editors. *Références ; Références: Cerema;* 2021. p. 56 p.
162. Cerema. Centre d'études et d'expertise sur les risques IeMela. Collecte et utilisation de données de mobilité pour la modélisation des déplacements : Des enquêtes ménages-déplacements aux données massives. Les ressources ; Données de mobilité pour la modélisation des déplacements: Cerema. Bron; 2022. p. 28 p.
163. Emilie S, Marion L, Audrey De N, Philippe Q, Kevin J. The untapped health and climate potential of cycling in France: a national assessment from individual travel data. *medRxiv.* 2023:2023.04.04.23288155.

164. Stevenson M, Thompson J, de Sá TH, Ewing R, Mohan D, McClure R, *et al.* Land use, transport, and population health: estimating the health benefits of compact cities. *The Lancet*. 2016;388(10062):2925-35.
165. Kahlmeier S, Racioppi F, Cavill N, Rutter H, Oja P. "Health in all policies" in practice: Guidance and tools to quantifying the health effects of cycling and walking. *Journal of Physical Activity and Health*. 2010;7(SUPPL.1):S120-S5.
166. Praznocy C. Les bénéfices et les risques de la pratique du vélo. Évaluation en Île-de-France. ORS Île-de-France; 2012 09/2012.
167. Fradet H, Vienne S. Application de l'outil d'évaluation économique des effets sanitaires (HEAT) liés à la pratique de la marche à Grenoble. Direction de la Santé Publique et Environnementale de la Ville de Grenoble; 2014 05/2014.
168. Gassiot M, Guyard F, Bedok H, Héritage Z, Hemery C, Saraux-Salaün P. Pratiques quotidiennes du vélo à Nantes : approche croisée de la santé et de la mobilité. *Santé Publique*. 2016;S1(HS):75-82.
169. Réseau français des Villes-Santé de l'OMS. Application de l'outil d'évaluation économique des effets sanitaires liés aux mobilités actives (HEAT) en France. 2015.
170. IPCC. Summary for Policymakers 6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press; 2022.
171. Chersich MF, Pham MD, Areal A, Haghighi MM, Manyuchi A, Swift CP, *et al.* Associations between high temperatures in pregnancy and risk of preterm birth, low birth weight, and stillbirths: Systematic review and meta-analysis. *The BMJ*. 2020;371.
172. Haghighi MM, Wright CY, Ayer J, Urban MF, Pham MD, Boeckmann M, *et al.* Impacts of high environmental temperatures on congenital anomalies: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(9).
173. Heo S, Lee W, Bell ML. Suicide and associations with air pollution and ambient temperature: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(14).
174. Liu J, Varghese BM, Hansen A, Xiang J, Zhang Y, Dear K, *et al.* Is there an association between hot weather and poor mental health outcomes? A systematic review and meta-analysis. *Environment International*. 2021;153.
175. Pascal M, Lagarrigue R, Tabai A, Bonmarin I, Camail S, Laaidi K, *et al.* Evolving heat waves characteristics challenge heat warning systems and prevention plans. *International Journal of Biometeorology*. 2021;65(10):1683-94.
176. Pascal M, Wagner V, Lagarrigue R, Casamatta D, Pouey J, Vincent N, *et al.* Estimation de la fraction de la mortalité attribuable à l'exposition de la population générale à la chaleur en France métropolitaine. Application à la période de surveillance estivale (1er juin -15 septembre) 2014-2022. Saint-Maurice: Santé publique France; 2023.
177. Basu R. High ambient temperature and mortality: A review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health: A Global Access Science Source*. 2009;8(1).
178. Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Lavigne E, Zanobetti A, Schwartz J, *et al.* Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study. *The Lancet*. 2015;386(9991):369-75.
179. Zafeiratou S, Samoli E, Dimakopoulou K, Rodopoulou S, Analitis A, Gasparrini A, *et al.* A systematic review on the association between total and cardiopulmonary mortality/morbidity or cardiovascular risk factors with long-term exposure to increased or decreased ambient temperature. *Science of the Total Environment*. 2021;772.

180. Hanna EG, Tait PW. Limitations to Thermoregulation and Acclimatization Challenge Human Adaptation to Global Warming. *Int J Environ Res Public Health*. 2015;12(7):8034-74.
181. Gasparrini A. Modeling exposure-lag-response associations with distributed lag non-linear models. *Statistics in Medicine*. 2014;33(5):881-99.
182. Gasparrini A, Armstrong B. Reducing and meta-analysing estimates from distributed lag non-linear models. *BMC Medical Research Methodology*. 2013;13(1).
183. Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. Multivariate meta-analysis for non-linear and other multi-parameter associations. *Statistics in Medicine*. 2012;31(29):3821-39.
184. Gasparrini A, Leone M. Attributable risk from distributed lag models. *BMC Medical Research Methodology*. 2014;14(1).
185. Rai M, Stafoggia M, de'Donato F, Scortichini M, Zafeiratou S, Vazquez Fernandez L, *et al*. Heat-related cardiorespiratory mortality: Effect modification by air pollution across 482 cities from 24 countries. *Environment International*. 2023;174.
186. Pascal M, Wagner V, Alari A, Corso M, Le Tertre A. Extreme heat and acute air pollution episodes: A need for joint public health warnings? *Atmospheric Environment*. 2021;249:118249.
187. Berger SE, Ordway MR, Schoneveld E, Lucchini M, Thakur S, Anders T, *et al*. The impact of extreme summer temperatures in the United Kingdom on infant sleep: Implications for learning and development. *Scientific Reports*. 2023;13(1).
188. Rifkin DI, Long MW, Perry MJ. Climate change and sleep: A systematic review of the literature and conceptual framework. *Sleep Medicine Reviews*. 2018;42:3-9.
189. Basner M, Smith MG, Jones CW, Ecker AJ, Howard K, Schneller V, *et al*. Associations of bedroom PM2.5, CO2, temperature, humidity, and noise with sleep: An observational actigraphy study. *Sleep Health*. 2023;9(3):253-63.
190. Li D, Zhang Y, Li X, Zhang K, Lu Y, Brown RD. Climatic and meteorological exposure and mental and behavioral health: A systematic review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*. 2023;892.
191. Ebi KL, Capon A, Berry P, Broderick C, de Dear R, Havenith G, *et al*. Hot weather and heat extremes: health risks. *The Lancet*. 2021;398(10301):698-708.
192. Chen J, Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*. 2020;143.
193. Papadogeorgou G, Kioumourtzoglou MA, Braun D, Zanobetti A. Low Levels of Air Pollution and Health: Effect Estimates, Methodological Challenges, and Future Directions. *Current environmental health reports*. 2019;6(3):105-15.
194. Orellano P, Reynoso J, Quaranta N, Bardach A, Ciapponi A. Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2.5), nitrogen dioxide (NO2), and ozone (O3) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environment International*. 2020;142.
195. Huangfu P, Atkinson R. Long-term exposure to NO2 and O3 and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*. 2020;144.
196. Dominski FH, Lorenzetti Branco JH, Buonanno G, Stabile L, Gameiro da Silva M, Andrade A. Effects of air pollution on health: A mapping review of systematic reviews and meta-analyses. *Environmental Research*. 2021;201.
197. Li Y, Xu L, Shan Z, Teng W, Han C. Association between air pollution and type 2 diabetes: an updated review of the literature. *Therapeutic Advances in Endocrinology and Metabolism*. 2019;10.

198. Yang BY, Fan S, Thiering E, Seissler J, Nowak D, Dong GH, *et al.* Ambient air pollution and diabetes: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research*. 2020;180.
199. Hamroun A, Camier A, Bigna JJ, Glowacki F. Impact of air pollution on renal outcomes: A systematic review and meta-analysis protocol. *BMJ Open*. 2021;11(1).
200. Turner MC, Andersen ZJ, Baccarelli A, Diver WR, Gapstur SM, Pope CA, III, *et al.* Outdoor air pollution and cancer: An overview of the current evidence and public health recommendations. *CA Cancer Journal for Clinicians*. 2020;70(6):460-79.
201. Zare Sakhvidi MJ, Lequy E, Goldberg M, Jacquemin B. Air pollution exposure and bladder, kidney and urinary tract cancer risk: A systematic review. *Environmental Pollution*. 2020;267.
202. Hahad O, Lelieveld J, Birklein F, Lieb K, Daiber A, Münzel T. Ambient air pollution increases the risk of cerebrovascular and neuropsychiatric disorders through induction of inflammation and oxidative stress. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(12):1-24.
203. Fu P, Guo X, Cheung FMH, Yung KKL. The association between PM 2.5 exposure and neurological disorders: A systematic review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*. 2019;655:1240-8.
204. Kihal-Talantikite W, Marchetta GP, Deguen S. Infant mortality related to NO<sub>2</sub> and PM exposure: Systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(8).
205. Medina S, Adélaïde L, Wagner V, de Crouy Chanel P, Real E, Colette A, *et al.* Impact de pollution de l'air ambiant sur la mortalité en France métropolitaine. Réduction en lien avec le confinement du printemps 2020 et nouvelles données sur le poids total pour la période 2016-2019. Saint-Maurice: Santé publique France; 2021.
206. World health organization. WHO global air quality guidelines - Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.; 2021.
207. OMS Europe. Estimating the morbidity from air pollution and its economic costs 2023 [Available from: <https://www.who.int/activities/estimating-the-morbidity-from-air-pollution-and-its-economic-costs>].
208. Liu C, Chen R, Sera F, Vicedo-Cabrera AM, Guo Y, Tong S, *et al.* Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *New England Journal of Medicine*. 2019;381(8):705-15.
209. Corso M, Blanchard M, Medina S, Wagner V. Short-term associations of nitrogen dioxide (No<sub>2</sub>) on mortality in 18 french cities, 2010–2014. *Atmosphere*. 2020;11(11).
210. Walton HA, Atkinson RW, Mills IG. Quantitative systematic review of the associations between short-term exposure to ambient ozone and mortality and hospital admissions. In: Atkinson RW, Mills IC, Walton HA, Kang S, Anderson HR, editors. *ystematic Review and Quantitative Meta-analysis of the Evidence for Associations between Chronic and Short-term Exposure to Outdoor Air Pollutants and Health* Department of Health Policy Research Programme Project: 002/0037. St Georges: , University of London; 2014. p. 141.
211. 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. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2023;96(4):551-63.
212. World Health Organization. Health risks of air pollution in Europe - HRAPIE project - Recommandations for concentration-response functions for cost-benefits analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Copenhagen, Danemark: WHO Regional office for Europe; 2013.
213. Atkinson RW, Kang S, Anderson HR, Mills IC, Walton HA. Epidemiological time series studies of PM<sub>2.5</sub> and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis. *Thorax*. 2014;69(7):660.

214. Pascal M, de Crouy Chanel P, Wagner V, Corso M, Tillier C, Bentayeb M, *et al.* The mortality impacts of fine particles in France. *Science of the Total Environment*. 2016;571:416-25.
215. Committee on the Medical Effects of Air Pollutants (COMEAP). Associations of long-term average concentrations of nitrogen dioxide with mortality. 2018.
216. Scheers H, Jacobs L, Casas L, Nemery B, Nawrot TS. Long-Term Exposure to Particulate Matter Air Pollution Is a Risk Factor for Stroke: Meta-Analytical Evidence. *Stroke*. 2015;46(11):3058-66.
217. Yuan S, Wang J, Jiang Q, He Z, Huang Y, Li Z, *et al.* Long-term exposure to PM<sub>2.5</sub> and stroke: A systematic review and meta-analysis of cohort studies. *Environmental Research*. 2019;177.
218. Hamra GB, Guha N, Cohen A, Laden F, Raaschou-Nielsen O, Samet JM, *et al.* Outdoor Particulate Matter Exposure and Lung Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental health perspectives*. 2014;906.
219. Yu P, Guo S, Xu R, Ye T, Li S, Sim MR, *et al.* Cohort studies of long-term exposure to outdoor particulate matter and risks of cancer: A systematic review and meta-analysis. *Innovation*. 2021;2(3).
220. Khreis H, Kelly C, Tate J, Parslow R, Lucas K, Nieuwenhuijsen M. Exposure to traffic-related air pollution and risk of development of childhood asthma: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*. 2017;100:1-31.
221. Mölter A, Simpson A, Berdel D, Brunekreef B, Custovic A, Cyrus J, *et al.* A multicentre study of air pollution exposure and childhood asthma prevalence: The ESCAPE project. *European Respiratory Journal*. 2015;45(3):610-24.
222. Santé publique France. Geodes [Available from: <https://geodes.santepubliquefrance.fr>].
223. Pascal M, Falq G, Wagner V, Chatignoux E, Corso M, Blanchard M, *et al.* Short-term impacts of particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>10-2.5</sub>, PM<sub>2.5</sub>) on mortality in nine French cities. *Atmospheric Environment*. 2014;95:175-84.
224. Pascal M, Wagner V, Alari A, Corso M, Le Tertre A. Extreme heat and acute air pollution episodes: A need for joint public health warnings? *Atmospheric Environment*. 2021;249.
225. Bentayeb M, Stempfelet M, Wagner V, Zins M, Bonenfant S, Songeur C, *et al.* Retrospective modeling outdoor air pollution at a fine spatial scale in France, 1989-2008. *Atmospheric Environment*. 2014;92:267-79.
226. Bentayeb M, Wagner V, Stempfelet M, Zins M, Goldberg M, Pascal M, *et al.* Association between long-term exposure to air pollution and mortality in France: A 25-year follow-up study. *Environment International*. 2015;85:5-14.
227. Pascal M, de Crouy Chanel P, Corso M, Medina S, Wagner V, Gorla S, *et al.* Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique. Saint-Maurice: Santé publique France; 2016.
228. Hu X, Han W, Wang Y, Aunan K, Pan X, Huang J, *et al.* Does air pollution modify temperature-related mortality? A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research*. 2022;210.
229. Grigorieva E, Lukyanets A. Combined effect of hot weather and outdoor air pollution on respiratory health: Literature review. *Atmosphere*. 2021;12(6).
230. Eminson K, Cai YS, Chen Y, Blackmore C, Rodgers G, Jones N, *et al.* Does air pollution confound associations between environmental noise and cardiovascular outcomes? - A systematic review. *Environmental Research*. 2023;232.

231. Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslin HM, Gawronska H, Gawronski SW. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*. 2012;427-428:347-54.
232. Diener A, Mudu P. How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective - with implications for urban planning. *Science of the Total Environment*. 2021;796.
233. Barton MG, Henderson I, Border JA, Siriwardena G. A review of the impacts of air pollution on terrestrial birds. *Science of the Total Environment*. 2023;873.
234. Ryalls JMW, Langford B, Mullinger NJ, Bromfield LM, Nemitz E, Pfrang C, *et al*. Anthropogenic air pollutants reduce insect-mediated pollination services. *Environmental Pollution*. 2022;297:118847.
235. Moreno E, Schwarz L, Host S, Chanel O, Benmarhnia T. The environmental justice implications of the Paris low emission zone: a health and economic impact assessment. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 2022;15(12):2171-84.
236. Journal officiel des Communautés européennes. Directive 2002/49/CE du parlement européen et du conseil du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement. 2002.
237. World Health Organization. Regional Office for E. Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe. Copenhagen: World Health Organization. Regional Office for Europe; 2011 2011.
238. Hänninen O, Knol AB, Jantunen M, Lim TA, Conrad A, Rappolder M, *et al*. Environmental burden of disease in Europe: assessing nine risk factors in six countries. *Environ Health Perspect*. 2014;122(5):439-46.
239. Basner M, Babisch W, Davis A, Brink M, Clark C, Janssen S, *et al*. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet*. 2014;383(9925):1325-32.
240. Eriksson C, Pershagen G, Nilsson M. Biological mechanisms related to cardiovascular and metabolic effects by environmental noise. Copenhagen: World Health Organization. Regional Office for Europe; 2018 2018. Contract No.: WHO/EURO:2018-3009-42767-59666.
241. Basner M, Müller U, Griefahn B. Practical guidance for risk assessment of traffic noise effects on sleep. *Applied Acoustics*. 2010;71(6):518-22.
242. Van Kamp I, Schreckenberg D, van Kempen E, Basner M, Brown AL, Clark C, *et al*. Study on methodology to perform an environmental noise and health assessment-a guidance document for local authorities in Europe. 2018.
243. World Health Organization. Regional Office for Europe. Environmental noise guidelines for the European Region. Copenhagen: World Health Organization. Regional Office for Europe; 2018 2018.
244. Hao G, Zuo L, Weng X, Fei Q, Zhang Z, Chen L, *et al*. Associations of road traffic noise with cardiovascular diseases and mortality: Longitudinal results from UK Biobank and meta-analysis. *Environ Res*. 2022;212(Pt A):113129.
245. Cai Y, Ramakrishnan R, Rahimi K. Long-term exposure to traffic noise and mortality: A systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence between 2000 and 2020. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*. 2021;269:116222.
246. Basner M, McGuire S. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Effects on Sleep. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(3):519.
247. Smith MG, Cordoza M, Basner M. Environmental Noise and Effects on Sleep: An Update to the WHO Systematic Review and Meta-Analysis. *Environ Health Perspect*. 2022;130(7):76001.

248. Guski R, Schreckenberg D, Schuemer R. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. *Int J Environ Res Public Health*. 2017;14(12).
249. Van Kempen E, Casas M, Pershagen G, Foraster M. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cardiovascular and Metabolic Effects: A Summary. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(2):379.
250. Kephelopoulos S, Paviotti M, Anfosso-Lédée F. Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU). Publications Office of the European Union; 2012. p. 180 p.
251. Blanes N, Marín A, Ramos MJ. Noise exposure scenarios in 2020 and 2030 outlooks for EU 28. 2019.
252. Kempen EV, Casas M, Pershagen G, Foraster M. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cardiovascular and Metabolic Effects: A Summary. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(2).
253. Wu S, Du W, Zhong X, Lu J, Wen F. The association between road traffic noise and type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis of cohort studies. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2023;30(14):39568-85.
254. Vienneau D, Stafoggia M, Rodopoulou S, Chen J, Atkinson RW, Bauwelinck M, *et al*. Association between exposure to multiple air pollutants, transportation noise and cause-specific mortality in adults in Switzerland. *Environ Health*. 2023;22(1):29.
255. Host SL, N.; Maclair, C.; Caudeville, J.,. Cumuls d'expositions environnementales en Île-de-France, un enjeu de santé publique - Méthode d'identification des secteurs les plus impactés. Paris, France: Observatoire régional de la santé ; 2022.
256. Roué-Le Gall A, Lemaire N, Pascal M, Diallo T. Urbanisme favorable à la santé : agir pour la santé, l'environnement et la réduction des inégalités. *La Santé en action*. 2022(459):10-5.