

Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine

Zone d'Avignon
Impact à court et long terme



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de la Santé
et des Solidarités



INSTITUT DE
VEILLE SANITAIRE

Cette étude a été réalisée par :

Karine MANTEY – Programme de formation à l'épidémiologie de terrain
Cellule interrégionale d'épidémiologie Sud

Ont participé à la réalisation de cette étude :

- **Institut de veille sanitaire**
Département santé environnement
Laurence PASCAL
- **Service statistiques et informatique**
Javier NICOLAU
- **Cellule interrégionale d'épidémiologie Sud**
Jean-Luc LASALLE
Florian FRANKE
- **Airmaraix**
Patricia GUIEU-RENZI
Dominique ROBIN
- **Direction départementale des affaires sanitaires et sociales du Vaucluse**
Service santé environnement
Didier ROUX
- **Direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement**
Jean-Pierre ULASIEN

Sommaire

Acronymes	4
Résumé	5
1. Objectifs	6
2. Description de la zone d'étude	6
2.1. Choix de la zone d'étude	6
2.2. Population et établissements de soins	7
2.2.1. Densités de population.....	7
2.2.2. Attractivité hospitalière	8
2.3. Sources de pollution	9
3. Matériel et méthodes	9
3.1. Méthodologie de l'EIS.....	9
3.1.1. Identification des dangers.....	9
3.1.2. Estimation de l'exposition	9
3.1.3. Choix des relations exposition-risque	10
3.1.3.1. EIS court terme	10
3.1.3.2. EIS long terme	11
3.1.4. Caractérisation du risque.....	12
3.2. Définitions des périodes d'étude.....	12
3.3. Construction des indicateurs d'exposition	13
3.3.1. Données de surveillance de la qualité de l'air	13
3.3.2. Sélection des stations de mesures	14
3.4. Indicateurs sanitaires.....	14
3.4.1. Données de mortalité.....	14
3.4.2. Données de morbidité.....	14
4. Résultats	15
4.1. Description des indicateurs de pollution	15
4.2. Indicateurs sanitaires.....	17
4.3. Caractérisation du risque à court terme.....	17
4.3.1. Estimation de l'impact sanitaire	17
4.3.2. Impact sanitaire par niveaux de pollution	18
4.3.3. Calcul des gains sanitaires liés à une baisse de la pollution atmosphérique	20
4.4. Caractérisation du risque à long terme.....	23
5. Discussion	23
5.1. Hypothèses, limites et incertitudes	23
5.1.1. Identification des dangers.....	24
5.1.2. Relations exposition-risque.....	24
5.1.3. Estimation de l'exposition	24
5.1.4. Caractérisation du risque.....	25
5.2. Interprétation des résultats	25
6. Conclusion	26
6.1. Un impact collectif à court terme non négligeable	26
6.2. Un impact sanitaire à long terme mesurable	26
6.3. Recommandations.....	26
6.4. Des résultats à enrichir et à communiquer	26
7. Bibliographie	27
8. Annexes	28

ACRONYMES

Aasqa :	Association agréée de surveillance de la qualité de l'air
Aphea :	Air pollution and health - an European approach
ATIH :	Agence technique de l'information hospitalière
Cire :	Cellule interrégionale d'épidémiologie
CO :	Monoxyde de carbone
COV :	Composés organiques volatiles
Ddass :	Direction départementale des affaires sanitaires et sociales
Drass :	Direction régionale des affaires sanitaires et sociales
Drire :	Direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement
EIS :	Évaluation d'impact sanitaire
Escompte :	Expérience sur site pour contraindre les modèles de pollution atmosphérique et de transport d'émissions
Finess :	Fichier national des établissements sanitaires et sociaux
FN :	Fumées noires
HCl :	Acide chlorhydrique
Insee :	Institut national de la statistique et des études économiques
Inserm :	Institut national de la santé et de la recherche médicale
InVS :	Institut de veille sanitaire
NO₂ :	Dioxyde d'azote
NO_x :	Oxyde d'azote
O₃ :	Ozone
OMS :	Organisation mondiale de la santé
Paca :	Provence-Alpes-Côte d'Azur
PDU :	Plan de déplacement urbain
PM10 :	Particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à 10 microns
PMSI :	Programme de médicalisation des systèmes d'information
PRQA :	Plan régional pour la qualité de l'air
PSAS 9 :	Programme de surveillance air et santé - 9 villes
RSA :	Résumé de sortie anonymisé
RUM :	Résumé d'unité médicale
SO₂ :	Dioxyde de soufre
SO_x :	Oxydes de soufre
UV :	Ultraviolet

Résumé

L'évaluation de l'impact sanitaire (EIS) de la pollution atmosphérique sur l'agglomération d'Avignon s'inscrit dans la continuité des orientations du Plan régional pour la qualité de l'air de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur qui visent à prévenir, réduire ou atténuer les effets de la pollution atmosphérique.

Dans cette étude, l'impact sanitaire à court terme de la pollution atmosphérique est calculé en termes de morbidité (admissions hospitalières) et de mortalité anticipée. L'impact sanitaire à long terme est estimé selon le nombre de décès attribuables à la pollution atmosphérique.

La zone d'étude retenue correspond à une zone urbaine où l'exposition de la population à la pollution atmosphérique peut être considérée comme homogène. Sept communes la composent : cinq communes du Vaucluse (Avignon, Le Pontet, Morières-lès-Avignon, Sorgues et Vedène) et deux communes du Gard (Les Angles et Villeneuve-lès-Avignon), ce qui représente une population totale de 153 624 habitants.

Deux périodes d'étude ont été définies : la période 1999-2000 pour les évaluations à court et long termes sur la mortalité et l'année 2001 pour l'analyse de la morbidité.

Cette étude repose sur les principes méthodologiques de l'EIS de la pollution atmosphérique urbaine dont la méthodologie se décompose en quatre étapes : identification des dangers, estimation de l'exposition, choix des relations exposition-risque et caractérisation du risque.

Les indicateurs de pollution retenus sont construits à partir des quatre polluants mesurés en routine sur la zone : NO₂, O₃, PM10 et SO₂. Les relations exposition-risque utilisées sont issues d'études épidémiologiques réalisées en population générale, en privilégiant les études multicentriques et européennes.

Le nombre annuel de décès anticipés attribuables à la pollution atmosphérique s'élève à 23, dont 10 décès par mortalité cardio-vasculaire et 2 décès par mortalité respiratoire. Le calcul des gains sanitaires, associé à différents scénarios de réduction de la pollution atmosphérique, montre que les scénarios les plus efficaces sont ceux qui correspondent à des diminutions de 25 % de la moyenne annuelle du polluant considéré.

Concernant les gains sanitaires à long terme, les différents scénarios montrent que la norme européenne prévue pour 2005 est d'ores et déjà respectée. Le respect de la norme européenne prévue en 2010 devrait permettre d'éviter 10 décès sur la totalité des décès enregistrés sur une année, alors qu'une diminution de 25 % de la moyenne annuelle permettrait d'en éviter 25.

Compte tenu des incertitudes et des limites de la méthodologie utilisée, les résultats doivent être interprétés comme des ordres de grandeur de l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé de la population de la zone étudiée.

Cependant, cette étude montre que, même si les risques relatifs associés à la pollution atmosphérique sont faibles, la proportion importante de personnes exposées aboutit à un impact collectif sur la mortalité non négligeable. Elle montre également que les effets sanitaires apparaissent déjà à des niveaux de pollution bien inférieurs à ceux pour lesquels les mesures sont prises actuellement et que les actions les plus efficaces seraient donc celles qui associeraient une réduction des émissions à la source de façon quotidienne à une diminution importante du nombre de pics annuels de pollution.

1 Objectifs

Le plan régional pour la qualité de l'air (PRQA), prévu par la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30 décembre 1996 et dont les modalités de mise en œuvre sont précisées par le décret du 6 mai 1998, fixe les orientations visant à prévenir, réduire ou atténuer les effets de la pollution atmosphérique. Il s'appuie notamment sur une évaluation des effets de la qualité de l'air sur la santé publique. Cette évaluation est également un outil de planification et d'évaluation des politiques publiques puisqu'elle permet d'une part, de fixer des objectifs d'amélioration de la qualité de l'air et, d'autre part, de mesurer l'impact sur la santé publique et l'efficacité de mesures de prévention.

La 6^{ème} orientation du PRQA [1] de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Paca) indique que « la surveillance épidémiologique, croisant des données sur la santé et d'autres sur la qualité de l'air, sera poursuivie ». Dans ce cadre, trois évaluations d'impact sanitaire (EIS) ont déjà été réalisées sur l'agglomération d'Aix en Provence [2], sur la ville de Martigues [3] et sur la zone de Toulon [4]. La réalisation de l'EIS sur l'agglomération d'Avignon décrite dans ce rapport s'inscrit dans la continuité des actions de surveillance menées en région Paca.

Cette étude suit la démarche méthodologique d'évaluation d'impact sanitaire décrite par l'Institut de veille sanitaire [5] (InVS), en accord avec les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), de manière à calculer l'impact sanitaire à court terme de la pollution atmosphérique en terme de morbidité (admissions hospitalières) et de mortalité anticipée. De plus, dans cette étude, une estimation à long terme permet d'évaluer l'impact de la pollution atmosphérique sur la mortalité grâce aux résultats des études épidémiologiques internationales utilisés pour réactualiser le guide méthodologique de l'InVS [6].

2 Description de la zone d'étude

Le département du Vaucluse a une superficie de 3 567 km². Il est délimité par la vallée du Rhône à l'ouest, la vallée de la Durance au sud ainsi que par les prémices des Alpes avec le massif du Ventoux et les Dentelles de Montmirail au nord. Il est de plus traversé par la chaîne du Luberon et les monts du Vaucluse. Ce département présente une topographie assez contrastée avec un point culminant à 1 912 m (Mont Ventoux) et un point bas à 12 m, situé au confluent du Rhône et de la Durance. La plaine du Comtat Venaissin s'étend à l'ouest du Vaucluse.

2.1 Choix de la zone d'étude

La sélection de la zone d'étude repose sur l'identification d'une zone urbaine où l'exposition de la population à la pollution atmosphérique peut être estimée et considérée comme homogène. Cela implique que la zone d'étude définie réponde aux critères suivants :

- zone sans rupture d'urbanisation ;
- où la qualité de l'air (mesurée par des stations de fond) et la répartition des émissions peuvent être considérées, *a priori*, comme homogènes ;
- où la majorité de la population séjourne en permanence.

L'unité urbaine d'Avignon est une agglomération qui s'étend sur deux régions et trois départements (région Paca : Vaucluse et Bouches-du-Rhône ; région Languedoc-Roussillon : Gard). Elle regroupe au total 16 communes et représente au dernier recensement Insee de 1999 [7] une population de 253 580 habitants.

Une réunion de concertation avec la Direction départementale des affaires sanitaires et sociales (Ddass) du Vaucluse et Airmaraix, l'Association agréée de surveillance de la qualité de l'air (Aasqa), qui couvre le département du Vaucluse, portant sur l'étude des principes de continuité urbaine et d'homogénéité d'immissions à l'intérieur de la zone d'étude, a conduit à restreindre cette zone à sept communes de l'unité urbaine d'Avignon.

L'étude des déplacements de population par commune (navettes domicile-travail¹), au sein de la zone d'étude définie par ces sept communes présélectionnées, a ensuite permis de vérifier que 82 % des déplacements se font à l'intérieur de cette zone (annexe 1).

Au final, la zone d'étude délimitée comprend cinq communes du Vaucluse (Avignon, Le Pontet, Morières-lès-Avignon, Sorgues et Vedène) et deux communes du Gard (Les Angles et Villeneuve-lès-Avignon). Cette zone est dénommée par la suite « Avignon » (figure 1).

2.2 Population et établissements de soins

2.2.1 Densités de population

La zone d'étude représente une population totale de 153 624 habitants au dernier recensement Insee de 1999. La densité globale de cette zone est de 922 habitants par km². Le tableau 1 présente la répartition des populations au sein des sept communes retenues dans la zone d'étude et les densités de population correspondantes.

Tableau 1 - Répartition de la population sur la zone d'étude*, 1999

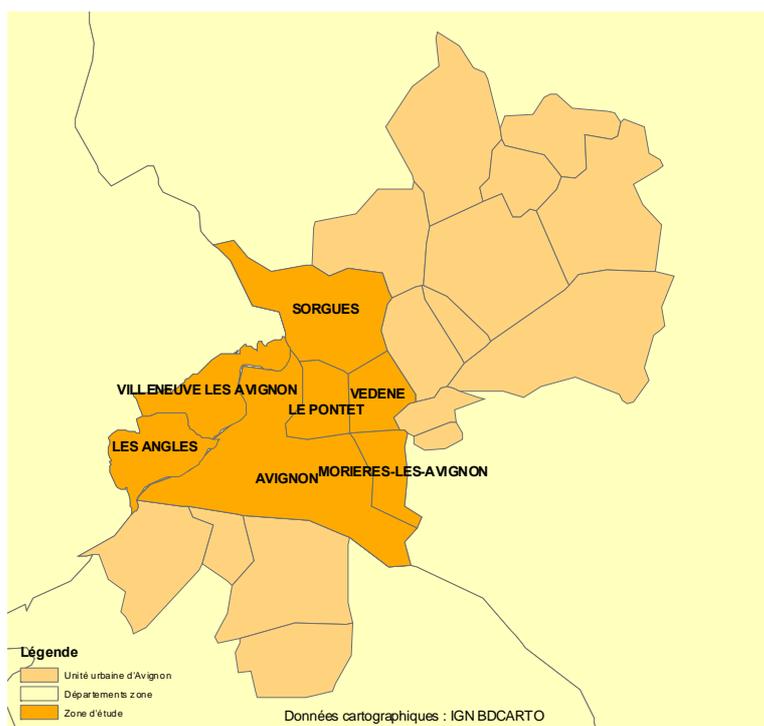
Code Communal	Commune	Population 1999	Superficie (km ²)	Densité hab/km ²
84 007	Avignon	85 937	64,8	1 326,6
84 081	Morières-lès-Avignon	6 546	10,4	631,4
84 092	Le Pontet	15 582	10,8	1 447,9
84 129	Sorgues	17 520	33,4	525,1
84 141	Vedène	8 669	11,2	775,8
30 011	Les Angles	7 576	17,8	426,4
30 351	Villeneuve-lès-Avignon	11 794	18,3	645,4
TOTAL		153 624	166,7	921,6

* Source : Insee, recensement 1999

¹ Source : Insee- Données 1999



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude



Le tableau 2 montre la répartition par tranche d'âge de la population de la zone d'étude.

Tableau 2 : Répartition de la population de la zone d'étude par tranche d'âge*, 1999

Commune	Population 0-14 ans	Population 15-64 ans	Population ≥ 65 ans
Avignon	15 397	55 516	15 024
Morières-lès-Avignon	1 010	4 460	1 076
Le Pontet	2 832	10 506	2 244
Sorgues	3 545	11 304	2 671
Vedène	1 867	5 818	984
Les Angles	1 160	4 952	1 464
Villeneuve-lès-Avignon	1 988	7 541	2 265
Total	27 799 (18 %)	100 097 (65 %)	25 728 (17 %)

* Source : Insee, recensement 1999

2.2.2 Attractivité hospitalière

Le pôle hospitalier d'Avignon attire environ 78 % de la population résidant dans les cinq communes du Vaucluse sélectionnées pour la zone d'étude [8] (annexe 1). Cette information n'est pas disponible pour la population de la zone d'étude résidant dans les deux communes du Gard.

Les établissements de soins présents dans la zone d'étude et susceptibles de recevoir les patients souffrant des pathologies retenues pour cette étude sont au nombre de deux : le centre hospitalier Henri Duffaut et la clinique Rhône-Durance à Avignon.

2.3 Sources de pollution

L'inventaire réalisé en 1999 dans le cadre du programme Escompte 2000-2003 sur l'unité urbaine d'Avignon présente les parts respectives de chaque type de source d'émission [9]. Concernant les émissions de NO_x, le trafic routier reste la principale source d'émission avec près de 50 % des émissions. Pour les émissions de CO, CO₂ et SO₂, principalement issus de combustions par les sources fixes, les secteurs résidentiel et tertiaire (chauffages et production d'eau chaude sanitaire) semblent prépondérants sur l'agglomération d'Avignon. Les émissions issues des secteurs résidentiel et tertiaire sont très variables d'une année à l'autre au regard de la signature climatique de l'année considérée (hiver rigoureux ou non...).

3 Matériel et Méthodes

3.1 Méthodologie de l'EIS

Cette étude repose sur les principes méthodologiques de l'évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine proposée par l'Institut de veille sanitaire.

Cette méthodologie se décompose en quatre étapes : identification des dangers, estimation de l'exposition, choix des relations exposition-risque et caractérisation du risque.

3.1.1 Identification des dangers

Cette étape a pour objectif d'établir les dangers liés à un polluant à partir de données toxicologiques et épidémiologiques.

Les effets connus de la pollution atmosphérique sur la santé à l'échelle des populations urbaines sont les effets sur la mortalité toutes causes, cardiovasculaire et respiratoire ainsi que ceux sur la morbidité étudiés au travers des admissions hospitalières respiratoires et cardiovasculaires.

L'impact sanitaire à court terme de la pollution atmosphérique sur la mortalité se traduit par un nombre de décès anticipés attribuables à un différentiel de pollution donné au cours d'une année. Un décès anticipé est un décès qui n'aurait pas eu lieu ce jour-là si le niveau de pollution avait été inférieur à celui mesuré. La méthodologie utilisée dans le PSAS-9 ne permet pas d'estimer ce délai d'anticipation, mais il serait de l'ordre de quelques semaines à quelques mois selon le type de pathologie à l'origine du décès [11].

3.1.2 Estimation de l'exposition

C'est une étape fondamentale dont l'objectif est de quantifier, à partir du traitement et de l'analyse des données de pollution collectées en routine par le réseau local de mesure de la qualité de l'air, l'exposition à laquelle est soumise la population.

Les indicateurs de pollution retenus pour étudier les effets de la pollution atmosphérique sur la santé sont ceux visés par le décret relatif à la surveillance de la qualité de l'air et de ses effets sur la santé et l'environnement (décret 2002-213 du 15 février 2002).

Cinq polluants mesurés en routine permettent la construction des indicateurs d'exposition pour les études d'impact sanitaire : les particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à 10 microns (PM₁₀), les fumées noires (FN) et le dioxyde de soufre (SO₂) pour la pollution acido-particulaire ; le dioxyde d'azote (NO₂) et l'ozone (O₃) pour la pollution photo-oxydante.

Il est nécessaire de construire, pour chaque polluant, un indicateur d'exposition reflétant au mieux les concentrations auxquelles la population est soumise.

L'estimation de l'exposition repose sur l'hypothèse selon laquelle la moyenne journalière des capteurs sélectionnés constitue une bonne approximation de la moyenne des expositions individuelles journalières.

La méthode utilisée pour la construction des indicateurs d'exposition pour les études à court terme et à long terme est identique, mais, pour le calcul de l'impact sanitaire à long terme, c'est la moyenne annuelle qui est prise en compte. En effet, les relations exposition-risque à long terme disponibles sont fondées sur des moyennes annuelles d'exposition.

3.1.3 Choix des relations exposition-risque

Dans son guide méthodologique [5], l'InVS a retenu des relations exposition-risque issues d'études épidémiologiques, réalisées en population générale, s'intéressant directement aux liens existant entre la pollution de l'air et la santé de l'homme. Les études multicentriques et européennes ont été privilégiées.

Dans les tableaux 3 à 7, les risques relatifs des fonctions exposition-risque apparaissent en gras lorsqu'ils sont significatifs.

3.1.3.1 EIS court terme

Depuis la parution du guide méthodologique de l'InVS en 1999, les fonctions exposition-risque concernant ces indicateurs ont été actualisées, d'une part au niveau européen, dans le cadre du Programme Apeha 2 [10] (Air pollution and health : a European approach), et d'autre part au niveau national, dans le cadre du Programme de surveillance air et santé [11] sur neuf villes françaises (PSAS-9).

- Mortalité totale, cardio-vasculaire et respiratoire

Les fonctions exposition-risque produites lors de la phase II du Psas-9 sont utilisées pour les indicateurs suivants : SO₂, NO₂, O₃. En revanche, pour les PM10, les fonctions exposition-risque du programme Apeha 2 sont utilisées.

Tableau 3 - Risques relatifs de mortalité (et intervalles de confiance à 95 %) estimés pour une exposition de 0-1 jour et pour une augmentation de 10 µg/m³ des indicateurs de pollution

Mortalité	PM10*	SO₂**	NO₂**	O₃**
toutes causes	1,006 [1,004 – 1,008]	1,011 [1,005-1,017]	1,010 [1,007-1,013]	1,007 [1,003-1,010]
cardiovasculaire		1,008 [1,004-1,011]	1,012 [1,005-1,018]	1,011 [1,004-1,018]
respiratoire		1,011 [1,001-1,021]	1,013 [1,005-1,021]	1,012 [1,006-1,019]

* Source : Apeha 2

** Source : PSAS-9

- Admissions hospitalières

Les fonctions exposition-risque, établies pour ces indicateurs sanitaires dans le cadre du PSAS-9, comportent un degré d'incertitude incompatible avec leur utilisation en routine pour la réalisation d'EIS. Les fonctions exposition-risque élaborées dans le cadre d'Apeha 1 [12] et Apeha 2 [13] sont utilisées.

Tableau 4 - Risques relatifs d'admissions hospitalières pour pathologies respiratoires (et intervalles de confiance à 95 %) estimés pour une exposition de 0-1 jour et pour une augmentation de 10 µg/m³ des niveaux des polluants

	Admissions hospitalières pour pathologies respiratoires	
	Chez les 15-64 ans	Chez les 65 ans et plus
SO ₂	1,002 [0,998-1,005] *	1,004 [1,001-1,009] *
FN	1,006 [1,001-1,010] *	1,001 [0,993-1,009] **
PM10		1,009 [1,006-1,013] **
NO ₂	1,002 [0,997-1,007] *	1,004 [0,996-1,012] *
O ₃ été	1,004 [0,998-1,010] *	1,008 [1,004-1,014] *

* Source : Apeha 1

** Source : Apeha 2

Concernant les admissions hospitalières pour pathologies cardio-vasculaires, les fonctions exposition-risque utilisées pour les indicateurs de pollution SO₂ et NO₂ sont celles du guide méthodologique de l'InVS 1999⁵.

Tableau 5 - Risques relatifs d'admissions hospitalières pour pathologies cardiovasculaires (et intervalles de confiance à 95 %) estimés pour une exposition de 0-1 jour et pour une augmentation de 10 µg/m³ des polluants

Polluant	Saison	Pathologies cardiovasculaires tous âges*
SO ₂	Hiver	1,013 [1,006-1,020]
NO ₂	Hiver	1,010 [1,006-1,014]
NO ₂	Eté	1,012 [1,007-1,017]

* Source : PSAS-9

Pour les PM10, des relations exposition-risque ont été produites dans le cadre du programme Apeha 2 [14] pour les indicateurs de pathologies cardiaques uniquement.

Tableau 6 - Risques relatifs d'admissions hospitalières pour pathologies cardiaques (et intervalles de confiance à 95 %) estimés pour une exposition de 0-1 jour et pour une augmentation de 10 µg/m³ des PM10*

	Admissions pour pathologies cardiaques*	
	Tous âges	65 ans et plus
PM10	1,005 [1,002 – 1,008]	1,007 [1,004-1,010]

* Source : Apeha 2

3.1.3.2 EIS long terme

Pour l'évaluation de l'impact sanitaire à long terme, c'est la fonction exposition-risque de l'étude tri-nationale [15], analysant l'impact des PM10 sur la mortalité toutes causes, qui est utilisée. Cette fonction est également retenue par l'OMS.

Tableau 7 - Risques relatifs de mortalité à long terme (et intervalles de confiance à 95 %) estimés pour une augmentation de 10 µg/m³ des PM10

Mortalité	PM10*
toutes causes	1,043 [1,026 – 1,061]

*Source : étude tri-nationale

3.1.4 Caractérisation du risque

Cette étape permet de quantifier l'impact sanitaire en calculant un nombre de cas attribuables à un indicateur d'exposition donné pour un indicateur sanitaire donné, sur la période d'étude choisie. Le nombre d'événements sanitaires attribuables à un niveau de pollution atmosphérique donné est calculé à partir du risque relatif associé au niveau de pollution étudié et du nombre moyen d'événements sanitaires au cours de la période considérée selon la formule suivante :

$$PA = f (RR - 1) / (1 + f (RR - 1)) \quad \text{où}$$

- PA = proportion d'événements sanitaires attribuables au niveau de pollution considéré ;
- RR = risque relatif associé au niveau de pollution et fourni par la courbe dose-réponse ;
- F = fraction de la population exposée.

Dans le cas de la pollution atmosphérique :

- F = 1, car toute la population est considérée comme exposée au niveau de pollution retenu ;
- RR = RR Δ , où RR Δ est l'excès de risque associé au différentiel de pollution Δ étudié, donné par la relation exposition-risque. En effet, le risque relatif n'est pas calculé en référence à un niveau de pollution nul dont le RR serait égal à 1 mais à un niveau de base non nul, fonction de la distribution de l'indicateur considéré au cours de la période d'étude et de l'objectif de l'EIS.

Le nombre d'événements attribuables (NA) est donc calculé, non pas pour un niveau de pollution donné, mais pour un différentiel de pollution donné selon la formule simplifiée suivante :

$$NA = ((RR_{\Delta} - 1) / RR_{\Delta}) \times N \quad \text{où}$$

- N = nombre moyen d'événements sanitaires sur la période considérée.

En pratique, le nombre d'événements sanitaires attribuables à la pollution atmosphérique est calculé pour chacun des indicateurs d'exposition et pour chaque journée de la période d'étude considérée. L'impact sanitaire saisonnier est ensuite obtenu en sommant les événements sanitaires attribuables pour chaque jour.

Ce calcul s'applique pour chacun des indicateurs d'exposition caractérisant la pollution urbaine. Cependant, les risques relatifs associés à chaque indicateur n'étant pas indépendants, les nombres d'événements attribuables aux indicateurs de pollution ne sont pas cumulables. L'impact sanitaire de la pollution atmosphérique est donc estimé comme étant, au minimum, égal au plus grand nombre d'événements attribuables à l'un des indicateurs d'exposition étudié.

3.2 Définition des périodes d'étude

Au moment de la réalisation de l'étude, les données de mortalité ne sont disponibles que pour l'année 1999 et 2000.

Les données de morbidité hospitalière ne sont pas complètes pour l'année 2000, les RSA du deuxième semestre de la clinique Rhône-Durance n'ayant pas été transmis à la tutelle. Cet établissement reçoit une part importante des patients hospitalisés pour pathologies cardiovasculaires. La prise en compte de cette année lors de l'analyse peut conduire à une sous-estimation de l'impact pour ces pathologies.

Deux périodes d'étude sont donc définies : les années 1999-2000 pour l'analyse de la mortalité et l'année 2001 pour l'analyse de la morbidité.

Les saisons tropicales sont définies pour l'été : du 1^{er} avril au 30 septembre de chaque année ; pour l'hiver, la saison est reconstituée à partir de deux périodes : du 1^{er} janvier au 30 mars et du 1^{er} octobre au 31 décembre de chaque année.

3.3 Construction des indicateurs d'exposition

Pour chaque polluant, l'indicateur d'exposition est construit en respectant les critères suivants :

- les niveaux des indicateurs de pollution des stations étudiées doivent être proches et refléter les mêmes phénomènes de pollution ;
- les niveaux journaliers des indicateurs de pollution doivent être bien corrélés dans le temps entre les différentes stations ;
- une station donnée doit pouvoir être qualifiée, du point de vue de son environnement, comme représentative de l'exposition de la population.

Les indicateurs d'exposition sont ensuite construits en calculant la moyenne arithmétique des données journalières des capteurs des stations sélectionnées.

3.3.1 Données de surveillance de la qualité de l'air

La surveillance de la qualité de l'air au niveau des départements du Vaucluse et du Gard est assurée par deux Aasqa : Airmaraix pour le département du Vaucluse et Air-LR pour le département du Gard. Cependant, la station du Gard la plus proche de la zone prédéfinie, située à Saze, n'est pas représentative des niveaux de pollution des villes des Angles et de Villeneuve-lès-Avignon, qui sont, selon Airmaraix, assez bien estimés par les mesures des stations situées dans l'agglomération avignonnaise.

Airmaraix a mis en place progressivement les stations de mesure de la qualité de l'air dans l'agglomération d'Avignon à partir de 1998. Quatre stations de mesure sont actuellement exploitées : trois stations urbaines mesurant la pollution de fond et une station de proximité automobile. Les caractéristiques des stations de mesure présentes sur la zone d'étude sont décrites dans les tableaux 8 et 9. Dans chacune de ces stations, des mesures régulières des polluants sont effectuées en continu et de manière automatique par les capteurs en place. Les polluants mesurés en routine depuis 1998 sont le NO₂, le SO₂, l'O₃, les PM10 et le CO.

Tableau 8 - Description des stations de la zone d'étude*

Station-Localisation	Type de station	Hauteur de prélèvement (m)	Polluants et date de mise en service				
			SO ₂	NO ₂	O ₃	PM 10	CO
Le Pontet	Urbaine	3	Août 98	Août 98	Août 98	Juillet 02	-
Avignon-Arrousaire	Urbaine	4	-	Août 98	Août 98	-	-
Avignon-Mairie	Urbaine	6	Juillet 98	Juillet 98	Juillet 98	Octobre 98	-
Charles de Gaulle-Rocade	Proximité		-	Juin 98	-	-	Juin 98

Source : Airmaraix

Tableau 9 - Méthodes de mesures des différents polluants*

Polluants	Méthode de mesure
SO ₂	Fluorescence UV
NO _x	Chimiluminescence
O ₃	Photométrie UV
PM10	Microbalance à quartz

* Source : Airmaraix

3.3.2 Sélection des stations de mesures

L'objectif étant de construire, à l'échelle d'une unité urbaine, des indicateurs « d'exposition ambiante », seules les stations de fond situées en zone urbaine ont été retenues, *a priori*, pour la construction des indicateurs d'exposition.

Les niveaux de polluants sont exprimés en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les niveaux de NO_2 , de SO_2 et des PM_{10} considérés correspondent à des moyennes journalières. Les niveaux d'ozone correspondent à la valeur journalière maximale des valeurs des moyennes glissantes sur 8 heures. Ces données sont validées par le réseau de mesure Airmaraix et respectent la règle des 75 % concernant les valeurs manquantes [5] (nécessité de disposer au minimum de 18 mesures horaires sur 24 heures ; dans le cas contraire, la valeur journalière est laissée manquante).

Les caractéristiques des niveaux de pollution mesurés par chaque station pour la période 1999-2001 se trouvent en annexes 2 et 3.

Concernant le NO_2 : trois stations urbaines sont disponibles avec des distributions bien corrélées entre elles (coefficient supérieur à 0,74) et des moyennes journalières variant de 28,0 à 31,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les trois stations seront donc utilisées dans la construction de l'indicateur d'exposition au NO_2 .

Concernant l' O_3 : trois stations sont disponibles avec des distributions très fortement corrélées (coefficient supérieur à 0,97) et des moyennes journalières variant de 67,9 à 73,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les trois stations seront donc utilisées dans la construction de l'indicateur d'exposition à l' O_3 .

Concernant le SO_2 : deux stations urbaines sont disponibles avec des distributions faiblement corrélées (coefficient égal à 0,59) et des moyennes journalières variant de 3,0 à 4,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les deux stations seront tout de même utilisées dans la construction de l'indicateur d'exposition SO_2 .

Concernant les PM_{10} : actuellement, deux stations mesurent les PM_{10} sur l'agglomération d'Avignon, mais seule la station d'Avignon-Mairie, mise en service en octobre 1998, dispose de mesures pour les années 1999 à 2001.

3.4 Indicateurs sanitaires

3.4.1 Données de mortalité

Les données de mortalité ont été obtenues auprès du service CepiDC de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) par l'intermédiaire de l'InVS. L'étude concerne la mortalité toutes causes (hors morts violentes et accidentelles), la mortalité pour cause respiratoire et pour cause cardiovasculaire pour les individus domiciliés dans la zone d'étude.

3.4.2 Données de morbidité

Les informations concernant la morbidité hospitalière sont extraites du Programme de médicalisation des systèmes d'information (PMSI) à partir de la base nationale des résumés de sortie anonymisés (RSA) de l'Agence technique de l'information hospitalière (ATIH) par l'intermédiaire de l'InVS. Les admissions hospitalières sont donc comptabilisées, pour les périodes étudiées et les diagnostics retenus, à partir des RSA des patients hospitalisés plus de 24 h et en provenance de leur domicile.

4 Résultats

4.1 Description des indicateurs de pollution

Les statistiques descriptives des indicateurs d'exposition sont présentées dans les tableaux 10 et 11.

Tableau 10 - Description des indicateurs d'exposition, Avignon, 1999-2000

	O3 été	NO2 année	NO2 été	NO2 hiver	SO2 année	SO2 été	SO2 hiver	PM10 année	PM10 été	PM10 hiver
Nombre de jours	366	731	366	365	731	366	365	695	358	337
Minimum*	26	3	4	3	0	0	0	6	6	6
Percentile 5*	53	10	10	13	1	1	1	9	9	9
Percentile 25*	77	19	17	22	2	2	2	13	14	13
Médiane*	92	28	24	33	3	3	3	20	20	19
Percentile 75*	108	37	30	44	6	6	5	28	27	30
Percentile 95*	131	54	41	59	10	10	10	44	38	46
Maximum*	159	80	60	80	21	21	17	78	50	78
Moyenne journalière*	92	29	24	34	4	4	4	22	22	23
Ecart-type*	23,0	13,6	9,9	14,9	3,1	3,2	3,0	11,1	9,0	12,8
% Niveaux journaliers supérieurs aux objectifs de qualité	22 %	19 %	9 %	30 %	0 %	0 %	0 %	27 %	28 %	25 %
% Valeurs manquantes	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	5 %	2 %	7 %

* $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tableau 11 - Description des indicateurs d'exposition, Avignon, 2001

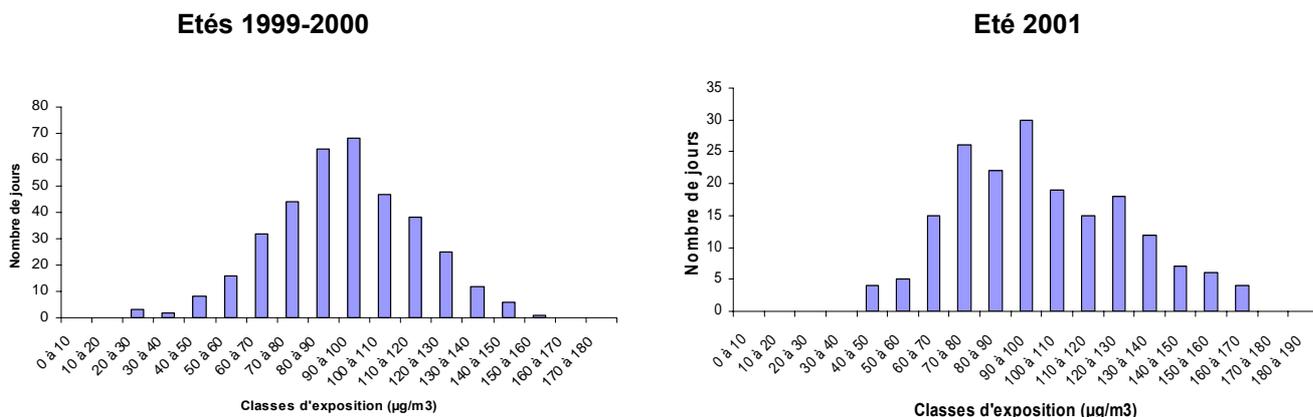
	O3 été	NO2 année	NO2 été	NO2 hiver	SO2 année	SO2 été	SO2 hiver	PM10 année	PM10 été	PM10 hiver
Nombre de jours	183	365	183	182	365	183	182	361	179	182
Minimum*	42	8	8	10	0	0	0	5	5	7
Percentile 5*	61	13	11	16	1		1	9	9	10
Percentile 25*	79	21	18	27	2	2	2	15	15	14
Médiane*	96	29	25	38	3	2	3	20	20	20
Percentile 75*	120	40	32	46	4	4	5	29	28	31
Percentile 95*	150	55	44	62	8	8	7	46	37	52
Maximum*	167	85	56	85	11	10	11	69	51	69
Moyenne journalière*	100	31	25	37	3	3	3	23	22	24
Ecart-type*	27,7	13,2	9,4	13,6	2,1	2,3	1,8	11,3	9,2	13,0
% Niveaux journaliers supérieurs aux objectifs de qualité	34 %	24 %	7 %	42 %	0 %	0 %	0 %	24 %	21 %	26 %
% Valeurs manquantes	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	2 %	0 %

* $\mu\text{g}/\text{m}^3$

L'année 2001 est caractérisée par une photochimie un peu plus importante que les années 1999 et 2000 avec des niveaux d'ozone plus élevés pour les percentiles 75 et 95. Les distributions par classe de l'ozone sont présentées dans la figure 2 pour chaque période. Les distributions du dioxyde d'azote et les PM10 sont présentées dans les figures 3 et 4.

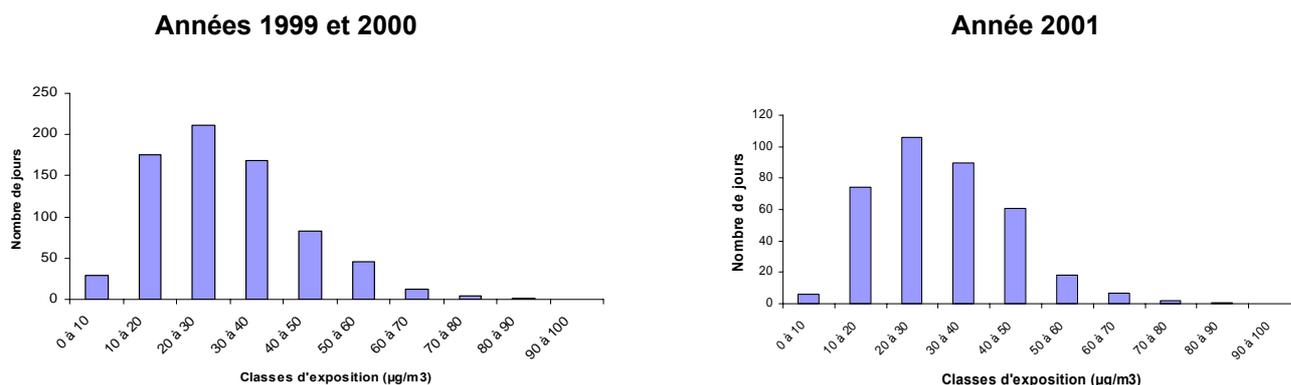
Les niveaux journaliers de l'indicateur d'exposition au SO₂ sont tous inférieurs à la valeur référence de l'objectif de qualité (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et sont si faibles que cet indicateur n'est pas pris en compte dans les calculs d'impact sanitaire.

Figure 2 - Distribution par classe de l'indicateur d'exposition O₃, Avignon



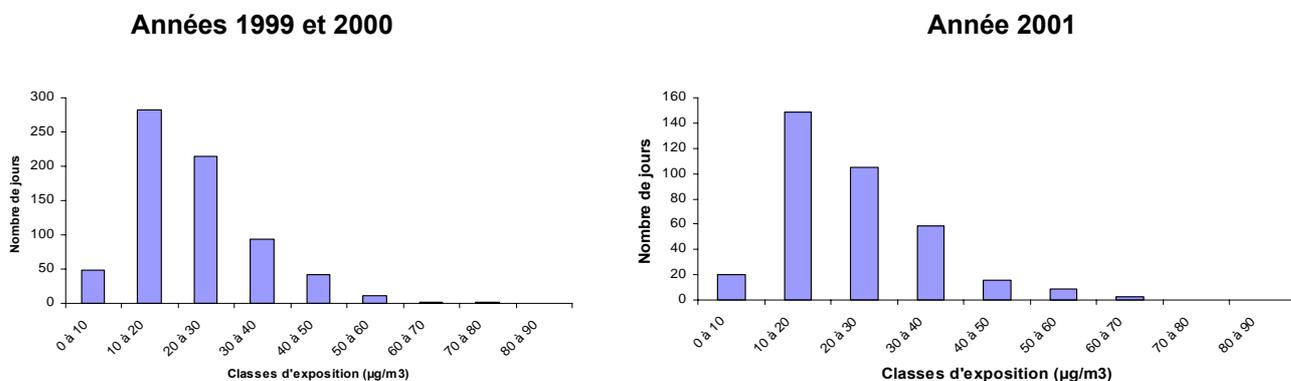
L'objectif de qualité pour l'ozone (110 µg/m³ sur 8 h) est respecté pendant 78 % de la période 1999-2000 et 66 % de la période 2001.

Figure 3 - Distribution de l'indicateur d'exposition NO₂, Avignon



L'objectif de qualité pour NO₂ (40 µg/m³) est respecté pendant 81 % de la période 1999-2000 et 76 % de l'année 2001.

Figure 4 - Distribution de l'indicateur d'exposition PM₁₀, Avignon



L'objectif de qualité pour les PM₁₀ (30 µg/m³) est respecté pendant 72 % de la période 1999-2000 et 76 % de l'année 2001.

4.2 Indicateurs sanitaires

- Mortalité

Les effectifs de mortalité toutes causes (hors morts violentes et accidentelles), de mortalité cardiovasculaire et de mortalité respiratoire sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 12 - Nombre de décès et moyennes journalières, Avignon, 1999-2000

	Nombre total de décès			Moyenne journalière		
	Été	Hiver	Année	Été	Hiver	Année
Mortalité toutes causes	1 120	1 288	2 408	3,1	3,5	3,3
Mortalité cardiovasculaire	348	449	797	1,0	1,2	1,1
Mortalité respiratoire	77	122	199	0,2	0,3	0,3

- Morbidité

Les effectifs de morbidité hospitalière pour cause cardiovasculaire, cardiaque et respiratoire sont présentés dans le tableau 13.

Tableau 13 - Nombre d'admissions hospitalières, Avignon, 2001

	Motifs respiratoires		Motifs cardiovasculaires Tous âges	Motifs cardiaques	
	15-64 ans	≥ 65 ans		Tous âges	≥ 65 ans
Année 2001	332	417	2 052	1 322	941
Été 2001	163	165	974	640	458
Hiver 2001	169	252	1 078	682	483

4.3 Caractérisation du risque à court terme

Pour l'année considérée, l'impact sanitaire est calculé pour chaque indicateur de pollution atmosphérique par rapport à une exposition à un niveau faible de pollution.

Les nombres de cas attribuables calculés pour chaque indicateur d'exposition ne sont pas cumulables et le nombre réel de cas attribuables est au moins égal à la valeur maximale observée parmi les différentes estimations. Les résultats présentés indiquent donc, pour chaque indicateur sanitaire parmi ceux calculés, le nombre de cas attribuables le plus élevé pour l'ensemble des polluants étudiés.

Seuls les résultats significatifs sont présentés par leur estimation centrale et l'intervalle de confiance à 95 %. Les résultats obtenus pour chaque polluant sont présentés en annexe 4.

4.3.1 Estimation de l'impact sanitaire

Les niveaux de référence choisis pour cette estimation globale [5] correspondent à des niveaux faibles de pollution, proches du percentile 5 ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'ozone et $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les autres indicateurs de pollution).

- Mortalité anticipée

Le nombre annuel de décès anticipés attribuables à la pollution atmosphérique est représenté dans le tableau 14.

L'impact sur la mortalité anticipée toutes causes et la mortalité respiratoire est lié à l'indicateur d'exposition NO_2 . Concernant la mortalité cardiovasculaire, c'est l'ozone qui présente l'impact sanitaire le plus important.

Tableau 14 - Nombre moyen annuel de décès anticipés attribuables à la pollution atmosphérique en fonction de l'indicateur sanitaire étudié, Avignon, 1999-2000

Indicateurs sanitaires d'exposition	Nombre annuel de décès attribuables
Mortalité toutes causes	23,2 [16,2–30,2]
Mortalité cardiovasculaire	9,7 [3,5–16,2]
Mortalité respiratoire	2,5 [0,9–4,0]

Ainsi, sur la zone étudiée, le nombre annuel total de décès anticipés attribuables à la pollution atmosphérique s'élève à 23 décès, dont 10 décès par mortalité cardiovasculaire et 2 décès par mortalité respiratoire.

- Morbidité hospitalière

Pour les admissions hospitalières pour motif cardiovasculaire, le calcul est effectué sur l'ensemble de la population tous âges confondus. Pour les admissions pour motif respiratoire, le calcul est effectué pour deux tranches d'âge : 15-64 ans et 65 ans et plus. Enfin, pour les admissions pour motif cardiaque, le calcul effectué pour l'ensemble de la population est ensuite différencié pour la tranche d'âge des 65 ans et plus. Le nombre de cas attribuables pour la mortalité respiratoire chez les 15-64 ans n'étant pas significatif, il n'est pas présenté dans le tableau suivant.

Tableau 15 - Nombre annuel d'hospitalisations attribuables à la pollution atmosphérique en fonction de la pathologie étudiée, Avignon, 2001

Indicateurs sanitaires d'exposition	Nombre annuel de cas attribuables
Morbidité respiratoire	
- 65 ans et plus	7,8 [3,8–13,8]
Morbidité cardiovasculaire	
Été	17,7 [10,3–25,1]
Hiver	29,0 [17,3–40,8]
Morbidité cardiaque	
- tous âges	8,8 [3,5–14,1]
- 65 ans et plus	8,7 [5,0–12,5]

L'impact sanitaire annuel global de la pollution atmosphérique est de 29 admissions hospitalières pour pathologies cardiovasculaires en hiver et 18 en été et de 8 admissions hospitalières pour pathologies respiratoires chez les personnes de 65 ans et plus.

Les admissions hospitalières pour motif cardiaque attribuables à la pollution atmosphérique représentent 9 admissions. Ces chiffres sont du même ordre de grandeur que le nombre d'admissions hospitalières calculées pour les personnes âgées de 65 ans et plus (8,7) ; ceci s'explique par le fait que cette population est à l'origine d'une grande partie des hospitalisations cardiaques (RR plus élevés, cf. tableau 6).

4.3.2 Impact sanitaire par niveaux de pollution

Les niveaux de référence retenus pour les calculs d'impact sanitaire par niveau de pollution correspondent aux objectifs de qualité santé pour O₃, PM10 et SO₂ et à la valeur-limite pour la protection de la santé pour le NO₂. Ces niveaux de référence sont les suivants (décret 2002-213 du 15 février 2002) :

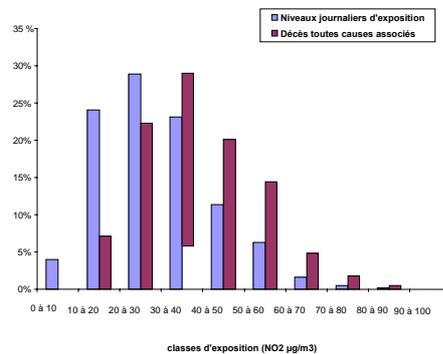
- indicateur O₃ : 110 µg/m³ sur 8 heures ;
- indicateur NO₂ : 40 µg/m³ en moyenne annuelle ;
- indicateur PM10 : 30 µg/m³ en moyenne annuelle ;
- indicateur SO₂ : 50 µg/m³ en moyenne annuelle.

Remarque : ces niveaux de référence sont inférieurs aux seuils de recommandations présentés ci-dessous (décret 2002-213 du 15 février 2002 pour NO₂ et SO₂ ; directive européenne du 12 février 2002 pour l'O₃) :

- indicateur O₃ : 180 µg/m³ en moyenne horaire ;
- indicateur NO₂ : 200 µg/m³ en moyenne horaire ;
- indicateur SO₂ : 300 µg/m³ en moyenne horaire.

Concernant l'impact sur la mortalité, quelque soit le couple indicateur d'exposition-indicateur sanitaire observé, si les jours de forte pollution (supérieurs aux objectifs de qualité) ont un impact sanitaire journalier plus important, leur fréquence plus faible en limite les effets sur une année entière. Ce résultat est illustré par la figure 5.

Figure 5 - Répartition des niveaux d'exposition journaliers au NO₂ et impact des décès toutes causes associés selon les classes d'exposition, Avignon, 1999-2000



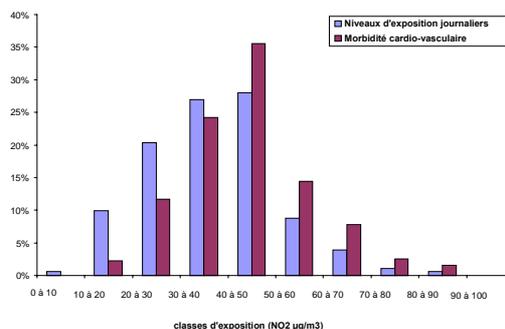
Environ 40 % des décès anticipés toutes causes sont attribuables aux niveaux journaliers de NO₂ supérieurs à l'objectif de qualité (40 µg/m³).

Les figures 6 et 7 illustrent la répartition de l'impact sanitaire en termes de morbidité potentiellement attribuable à la pollution atmosphérique en fonction des niveaux journaliers d'exposition répartis par classe de niveau.

Les niveaux de pollution supérieurs aux objectifs de qualité ont un impact non négligeable sur les admissions hospitalières potentiellement attribuables à la pollution atmosphérique.

En effet, les niveaux journaliers de NO₂ supérieurs à l'objectif de qualité (40 µg/m³) sont responsables de 62 % des admissions hospitalières pour motif cardiovasculaire potentiellement attribuables à la pollution atmosphérique pour l'hiver (figure 6) et de seulement 16 % en été, les niveaux de NO₂ étant plus faibles en cette saison.

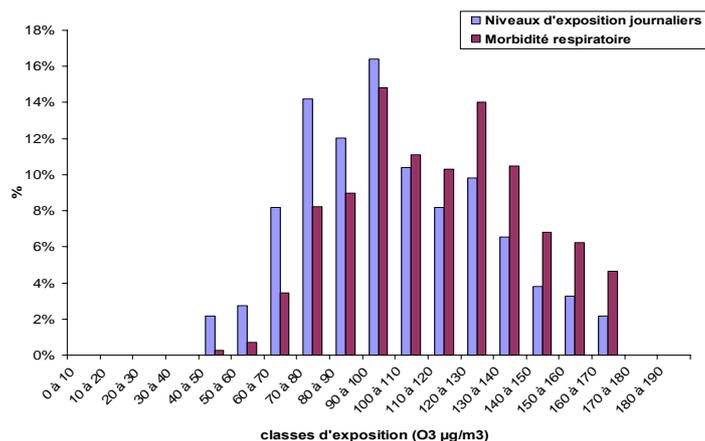
Figure 6 - Répartition des niveaux d'exposition journaliers au NO₂ et impact sur les admissions hospitalières pour motif cardiovasculaire associés, Avignon, hiver 2001



Des résultats identiques ont été observés concernant la morbidité cardiaque. Les niveaux journaliers de PM10 supérieurs à l'objectif de qualité ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont responsables de 53 % des admissions hospitalières pour motif cardiaque potentiellement attribuables à la pollution atmosphérique.

De la même façon, la figure 8 montre que les niveaux journaliers en O_3 supérieurs à l'objectif de qualité ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont responsables de 53 % des admissions hospitalières pour motif respiratoire potentiellement attribuables à la pollution atmosphérique.

Figure 7 - Répartition des niveaux d'exposition journaliers à O_3 et impact sur les admissions hospitalières pour motif respiratoire chez les sujets âgés de 65 ans et plus associés, Avignon, été 2001



4.3.3 Calcul des gains sanitaires liés à une baisse de la pollution atmosphérique

Les gains sanitaires sont calculés pour deux scénarios différents :

Scénario 1 : gain sanitaire lié à la diminution des niveaux dépassant les valeurs des objectifs de qualité pour chaque polluant (décret 2002-213 du 15 février 2002) :

- indicateur O_3 : le niveau de référence est de $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 8 heures ;
- indicateur NO_2 : le niveau de référence est de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle ;
- indicateur PM_{10} : le niveau de référence est de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle.

Scénario 2 : gain sanitaire lié à la diminution de x % de la moyenne annuelle pour chaque polluant : le niveau de référence choisi est une diminution de 25 % pour chaque polluant.

- Gains sanitaires pour la mortalité anticipée

Tableau 16 - Nombre moyen annuel de décès évitables suivant les scénarios de réduction de la pollution, Avignon, 1999-2000

Indicateurs sanitaires d'exposition	Nombre annuel de décès évitables
Mortalité toutes causes	
- Scénario 1	2,5 [1,8–3,2]
- Scénario 2	8,6 [6,0–11,2]
Mortalité cardiovasculaire	
- Scénario 1	0,6 [0,2–0,9]
- Scénario 2	4,1 [1,5–6,8]
Mortalité respiratoire	
- Scénario 1	0,3 [0,1–0,5]
- Scénario 2	0,9 [0,4–1,5]

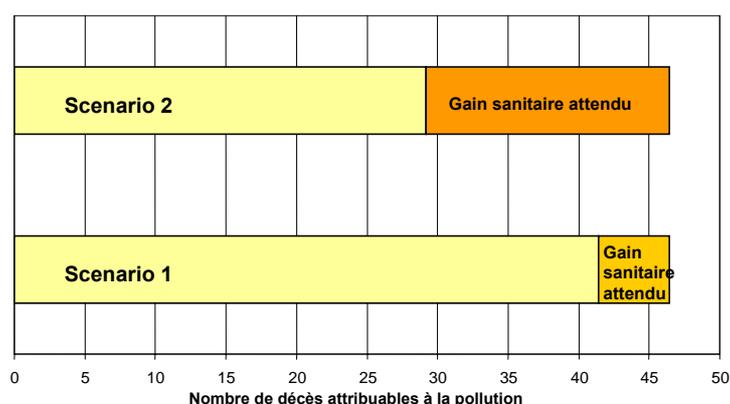
Quel que soit l'indicateur de mortalité observé, le gain sanitaire obtenu par le scénario 2 est toujours supérieur au gain sanitaire obtenu par le scénario 1.

Ainsi, l'application du scénario 2 à la pollution au NO₂ montre un gain sanitaire sur la mortalité toutes causes de l'ordre de 37 %, avec un nombre de décès anticipés évitables égal à 9 cas comparé à 3 cas avec le scénario 1.

Pour les mortalités respiratoire et cardiovasculaire anticipées, les gains sanitaires obtenus avec le scénario 1 sont environ de 6 à 12 % alors qu'ils sont environ de 36 à 42 % avec le scénario 2.

Le gain sanitaire attendu, correspondant au nombre de cas de décès anticipés évitables par la mise en place des scénarios 1 ou 2 peut être représenté sous forme graphique pour chaque scénario, comme l'illustre la figure 8. Le graphe correspond aux gains sanitaires attendus pour la période 1999-2000, soit pour deux années.

Figure 8 - Gains sanitaires concernant la mortalité toutes causes anticipée, Avignon, 1999-2000



- Gains sanitaires pour la morbidité

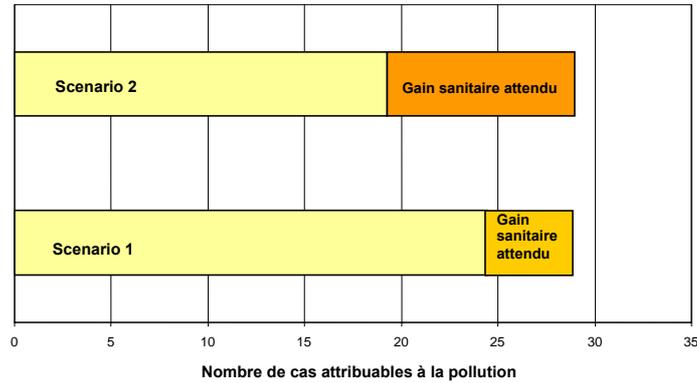
Comme précédemment, les gains sanitaires calculés pour les différents indicateurs de morbidité sont plus importants lorsqu'on applique le scénario 2 aux différents polluants impliqués, les résultats sont présentés pour chaque indicateur sanitaire dans le tableau 17.

Tableau 17 - Nombre d'admissions hospitalières évitables suivant les scénarios de réduction de la pollution, Avignon, 2001

Indicateurs sanitaires d'exposition	Nombre annuel de cas évitables
Morbidité respiratoire 65 ans et plus	
- Scénario 1	1,0 [0,5–1,8]
- Scénario 2	3,1 [1,6–5,5]
Morbidité cardiovasculaire	
Eté	
- Scénario 1	0,5 [0,3–0,7]
- Scénario 2	7,2 [4,2–10,1]
Hiver	
- Scénario 1	4,6 [2,7–6,4]
- Scénario 2	9,7 [5,8–13,6]
Morbidité cardiaque	
Tous âges :	
- Scénario 1	1,5 [0,6–2,5]
- Scénario 2	3,7 [1,5–5,9]
65 ans et plus :	
- Scénario 1	1,5 [0,8–2,2]
- Scénario 2	3,7 [2,1–5,3]

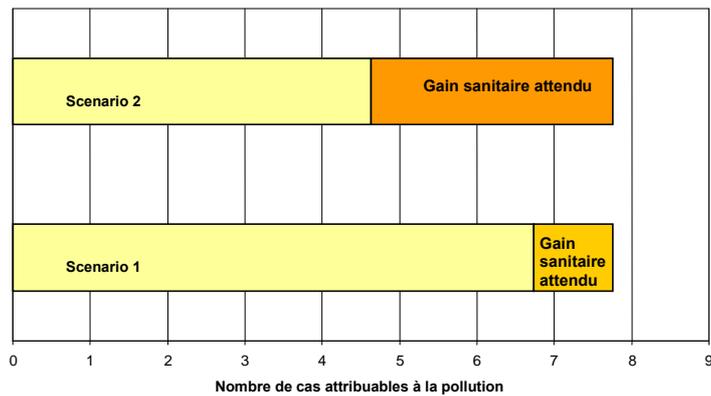
L'efficacité des scénarios est illustrée sous forme graphique (figures 9 à 11).

Figure 9 - Gains sanitaires pour la morbidité cardiovasculaire, Avignon, hiver 2001



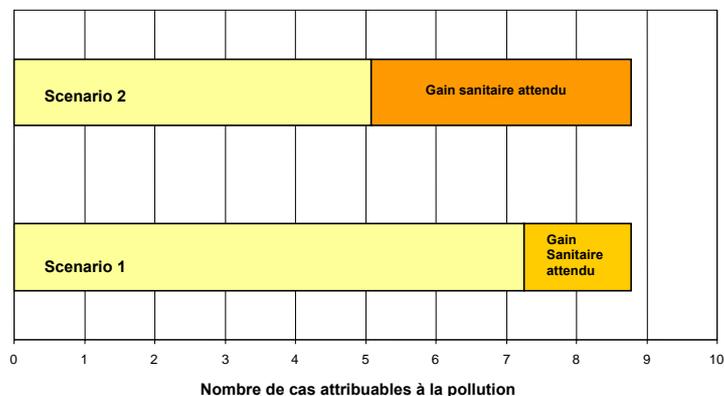
Pour la période hivernale, le scénario 2 permet un gain sanitaire deux fois plus important que celui obtenu par le scénario 1 avec 10 admissions hospitalières pour motifs cardiovasculaires évitables contre 5 avec le scénario 1. En période estivale, le scénario 2 permet un gain sanitaire de 40 % contre 3 % avec le scénario 1.

Figure 10 - Gains sanitaires concernant la morbidité respiratoire chez les sujets âgés de 65 ans et plus, Avignon, 2001



Si l'application du 1^{er} scénario ne permet un gain sanitaire que de l'ordre de 13 %, le gain sanitaire obtenu en appliquant le deuxième scénario est de l'ordre de 40 %, avec 3 admissions hospitalières évitables pour cause respiratoire chez les personnes de 65 ans et plus sur les 7 admissions imputables à la pollution atmosphérique. Le scénario 2 permet donc un gain sanitaire trois fois plus important que le scénario 1.

Figure 11 - Gains sanitaires concernant la morbidité cardiaque, Avignon, 2001



Le scénario 2 permet une nouvelle fois un gain sanitaire plus important (42 %) que celui obtenu avec le scénario 1 (17 %).

4.4 Caractérisation du risque à long terme

Les niveaux de référence choisis pour les différents scénarios de l'EIS long terme sont les suivants :

Scénario 1 : gain sanitaire lié à la diminution de la moyenne annuelle des PM10 au niveau de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valeur-limite européenne pour la protection pour la santé prévue en 2005 ;

Scénario 2 : gain sanitaire lié à la diminution de la moyenne annuelle des PM10 au niveau de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valeur-limite européenne pour la protection pour la santé prévue en 2010 ;

Scénario 3 : gain sanitaire lié à la diminution de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la moyenne annuelle des PM10 ;

Scénario 4 : gain sanitaire lié à la diminution de 25 % de la moyenne annuelle des PM10.

Les résultats obtenus après simulation de ces scénarios sont présentés dans le tableau 18.

Tableau 18 - Nombre annuel de décès toutes causes attribuables (NA) à la pollution atmosphérique pour les quatre scénarios de l'EIS long terme, Avignon, 1999-2000

	NA	IC 95 %	
Scénario 1 : gain sanitaire lié à la diminution de la moyenne annuelle au niveau de la norme européenne 2005 de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0	0
Scénario 2 : gain sanitaire lié à la diminution de la moyenne annuelle au niveau de la norme européenne 2010 de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$	10,19	6,20	14,35
Scénario 3 : gain sanitaire lié à la diminution de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la moyenne annuelle	23,89	14,50	33,74
Scénario 4 : gain sanitaire attribuable à une diminution des niveaux de 25 %	25,19	15,29	35,59

Le gain sanitaire annuel obtenu avec le premier scénario est nul puisque la moyenne annuelle observée sur les données de la période 1999-2000, égale à $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, est inférieure au seuil de la norme européenne applicable en 2005 ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Le scénario 2 permettrait un gain sanitaire à long terme de l'ordre de 10 décès évitables par an.

Le scénario 3 permettrait un gain sanitaire annuel égal à 24 décès évitables.

Les scénarios 3 et 4 présentent des résultats similaires en termes d'impact sanitaire car ces deux scénarios aboutiraient à une moyenne annuelle équivalente de l'ordre de $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, le scénario 4 représentant le meilleur scénario en termes d'impact sanitaire à long terme, permettant d'éviter environ 25 décès.

5 Discussion

Les effets néfastes de la pollution atmosphérique, même à des niveaux faibles de pollution, ont fait l'objet de nombreuses études au cours des 20 dernières années. L'évaluation de l'impact sanitaire ne vise pas à démontrer ces effets mais à les quantifier au niveau local.

Les résultats de cette étude doivent être interprétés en tenant compte des hypothèses, limites et incertitudes liées à la démarche d'une EIS qui entraînent le plus souvent une sous-estimation de l'impact sanitaire global.

5.1 Hypothèses, limites et incertitudes

L'évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine sur la zone d'étude, définie autour de la commune d'Avignon, a été menée en suivant la méthodologie proposée par le guide de l'InVS [4], actualisé en mars 2003 [5]. Les quatre étapes de la démarche décrite dans le guide ont été réalisées : identification des dangers, choix des relations exposition-risque, estimation de l'exposition et caractérisation du risque.

5.1.1 Identification des dangers

Cette première étape présente des limites qui sont à l'origine d'une sous-estimation de l'impact sanitaire global de la pollution atmosphérique :

- l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique en termes de morbidité ne prend en compte que les effets ayant nécessité une hospitalisation. Les effets respiratoires traités en ambulatoire ne sont pas pris en compte alors qu'ils représentent une fraction importante de la morbidité respiratoire ;
- les polluants retenus pour estimer l'exposition ne représentent qu'une fraction des substances chimiques responsables de la pollution atmosphérique ;
- la pollution de l'air à l'intérieur des locaux n'est pas prise en compte pour estimer l'exposition de la population ; seule est étudiée la pollution atmosphérique extérieure de fond.

5.1.2 Relations exposition-risque

La démarche d'une EIS implique de conserver, à chaque étape, la plus grande adéquation entre les caractéristiques de l'EIS et celles des études épidémiologiques ayant produit les fonctions exposition-risque.

Les courbes exposition-risque fondées sur des observations épidémiologiques à des faibles niveaux d'exposition ont été obtenues à partir d'une zone géographique qui peut être soumise à une pollution atmosphérique différente de celle observée dans notre zone d'étude.

Cependant, l'utilisation des courbes exposition-risque obtenues lors des dernières études européenne (Apeha 2) et française (PSAS 9) pour l'estimation de l'impact à court terme limite cet inconvénient. En effet, ces études ont notamment montré la cohérence des relations exposition-risque sur la mortalité et les admissions pour motif respiratoire [9, 10], et ce quelles que soient les caractéristiques locales.

Les incertitudes liées à l'utilisation des fonctions exposition-risque pour la mortalité totale à long terme sont plus importantes. En effet, ces fonctions ont été établies dans des populations américaines potentiellement différentes des populations étudiées ici, en termes de causes de mortalité, d'exposition et de caractéristiques socio-démographiques.

5.1.3 Estimation de l'exposition

L'exposition est estimée pour la population séjournant dans la zone d'étude retenue et non au plan individuel. Un même niveau d'exposition est attribué à chaque individu de cette population, alors que les individus sont exposés, au cours d'une même journée, à des niveaux de pollution variables.

Une des hypothèses formulées en amont de la réalisation de cette étude était que les niveaux de pollution dans les deux villes du Gard étaient bien estimés par les mesures des stations du Vaucluse sélectionnées pour cette étude. Cette hypothèse n'a cependant pas été vérifiée.

Suite aux déplacements personnels ou professionnels, une partie de la population peut s'absenter de la zone d'étude. De même, la zone d'étude retenue peut être une zone attractive importante pour une population ne résidant pas dans la zone d'étude définie.

Il apparaît donc que les incertitudes liées aux mouvements de population peuvent conduire, selon les cas, à surestimer ou sous-estimer l'impact sanitaire.

En outre, le niveau moyen de pollution sur la zone d'étude est calculé à partir des valeurs enregistrées par les stations de mesure. Il est donc dépendant de l'implantation de ces capteurs. De ce fait, une implantation différente des capteurs aurait pu conduire à des estimations de niveaux d'exposition différentes. Néanmoins, l'analyse des données enregistrées permet de penser que l'indicateur d'exposition construit est bien représentatif de l'exposition moyenne de la population.

5.1.4 Caractérisation du risque

La caractérisation du risque s'appuie sur la mise en relation des indicateurs d'exposition avec les indicateurs sanitaires disponibles.

Le nombre d'admissions hospitalières peut être sous-estimé ou surestimé du fait d'erreurs potentielles de diagnostic et/ou de codage, mais ce biais est partiellement contrôlé par le regroupement de ces admissions hospitalières en grandes catégories.

Le dénombrement à partir des bases de données PMSI ne prend en compte que les admissions dans les établissements de soins qui entrent dans le champ du PMSI. De plus, la caractérisation du risque pour l'ensemble de la population résidant dans la zone d'étude repose sur l'hypothèse de la fréquentation des établissements de soins d'Avignon par les habitants des communes de Villeneuve-lès-Avignon et des Angles. Aucune donnée ne nous a permis de confirmer cette hypothèse.

La non prise en compte des séjours dans les urgences, au niveau du PMSI, conduit également à sous-estimer le nombre d'événements sanitaires, et donc l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique.

Concernant la caractérisation du risque à long terme, le résultat présenté dans cette étude devra être confirmé par la suite en utilisant un indicateur d'exposition aux PM10 et des indicateurs de mortalité calculés sur la même période, ce qui n'a pas été possible dans cette étude.

5.2 Interprétation des résultats

Compte tenu des incertitudes et limites présentées ci-dessus, les résultats doivent être interprétés comme des ordres de grandeur de l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé de la population de la zone d'étude définie. Il s'agit d'une estimation fondée sur les acquis scientifiques actuels et les données locales disponibles.

Le calcul d'un risque attribuable à un facteur de risque nécessite que la relation entre l'exposition au facteur de risque et la maladie soit de nature causale. La confrontation des nombreux résultats épidémiologiques aux critères de causalité habituellement retenus a permis de conclure que la pollution atmosphérique constitue bien un facteur de risque pour la santé de nature causale.

Dans la mesure où la population est exposée à un ensemble de polluants pour lesquels aucun indicateur n'est totalement spécifique, les impacts estimés par indicateur de pollution ne s'additionnent pas. Ainsi, si les polluants ont une toxicité propre, leur niveau est avant tout un indicateur d'un mélange chimique complexe. La notion de risque attribuable doit donc s'entendre comme étant une estimation du risque associé à la pollution atmosphérique urbaine, facteur de risque supposé causal, approché indirectement par les indicateurs de pollution. Une action visant à réduire le niveau d'un indicateur sans réduction de la pollution globale ne produirait donc pas les effets positifs escomptés. Une politique de réduction des risques ne peut être envisagée qu'au travers d'une approche globale (réduction des émissions liées à l'ensemble des sources), la pollution atmosphérique dans son ensemble constituant le facteur de risque à maîtriser.

L'estimation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique à court terme se traduit par un nombre de décès anticipés attribuables à un différentiel de pollution donné au cours d'une année. Le nombre de décès anticipés calculé ne s'interprète pas comme un excès absolu de mortalité mais comme une estimation du nombre d'individus qui ont vu, au cours de l'année étudiée, leur espérance de vie réduite d'une durée correspondant à cette anticipation, et qui sont donc décédés prématurément.

6 Conclusion

6.1 Un impact collectif à court terme non négligeable

Sur une année, l'impact global de la pollution atmosphérique pour la zone d'étude définie autour d'Avignon (153 624 habitants) est estimé à 23 décès anticipés (dont 10 décès suite à une pathologie cardiovasculaire et 2 décès suite à une pathologie respiratoire).

Ces chiffres, même s'ils ne constituent que des ordres de grandeur, montrent que la pollution atmosphérique a un impact sanitaire sur une population, même à des niveaux de pollution modérés. En effet, l'estimation de l'impact sanitaire associé aux niveaux d'exposition supérieurs aux objectifs de qualité montre que cet impact apparaît à des niveaux inférieurs aux normes réglementaires actuelles.

6.2 Un impact sanitaire à long terme mesurable

Cette étude a également permis d'estimer l'impact sanitaire à long terme selon différents scénarios de réduction de la pollution atmosphérique. Ces différentes estimations montrent que, plus le niveau de la moyenne annuelle est abaissé, plus le nombre de décès évitables est important. Ainsi, la mise en place de la norme européenne en 2010 devrait permettre d'éviter 10 décès par an, et la diminution de 25 % de la moyenne annuelle permettrait d'en éviter 25.

6.3 Recommandations

Les épisodes de pics de pollution atmosphérique monopolisent souvent l'attention et sont perçus comme des situations « d'alerte sanitaire ». Or si les jours de forte pollution (caractérisés par des niveaux d'exposition journaliers élevés) sont les jours qui présentent des impacts sanitaires journaliers les plus importants, leur faible fréquence en limite l'effet sur l'impact sanitaire global à l'échelle d'une année entière.

Le gain sanitaire associé à différents scénarios de réduction des émissions polluantes permet de comparer l'impact d'une diminution de niveau moyen annuel de pollution atmosphérique à celui d'une suppression des pointes de pollution.

Ainsi, la suppression des niveaux de pollution dépassant les objectifs de qualité permettrait un gain sanitaire de 7 à 17 % maximum (selon les indicateurs sanitaires), tandis qu'une réduction du niveau annuel moyen de pollution de 25 % s'accompagnerait d'une réduction de 33 à 42 % des effets sanitaires.

En pratique, ces résultats montrent qu'une politique locale de gestion des risques liés à la pollution atmosphérique qui ne viserait qu'à éviter les dépassements des seuils réglementaires n'aurait qu'un impact limité en termes de bénéfices sur la santé publique.

Les actions les plus efficaces seront donc celles qui associeront une réduction des émissions à la source de façon quotidienne à une diminution importante du nombre de pics annuels de pollution.

6.4 Des résultats à enrichir et à communiquer

Les résultats présentés dans cette étude pourront être rapidement actualisés en fonction de la disponibilité de données sanitaires plus récentes.

L'estimation de l'impact sanitaire à long terme devra également être revue dès que des fonctions exposition-risque nationales ou européennes auront pu être élaborées de manière à limiter les incertitudes, liées notamment aux différences entre les populations utilisées pour établir les courbes et les populations françaises locales.

La communication des résultats de cette étude aux décideurs, aux médias et au public devrait permettre une meilleure sensibilisation aux dangers de la pollution atmosphérique respirée quotidiennement par l'ensemble de la population, de relativiser les effets sanitaires des pics de pollution et enfin de construire une politique de réduction de la pollution atmosphérique plus efficace en termes d'impact sur la santé publique.

7 Bibliographie

- [1] Plan régional pour la qualité de l'air de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Drire Paca, mai 2000.
- [2] Evaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique sur la zone d'Aix-en-Provence, Cellule interrégionale d'épidémiologie Sud, février 2001.
- [3] Evaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique sur l'agglomération de Martigues, Cellule interrégionale d'épidémiologie Sud, 2000.
- [4] Evaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique sur la zone de Toulon, Institut de veille sanitaire et Cellule interrégionale d'épidémiologie Sud, septembre 2004.
- [5] Evaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine - Guide méthodologique, Institut de veille sanitaire, juillet 1999.
- [6] Evaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine - Actualisation du guide méthodologique : recommandations provisoires pour les évaluations de l'impact sanitaire court terme et long terme, Institut de veille sanitaire, mars 2003.
- [7] Base de données communes - Profil : recensement général de la population 1999, Insee.
- [8] Attractivité géographique des établissements de santé de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Direction régionale des affaires sanitaires et sociales de Provence-Alpes-Côte d'Azur, février 1999.
- [9] Qualité de l'air de l'Est des Bouches-du-Rhône, du Var et du Vaucluse - Bilan d'activités 2002, Airmaraix.
- [10] Katsouyanni K, Touloumi G, Samoli E, Gryparis A, Le Tertre A, Monopolis Y, Rossi G, Zmirou D, Ballester F, Boumghar A, Anderson HR, Wojtyniak B, Paldy A, Braunstein R, Pekkanen J, Schindler C, Schwartz J. *Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality : results from 29 European cities within the Apeha2 project. Epidemiology*, 2001 Sep;12(5):521-31.
- [11] Surveillance des effets sur la santé liés à la pollution atmosphérique en milieu urbain, PSAS 9 phase II, Institut de veille sanitaire, juin 2002.
- [12] Spix C, Anderson HR, Schwartz J, Vigotti MA, LeTertre A, Vonk JM, TouloumiG, Balducci F, Piekarski T, Bacharova L, Tobias A, Ponka A, Katsouyanni K. *Short-term effects of air pollution on hospital admissions of respiratory diseases in Europe : a quantitative summary of Apeha study results. Air pollution and health : a European approach. Arch Environ Health*, 1998 Jan-Feb;53(1):54-64.
- [13] Atkinson RW, Anderson HR, Sunyer J, Ayres J, Baccini M, Vonk JM, Boumghar A, Forastiere F, Forsberg B, Touloumi G, Schwartz J, Katsouyanni K. *Acute effects of particulate air pollution on respiratory admissions : results from Apeha2 project. Air pollution and health : a European approach. Am J Respir Crit Care Med.*, 2001 Nov 15;164 (10 Pt 1):1860-6.
- [14] Le Tertre A, Medina S, Samoli E, Forsberg B, Michelozzi P, Boumghar A, Vonk JM, Bellini A, Atkinson R, Ayres JG, Sunyer J, Schwartz J, Katsouyanni K. *Short-term effects of particulate air pollution on cardiovascular diseases in eight European cities. J Epidemiol Community Health*, 2002 Oct;56(10):773-9.
- [15] Künstli N, Kaiser R, Medina S et al. Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet* 2000;356:795-801.

8 Annexes

**Annexe 1 Navettes domicile- travail
Attractivité hospitalière**

Annexe 2 Distribution des indicateurs d'exposition par station

Annexe 3 Coefficients de corrélation entre les stations de mesure

Annexe 4 Nombre de décès anticipés et d'admissions hospitalières par polluant et pour chaque indicateur sanitaire

Annexe 1

Navettes domicile-travail*, 1999

Commune de provenance	Lieu de résidence-Lieu de travail		
	Total déplacements	Déplacements dans la même commune	Déplacements dans la zone d'étude
Avignon	28 103	20 590 (73 %)	23 375 (83 %)
Morières-lès-Avignon	2 690	546 (20 %)	2 272 (85 %)
Le Pontet	6 024	2 104 (35 %)	5 136 (85 %)
Sorgues	5 680	2 312 (41 %)	4 476 (79 %)
Vedène	3 510	779 (22 %)	2 797 (80 %)
Les Angles	3 042	545 (18 %)	2 368 (78 %)
Villeneuve-lès-Avignon	4 601	1 114 (24 %)	3 647 (79 %)
TOTAL	53 650	-	44 071 (82 %)

*Source : Insee

Attractivité hospitalière*, 1999

	Pôle hospitalier d'Avignon	Pôle Hospitalier de Marseille	Pôle hospitalier de Carpentras
Avignon	84 %	5 %	1 %
Morières-lès-Avignon	80 %	4 %	1 %
Le Pontet	79 %	6 %	1 %
Sorgues	72 %	5 %	1 %
Vedène	77 %	4 %	2 %
Les Angles	NC	NC	NC
Villeneuve-lès-Avignon	NC	NC	NC

*Source : Drass Paca

NC = Non communiqué

Annexe 2

Distribution de l'indicateur d'exposition O₃ en µg/m³ par station, Avignon, années 1999 à 2001

	Avignon-Arrousaire	Avignon-Mairie	Le Pontet
Moyenne	69,8	73,5	67,9
Médiane	69,0	72,0	66,0
Ecart-type	33,4	34,1	34,8
Centile 5	15,5	18,5	10,0
Centile 25	46,0	49,0	44,0
Centile 75	93,0	97,0	93,0
Centile 90	114,0	120,0	115,0
Centile 95	127,0	133,0	129,0
Minimum	2,0	4,0	1,0
Maximum	167	172	173
% Valeurs manquantes	2,5 %	0,5 %	0,4 %

Distribution de l'indicateur d'exposition NO₂ en µg/m³ par station, Avignon, années 1999 à 2001

	Avignon-Arrousaire	Avignon-Mairie	Le Pontet
Moyenne	30,0	28,0	31,6
Médiane	28,0	26,0	30,0
Ecart-type	15,0	13,8	14,2
Centile 5	9,0	9,0	11,0
Centile 25	19,0	17,0	22,0
Centile 75	39,0	37,0	40,0
Centile 90	50,0	47,0	50,0
Centile 95	57,0	54,0	59,0
Minimum	1,0	1,0	1,0
Maximum	92,0	79,0	88,0
% Valeurs manquantes	0,9 %	4,3 %	1,5 %

Distribution de l'indicateur d'exposition SO₂ en µg/m³ par station, Avignon, années 1999 à 2001

	Avignon-Mairie	Le Pontet
Moyenne	3,0	4,3
Médiane	2,0	3,0
Ecart-type	2,5	3,7
Centile 5	0	0
Centile 25	1,0	2,0
Centile 75	4,0	6,0
Centile 90	6,0	9,0
Centile 95	8,0	12,0
Minimum	0	0
Maximum	18,0	29,0
% Valeurs manquantes	3,0 %	0,7 %

Distribution de l'indicateur d'exposition PM₁₀ en µg/m³ par station, Avignon, années 1999 à 2001

	Avignon-Mairie
Moyenne	22,4
Médiane	20,0
Ecart-type	11,2
Centile 5	9,0
Centile 25	14,0
Centile 75	28,0
Centile 90	38,0
Centile 95	45,0
Minimum	5,0
Maximum	78,0
% Valeurs manquantes	3,6 %

Annexe 3

Coefficients de corrélation entre les stations de mesure, années 1999 à 2001

NO₂	Avignon-Arrousaire	Avignon-Mairie	Le Pontet
Avignon-Arrousaire	1	0,92	0,78
Avignon-Mairie	0,92	1	0,74
Le Pontet	0,78	0,74	1

O₃	Avignon-Arrousaire	Avignon-Mairie	Le Pontet
Avignon-Arrousaire	1	0,98	0,98
Avignon-Mairie	0,98	1	0,97
Le Pontet	0,98	0,97	1

SO₂	Avignon-Mairie	Le Pontet
Avignon-Mairie	1	0,59
Le Pontet	0,59	1

Annexe 4

Nombre annuel de décès anticipés par polluant pour chaque indicateur sanitaire étudié et chaque saison étudiée, Avignon, 1999-2000

Indicateurs sanitaires d'exposition	Nombre annuel de décès attribuables
Mortalité toutes causes	
O ₃ été	20,1 [8,6–29,0]
NO ₂ année	23,2 [16,2–30,2]
PM10 année	8,7 [5,8–11,7]
Mortalité respiratoire	
O ₃ été	2,3 [1,1–3,8]
NO ₂ année	2,5 [0,9–4,0]
Mortalité cardiovasculaire	
O ₃ été	9,7 [3,5–16,2]
NO ₂ année	9,2 [3,8–13,8]

Nombre annuel d'admissions hospitalières par polluant pour chaque pathologie étudiée et chaque saison étudiée, Avignon, 2001

Indicateurs sanitaires d'exposition	Nombre annuel de cas attribuables
Morbidité respiratoire 15-64 ans	
O ₃ été	3,9 [-1,9–9,9]
NO ₂ année	1,4 [-2,1–5,0]
Morbidité respiratoire 65 ans et plus	
O ₃ été	7,8 [3,8–13,8]
NO ₂ année	3,5 [-3,5–10,7]
PM10 année	5,0 [3,3–7,2]
Morbidité cardiovasculaire	
NO ₂ hiver	29,0 [17,3–40,8]
NO ₂ été	17,7 [10,3–25,1]
Morbidité cardiaque tous âges	
PM10 année	8,8 [3,5–14,1]
Morbidité cardiaque 65 ans et plus	
PM10 année	8,7 [5,0–12,5]