



HAL
open science

Quantification des années de vie perdues attribuables aux expositions chroniques à la pollution atmosphérique urbaine: Le cas de Nantes

Yvonnick Guillois-Becel, Daniel Eilstein, Philippe Glorennec, Agnès Lefranc

► To cite this version:

Yvonnick Guillois-Becel, Daniel Eilstein, Philippe Glorennec, Agnès Lefranc. Quantification des années de vie perdues attribuables aux expositions chroniques à la pollution atmosphérique urbaine: Le cas de Nantes. *Environnement, Risques & Santé*, 2007, 6 (3), pp.189-197. hal-03865837

HAL Id: hal-03865837

<https://ehesp.hal.science/hal-03865837>

Submitted on 28 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Quantification des années de vie perdues attribuables aux expositions chroniques à la pollution atmosphérique urbaine : le cas de Nantes

YVONNICK GUILLOIS-BECEL^{1*}
DANIEL EILSTEIN²
PHILIPPE GLORENNEC³
AGNÈS LEFRANC²

¹ Direction régionale des affaires sanitaires et sociales de Bretagne, Cellule interrégionale d'épidémiologie Ouest, 20, rue d'Isly, CS 84224, 35042 Rennes cedex
<yvonnick.guillois-becel@sante.gouv.fr>

² Institut de veille sanitaire (InVS), Département santé environnement, 12, rue du Val d'Osne, 94415 Saint-Maurice cedex
<d.eilstein@invs.sante.fr>
<a.lefranc@invs.sante.fr>

³ École nationale de la santé publique (ENSP), Avenue du Pr. Léon Bernard, CS74312, 35043 Rennes cedex
<Philippe.Glorennec@ensp.fr>

Tirés à part :
Y. Guillois-Becel

Résumé. *Position du problème :* lors de l'élaboration en France des plans régionaux pour la qualité de l'air, des évaluations de l'impact sanitaire à court terme de la pollution atmosphérique urbaine ont été réalisées à partir de relations exposition-risque issues d'études de séries temporelles. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a suggéré de prendre également en compte les relations exposition-risque issues d'études de cohortes afin d'évaluer l'impact des expositions chroniques et de caractériser l'anticipation des décès attribuables à la pollution atmosphérique. L'article présente la démarche mise en œuvre à Nantes pour caractériser l'impact à long terme de la pollution atmosphérique en nombre d'années de vie perdues en complément à l'évaluation du nombre de décès attribuables. *Méthode :* la population d'étude est répartie en cohortes de naissance. Pour chaque cohorte, deux courbes de survie sont construites à partir des conditions actuelles de mortalité. La première des courbes est déterminée à partir des niveaux actuels d'exposition à la pollution atmosphérique tandis que la seconde est établie pour des expositions à un niveau de référence plus faible. Les surfaces entre les deux courbes de survie représentent les années de vie dont la perte est attribuable à la pollution atmosphérique urbaine. *Résultats :* l'impact de la pollution atmosphérique a été évalué de l'ordre de 56 décès anticipés, soit environ 2,0 % des décès parmi les Nantais âgés de plus de 30 ans. Le nombre d'années de vie perdues par cette population a été estimé à 27,2 années en 1999 et 2 388,1 années sur la période 1999-2008. La réduction d'espérance de vie à 30 ans a été évaluée de l'ordre de 0,3 année. *Conclusions :* après identification et discussion des erreurs et incertitudes, cette étude a confirmé l'existence à Nantes d'un impact sanitaire non négligeable de la pollution atmosphérique et réaffirmé le rôle essentiel des expositions chroniques dans la manifestation de cet impact. La quantification du nombre d'années de vie perdues et de la réduction d'espérance de vie offre, dans le cadre des études locales, des arguments nouveaux pour réfuter l'hypothèse d'un impact sanitaire limité à des décès précipités de personnes en fin de vie. Malgré des niveaux de pollution modérés, les gains sanitaires attendus à Nantes, sont du même ordre de grandeur, voire supérieurs, à ceux évalués dans 9 autres villes françaises pour une même réduction des expositions à la pollution atmosphérique.

Mots clés : années de vie perdues ; effets à long terme ; espérance de vie ; pollution de l'air ; tables de survie.

Abstract. *Quantification of years of life lost attributable to chronic air pollution exposure in a health impact assessment: the case of Nantes*

Background: When French regional planning for air quality first began, exposure-response functions from time-series studies were used to assess the short-term health impact of urban air pollution. The World Health Organisation also suggests that exposure-response functions from cohort studies be taken into account to evaluate the effects of chronic exposure and to quantify the prematurity of deaths related to chronic exposure to air pollution. This work characterises the long-term effects of air pollution in Nantes by considering years of life lost as well as the number of attributable deaths. Methods: The study population is classified in birth cohorts. For each cohort, 2 survival curves are built based on current mortality conditions: the first is built for current exposure to air pollution and the second for exposure to a lower reference level of

air pollution. The area between the 2 curves represents years of life lost attributable to urban air pollution. Results: The estimated number of premature deaths due to air pollution is approximately 56, or about 2.0% of the deaths of those older than 30 years. The health impact on the Nantes population is estimated at 27.2 years of life lost attributable to urban air pollution in 1999 and 2,388.1 years of life lost for the 1999-2008 period. This amounts to a decrease of roughly 4 months in the life expectancy of those aged 30 years. Conclusion: This study, which also identifies and discusses relevant errors and uncertainty, confirmed that air pollution in Nantes has significant health effects and that chronic exposure plays an essential role in this impact. The number of years of life lost and the reduction in life expectancy provide new reasons to reject the assumption that health effects are limited to the premature deaths of terminally-ill people. The expected health gains in Nantes associated with reduced although still moderate air pollution levels are on the same scale as, and possibly better than, those found in 9 other French cities for similar air pollution decreases.

Key words: air pollution; long term effects; life expectancy; life tables; years of life lost.

Des évaluations de l'impact sanitaire à court terme de la pollution atmosphérique urbaine ont été réalisées pour contribuer aux plans régionaux pour la qualité de l'air (PRQA) en application de la loi sur l'air de décembre 1996 [1]. Ces études locales reposaient sur l'utilisation de relations exposition-risque, issues d'études de séries temporelles, estimées pour des décalages d'exposition à la pollution urbaine extérieure de 0-1 jour (exposition du jour même et du jour précédent). Elles exprimaient l'impact sanitaire sous la forme de nombres de décès anticipés et d'admissions hospitalières pour des motifs cardiovasculaires et respiratoires.

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a suggéré de prendre en compte les effets sanitaires à long terme engendrés par des expositions chroniques à la pollution atmosphérique urbaine à partir d'une méthode reposant sur la construction de tables de survie [2]. Une telle approche exploite des relations exposition-risque, issues d'études de cohortes, pour lesquelles l'exposition est évaluée à partir de concentrations dans l'atmosphère en PM₁₀ ou PM_{2,5} – particules de diamètre inférieur à 10 et 2,5 µm respectivement – moyennées sur plusieurs années [3]. Elle permet de compléter le calcul du nombre de décès attribuables aux expositions chroniques à la pollution atmosphérique par le nombre d'années de vie perdues caractérisant le degré d'anticipation des décès.

Quelques travaux utilisent en partie les possibilités offertes par la méthode des tables de survie pour évaluer une réduction de l'espérance de vie attribuable à la pollution atmosphérique urbaine [4-8].

En France, les 9 agglomérations urbaines participant au programme APHEIS¹-3 [9, 10] offrent l'exploitation la plus complète de la méthode des tables de survie : l'évaluation d'une réduction de l'espérance de vie est complétée par la quantification du

nombre d'années de vie perdues. Aucune de ces 9 villes n'est située dans le nord-ouest de la France où le climat océanique offre des conditions favorables à la dispersion des polluants urbains.

Cet article présente l'impact sanitaire à long terme de la pollution atmosphérique à Nantes, où prédomine le climat océanique, et met en évidence l'intérêt de compléter les évaluations antérieures portant sur les effets à court terme de la pollution atmosphérique [11] par la quantification des années de vie perdues.

Matériel et méthode

Principe

Caractérisation de l'impact sanitaire en nombre de décès

Le nombre de décès attribuables aux expositions à la pollution atmosphérique au niveau I est obtenu par comparaison avec un niveau référent de pollution atmosphérique de la manière suivante [3, 12] :

$$d_{att.}(I) = \frac{RR_{\Delta} - 1}{RR_{\Delta}} \times d(I) \quad (1)$$

Où :

- $d_{att.}(I)$ est un nombre de décès attribuable au différentiel Δ d'exposition chronique entre le niveau étudié (I) et le niveau référent (Iref) de pollution atmosphérique ;
- $d(I)$ est un nombre de décès observés au niveau I d'exposition ;
- RR_{Δ} est un risque relatif associé à la mortalité pour un différentiel Δ d'exposition chronique à la pollution atmosphérique.

Caractérisation de l'impact sanitaire en nombre d'années de vie perdues

La population d'étude est répartie en cohortes C_a regroupant les individus nés l'année a. Pour chacune des cohortes, une courbe de survie est établie à partir des conditions actuelles de mortalité et d'exposition à la pollution atmosphérique. Caracté-

¹ APHEIS : Air Pollution and Health: A European Information System. Mis en place en 1999, le programme APHEIS a pour but de fournir aux décideurs européens, aux professionnels de la santé et de l'environnement, et au grand public, des informations actualisées et faciles d'utilisation dans le domaine de la pollution de l'air et de ses effets sur la santé publique.

riser l'impact sanitaire à long terme sous forme d'un nombre d'années de vie perdues consiste à comparer ces courbes à celles qui auraient été obtenues pour une exposition à un niveau référent de pollution atmosphérique.

Pour une cohorte C_a , la surface entre les deux courbes de survie sur une période donnée représente un nombre d'années de vie dont la perte est attribuable au différentiel d'exposition entre le niveau étudié (I) et le niveau référent (Iref) de pollution atmosphérique (figure 1) [13].

Lorsque les deux courbes de survie sont construites jusqu'à extinction des effectifs, le nombre d'années de vie perdues peut être rapporté aux effectifs initiaux de la cohorte pour déterminer une réduction de l'espérance de vie attribuable au différentiel d'exposition.

Les effectifs des cohortes C_a et la répartition par âge des décès permettent de construire les courbes de survie associées aux conditions actuelles de mortalité et d'exposition à la pollution atmosphérique.

Le nombre de décès $d_x(I_{ref})$ attendus à l'âge x , pour une exposition au niveau référent de pollution atmosphérique est obtenu de la manière suivante [3, 12] :

$$d_x(I_{ref}) = \frac{d_x(I)}{RR_{\Delta}} \quad (2)$$

Où :

- $d_x(I)$ est le nombre de décès observés à l'âge x pour une exposition au niveau I étudié ;
- RR_{Δ} est le risque relatif associé à la mortalité totale pour un différentiel Δ d'exposition chronique à la pollution par rapport au niveau référent Iref.

Les effectifs des cohortes C_a et le nombre calculé de décès $d_x(I_{ref})$ permettent alors de construire les courbes de survie associées à une exposition au niveau référent de pollution atmosphérique.

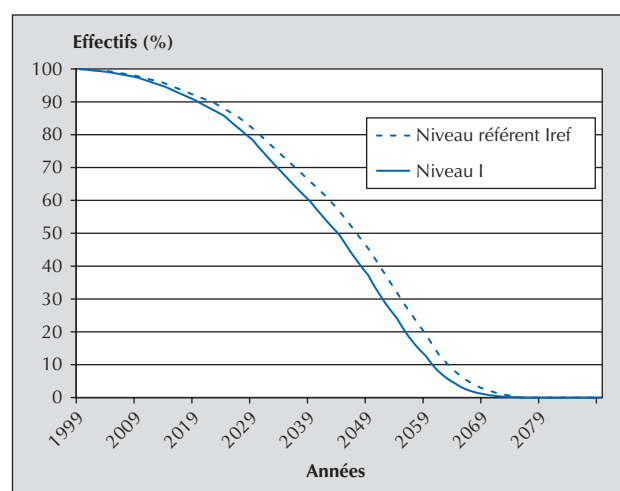


Figure 1. Courbes de survie de la cohorte C_a exposée aux niveaux I et Iref de pollution atmosphérique urbaine.

Figure 1. Survival curves for the C_a cohort exposed to levels I and Iref of urban air pollution.

L'évaluation de l'impact sanitaire à long terme sous la forme de nombres de décès ou d'années de vie perdues nécessite donc de sélectionner des relations exposition-risque, puis d'évaluer les expositions à la pollution atmosphérique. L'évaluation du nombre d'années de vie perdues attribuables à la pollution atmosphérique requiert un travail spécifique de construction et comparaison de courbes de survie.

Sélection des relations exposition-risque

L'étude de cohorte la plus puissante a été publiée par Pope en 2002 et propose plusieurs relations exposition-risque (RR_{10}) associées à la mortalité totale, mortalité cardio-pulmonaire et mortalité par cancer du poumon pour une augmentation de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ des concentrations en $\text{PM}_{2,5}$ [14]. Ces relations proviennent du suivi pendant la période 1983-1998 de la mortalité au sein de la cohorte de l'American Cancer Society composée d'adultes de plus de 30 ans résidant dans 151 villes américaines.

Les risques relatifs RR_{10} utilisés à Nantes (tableau 1) proviennent des travaux de Pope. Ils ont également été employés dans le cadre du projet APHEIS-3 évaluant l'impact à long terme de la pollution atmosphérique dans 23 villes européennes [9, 10]. Les trois relations exposition-risque ont été utilisées pour évaluer le nombre de décès attribuables aux expositions chroniques à la pollution atmosphérique. Seule la relation correspondant à la mortalité totale a été exploitée pour calculer le nombre d'années de vie perdues.

Le risque relatif associé à un différentiel d'exposition Δ par rapport au niveau référent de pollution atmosphérique s'exprime à partir du risque relatif RR_{10} [3, 12] :

$$RR_{\Delta} = \exp\left(\frac{\Delta \times \ln RR_{10}}{10}\right) \quad (3)$$

Évaluation des expositions

Zone d'étude

La zone d'étude doit vérifier des conditions d'homogénéité de la densité de population et des niveaux de pollution atmosphérique [3, 12]. Elle a ici été limitée à la commune de Nantes (270 251 habitants – recensement de la population, 1999 – Institut national de la statistique et des études économiques).

Tableau 1. Risques relatifs fournis pour une augmentation de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ des $\text{PM}_{2,5}$ (d'après [13]).

Table 1. Relative risks reported for an increase of $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in the concentration of $\text{PM}_{2,5}$ (from [13]).

	RR_{10}	IC 95 % ^a
Mortalité totale	1,06	1,02-1,11
Mortalité cardio-pulmonaire	1,09	1,03-1,16
Mortalité par cancer du poumon	1,14	1,04-1,23

^a Intervalle de confiance à 95 %.

^a 95% confidence interval.

Période d'étude

Le nombre de décès attribuables à la pollution atmosphérique urbaine a été estimé en 1999. Le nombre d'années de vie perdues a également été calculé pour la population nantaise de 1999 sur des périodes de 1 et 10 ans, c'est-à-dire en 1999 et sur la période 1999-2008. De même, une réduction de l'espérance de vie à 30 ans, en 1999, a été estimée.

Indicateur d'exposition

Au niveau de l'agglomération nantaise, la surveillance de la qualité de l'air est assurée par l'association Air Pays de la Loire qui disposait d'une station urbaine mesurant des concentrations en $PM_{2,5}$ représentatives des immissions ambiantes.

La moyenne arithmétique des concentrations en $PM_{2,5}$ établie sur la période du 9 avril 2002 au 8 avril 2003, a fourni l'indicateur d'exposition I.

Le programme APHEIS-3 a quantifié les gains sanitaires associés à des réductions de $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ des expositions chroniques aux $PM_{2,5}$ dans les 23 villes européennes. Par homogénéité avec ce programme, l'impact sanitaire a été quantifié par rapport à un niveau référent Iref inférieur de $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à l'indicateur d'exposition I.

Construction et comparaison des courbes de survie

La construction et la comparaison des courbes de survie ont été restreintes aux cohortes C_{1900} à C_{1978} . Les cohortes nées avant 1900, dont le recensement de 1999 ne fournissait pas les effectifs, ainsi que les cohortes nées après 1978, âgées de moins de 30 ans en 2008 et pour lesquelles les relations de Pope n'étaient donc pas valides, ont été exclues de la démarche.

La construction des courbes de survie aurait pu être affectée d'erreurs aléatoires d'autant plus importantes que les effectifs de la population d'étude étaient faibles. Aussi, afin de limiter l'impact des erreurs aléatoires, les cohortes C_{1900} à C_{1978} ont été associées à la cohorte C_{1979} pour être réunies par groupe de 5 (cohortes C_{1900} à C_{1904} ; C_{1905} à C_{1909} , [...], C_{1975} à C_{1979}). De même, les données de mortalité de l'année 1999 ont été regroupées en tranches d'âge quinquennales (20 à 24 ans, 25 à 29 ans, [...], 90 à 94 ans, 95 à 99 ans).

La construction des courbes de survie des cohortes C_{1900} à C_{1978} exposées aux niveaux I et Iref a été réalisée en exploitant ces données agrégées (effectifs, mortalité) selon trois étapes successives :

- pour chacune des cohortes C_{1900} à C_{1978} , ont été calculés des effectifs en début d'année 1999 ;
- les quotients de mortalité en 1999 (complément à 1 des probabilités de survie) ont ensuite été calculés ou obtenus par extrapolation pour les grands âges (figure 2) ;
- enfin, les courbes de survie ont été construites en appliquant de façon itérative les probabilités de survie aux effectifs lissés du début de l'année 1999 (tableau 2).

Pour chaque cohorte, les aires entre les courbes de survie construites sur des périodes de 1 et 10 ans pour des expositions aux niveaux I et Iref ont été calculées selon la méthode des trapèzes. Ces surfaces déterminées pour les cohortes C_{1900} à

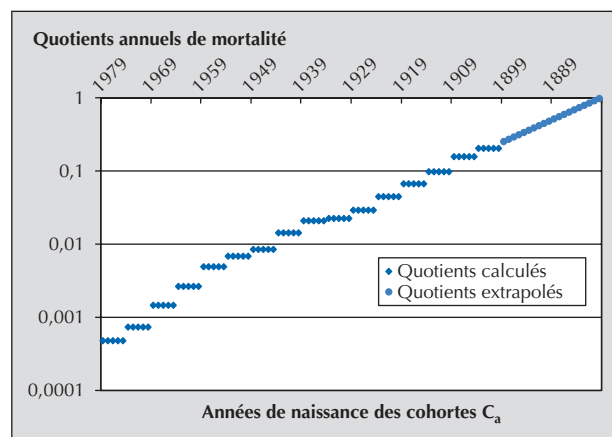


Figure 2. Quotients annuels de mortalité des cohortes C_{1978} à C_{1880} exposées au niveau I. Nantes, 1999.

Figure 2. Annual mortality quotients of cohorts C_{1978} to C_{1880} exposed to level I. Nantes, 1999.

C_{1978} ont ensuite été sommées pour fournir le nombre d'années de vie perdues à l'échelle de la population nantaise.

Parallèlement, les courbes de survie de la cohorte C_{1969} exposée aux niveaux I et Iref ont été construites jusqu'à extinction des effectifs. Le nombre d'années de vie perdues ainsi déterminé a été rapporté aux effectifs de la cohorte en 1999 pour fournir une réduction de l'espérance de vie à 30 ans attribuable aux expositions chroniques à la pollution atmosphérique².

Données sanitaires

Les données de mortalité par âge ont été collectées auprès du Centre d'épidémiologie des causes médicales de décès (CépiDc). Le CépiDc dénombrait pour l'année 1999, 2 786 décès toutes causes, 841 décès d'origine cardio-pulmonaire (code CIM9 = 401 à 440 et 460 à 519), et 167 décès par cancer du poumon (code CIM9 = 162) parmi la population nantaise âgée de plus de 30 ans.

Le recensement général de la population a fourni la répartition par année de naissance de la population nantaise, à la date du 7 mars 1999. Il constituait une bonne approximation des effectifs de la population nantaise au milieu de l'année 1999.

Résultats

L'indicateur d'exposition I était de $10,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (concentration moyenne en $PM_{2,5}$ sur la période du 9 avril 2002 au 8 avril 2003).

² Le détail des algorithmes de calcul utilisés pour construire les courbes de survie et déterminer le nombre d'années de vie perdues peut être obtenu auprès du premier auteur du présent article.

Tableau 2. Construction des courbes de survie de la cohorte C₁₉₆₉ exposée aux niveaux I et Iref de pollution atmosphérique urbaine.

Table 2. Construction of survival curves for the C₁₉₆₉ cohort exposed to levels I and Iref of urban air pollution.

Année b	Exposition niveau I ^a S _{b,1969(I)}	Exposition niveau Iref ^b S _{b,1969(Iref)}
1999	S _{1999,1969} ^c	S _{1999,1969}
2000	S _{1999,1969} × p _{1969(I)} ^d	S _{1999,1969} × p _{1969(Iref)} ^e
2001	S _{1999,1969} × p _{1969(I)} × p _{1968(I)}	S _{1999,1969} × p _{1969(Iref)} × p _{1968(Iref)}
2002	S _{1999,1969} × p _{1969(I)} × p _{1968(I)} × p _{1967(I)}	S _{1999,1969} × p _{1969(Iref)} × p _{1968(Iref)} × p _{1967(Iref)}
...

^a S_{b,1969(I)} : effectifs survivants au début de l'année b de la cohorte C₁₉₆₉ exposée au niveau I.
^b S_{b,1969(Iref)} : effectifs survivants au début de l'année b de la cohorte C₁₉₆₉ exposée au niveau Iref.
^c S_{1999,1969} : effectifs au début de l'année 1999 de la cohorte C₁₉₆₉.
^d p_{1969(I)} : probabilité de survie en 1999 de la cohorte C₁₉₆₉ exposée au niveau I.
^e p_{1969(Iref)} : probabilité de survie en 1999 de la cohorte C₁₉₆₉ exposée au niveau Iref.
^a S_{b,1969(I)} : number of survivors at the beginning of year b of cohort C₁₉₆₉ exposed to level I.
^b S_{b,1969(Iref)} : number of survivors at the beginning of year b of cohort C₁₉₆₉ exposed to level Iref.
^c S_{1999,1969} : number of individuals at the beginning of 1999 in cohort C₁₉₆₉.
^d p_{1969(I)} : probability of survival in 1999 of members of cohort C₁₉₆₉ exposed to level I.
^e p_{1969(Iref)} : probability of survival in 1999 of members of cohort C₁₉₆₉ exposed to level Iref.

La mortalité attribuable au différentiel d'exposition par rapport au niveau de référence représentait en 1999, 56 (19-100) décès anticipés soit 2,0 % (0,7 %-3,6 %) des décès parmi les Nantais âgés de plus de 30 ans. Ces décès attribuables étaient notamment composés de 25 (9-43) décès d'origine cardiopulmonaire et 7 (2-12) décès par cancer du poumon, représentant environ 44,6 % et 12,5 % de la mortalité attribuable.

Le nombre d'années de vie perdues par la population nantaise a été estimé à 27,2 années en 1999 et 2 388,1 années sur une période de 10 ans. L'impact sanitaire associé aux cohortes C₁₉₂₉ à C₁₉₁₀ âgées de 70 à 89 ans représentait environ 50 % du

nombre total d'années de vie perdues : 52,4 % en 1999 et 48,2 % pour la période 1999-2008 (tableau 3).

L'impact sanitaire attribuable au différentiel d'exposition par rapport au niveau de référence, était également associé en 1999 à une réduction de l'espérance de vie à 30 ans de 0,27 (0,09-0,47) année.

Le tableau 4 compare la ville de Nantes et les 9 agglomérations urbaines françaises du programme APHEIS-3 en termes de pollution atmosphérique (concentrations moyennes en PM_{2,5} et PM₁₀) et de mortalité parmi la population âgée de plus de 30 ans

Tableau 3. Nombre d'années de vie perdues attribuables à la pollution atmosphérique urbaine. Nantes, 1999 et 1999-2008.

Table 3. Number of lost years of life attributable to urban air pollution. Nantes, 1999 and 1999-2008.

Cohortes	Âge en 1999	^a IS ₁₉₉₉ ^c (IC 95 %)	^b IS _{1999/2008} ^c (IC 95 %)
C ₁₉₇₀ à C ₁₉₇₈	21 à 29 ans	0 (0-0)	25,9 (8,9-46,0)
C ₁₉₆₉ à C ₁₉₆₀	30 à 39 ans	^d 0,8 (0,3-1,4)	^d 113,6 (38,9-201,9)
C ₁₉₅₉ à C ₁₉₅₀	40 à 49 ans	2,0 (0,7-3,6)	232,9 (79,6-413,9)
C ₁₉₄₉ à C ₁₉₄₀	50 à 59 ans	2,8 (1,0-5,0)	340,7 (116,5-605,8)
C ₁₉₃₉ à C ₁₉₃₀	60 à 69 ans	4,2 (1,4-7,5)	409,1 (139,8-727,8)
C ₁₉₂₉ à C ₁₉₂₀	70 à 79 ans	7,3 (2,5-13,0)	694,7 (237,1-1237,6)
C ₁₉₁₉ à C ₁₉₁₀	80 à 89 ans	7,0 (2,4-12,4)	456,7 (155,5-816,0)
C ₁₉₀₉ à C ₁₉₀₀	90 à 99 ans	3,1 (1,1-5,5)	114,6 (38,9-205,5)
C ₁₉₀₀ à C ₁₉₇₈	21 à 99 ans	27,2 (9,3-48,4)	2 388,1 (815,2-4254,5)

^a IS₁₉₉₉ : nombre d'années de vie perdues en 1999.
^b IS_{1999/2008} : nombre d'années de vie perdues sur la période 1999/2008.
^c IC 95 % : nombre d'années de vie perdues obtenu en utilisant les bornes de l'intervalle de confiance à 95% de la relation exposition-risque. RR₁₀ = 1,06 (1,02-1,11).
^d Exemples de lecture. Le nombre d'années de vie perdues par les cohortes C₁₉₆₉ à C₁₉₆₀ est estimé à 0,8 année en 1999 et 113,6 années sur la période 1999-2008.
^a IS₁₉₉₉ : number of years of life lost in 1999.
^b IS_{1999/2008} : number of years of life lost for the 1999/2008 period.
^c 95% CI: number of years of life lost obtained using the 95% confidence limits of the exposure-risk relation. RR₁₀ = 1.06 (1.02-1.11).
^d Examples. The number of years of life lost by cohorts C₁₉₆₉ through C₁₉₆₀ is estimated at 0.8 year in 1999 and 113.6 years for 1999-2008.

Tableau 4. Comparaison du gain sanitaire attendu à Nantes en 1999 pour une réduction des expositions aux $PM_{2,5}$ de $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec les 9 villes françaises du programme APHEIS-3.Table 4. Comparison of health improvement expected in Nantes in 1999 for a reduction in $PM_{2,5}$ exposure of $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with the 9 French cities in the APHEIS-3 program.

Zone d'étude (pop.1999)	^a $PM_{2,5}$	^a PM_{10}	^b Décès toutes causes pour 100 000 hab.	Gain sanitaire attendu pour 100 000 habitants			Années de vie perdus en 1 an
				^b Décès toutes causes	^c Décès cardio- pulmonaires	^c Décès par cancer du poumon	
Bordeaux (584 164 hab.)	13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2002)	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2000)	844	17,62 (4,59-30,89)	9,06 (3,25-15,00)	1,90 (0,64-3,20)	8,32 (2,20-14,35)
Le Havre (254 585 hab.)	13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2002)	21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2000)	889	18,56 (4,83-32,54)	9,25 (3,32-15,32)	1,92 (0,64-3,23)	8,74 (2,31-15,08)
Lille (1 091 156 hab.)	16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2001)	26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2001)	822	17,13 (4,46-30,03)	8,97 (3,22-14,85)	1,99 (0,67-3,35)	8,00 (2,11-13,8)
Lyon (782 828 hab.)	-	23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2000)	774	16,2 (4,2-28,3)	8,67 (3,11-14,4)	1,87 (0,63-3,15)	7,63 (2,02-13,2)
Marseille (856 165 hab.)	18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2002)	27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2000)	991	20,71 (5,39-36,60)	11,20 (4,02-18,55)	2,24 (0,75-3,77)	9,70 (2,56-16,74)
Nantes (270 251 hab.)	10,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (04/2002-04/2003)	18,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2000-2002)	1 030	20,81 (7,12-36,98)	9,25 (3,20-15,75)	2,77 (0,84-4,32)	10,07 (3,44-17,90)
Paris (6 164 418 hab.)	14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2000)	22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2000)	718	15 (3,9-26,2)	7,1 (2,6-11,8)	1,7 (0,6-2,8)	7,01 (1,85-12,10)
Rouen (434 924 hab.)	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2002)	21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2001)	833	17,35 (4,51-30,41)	8,74 (3,14-14,47)	2,06 (0,69-3,46)	8,16 (2,16-14,67)
Strasbourg (451 133 hab.)	16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2002)	23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2002)	736	15,17 (3,95-26,59)	7,47 (2,68-12,36)	3,51 (1,18-5,91)	7,12 (1,88-12,27)
Toulouse (690 162 hab.)	16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2000)	24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2000)	657	13,8 (3,6-24,2)	7,0 (2,5-11,6)	3,51 (1,18-5,91)	6,39 (1,69-11,02)

^a Valeur moyenne des concentrations mesurées. La période de disponibilité des mesures est fournie entre parenthèses.^b Adultes âgés de plus de 30 ans, décès toutes causes CIM9 : 0-999, Année 1999.^c Les valeurs entre parenthèses correspondent au gain sanitaire calculé avec les bornes de l'intervalle de confiance à 95 % des relations exposition-risque. Source : APHEIS-3 City reports.^d Adultes âgés de plus de 30 ans, décès d'origine cardio-pulmonaire CIM9 : 401 à 440 et 460 à 519, Année 1999.^e Adultes âgés de plus de 30 ans, décès par cancer du poumon CIM9 : 162, Année 1999.^a Mean value of concentrations measured. The availability period for measurements is reported between parentheses.^b Adults older than 30 years, all causes of death (ICD9: 0 - 999, 1999).^c Values between parentheses correspond to the health improvement calculated with the 95% confidence intervals of the exposure-risk relation. Source: APHEIS-3 City reports.^d Adults older than 30 years, death of cardiopulmonary causes, ICD9: 401-440 and 460-519, 1999.^e Adults older than 30 years, deaths from lung cancer (ICD9: 162, 1999).

(nombre de décès pour 100 000 habitants). Il met ainsi en perspective les gains sanitaires attendus dans les 10 villes pour des réductions des expositions aux $PM_{2,5}$ de $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Discussion

Limites

Les résultats doivent être interprétés comme des ordres de grandeur en raison des erreurs et incertitudes. Certaines d'entre elles sont dues à l'exploitation des relations exposition-risque disponibles pour le long terme : elles sont présentes même lorsque l'impact sanitaire est exprimé sous la forme d'un nombre de décès attribuables. D'autres limites sont, au contraire, spécifiques au calcul du nombre d'années de vie perdues.

Exploitation des relations exposition-risque

La confrontation des résultats épidémiologiques aux critères de causalité permet raisonnablement de conclure que la pollution atmosphérique constitue un facteur de risque de nature causale pour la santé et autorise la réalisation d'évaluations de l'impact sanitaire [15]. Le calcul d'un risque attribuable, par transposition de risques relatifs issus d'une étude épidémiologique américaine, constitue cependant une source importante d'incertitudes : la composition démographique, la relation entre les expositions individuelles et les concentrations mesurées dans l'air extérieur (largement conditionnée par les budgets espace-temps), les causes de mortalité, la susceptibilité à la pollution atmosphérique, la nature et l'historique des expositions à la pollution atmosphérique peuvent être différents pour les deux populations. En l'absence de relation exposition-risque européenne, l'Organisation mondiale de la santé propose d'utiliser les relations issues des études américaines. Plusieurs études de cohortes européennes, dont une étude française, confortent cette approche. Malgré des difficultés de comparaison quantitative des risques relatifs obtenus, en raison notamment de différences dans les indicateurs d'exposition utilisés, ces études fournissent des résultats qualitativement cohérents avec ceux des études américaines [16-20]. Afin de prendre en compte le fait qu'aux États-Unis la mortalité violente (suicides, accidents) puisse être différente, le risque relatif fourni pour la mortalité totale aurait pu être appliqué à la mortalité toutes causes sauf accidentelles. Cette approche suggérée par Künzli [4] aurait minoré légèrement le nombre de décès attribuables à la pollution atmosphérique en 1999 : 51 (18-91) décès. Le nombre d'années de vie perdues à Nantes en 1999 et sur la période 1999-2008 aurait été estimé à 24,9 (8,5-44,3) et 2 176,0 (742,9-3 875,8) années. La réduction de l'espérance de vie à 30 ans aurait été évaluée à 0,24 (0,08-0,42) année.

Le domaine de validité des relations exposition-risque est restreint aux adultes âgés de plus de 30 ans. Les décès attribuables à la pollution atmosphérique au sein de la population nantaise âgée de moins de 30 ans n'ont donc pas été évalués. Ainsi l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique sur les enfants n'est pas évalué alors qu'il pourrait être important [21]. Par ailleurs, le recensement de 1999 ne fournit pas les effectifs

des cohortes les plus âgées nées avant 1900. Le nombre d'années de vie perdues n'a donc été quantifié que pour les cohortes C_{1900} à C_{1978} . Ces restrictions contribuent à sous-évaluer l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique.

Les relations exposition-risque évaluent les expositions à la pollution atmosphérique à partir de concentrations moyennes en particules mesurées sur plusieurs années. Ces concentrations sont considérées comme des indicateurs du potentiel dangereux de l'air, milieu complexe dont la composition est inaccessible à la mesure. Cette approche a des limites puisque les teneurs en particules ne sont pas corrélées avec la pollution photo-oxydante de la période estivale dont l'ozone est un indicateur.

Les risques relatifs issus des études de cohortes ne sont pas associés à des fenêtres d'exposition précisément définies, contrairement aux relations fournies pour le court terme à partir d'études écologiques temporelles. Lors des évaluations d'impact sanitaire, la construction des indicateurs d'exposition est alors sujette à discussion. À Nantes, l'impact sanitaire a été évalué à partir des concentrations en $PM_{2,5}$ disponibles seulement pour la période du 9 avril 2002 au 8 avril 2003. L'historique depuis 2000 des mesures de PM_{10} (fortement corrélées aux $PM_{2,5}$) montre cependant que des concentrations en $PM_{2,5}$ disponibles sur des périodes plus étendues (2 ou 3 années) n'auraient pas modifié l'ordre de grandeur de l'impact sanitaire.

Les capteurs de particules et tout particulièrement de $PM_{2,5}$ sont souvent peu nombreux au sein des réseaux de mesure de la qualité de l'air. Cependant, les études effectuées avant l'installation des équipements de mesure limitent les erreurs associées à une mauvaise implantation des stations. À Nantes, l'évaluation des expositions à partir d'une seule station de mesure des $PM_{2,5}$ a été préférée à l'utilisation des mesures plus nombreuses de PM_{10} (2 stations de mesure). En effet, la conversion en $PM_{2,5}$ des concentrations mesurées en PM_{10} aurait pu générer des erreurs et incertitudes difficiles à évaluer et susceptibles d'être supérieures à la variabilité géographique des expositions à la pollution atmosphérique. La localisation de cet unique capteur de $PM_{2,5}$ n'a pas permis d'étendre la zone d'étude aux communes urbaines voisines et d'évaluer un impact sanitaire à l'échelle de l'agglomération nantaise.

L'évaluation d'un impact sanitaire à long terme est très dépendante du niveau de référence choisi. À Nantes, l'impact a été calculé par rapport à une concentration de référence en $PM_{2,5}$ de $7,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ce choix tend à majorer les expositions attribuables au bruit de fond de la pollution atmosphérique, c'est-à-dire en l'absence de rejet d'origine anthropique. À titre de comparaison, l'Agence française de sécurité sanitaire environnementale (Afsse) a récemment utilisé les valeurs de 4,5, 6 et $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ comme niveaux de référence pour les $PM_{2,5}$ en 2020 [6, 7]. L'utilisation d'un niveau de référence en $PM_{2,5}$ de $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aurait mis en évidence un impact sanitaire plus élevé correspondant à 102 (35-181) décès attribuables en 1999. Cet impact aurait également représenté 49,5 (17,0-87,5) années de vie perdues en 1999 et 4 356,0 (1 492,5-7 725,6) années pour la période 1999-2008. Enfin, la réduction de l'espérance de vie à 30 ans pour un niveau de référence de $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aurait été évaluée à 0,49 (0,17-0,87) année, ce qui reste du même ordre de grandeur.

Calcul du nombre d'années de vie perdues

La construction des courbes de survie des cohortes C_{1900} à C_{1978} exposées à la pollution atmosphérique au niveau référent, suppose que les décès attribuables à la pollution atmosphérique surviennent aux mêmes âges que les décès toutes causes. Les calculs réalisés sont toutefois souples et pourraient être adaptés à de nouvelles hypothèses en rapport avec l'évolution des connaissances. À titre d'exemple, pour des âges de survenue identiques à ceux des décès par cancer du poumon et décès d'origine cardio-pulmonaire (Loire-Atlantique, 1997-1999), le nombre d'années de vie perdues en 1999 évoluerait peu : 26,5 (9,1-47,2) années. Une diminution plus importante du nombre d'années de vie perdues serait observée pour la période 1999-2008 : 2 003,8 (683,4-3 574,0) années. La réduction d'espérance de vie à 30 ans serait évaluée à 0,20 (0,07-0,36) année.

D'autres erreurs et incertitudes sont attribuables à la construction des courbes de survie uniquement à partir des effectifs de population, des expositions à la pollution atmosphérique et des conditions de mortalité spécifiques de l'année 1999. Ainsi, l'impact sanitaire est minoré car les perspectives d'accroissement de la population nantaise n'ont pas été prises en compte. De plus, les probabilités de survie en 1999 ont été déterminées à partir d'un seul et même indicateur d'exposition alors que les expositions peuvent évoluer. Les calculs pourraient toutefois être facilement adaptés à de nouvelles hypothèses d'évolution des expositions. Enfin, les courbes de survie n'ont pas intégré l'accroissement régulier de l'espérance de vie associé à un possible éloignement des conditions de mortalité de la cohorte de l'*American Cancer Society*. Le calcul du nombre d'années de vie perdues sur une période d'étendue restreinte telle que l'année 1999 limite l'impact de ces erreurs. En revanche, la réduction de l'espérance de vie à 30 ans et dans une moindre mesure le nombre d'années de vie perdues calculé sur la période 1999-2008 sont susceptibles d'être affectés par ces erreurs et incertitudes.

Interprétation des résultats

L'impact sanitaire sur l'année 1999, déterminé par rapport à un niveau Iref inférieur de $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à l'indicateur d'exposition I, a été évalué de l'ordre de 56 (19-100) décès anticipés, soit environ 2,0 % (0,7-3,6 %) des décès parmi les Nantais âgés de plus de 30 ans. Ces résultats minorent l'impact de la pollution atmosphérique urbaine puisqu'ils ne prennent que partiellement en compte l'impact des expositions de courte durée. À titre de comparaison, l'impact sanitaire à court terme de la pollution atmosphérique sur l'agglomération nantaise (Nantes, Rezé, Saint-Sébastien-sur-Loire : 330 952 habitants en 1999) avait été évalué de l'ordre de 43 (21-66) décès annuels pour la période du 1^{er} octobre 1995 au 30 septembre 1998 [11]. Les décès mis en évidence par les évaluations d'impact à court et long termes ne peuvent cependant pas être additionnés car une partie de la mortalité attribuable aux expositions chroniques recoupe la mortalité prise en compte par les études à court terme [22, 23].

Les résultats obtenus confirment donc l'existence à Nantes d'un impact sanitaire de la pollution atmosphérique non néglig-

geable malgré des niveaux modérés de pollution atmosphérique. Ces résultats soulignent l'importance des expositions chroniques en termes de santé publique. Ils confortent donc les conclusions de l'évaluation de l'impact sanitaire à court terme indiquant que ce sont les expositions les plus fréquentes, correspondant à des niveaux modérés, qui sont responsables de l'essentiel de l'impact sanitaire.

Les décès mis en évidence par les évaluations d'impact sanitaire sont parfois abusivement perçus comme des décès précipités de personnes en fin de vie. La réduction de l'espérance de vie à 30 ans (0,27 année en 1999) illustre le degré d'anticipation des décès attribuables aux expositions chroniques à la pollution atmosphérique et offre un nouvel argument pour rejeter l'hypothèse d'un impact sanitaire limité à des décès anticipés de quelques jours. Au-delà de la ville de Nantes, la présentation de tels résultats constitue un apport significatif et mériterait d'être systématisée pour enrichir les nombreuses évaluations locales de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique réalisées pour argumenter des choix de santé publique auprès de décideurs locaux [24].

Dans un contexte régional où les niveaux sont modérés, la pollution atmosphérique est difficilement considérée comme un problème de santé publique. Malgré des niveaux de pollution atmosphérique nettement plus faibles, les gains sanitaires attendus à Nantes pour des réductions des concentrations en $\text{PM}_{2,5}$ de $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont comparables, voire supérieurs, à ceux attendus dans les 9 agglomérations françaises du programme APHEIS-3. Le nombre de décès attribuables pour 100 000 habitants, proportionnel au nombre de décès (*cf.* relation (1), page 190), est plus élevé à Nantes que dans les 9 autres villes, en raison d'une mortalité toutes causes plus importante parmi la population de plus de 30 ans (*tableau 4*). Du fait des niveaux modérés de pollution atmosphérique, les gains sanitaires ne pourront cependant être obtenus à Nantes qu'au prix de politiques ambitieuses : des réductions des expositions aux $\text{PM}_{2,5}$ de 1, 2, voire $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seront plus difficiles à obtenir que dans les agglomérations urbaines plus fortement polluées.

Conclusion

En termes de gestion des risques, les décideurs locaux devraient trouver dans ces nouveaux résultats des incitations supplémentaires à la mise en œuvre de politiques permettant une réduction des expositions chroniques à la pollution atmosphérique, même si les décès attribuables aux expositions chroniques à la pollution atmosphérique ne peuvent être interprétés *stricto sensu* comme des décès évitables du fait notamment des causes concurrentes de mortalité [25]. Les feuilles de calcul développées à l'occasion de ce travail, pourraient facilement être réutilisées à la demande des décideurs pour simuler les gains sanitaires associés à des objectifs de qualité d'air qui seraient discutés puis arrêtés dans le cadre d'une politique locale. ■

Références

- Glorennec P, Nourry L, Quénel P. Impact sanitaire des expositions de courte durée à la pollution atmosphérique urbaine dans le nord-ouest de la France. *Environnement, Risques & Santé* 2002 ; 1 : 157-63.
- Quantification of the health effects of exposure to air pollution. Report of a WHO working group. Bilthoven, Netherlands. 20-22 November 2000. Copenhagen (Denmark) : European Regional Office, World Health Organization, 2001.
- Pascal L, Cassadou S. *Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine. Actualisation du guide méthodologique. Recommandations provisoires pour les EIS court terme et long terme. Manuel d'utilisation du logiciel EIS-PA version 2.0.* Saint Maurice : Institut de veille sanitaire (InVS), 2003.
- Künzli N, Kaiser R, Medina S, Studnicka M, Oberfeld G, Horak F. *Health costs due to road traffic-related air pollution : an impact assessment project of Austria, France, and Switzerland prepared for the third WHO Ministerial Conference on Environment and Health, London 1999. Air Pollution attributable cases : technical report on epidemiology.* Bern (Switzerland) : European Regional Office, World Health Organization, 1999.
- Seethaler R. *Health costs due to road traffic-related air pollution : an impact assessment project of Austria, France, and Switzerland prepared for the third WHO Ministerial Conference on Environment and Health, London 1999. Synthesis report prepared on behalf of the tri-lateral research team of Austria, France and Switzerland.* Bern (Switzerland) : European Regional Office, World Health Organization, 1999.
- Nerrière E, Boudet C, Cassadou S, et al. *Impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine. Estimation de l'impact lié à l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité par cancer du poumon et par maladies cardio-respiratoires en 2002 avec projection d'ici 2020.* Maison-Alfort : Agence française de sécurité sanitaire environnementale (Afsse), 2004.
- Nerrière E, Duboudin C. *Impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine. Estimation de l'impact lié à l'exposition chronique aux particules fines sur l'espérance de vie.* Maison-Alfort : Agence française de sécurité sanitaire environnementale, 2005.
- Brunekreef B. Air pollution and life expectancy : is there a relation? *Occup Environ Med* 1997 ; 54 : 781-4.
- Medina S, Boldo E, Saklad, et al. *APHEIS : Third year report 2002-2003. Health impact assessment of air pollution and communication strategy.* Saint-Maurice (France) : Institut de veille sanitaire (InVS), 2004.
- Boldo E, Medina S, Le Tertre A, et al. APHEIS : Health impact assessment of long-term exposure to PM_{2,5} in 23 European cities. *Eur J Epidemiol* 2006 ; 21 : 449-58.
- Glorennec P, Nourry L, Quenel P. *Impact sanitaire de la pollution atmosphérique sur l'agglomération nantaise.* Rennes : Cellule inter-régionale d'épidémiologie (Cire) Ouest, 1999.
- Glorennec P, Quénel P. *Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine : guide méthodologique.* Saint-Maurice (France) : Institut de veille sanitaire (InVS), 1999.
- Miller BG, Hurley JF. Life table methods for quantitative impact assessments in chronic mortality. *J Epidemiol Community Health* 2003 ; 57 : 200-6.
- Pope CA, Burnett RT, Thun MJ, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 2002 ; 287 : 1132-41.
- Filleul L, Medina S, Cassadou S. La pollution atmosphérique particulaire urbaine : de l'épidémiologie à l'impact sanitaire en santé publique. *Rev Epidemiol Sante Publique* 2003 ; 51 : 527-42.
- Peters A, Pope CA. Commentary. Cardiopulmonary mortality and air pollution. *Lancet* 2002 ; 360 : 1184-5.
- Hoek G, Brunekreef B, Goldbohm S, Fischer P, Van Den Brandt PA. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands : a cohort study. *Lancet* 2002 ; 360 : 1203-9.
- Gehring U, Heinrich J, Krämer U, et al. long-term exposure to ambient air pollution and cardiopulmonary mortality in women. *Epidemiology* 2006 ; 17 : 545-51.
- Nafstad P, Haheim LL, Wisloff T, et al. Urban air pollution and mortality in a cohort of norwegian men. *Environ Health Perspect* 2004 ; 112 : 610-5.
- Filleul L, Rondeau V, Vandentorren S, et al. Twenty five year mortality and air pollution : results from the French PAARC survey. *Occup Environ Med* 2005 ; 62 : 453-60.
- Boldo E, Aragonés N, Medina S, et al. *WP5-ENHIS-1. Full report on HIA of outdoor air pollution.* Saint-Maurice (France) : Air Pollution and Health : A European Information System (APHEIS), 2005. www.apheis.net.
- Künzli N, Medina S, Kaiser R, Quénel P, Horak F, Studnicka M. Assessment of deaths attributable to air pollution : Should we use risk estimates based on time series or on cohort studies? *Am J Epidemiol* 2001 ; 153 : 1050-5.
- Martuzzi M. Re : "Assessment of deaths attributable to air pollution : should we use risk estimates based on time series or on cohort studies?". *Am J Epidemiol* 2001 ; 154 : 974-5.
- D'Helf-Blanchard M. Synthèse des évaluations d'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine, France, 1995-2002. *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire* 2005 ; 19 : 85-6.
- Hubert P. Pour un meilleur usage du risque attribuable en santé environnementale. *Environnement, Risques & Santé* 2003 ; 2 : 266-8.