

# Impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine

Estimation de l'impact lié à l'exposition chronique  
aux particules fines sur l'espérance de vie

● **Note d'expertise**



agence française de sécurité sanitaire environnementale

Juin 2005

# **Impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine**

**Estimation de l'impact lié à l'exposition chronique  
aux particules fines sur l'espérance de vie**

- **Dossier suivi par :**
  - **Elena Nerrière**
  - **Cédric Duboudin**

# Résumé

## Introduction

L'Agence française de sécurité sanitaire environnementale (AFSSE) a engagé un travail en 2003 destiné à estimer l'impact de la qualité de l'air en milieu urbain sur le risque de décès en relation avec les particules fines  $PM_{2,5}$ . Cette estimation d'impact porte sur la situation actuelle et se projette dans le futur selon plusieurs scénarios d'évolution de la pollution atmosphérique urbaine au cours de la période 2000-2020. En complément de la caractérisation du risque en terme de décès attribuables aux particules fines pour des causes spécifiques de décès, dont les résultats sont parus en décembre 2004<sup>1</sup>, le présent travail quantifie le gain en terme d'espérance de vie que représenterait une diminution du niveau moyen de pollution aux particules fines dans un ensemble d'agglomérations urbaines. L'utilisation d'un autre indicateur de l'impact des particules, exprimé sous la forme de la perte d'espérance de vie, est une approche recommandée au niveau européen dans le cadre des projets en appui au programme CAFE (Clean Air for Europe).

## Matériel et Méthode

Les calculs sont fondés sur le Risque Relatif proposé dans le cadre de l'étude de l'American Cancer Society pour la mortalité totale [Pope, 2002] (RR égal à 1,06, IC à 95 % [1,02-1,11] pour les sujets de plus de 30 ans). La valeur moyenne de l'exposition est fixée à  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{2,5}$ ; elle correspond à la concentration moyenne des  $PM_{10}$  observée en 2002 sur l'ensemble des 76 unités urbaines étudiées, converties en concentration  $PM_{2,5}$ . Différents objectifs de qualité de l'air à atteindre (respectivement 4,5; 6 et  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sont testés, conformément à la procédure justifiée dans le rapport initial.

## Résultats

Les gains en terme de nombre moyen de jours de vie gagnés se chiffrent à 170 [58-305] pour une diminution du niveau des concentrations ambiantes de  $PM_{2,5}$  de  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , à 136 [46-244] jours pour une diminution à  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et de l'ordre de 68 [23-122] jours pour une diminution à  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## Discussion et conclusion

Les gains estimés en terme d'espérance de vie pour la situation française sont dans l'ensemble comparables aux estimations réalisés dans le cadre d'études internationales

---

<sup>1</sup> Estimation de l'impact sanitaire lié à l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité par cancer du poumon, et par maladies cardio-respiratoires en 2002 avec projections d'ici 2020, AFSSE. (<http://www.afsse.fr>)

(OMS, IIASA et APHEIS...). Le gain sanitaire qui peut être attendu de la poursuite voire du renforcement des politiques de réduction de la pollution atmosphérique est donc substantiel.

## Introduction et contexte

L'Agence française de sécurité sanitaire environnementale (AFSSE) a engagé un travail en 2003 destiné à estimer l'impact de la qualité de l'air sur le risque de décéder pour des causes spécifiques de décès, en relation avec les particules fines  $PM_{2,5}$ , considérées comme l'indicateur de référence de qualité de l'air et de risque sanitaire, dans la situation actuelle et pour plusieurs scénarios d'évolution de la pollution atmosphérique urbaine au cours de la période 2000-2020 [AFSSE 2004]. Ce travail s'inscrit dans le cadre du Plan cancer développé depuis 2003 par les pouvoirs publics.

Le protocole d'analyse est exposé en détail dans le rapport publié en 2004. Brièvement, il s'appuie sur la méthodologie suivie par Künzli et al [1999 ; 2000] dans son étude de l'évaluation de l'impact de la pollution de l'air ( $PM_{10}$ ) liée au trafic automobile en Autriche, France et Suisse. Il utilise les relations doses-réponses établies par Pope et al [2002] pour quantifier la relation entre des expositions au long cours aux  $PM_{2,5}$  dans un grand nombre d'agglomérations urbaines américaines et le risque de décès par cancer du poumon et par maladie cardio-respiratoire. Les impacts sont modélisés à partir des *expositions* estimées par les niveaux dans l'air ambiant (« immissions ») de particules ( $PM_{10}$ ) mesurés par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air sur site de « fond urbain ». Ces mesures sont converties en  $PM_{2,5}$ , avec l'hypothèse, basée sur les travaux internationaux, que celles-ci constituent 60 % des  $PM_{10}$ . Ces impacts sont estimés pour la situation actuelle (année de référence : 2002) et, à échéance respectivement de 2010 et 2020, pour trois évolutions possibles de la qualité de l'air au sein de trois scénarios plus ou moins contraignants, simulant des politiques publiques qui pourraient être menées. La diminution du nombre de cas attribuables de 2002 à 2020 via 2010 résulte d'une diminution partielle des immissions en 2010, et complète en 2020 en supposant une diminution linéaire des impacts. Ces scénarios sont qualifiés respectivement de : 1-« minimum exigible », 2-« progressif » et 3-« volontariste ».

Des informations sur les concentrations rétrospectives en particules ont pu être obtenues, grâce à l'ADEME et aux réseaux de surveillance de la qualité de l'air, pour 76 unités urbaines totalisant 15 259 590 personnes de 30 ans ou plus, population visée par cette évaluation de l'impact.

L'impact de la pollution est celui des concentrations dans l'air qui sont supérieures à une exposition dite de référence ; pour chaque unité urbaine est estimé un impact dû à l'écart entre la valeur moyenne annuelle des immissions observées et cette référence. Künzli [1999 ; 2000] avait justifié, pour les  $PM_{10}$ , le choix de  $7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  soit  $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  converti en

PM<sub>2,5</sub>, en se fondant sur les valeurs observées en Europe dans des villes ou régions de faible pollution (7,5 µg/m<sup>3</sup> étant la valeur centrale de l'intervalle de concentrations annuelles en PM<sub>10</sub> le plus faible jamais observé dans les études épidémiologiques : 5 à 10 µg/m<sup>3</sup>). Il a été proposé, pour apprécier l'influence du choix de ce niveau de base, de faire plusieurs scénarios, en faisant varier le niveau de référence B de PM<sub>2,5</sub> de 4,5 µg/m<sup>3</sup> à 9 µg/m<sup>3</sup> en passant par 6 µg/m<sup>3</sup> (les équivalents en PM<sub>10</sub> seraient respectivement 7,5 ; 10 et 15 µg/m<sup>3</sup>).

Les principaux résultats pour la mortalité par cancer du poumon, basées sur le plus faible niveau de référence (4,5 µg/m<sup>3</sup>) et le Risque Relatif (RR) estimé par Pope (1,06 [1,02-1,11]) sont les suivants :

- Pour l'ensemble des sujets de plus de 30 ans, le nombre de décès par cancer du poumon attribuables en 2002 à l'exposition aux PM<sub>2,5</sub> urbaines est estimé à 1117 [347-1713] (soit une fraction attribuable de 11 % environ).
- Selon le scénario prospectif « volontariste », l'évolution de l'estimation du nombre annuel de décès par cancer du poumon attribuables à la pollution atmosphérique est la suivante : de 1117 décès en 2002, on passe à 962 [296-1485] en 2010 puis à 569 [171-896] en 2020. La diminution du nombre de cas de décès est donc de l'ordre de 15 % à l'horizon 2010 et de 50 % à l'horizon 2020.
- Sous l'hypothèse d'une diminution linéaire des impacts annuels calculés pour 2002, 2010 (étape « réglementaire » de l'UE) et 2020, le cumul au cours de la période 2002-2020 du nombre estimé de décès attribuables aux particules fines pour la population urbaine sélectionnée de plus de 30 ans (toujours selon le scénario « volontariste ») est de 16 814.

L'utilisation d'un autre indicateur de l'impact des particules, exprimé sous la forme de la perte d'espérance de vie [Rabl, 2003], est une approche recommandée au niveau européen dans le cadre des projets en appui au programme CAFE (Clean Air for Europe<sup>2</sup>). En effet, le nombre de décès prématurés liés à la pollution de l'air n'apporte pas toujours une information pertinente. Une première raison résulte de la tentation d'additionner le nombre de décès attribuables à différentes causes (comme la pollution de l'air, le tabagisme ...) ; or cela n'est pas théoriquement et mathématiquement correct. Exprimer l'impact sanitaire en terme de perte d'espérance de vie autorise plus de comparaisons. Par exemple, on peut observer que les accidents de la route font potentiellement perdre plus d'années de vie que les cancers, les premiers touchant des victimes plutôt jeunes (entre 18 et 25 ans), les seconds des tranches de population généralement plus âgées. De plus, par contraste avec

---

<sup>2</sup> <http://europa.eu.int/comm/environment/air/cale/>

les décès liés aux accidents de la route, les décès attribuables à la pollution de l'air ne sont pas directement observables. Enfin, l'approche en terme d'impact sur l'espérance de vie constitue souvent une étape du calcul économique de type coût/bénéfice.

C'est pourquoi, en complément de la caractérisation du risque en terme de décès attribuables aux particules fines, le présent travail quantifie le gain en terme d'espérance de vie que représenterait une diminution du niveau de pollution aux particules fines.

## **Matériel et Méthodes**

La méthodologie utilisée est celle proposée par Rabl [2003], responsable scientifique au Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, et expert reconnu dans ce domaine. Il a par exemple participé au projet européen ExternE (Externalities of Energies) et s'est longtemps battu pour démontrer pourquoi le nombre de décès prématurés n'est pas un bon indicateur pour la mortalité attribuable à la pollution atmosphérique.

La méthode est détaillée en annexe. Les calculs sont fondés sur le Risque Relatif proposé par Pope [2002] pour la mortalité totale (RR égal à 1,06, IC à 95 % [1,02-1,11]). Cette valeur de RR a été estimée par Pope sur la base du suivi de la cohorte sur la population des plus de 30 ans. Il est donné pour une augmentation de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  des concentrations. Nous avons donc appliqué cette valeur pour les sujets de plus de 30 ans et considéré un RR égal à 1 pour les moins de 30 ans.

La valeur initiale d'exposition est fixée à  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  : elle correspond à la concentration moyenne des  $\text{PM}_{2,5}$  estimée en 2002 à partir des concentrations mesurées des  $\text{PM}_{10}$  sur l'ensemble des 76 unités urbaines étudiées. Différents objectifs de qualité de l'air à atteindre ( $4,5$  ;  $6$  et  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sont testés, comme dans l'approche suivie pour l'estimation du nombre de décès attribuables [AFSSE 2004].

## Résultats

Les résultats obtenus en terme de nombre de jours de vie gagnée par un individu moyen grâce à la diminution de la pollution en particules fines sont présentés dans le tableau 1.

Diminution du niveau de $PM_{2,5}$ *	Nombre de jours de vie gagnée**
De $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	170 [58-305]
De $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$	136 [46-244]
De $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$	68 [23-122]

\* $Ratio PM_{2.5}/PM_{10}=0,6$

\*\* $RR=1,06$  [1,02-1,11] pour les plus de 30 ans (Pope 2002 mortalité totale) et  $RR=1$  pour les moins de 30 ans

**Tableau 1 : gain en espérance de vie pour un citoyen moyen, exprimé en nombre de jours selon l'ampleur de la diminution des concentrations ambiantes des particules fines.**

## Discussion

### Comparaison des résultats avec d'autres travaux

L'étude réalisée en 1999 par l'OMS a estimé, sur la base d'un RR à 1,043, le gain en espérance de vie à 217 jours lorsque le niveau en  $PM_{10}$  diminuait de  $23,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (niveau de référence considéré comme non pollué) et à 123 jours pour une diminution de  $23,5$  à  $14,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (sans pollution automobile).

Plus récemment, l'étude APHEIS [2004] a mis en évidence sur 26 villes européennes que si les moyennes annuelles de  $PM_{2.5}$  (obtenues par conversion des  $PM_{10}$ ) ne dépassaient pas  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , le gain attendu en terme d'espérance de vie pour un adulte âgé de 30 ans pouvait aller de 2 à 13 mois selon la ville considérée. Les villes de Tel Aviv, Rome et Séville suivies à un moindre degré par Celje, Cracovie, Athènes, Bilbao et enfin, Lublin et Budapest connaîtraient les gains les plus importants.

L'étude réalisée par l'IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) en 2002 [IIASA 2002] montrent que, pour la France, le nombre de jours de vie perdue dus à l'exposition aux  $PM_{2.5}$  (en considérant un RR égal à 1,06) étaient de 473 jours en 1990 du fait du niveau de pollution de l'époque ; il pourrait être de 259 jours en 2010 si les émissions diminuaient de manière à respecter la législation actuelle et de 209 jours si tous les moyens techniques disponibles de contrôle des émissions étaient entièrement mis en application. Autrement dit, la réduction des émissions engendrerait un gain d'espérance de vie compris entre 214 et 264 jours suivant le scénario considéré.

Rabl [2003] chiffre pour les Etats-Unis et l'Europe un gain en terme d'espérance de vie de l'ordre de 4,5 mois (soit environ 137 jours) par personne pour une diminution d'exposition aux  $PM_{10}$  de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  tout au long de la vie.

Les gains en terme d'espérance de vie que nous avons estimés sont dans l'ensemble comparables aux estimations réalisées dans le cadre de l'OMS et APHEIS, ainsi que celles faites par Rabl. Elles sont inférieures à celles réalisées par l'IIASA, mais la comparaison directe avec cette étude est délicate. En effet, elle repose sur des scénarios relatifs aux émissions alors que nous avons raisonné en terme de concentrations ambiantes.

## **Comparaison des résultats avec d'autres causes**

Si l'on s'intéresse aux effets du tabagisme sur l'espérance de vie, une étude récente sur la population particulière des médecins hommes anglais nés entre 1900 et 1930 a montré que l'espérance de vie des fumeurs était diminuée en moyenne de 10 ans par rapport au groupe des non fumeurs [Doll & Peto 2004]. Cela est bien sûr considérablement plus fort que l'effet de la pollution atmosphérique urbaine. Dans une lettre à l'éditeur du British Medical Journal parue en 2000, les auteurs démontrent que le nombre de minutes perdues par cigarette fumée se chiffrerait à 11 minutes [Shaw et al 2000]. Ils ont comparé l'espérance de vie entre hommes fumeurs et non fumeurs, et ont mis en évidence une différence de 6,5 années qu'ils ont rapportée à une consommation moyenne de 5772 cigarettes par an.

A titre de comparaison, nous avons calculé sur la population des 76 unités urbaines considérées dans cette étude, la perte d'espérance de vie liée au seul cancer du poumon, toutes causes confondues (pollution et autres). Cette perte rapportée à la population des 76 unités urbaines s'élève à 270 jours environ par individu. Cette estimation est cependant à prendre avec prudence car elle fait abstraction des décès qui surviendraient pour d'autres causes, les sujets ayant été épargnés du risque de cancer.

## **Facteurs influençant les résultats**

Outre les hypothèses et incertitudes liées à l'étude de Pope (évaluation de l'exposition, RR constant, absence d'effet cumulatif de la pollution), qui se répercutent naturellement sur nos résultats, les principales inférences liées à la démarche employée proviennent de l'utilisation en France de résultats établis aux USA ; cela appelle à la fois une transposition et une analogie [Hubert 2003]. Autrement dit, les hypothèses suivantes sont implicitement formulées : (i) la population urbaine américaine est comparable à la population française urbaine en terme de mode de vie, de tabagisme, d'alimentation ... c'est-à-dire pour l'ensemble des facteurs de risques des pathologies considérées. Les chiffres de la mortalité sont également jugés comparables, en particulier les fractions de mortalité par cancer du poumon et maladies cardiovasculaires, ainsi que la fraction des décès par mort violente ; (ii) la pollution particulaire dans les zones urbaines américaines et françaises, à défaut d'être de même nature, conduit aux mêmes effets sur la santé ; (iii) la mesure de l'exposition, enfin, est comparable.

L'impact de ces hypothèses ou plus précisément du non-respect de ces hypothèses sur les gains d'espérance de vie est difficilement quantifiable. L'exposition, par exemple, est estimée dans Pope grâce à deux séries de mesures  $PM_{2,5}$  (1979-82 et 1999-2000) qui encadrent la

période d'étude. L'exposition associée à chaque unité urbaine est définie comme la moyenne des mesures issues de l'ensemble des capteurs de la zone urbaine. L'exposition dans les unités urbaines françaises est estimée grâce aux mesures de  $PM_{10}$  des stations dites de fond ; un ratio de conversion  $PM_{2,5}/PM_{10}$  permet alors d'estimer le niveau de  $PM_{2,5}$ . Ces deux manières de procéder ne sont pas théoriquement comparables, mais il est difficile d'estimer l'erreur liée à cette différence.

Les valeurs  $PM_{2,5}$  sont estimées avec l'hypothèse d'un ratio  $PM_{2,5}/PM_{10}$  de 0,6 proposé par l'US-EPA et utilisé par Künzli [1999]. Dans le cadre du projet PEP (Transport related health impacts and their costs and benefits with a particular focus on children) de l'OMS, il avait été recommandé, lors de la conférence de La Hague d'octobre 2003 [WHO 2003], d'utiliser ce facteur de conversion (à défaut d'informations locales disponibles qui devront toujours être prioritaires). Toutefois, l'OMS semble préconiser, depuis peu, pour l'Europe, un ratio de 0,7 plutôt que 0,6 (préparation de la phase 3 du programme APHEIS). Un rapport de l'Ecole des Mines de Douai [Houdret et al 2002] semble d'ailleurs justifier cette préconisation : dans cette étude portant sur 12 villes françaises, les données collectées par des TEOM (*Tapered Oscillating Micro-balance*)  $PM_{2,5}$  ont été comparées à celles obtenues en parallèle par des TEOM  $PM_{10}$ . Les ratios  $PM_{2,5}/PM_{10}$  varient de 0,66 en été à 0,70 en hiver. Si l'on considère un ratio  $PM_{2,5}/PM_{10}$  de 0,7, la moyenne des  $PM_{2,5}$  dans nos 76 unités urbaines en 2002 serait de  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , au lieu des  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  précédemment considérés et les gains en terme d'espérance de vie liés à la réduction de la pollution seraient supérieurs de 15 % environ (voir tableau 2 ci-dessous).

Diminution du niveau de PM <sub>2.5</sub> *	Nombre de jours de vie gagnée**
14 µg/m <sup>3</sup> à 5,25 µg/m <sup>3</sup>	200 [67-356]
14 µg/m <sup>3</sup> à 7 µg/m <sup>3</sup>	160 [54-285]
14 µg/m <sup>3</sup> à 10,5 µg/m <sup>3</sup>	80 [27-142]

\*Ratio PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>=0,7

\*\*RR=1,06 [1,02-1,11] pour les plus de 30 ans (Pope 2002 mortalité totale) et RR=1 pour les moins de 30 ans

**Tableau 2 : Analyse de sensibilité du gain en espérance de vie pour un citadin moyen, exprimé en nombre de jours, selon l'ampleur de la diminution des concentrations ambiantes des particules fines pour un ratio PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>=0,7.**

Par ailleurs, les résultats présentés dans le tableau 1 ont été obtenus en utilisant la concentration moyenne en PM<sub>2.5</sub> (estimée à partir de celle des PM<sub>10</sub>) observée en 2002 sur les 76 unités urbaines étudiées, calculée en moyenne arithmétique, à savoir 12 µg/m<sup>3</sup>. La moyenne des concentrations de PM<sub>2.5</sub> pondérée par le nombre d'habitants est légèrement supérieure et se situe autour de 13 µg/m<sup>3</sup>. Cette augmentation rend compte du fait que certaines villes plus peuplées ont tendance à être également un peu plus polluées (cette tendance est très faible, mais impacte néanmoins la moyenne des concentrations). L'utilisation de cette moyenne pondérée par la population comme référence conduit à des gains en espérance de vie supérieurs de 13 à 33 % (voir tableau 3). Exprimé en différentiel de nombre de jours par rapport aux résultats du tableau 1, la valeur centrale du nombre de jours de vie gagnée supplémentaires est de 23, quelles que soient l'ampleur de la diminution des concentrations ambiantes des particules fines et la concentration initiale.

Diminution du niveau de PM <sub>2.5</sub>	Nombre de jours de vie gagnée
13 µg/m <sup>3</sup> à 4,5 µg/m <sup>3</sup>	193 [65-346]
13 µg/m <sup>3</sup> à 6 µg/m <sup>3</sup>	159 [54-285]
13 µg/m <sup>3</sup> à 9 µg/m <sup>3</sup>	91 [31-162]

Ratio PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>=0,6

RR=1,06 [1,02-1,11] pour les plus de 30 ans (Pope 2002 mortalité totale) et RR=1 pour les moins de 30 ans

**Tableau 3 : Analyse de sensibilité du gain en espérance de vie pour un citadin moyen, exprimé en nombre de jours, selon l'ampleur de la diminution des concentrations ambiantes des particules fines et la concentration initiale.**

Se pose aussi la question de la représentativité des chiffres de mortalité pris en compte pour les zones urbaines françaises (données 1999), ainsi que celle des données de pollution atmosphérique (données 2002). Cette représentativité pourrait être appréhendée par l'analyse des données de mortalité ou de la pollution atmosphérique sur une période un peu plus longue.

On relèvera enfin, comme signalé plus haut pour le cancer du poumon, que l'estimation des gains en espérance de vie telle que développée dans cette étude ne tient pas compte de la compétition entre les risques : un décès évité par la suppression d'une cause augmente d'autant la population susceptible de décéder d'autre chose ; pour le calcul de l'espérance de vie, le problème est de savoir si ces autres causes de décès conduisent à une mort prématurée ou non. Dans notre cas, il n'y a pas de raison, a priori, de penser que les individus qui « échapperaient » à la mort du fait d'une baisse du niveau de pollution, décèderaient plus précocement par ailleurs.

Dans l'étude de Pope [2002], le risque relatif  $RR_{10}$  a été estimé sur une population d'individus âgés plus de 30 ans ; il est donc appliqué tel quel dans notre étude pour les plus de 30 ans. Deux options sont alors possibles pour les moins de 30 ans :

1. le risque relatif est extrapolé à l'identique au moins de 30 ans. Il est donc constant pour toute la durée de vie de l'individu. Le sens (surestimation ou sous-estimation) de l'erreur engendrée par cette extrapolation n'est pas connu ;
2. la pollution est considérée comme sans impact sur la mortalité des moins de 30 ans ; autrement dit, le risque relatif est égal à 1 pour cette population. Dans ce cas, on sait a priori que l'on sous-estime l'impact de la pollution atmosphérique sur le nombre d'années perdues. C'est celle que nous avons choisie pour réaliser les calculs.

Néanmoins, si l'option (1) avait été retenue, les gains en terme d'espérance de vie auraient été de 25 % supérieurs à ceux de l'option (2) présentés dans le tableau 1 sans pour autant savoir si les gains sont sous estimés ou sur estimés par rapport à la réalité.

Enfin, toutes les unités urbaines n'ont pas le même le même niveau de pollution initial ; les réductions de pollution, respectivement à 4,5, 6 et 9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ne conduisent donc pas aux mêmes gains d'espérance de vie selon la ville. Suivant la zone urbaine considérée, le gain d'espérance de vie est compris entre 20 et 313 jours pour un niveau cible à 4,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ; il est compris entre 0 et 279 jours pour 6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ; et entre 0 et 211 jours pour 9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (la valeur de

0 correspond à un gain nul lorsque les concentrations moyennes actuelles sont déjà au niveau cible).

## **Conclusion**

Au delà du nombre important de décès potentiellement évitables, le gain sanitaire mesuré en terme d'espérance de vie obtenu grâce à la poursuite voire le renforcement des politiques de réduction de la pollution atmosphérique en milieu urbain est substantiel.

A titre de comparaison, la baisse de la mortalité observée en France entre 1999 et 2001 s'est traduite par une augmentation de la durée moyenne de vie de 3 dixièmes d'année en 2001 (soit environ 109 jours) [INED 2002-2003]. Étudié par groupe d'âge, ce gain d'espérance de vie entre 1993 et 1998 se chiffrerait à 109 jours chez les sujets de 15 à 44 ans et à 135 jours chez les 45-74 ans.

Compte tenu de ces résultats et au delà du nombre important de décès potentiellement évitables, la réalisation d'une étude économique de type coûts/bénéfices apparaît nécessaire de manière à quantifier les conséquences économiques de ce gain d'espérance de vie.

## Bibliographie

- AFSSE (2004). Estimation de l'impact sanitaire lié à l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité par cancer du poumon, et par maladies cardio-respiratoires en 2002 avec projections d'ici 2020, AFSSE.
- APHEIS (2004). Health impact assessment of air pollution and communication strategy. Third Year report, 2002-2003, July 2004.
- Doll R., Peto R., Boreham J., Sutherland I. (2004). Mortality in relation to smoking: 50 years' observations on male British doctors. *British Medical Journal* 328 (7455): 1519.
- IIASA (2002). A methodology to estimate changes in statistical life expectancy due to the control of particulate matter air pollution.
- INED (2002-2003). 31<sup>ème</sup> rapport sur la situation démographique en France : [http://www.ined.fr/publications/rapport\\_parlement/31erapport.pdf](http://www.ined.fr/publications/rapport_parlement/31erapport.pdf).
- Houdret J.L., Mathe F., Dybiak R. et Angotzi C. (décembre 2002). Métrologie des particules : Programme pilote national de surveillance des particules PM10 et PM<sub>2,5</sub>. Etude n°5, partie 1. Ecole des Mines de Douai, Département Chimie et Environnement, Douai : 26 pages.
- Hubert P. (2003). "Pour un meilleur usage du risque attribuable en santé environnementale." *Environnement, Risques et Santé* 2 (5) : 266-278.
- Künzli N., Kaiser R., Medina S., Studnicka M., Chanel O., Filliger P., Herry M., Horak F., Puybonnieux-Textier V., Quénel P., Schneider J., Seethaler R., Vergnaud J.C. and Sommer H. (2000). Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution : a European assessment. *The Lancet* 356: 795-801.
- Künzli N., Kaiser R., Medina S., Studnicka M., Oberfeld G. and Horak F. (1999). Health costs due to road traffic-related air pollution: an impact assessment project of Austria, France and Switzerland - Air pollution attributable cases: technical report on epidemiology. Bern, WHO-Europe: 76.
- Pope C.A., Burnett R.T., Thun M.J., Calle E.E., Krewski D., Ito K. and Thurston G.D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 297(9): 1132-1141.

- Shaw M, Mitchell R, Dorling D. (2000). Time for a smoke? One cigarette reduces your life by 11 minutes. *British Medical Journal* 320 (7226): 53.
- Rabl A. (2003). Interpretation of Air Pollution Mortality: Number of Deaths or years of life Lost? *Journal of Air Waste & Management Association* 53 (1), 41-50.
- WHO (1999). Health costs due to road traffic-related air pollution. An impact assessment project of Austria, France and Switzerland. Synthesis report.
- WHO (2003). Input report on air pollution. Specificities of children. Workshop 3 - The PEP project: Transport-related health impacts and their costs and benefits with a particular focus on children. The Hague, WHO.

# Annexe : Quantification du gain en espérance de vie lié à la diminution de la pollution aux particules fines

## *Quelques définitions*

Soit  $Q(t)$  le taux de mortalité à l'âge  $t$  : c'est la probabilité que l'on a de mourir avant l'âge  $t+1$  sachant que l'on a l'âge  $t$ .

Dans notre cas,  $Q(t)$  sera défini annuellement de la manière suivante et calculé à partir des données INSEE :

$$Q(t) = \frac{\text{nombre de morts d'âge compris entre } t \text{ et } t+1 \text{ dans l'année}}{\text{taille de la population d'âge } t \text{ au 1er janvier}} \quad \text{eq. 1.}$$

Soit  $S(t)$  la survie à l'âge  $t$  : c'est la probabilité que l'on a de vivre au moins jusqu'à l'âge  $t$  sachant que l'on vient de naître. Par définition,  $S(0) = 1$ .

## *Calcul de la survie à partir du taux de mortalité*

La probabilité de mourir entre l'âge  $t$  et  $t+dt$  sachant que l'on vient de naître peut s'exprimer de deux manières différentes :

1. C'est la probabilité de vivre au moins jusqu'à l'âge  $t$  moins la probabilité de vivre au moins jusqu'à l'âge  $t+dt$ , autrement dit :  $S(t) - S(t+dt)$  ;
2. C'est également la probabilité de vivre au moins jusqu'à l'âge  $t$  fois la probabilité de mourir entre  $t$  et  $t+dt$  ;
3. sachant que l'on a l'âge  $t$ , ce qui s'exprime à une approximation près par le produit :  $S(t) \cdot Q(t) \cdot dt$ .

D'où la relation entre survie et taux de mortalité :  $S(t+dt) = S(t)[1 - Q(t) \cdot dt]$  eq. 2.

Relation qui s'écrit de manière exacte sous la forme :

$$\frac{dS(t)}{S(t) \cdot dt} = -Q(t) \quad \text{eq. 3.}$$

L'équation 2 devient dans notre cas, c'est-à-dire avec la définition annuelle du taux de mortalité ( $dt = 1$ ) :

$$S(t+1) = S(t)[1 - Q(t)] \quad \text{eq. 4.}$$

Il s'agit d'une approximation ; la relation exacte peut être obtenue par intégration de l'équation 3 :

$$S(t+1) = S(t)\exp[-Q(t)] \quad \text{eq. 5,}$$

qui donne par itération :

$$S(t+1) = S(0)\exp\left[-\sum_{t=0}^t Q(t)\right] \quad \text{eq. 6.}$$

### ***Définition de l'espérance de vie***

L'espérance de vie à la naissance est l'espérance mathématique de la variable durée de vie restante à la naissance ( $t$ ) ; elle se définit donc de la manière suivante :

$$EV = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt ,$$

où  $f(t)$  est la densité de probabilité de la variable  $t$ , autrement dit la probabilité de vivre exactement jusqu'à l'âge  $t$  sachant que l'on vient de naître ; on a  $f(t) = S(t) \cdot Q(t)$ .

L'espérance de vie à la naissance s'exprime donc de la manière suivante :

$$EV = \int_0^{\infty} t \cdot S(t) \cdot Q(t) \cdot dt \quad \text{eq. 7.}$$

### Calcul de l'espérance de vie

Calculer une intégrale nécessite sa transformation préalable en une somme finie de  $n$  termes. Cette somme n'est qu'une approximation de l'intégrale, mais elle converge vers la vraie valeur de l'intégrale lorsque  $n$  augmente. Suivant la manière dont l'intégrale est discrétisée, la somme qui permet de la calculer converge plus ou moins rapidement. Autrement dit, dans notre cas, il convient de discrétiser de manière astucieuse l'intégrale de l'espérance de vie si on ne veut pas que le résultat dépende directement de l'âge maximal pour lequel on dispose de données.

D'après l'équation 3, on peut écrire :  $t \cdot S(t) \cdot Q(t) \cdot dt = -t \cdot dS(t)$ ,

or : 
$$d(t \cdot S(t)) = t \cdot dS(t) + S(t) \cdot dt,$$

d'où : 
$$t \cdot S(t) \cdot Q(t) \cdot dt = S(t) \cdot dt - d(t \cdot S(t)).$$

L'espérance de vie peut donc s'exprimer également sous la forme suivante :

$$EV = \int_0^{\infty} S(t) \cdot dt - [t \cdot S(t)]_0^{\infty}.$$

Il existe dans tous les cas une valeur  $t_{\max}$  à partir de laquelle la survie est nulle. Le second terme de l'équation précédente est donc nul.

L'espérance de vie à la naissance s'exprime alors de manière simple par la formule :

$$EV = \int_0^{\infty} S(t) \cdot dt \quad \text{eq. 8.}$$

La formule 8 conduit à une somme qui converge plus vite que l'équation 7 précédemment établie. Dans le cas d'une estimation annuelle de la survie, on calculera l'espérance de vie par la somme :

$$EV = \sum_{t=0}^{t_{\max}} S(t) \quad \text{eq. 9,}$$

où  $t_{\max}$  est la durée maximale pour laquelle on dispose de données.

### **Calcul du taux de mortalité correspondant à un niveau de pollution donné**

Le taux de mortalité  $Q_e(t)$  calculé par la formule 1 à partir des données INSEE correspond au niveau de pollution actuellement observé  $E$ . Soit  $B$  le niveau de pollution sans effet sur la mortalité et  $Q_b(t)$  le taux de mortalité correspondant à ce niveau de référence. La relation dose-réponse proposée par Pope [1995, 2002] et fondée sur le modèle de survie de Cox (*Cox proportional hazard regression model*) permet d'écrire :

$$Q_e(t) = Q_b(t) \exp[\mathbf{a}(E - B)].$$

Cette relation permet d'une part de calculer  $Q_b(t)$  à partir de  $Q_e(t)$  :

$$Q_b(t) = Q_e(t) \exp[\mathbf{a}(B - E)],$$

mais également de calculer le taux de mortalité  $Q_c(t)$  correspondant à un niveau de pollution  $C$  donné intermédiaire entre  $B$  et  $E$  :

$$Q_c(t) = Q_b(t) \exp[\mathbf{a}(C - B)],$$

soit :

$$Q_c(t) = Q_e(t) \exp[\mathbf{a}(C - E)].$$

On n'utilise pas directement le coefficient  $\mathbf{a}$ , mais le risque relatif  $RR_{10}$  calculé par Pope et correspondant à une augmentation de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de la pollution atmosphérique particulaire ( $\text{PM}_{2.5}$ ) :

$$RR_{10} = \frac{Q_{b+10}}{Q_b} = \exp(10\mathbf{a})$$

Autrement dit :

$$\mathbf{a} = \frac{\ln(RR_{10})}{10}.$$

Ainsi le taux de mortalité  $Q_c(t)$  correspondant à un niveau de pollution  $C$  compris entre le niveau de référence  $B$  et le niveau observé  $E$  s'exprime en fonction de  $RR_{10}$  et de  $Q_e(t)$  de la manière suivante :

$$Q_c(t) = Q_e(t) \cdot (RR_{10})^{\frac{C-E}{10}} \quad \text{eq. 10.}$$

Nous remarquerons que  $Q_c(t)$  ne dépend que de l'écart entre  $C$  et  $E$ .

Künzli [2000] propose une approximation linéaire de la relation dose-réponse, qui conduit à une formule pour  $Q_c(t)$  de la forme :

$$Q_c(t) = \frac{Q_e(t)}{1 + (RR_{10} - 1)(E - C)/10} \quad \text{eq. 11.}$$

Cette approximation ne sera pas utilisée.

### **Calcul de la durée de vie gagnée par une baisse du niveau de pollution de $E$ à $C$**

La durée de vie totale perdue liée à la pollution se calcule par la différence :

$$\Delta EV = EV_b - EV_e = \int_0^{\infty} S_b(t) \cdot dt - \int_0^{\infty} S_e(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} (S_b(t) - S_e(t)) \cdot dt .$$

Autrement dit, par la formule :

$$\Delta EV = EV_b - EV_e \approx \sum_{t=0}^{t_{\max}} S_b(t) - S_e(t) \quad \text{eq. 12,}$$

où :  $S_e(t+1) = S_e(t)[1 - Q_e(t)]$  et  $S_b(t+1) = S_b(t)[1 - Q_b(t)]$ ,  $Q_b(t)$  étant calculé par la formule 10.

#### Remarques :

1. Le terme  $S_b(t) - S_e(t)$  de l'équation 12 représente la perte annuelle de vie liée à la pollution.
2. Pour calculer la survie, nous préférons employer l'équation 4 plutôt que la relation 5, car elle permet de terminer la série de manière cohérente : considérant que tous les

individus sont morts à  $t_{\max}$ , alors on a  $Q(t_{\max})=1$  et  $S(t_{\max}+1)=0$ . Nous avons pu constaté dans le calcul de  $\Delta EV$  que l'écart entre la valeur obtenue à partir de l'équation 4 et celle obtenue à partir de l'équation 5 était négligeable.

De la même manière, la durée de vie que l'on pourrait gagner par une baisse de la pollution de  $E$  à  $C$  est égale à :

$$\Delta EV = EV_c - EV_e = \int_0^{\infty} S_c(t) \cdot dt - \int_0^{\infty} S_e(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} (S_c(t) - S_e(t)) \cdot dt.$$

Autrement dit :

$$\Delta EV = EV_c - EV_e \approx \sum_{t=0}^{t_{\max}} S_c(t) - S_e(t) \quad \text{eq. 13,}$$

où :  $S_c(t+1) = S_c(t)[1 - Q_c(t)]$ ,  $Q_c(t)$  étant calculé par la formule 10.

### **Aspect pratique concernant les données du très grand âge**

Les données de mortalité vont jusqu'à 112 ans (dernière personne décédée). Néanmoins, les données disponibles concernant la population s'arrêtent à 100 ans ; le calcul direct de la survie n'est donc pas possible au-delà de 100 ans. L'analyse des données de survie entre 95 et 100 ans fait apparaître une relation linéaire entre le log de la survie et l'âge. L'utilisation de cette approximation au-delà de 100 ans permet de pallier cet inconvénient.

En effet, l'analyse des données de survie de 95 à 100 ans sur la population des 76 unités urbaines permet effectivement de proposer une relation du type :

$$S_e(t) = \exp(a \times t + b) \quad \text{pour } t \geq 95 \text{ ans,}$$

où :  $a = -0.2587$  et  $b = 22.255$ .

Le coefficient de détermination  $R^2$  sur les 6 points (95 à 100 ans) est de 0.9993. Cette relation sera utilisée pour extrapoler les valeurs de survie jusqu'à 112 ans,  $S_e(113)$  étant considéré comme nul. Le taux de mortalité  $Q_e(t)$  est alors calculé à partir de la survie également jusqu'à 112 ans en inversant l'équation 4 :

$$Q_e(t) = \frac{S_e(t) - S_e(t+1)}{S_e(t)}.$$

$Q_b(t)$  est calculé à partir de  $Q_e(t)$  par la relation 10 jusqu'à 111 ans et vaut 1 pour 112 ans. On fait donc l'hypothèse que même s'il n'y avait pas de pollution, personne ne vivrait au-delà de 112 ans. Il en est de même pour  $Q_c(t)$  avec  $C$  compris entre  $E$  et  $B$ .

**Remarque concernant le risque relatif  $RR_{10}$**

Dans l'étude de Pope [2002], le risque relatif  $RR_{10}$  a été estimé sur une population d'individus âgés plus de 30 ans. Deux options sont possibles pour les moins de 30 ans :

1. le risque relatif est extrapolé au moins de 30 ans. Il est donc constant pour toute la durée de vie de l'individu. Le sens (surestimation ou sous-estimation) de l'erreur engendrée par cette extrapolation n'est pas connu ;
2. la pollution est considérée comme sans impact sur la mortalité des moins de 30 ans. Autrement dit, le risque relatif est égal à 1 pour cette population. Dans ce cas, on sait a priori que l'on sous-estime l'impact de la pollution atmosphérique sur le nombre d'année perdue ; cette solution est donc préférable à la précédente. C'est celle que nous avons choisie.



**agence française de sécurité sanitaire environnementale**  
27-31 avenue du Général Leclerc  
94704 Maisons-Alfort Cedex  
Tél. +33 1 56 29 19 30  
[afsse@afsse.fr](mailto:afsse@afsse.fr)

[www.afsse.fr](http://www.afsse.fr)

ISBN 2-11-095610-0