ARTICLES

Estimation des coûts attribuables à la pollution de l'air dans le secteur du bâtiment

Estimation of damage costs due to air pollution in the building sector

Ari RABL*, Laurence TEULERE**

Résumé

Cet article a pour objet d'établir une évaluation monétaire des dommages sur les bâtiments imputables aux émissions polluantes en France. Bien qu'il n'existe pas d'inventaire détaillé des matériaux du parc immobilier français qui permette de quantifier les réactions des matériaux de construction aux divers polluants, des données sur le montant et la fréquence des dépenses de rénovation sont disponibles auprès de la Direction Générale des Impôts. Une analyse statistique de ces dépenses met en évidence le rôle prépondérant du revenu dans une décision de rénover un bâtiment. Tandis que les dépenses augmentent avec la concentration de particules, aucune corrélation positive entre ces dépenses de protection et les concentrations de SO_2 n'a pu être décelée. Nous en avons donc conclu qu'en France, c'est l'état d'encrassement des façades (dû aux particules) et non le niveau d'érosion (dû au SO_2) qui semble l'emporter dans la décision de ravaler. À l'aide de ces données, nous avons alors pu définir une fonction dose-réponse qui exprime le coût annuel moyen par personne des dépenses de rénovation en fonction de la concentration ambiante des particules. Nous montrons que le coût total (dépenses de rénovation + perte d'aménité) est environ le double des dépenses de rénovation. Nous avons également analysé les données disponibles pour les dépenses de restauration des monuments historiques. La comparaison avec une estimation des dommages de la pollution sur la santé montre que les dommages des bâtiments imputables à la pollution sont plus faibles de deux ordres de grandeur.

Abstract

This paper reviews the methodologies for calculating air pollution damage to buildings, as well as the data available for their implementation in France. There are no inventories of building materials and surface areas for France, but we have been able to obtain data for frequencies and costs of renovation activities. In particular, data for renovation expenditures are available from the Tax Office because they are deductable from the income tax. By regressing these data we derive a « combined dose-response function » for the renovation cost as a function of pollution. We find that the most important variables are income and concentration of particles, whereas a correlation with SO_2 is not clear. This could be understood if most renovation expenditures in France are occasioned by soiling (primarily due to particles) rather than corrosion (primarily due to SO_2). For historical buildings and monuments we have been able to find only data for total national expenditures ; they imply that the cost of pollution damage is somewhat smaller than for utilitarian buildings. Since the total damage cost is the sum of renovation cost and of amenity loss, we also examine the latter. We show that the amenity loss can be inferred from renovation expenditures without carrying out a contingent valuation ; the amenity loss is approximately equal to the renovation cost. Based on detailed models for atmospheric dispersion and for the geographic distribution of buildings, we calculate the damage cost caused by individual sources of pollution. We compare our results with other estimates in the literature, and we discuss the uncertainties. We also find that, compared to the cost of health damage, the cost of damage to buildings is smaller by about two orders of magnitude.

* *Centre d'Énergétique, École des Mines, 60, boulevard Saint-Michel, 75272 Paris Cedex 06.*

** *Direction Stratégie/Département Marché -EDF, 2, rue Louis Murat, 75384 Paris Cedex 08.*

Introduction

Les phénomènes d'altération et de dégradation des façades extérieures des bâtiments ne sont pas nouveaux et peuvent être aussi bien d'origine naturelle qu'anthropogénique. Il semblerait cependant que l'accroissement de la pollution atmosphérique ait favorisé leur accélération. Les phénomènes d'encrassement des façades seraient accentués par les émissions de particules (les suies notamment) et les phénomènes de corrosion ou d'érosion par les pluies acides (liées aux émissions de dioxyde de soufre principalement).

Afin de guider la politique environnementale, il serait souhaitable de connaître le bénéfice d'une réduction des dommages dus à la pollution atmosphérique. Le but de cet article est justement d'évaluer le coût des dommages sur les bâtiments. L'idéal serait de l'établir à l'aide de l'approche par la fonction de dommage ou *impact pathways analysis* [1,2]. Celle-ci permet en effet de définir à partir des modèles de dispersion les niveaux de concentrations des polluants et d'en déduire la dégradation des matériaux de construction à l'aide des fonctions dose-réponse. Mais le manque de connaissances sur ces fonctions dose-réponse et l'absence d'inventaires en France de la surface des façades et la nature des matériaux de construction nous ont contraints à adopter une autre démarche.

Notre approche s'appuie directement sur la fréquence et le montant des dépenses d'entretien ou de ravalement engagées par les propriétaires, qui sont des données disponibles en France dans la mesure où elles ouvrent droit à une réduction d'impôts. Nous avons effectué des régressions par rapport au revenu, aux concentrations de particules et aux concentrations de SO_2, ce qui nous a permis d'établir le coût des dommages imputables à la pollution.

Nous présenterons également une comparaison de ces coûts de rénovation avec ceux obtenus dans d'autres études, ainsi que le coût des dommages estimé pour les monuments historiques français. Enfin, nous montrerons que le coût des dommages sur les bâtiments que nous avons estimé est inférieur de deux ordres de grandeur à celui des dommages sur la santé.

Mais il convient au préalable d'examiner le coût économique total des dommages qui comprend, en plus des dépenses engagées pour éviter ou réparer les dommages, la perte d'aménité, c'est-à-dire la diminution de satisfaction liée à l'utilisation ou à l'esthétique d'un bâtiment. Nous montrerons que la perte d'aménité est comparable au coût de rénovation des bâtiments.

Abréviations utilisées

c : concentration

UE : Union européenne (EU15 = les 15 pays membres actuels)

FF : franc français

kFF : 1 000 FF

MFF : million FF

NO_x : mélange non défini d'oxydes d'azote, en particulier de NO et de NO_2

P : perte d'aménité

PS_d : particules en suspension, de diamètre en dessous de d µm (PM_d en anglais)

D : dépenses de rénovation

SO_x : mélange non spécifié d'oxydes de soufre, en particulier de SO_2 et de SO_3

T : période entre des rénovations successives

TSP : Total Suspended Particles (particules totales en suspension)

Perte d'aménité

Bien que les pertes d'aménité, comme celles liées à la dégradation esthétique des bâtiments, puissent paraître difficilement estimables en termes monétaires parce qu'elles relèvent de la perception subjective des individus de leur cadre de vie, il est possible de les aborder en interrogeant directement les individus sur leur consentement à payer pour éviter ce type de dégradations. Cette méthode, appelée évaluation contingente [3] est coûteuse (une enquête d'un échantillon représentatif coûte entre 200 et 500 kF) et difficile à mettre en place si l'on veut éviter des biais importants. En France, il n'existe pas, à ce jour, de telles études en ce domaine.

Afin d'estimer le coût total, nous proposons donc une autre approche, basée sur le fait que la perte d'aménité est implicite dans les décisions de rénovation et de réparation que les dégradations entraînent : pour un coût de rénovation donné, plus la perte d'aménité est importante, plus les rénovations sont fréquentes.

Un modèle simple démontre comment on peut déduire la perte d'aménité en observant les décisions de rénovation. Entre deux opérations de rénovation, on suppose que la perte d'utilité liée à l'encrassement des façades augmente de manière linéaire avec le temps (t). Si T est la période de temps entre deux opérations de rénovation, la perte d'aménité totale P durant T est alors égale à

$$P = \int_0^T \alpha\, t\, dt = \frac{\alpha}{2} T^2 \qquad (1)$$

où α est une constante de proportionnalité, et nous supposons un taux d'actualisation nul (*voir* Figure 1).

Le coût total du dommage durant cette période correspond à la somme de la perte d'aménité P et

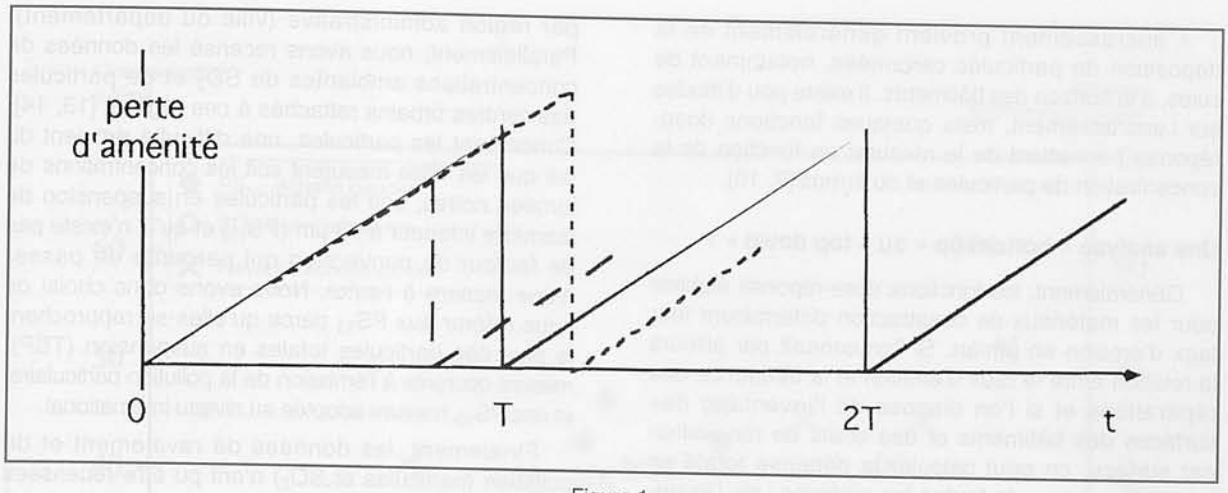

Figure 1.
Taux de perte d'aménité en fonction du temps t.
Les lignes en pointillé correspondent à une rénovation avant ou après T.
Amenity loss rate as function of time t.
Solid line : renovation period T ; dashed lines : renovation period shorter or longer than T.

des dépenses de rénovation D. Le seul paramètre exogène de ce modèle, sur lequel le propriétaire d'un bâtiment peut intervenir, est la longueur de la période T. Un propriétaire rationnel choisira T de sorte que le coût total soit minimal, ce qui revient à minimiser le coût moyen C_{av} durant une période T :

$$C_{av} = \frac{P}{T} + \frac{D}{T} \quad (2)$$

En insérant l'équation (1) et en prenant la dérivée de C_{av} par rapport à T, on obtient la condition première d'optimalité ou T_o :

$$0 = \frac{\alpha}{2} - \frac{D}{T_0^2} \quad (3)$$

ou

$$T_o = \sqrt{\frac{2D}{\alpha}} \quad (4)$$

D'après l'équation 1, cette condition implique

$$P = D, \quad (5)$$

c'est-à-dire que la perte d'aménité est égale aux dépenses de rénovation.

A. Rabl [4] a généralisé cet argument afin de prendre en compte des conditions plus réalistes, par exemple les effets de l'actualisation et la possibilité que la perte d'utilité augmente de façon non linéaire avec le temps. Il trouve que le rapport P/D pourrait varier de 50 %, mais que l'équation 5 semble une bonne approximation pour des conditions typiques. Il préconise donc la simple règle que la perte d'aménité est approximativement égale aux coûts de rénovation et que le coût total des dommages peut être défini par :

« Coût total des dommages
= 2 × dépenses de rénovation ». (6)

Cet argument suppose que le propriétaire minimise son coût total. Les deux composantes du coût total sont d'importance égale dans une décision de ravaler : en effet le propriétaire achète de l'aménité en payant le coût des travaux. Bien sûr, il peut y avoir des erreurs de jugement ou bien une impossibilité d'obtenir toutes les informations nécessaires, mais il semble plausible qu'en moyenne les erreurs se compensent et que le choix de la période de rénovation T soit alors correct. En tout cas, une estimation de la perte d'aménité est incertaine ; même avec une évaluation contingente il serait difficile d'obtenir une estimation plus fiable car les incertitudes d'une évaluation contingente sont considérables.

La règle d'estimation de l'équation 6 reste valable pour les monuments historiques dans la mesure où les dépenses publiques de rénovation sont l'expression d'un consentement à payer collectif pour l'amélioration de l'apparence de ces monuments. Même si l'on considère souvent qu'il n'est pas possible de donner un prix au patrimoine bâti, celui-ci n'en a pas moins une valeur que les économistes mesurent par la perte (ou le gain) de satisfaction des individus consécutive à une dégradation (ou à une amélioration) de ces monuments. C'est cette valeur que nous cherchons ici à mesurer indirectement à partir des dépenses de rénovation.

Méthodes d'estimation des coûts de rénovation

Les différents types de dommages

Deux types de dommages sont engendrés par la pollution atmosphérique :

- la corrosion ou l'érosion des matériaux de construction et de revêtement ;
- l'encrassement.

De nombreuses études ont été menées pour quantifier les effets de la corrosion et de l'érosion sur les bâtiments sous la forme de fonctions dose-réponse. Elles montrent que ces phénomènes sont principalement dus à l'attaque des pluies acides [5-8].

L'encrassement provient généralement de la déposition de particules carbonées, notamment de suies, à la surface des bâtiments. Il existe peu d'études sur l'encrassement, mais quelques fonctions dose-réponse permettent de le mesurer en fonction de la concentration de particules et du temps [9, 10].

Une analyse « bottom up » ou « top down » ?

Généralement, les fonctions dose-réponse établies pour les matériaux de construction déterminent leur taux d'érosion en µm/an. Si l'on connaît par ailleurs la relation entre le taux d'érosion et la fréquence des réparations et si l'on dispose de l'inventaire des surfaces des bâtiments et des coûts de rénovation par surface, on peut calculer la dépense totale en faisant la somme de toutes les surfaces i de l'inventaire, comme suit :

$$\text{Dépense totale de rénovation} = \sum_i \text{surface}_i \times \text{fréquence}_i \times \text{coût}_i \quad (7)$$

Cette approche, considérée comme une micro-analyse, est connue sous le nom d'approche « **bottom up** ».

Elle a été appliquée par le programme ExternE [1] pour estimer le coût des dommages sur les bâtiments en Grande-Bretagne. Une étude détaillée des constructions de Birmingham (deuxième ville après Londres), a permis de dresser cinq « portraits-robots » pour les constructions types et de définir leur ventilation géographique sur l'ensemble du territoire [11]. Les coûts de réparation ont été donnés par l'étude d'Ecotec et celle de Lipfert [5, 11] et la relation entre la fréquence des réparations et le taux d'érosion a été estimée sur la base de jugements d'experts (à savoir : un taux d'érosion de 3 mm des façades en pierre ou en mortier implique une rénovation).

Cette approche n'a pas encore pu être appliquée en France pour deux raisons. Premièrement, il n'y a, en France, aucune information sur la surface des façades et la nature des matériaux de construction. Deuxièmement, la relation entre la fréquence des réparations et le taux d'érosion est apparue fortement incertaine. Les propriétaires d'immeubles contrôlent rarement l'usure de leurs façades pour décider de ravaler et s'appuient davantage sur l'état de salissure de leurs bâtiments qui résulte principalement de l'encrassement.

Compte tenu de ces lacunes, nous avons choisi de fonder notre analyse directement sur des données observables de fréquences et de coûts des activités de rénovation, à l'instar de Newby et al. [12]. Cette approche globale est connue sous le nom de « **top down** ».

Coûts de rénovation en France

Des données issues des déductions d'impôts

La Direction Générale des Impôts nous a fourni le détail des dépenses de ravalement ouvrant droit à une réduction d'impôts par contribuable et agrégées par région administrative (ville ou département). Parallèlement, nous avons recensé les données de concentrations ambiantes de SO_2 et de particules des centres urbains rattachés à ces régions [13, 14]. Concernant les particules, une difficulté provient du fait que les villes mesurent soit les concentrations de fumées noires, soit les particules en suspension de diamètre inférieur à 13 µm (PS_{13}) et qu' il n'existe pas de facteur de conversion qui permette de passer d'une mesure à l'autre. Nous avons donc choisi de nous référer aux PS_{13} parce qu'elles se rapprochent le plus des particules totales en suspension (TSP), mesure courante à l'émission de la pollution particulaire, et des PS_{10}, mesure adoptée au niveau international.

Finalement, les données de ravalement et de pollution (particules et SO_2) n'ont pu être recensées que pour 15 villes, auxquelles s'ajoutent 2 villes où ne figurent que les niveaux de concentrations en particules. Ces données forment le nuage de points représenté dans la figure 2. Celui-ci montre que les dépenses de rénovation (en abscisse) augmentent avec le niveau de revenu mais diminuent avec le niveau de pollution (en ordonnée). Cette relation de décroissance avec la pollution qui apparaît surprenante s'explique par la corrélation négative entre les niveaux de revenu et de pollution dans ces principales villes françaises, le coefficient de corrélation R^2 entre revenu et PS_{13} étant de – 0,5. Le revenu joue un rôle crucial.

Les paramètres de la régression linéaire des dépenses de rénovation sur le revenu, les niveaux de PS_{13} et de SO_2 figurent dans le tableau 1. Le coefficient des PS_{13} est positif mais celui du SO_2 est négatif. De surcroît, l'incertitude sur ces deux paramètres est grande comme l'indiquent les statistiques de Student dans la 4e colonne (– 0,7 pour le SO_2 et 0,8 pour les PS_{13}).

Si le revenu est une variable importante, on devrait s'attendre à ce que les coefficients de pollution varient avec le revenu. Nous avons donc introduit comme nouvelle variable le produit du revenu et de la pollution. Si l'on effectue une nouvelle régression des dépenses de ravalement sur le revenu et sur la nouvelle variable (revenu × concentration PS_{13}), les estimations obtenues s'avèrent de meilleure qualité comme l'indique le tableau 2, p. 86.

Nous avons essayé d'autres régressions pour aboutir toujours au même résultat : les dépenses de ravalement sont corrélées de façon significative et positive avec la variable « Revenu », tandis que la corrélation avec les variables de pollution n'est pour la plupart pas significative. Le coefficient de la variable PS_{13} ou du revenu × PS_{13} est positif, celui de la variable SO_2 ou du revenu × SO_2 est négatif, et tous les coefficients de la pollution ont des écarts-types importants ($|t| \leq \approx 1$).

Deux facteurs peuvent expliquer nos résultats.

• D'une part, les données environnementales évoluent d'une année sur l'autre et peuvent représenter une source d'incertitude importante. Depuis le début

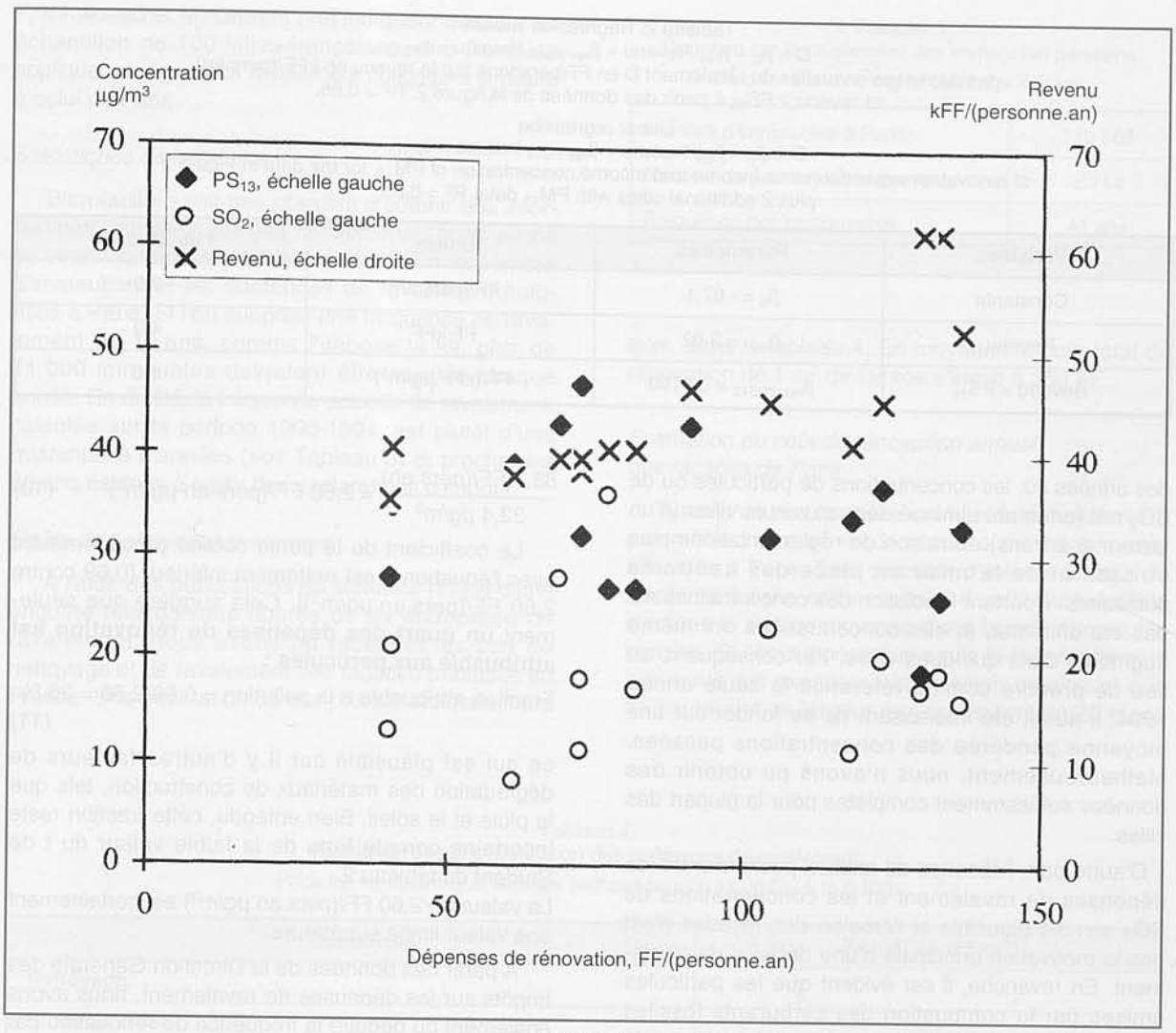

Figure 2.
Données de dépenses de ravalement, revenu et concentrations de particules (PS_{13}) et de SO_2 pour 15 villes françaises. Pour chaque ville, les dépenses de rénovation sont représentées en abscisse, et le revenu (en kFF/(personne.an) et les niveaux de concentration (en µg/m³) sont indiqués en ordonnée.

Data for renovation expenditures, income, and concentrations of particles (PM_{13}) and SO_2, for 15 cities in France. For each city the x-axis shows the renovation expenditure, and the corresponding income and concentrations are shown along the y-axis. (1.00 $ = 5 to 6 FF).

Tableau 1.
Régression linéaire
$D = \beta_0 + \beta_{rev}$ Revenu $+ \beta_{PS13}\, c_{PS13} + \beta_{SO2}\, c_{SO2}$
des dépenses annuelles de ravalement D en FF/personne sur le revenu en kFF/(pers.an) et les concentrations de SO_2 et PS_{13} en µg/m³ à partir des données de la figure 2. $R^2 = 0,66$.

Linear regression
$D = \beta_0 + \beta_{rev}$ Income $+ \beta_{PS13}\, c_{PS13} + \beta_{SO2}\, c_{SO2}$
of renovation expenditures in FF/(person.yr) vs income in kFF/(person.yr) and concentrations in µg/m³ of particles (PM_{13}) and SO_2, for the data in Figure 2. $R^2 = 0.66$.

Variables	Paramètres	Unités	t de Student
Constante	$\beta_0 = -82$	FF/(pers.an)	- 1,5
Revenu	$\beta_{rev.} = 3,52$	FF/kFF	4,3
PS_{13}	$\beta_{PS13} = 0,72$	FF/(pers.an.µg/m³)	0,8
SO_2	$\beta_{SO2} = -0,39$	FF/(pers.an.µg/m³)	- 0,7

Tableau 2. Régression linéaire
$D = \beta_0 + \beta_{rev}$ Revenu + $\beta_{rev \cdot PS13}$ Revenu × c_{PS13}
des dépenses annuelles de ravalement D en FF/personne sur le revenu en kFF/(pers.an)
et revenu × PS_{13} à partir des données de la figure 2. $R^2 = 0,65$.

Linear regression
$D = \beta_0 + \beta_{rev}$ Income + $\beta_{rev \cdot PS13}$ Income × c_{PS13}
of renovation expenditures vs Income and Income.concentration of PM_{13}, for the data in Figure 2
plus 2 additional cities with PM_{13} data. $R^2 = 0.65$.

Variables	Paramètres	Unités	t de Student
Constante	$\beta_0 = -67,1$	FF/(pers.an)	- 2,0
Revenu	$\beta_{rev.} = 3,02$	FF/kFF	4,9
Revenu × PS_{13}	$\beta_{rev \times PS13} = 0,0158$	FF/(kFF.µg/m³)	1,0

des années 80, les concentrations de particules ou de SO_2 ont fortement diminué dans plusieurs villes (d'un facteur 2 à Paris) en raison de réglementations plus strictes et de la mise en place des centrales nucléaires. Pourtant l'évolution des concentrations n'a pas été uniforme, et ces concentrations ont même augmenté dans quelques villes. Par conséquent, au lieu de prendre comme référence la seule année 1994, il aurait été intéressant de se fonder sur une moyenne pondérée des concentrations passées. Malheureusement, nous n'avons pu obtenir des données suffisamment complètes pour la plupart des villes.

• D'autre part, l'absence de relation positive entre les dépenses de ravalement et les concentrations de SO_2 semble plausible si l'érosion des façades n'est pas la motivation principale d'une décision de ravalement. En revanche, il est évident que les particules émises par la combustion des carburants fossiles augmentent la nécessité de ravaler par la noirceur de la suie. C'est pourquoi nous trouvons la régression du tableau 2 plausible (malgré des t de Student faibles), et nous prenons donc pour la suite le modèle :

$$D = \beta_0 + \beta_{rev} \text{ Revenu} + \beta_{rev \cdot PS13} \text{ Revenu} \times c_{PS13} \quad (8)$$

où le revenu est exprimé en kFF/(pers.an), et où c_{PS13} est la concentration de particules PS_{13} en µg/m³ et D représente les dépenses de ravalement en FF/(pers.an). Cette équation est en fait une **fonction de concentration-réponse** linéaire qui permet de calculer le coût des dommages liés aux concentrations de particules. Sa pente est définie par le coefficient de PS_{13}. Pour un revenu moyen de 43,5 FF/(pers.an), ce coefficient est égal à :

$$\frac{\partial D}{\partial c_{PS}} = \beta_{rev \cdot PS} \times \text{Revenu} = 0,69 \text{ FF/(personne·an·µg/m}^3\text{)}. \quad (9)$$

Pour la ville de Paris dont le revenu par habitant est le plus élevé en France, le coefficient est égal à $0,0158 \times 61,9 = 0,98$ FF/(pers·an·µg/m³).

Si seules les particules (avec un niveau de concentration moyen de 32,4 µg/m³) étaient à l'origine des dépenses de ravalement, la pente de la fonction dose-réponse serait alors égale à :

$$\frac{83,7 \text{ FF/(pers.an)}}{32,4 \text{ µg/m}^3} = 2,60 \text{ FF/(pers·an·µg/m}^3\text{)} \quad (10)$$

Le coefficient de la pente obtenu précédemment avec l'équation 9 est nettement inférieur [0,69 contre 2,60 FF/(pers.an.µg/m³)]. Cela suggère que seulement **un quart des dépenses de rénovation est attribuable aux particules :**

Fraction attribuable à la pollution = 0,69/2,60 = 26 % (11)

ce qui est plausible car il y d'autres facteurs de dégradation des matériaux de construction, tels que la pluie et le soleil. Bien entendu, cette fraction reste incertaine compte tenu de la faible valeur du t de Student du tableau 2.
La valeur de 2,60 FF/(pers.an.µg/m³) est certainement une valeur limite supérieure.

À partir des données de la Direction Générale des Impôts sur les dépenses de ravalement, nous avons également pu déduire la fréquence de rénovation par contribuable. Elle est de l'ordre de 50 ans pour la France et de 30 ans pour la seule ville de Paris.

Les données de rénovation de Paris

Pour la ville de Paris il est possible de comparer ces estimations avec des données obtenues indépendamment grâce à la législation sur les ravalements.

Législation

En 1852, un décret introduit par Napoléon III imposa aux propriétaires d'immeubles parisiens de nettoyer les façades exposées sur la rue au moins une fois tous les 10 ans. Cette mesure fut étendue en 1904 à toutes les façades [15].Durant la première moitié du XXe siècle, l'application de cette loi a été quelque peu inégale et ce n'est que dans les années 60 que les campagnes de ravalement ont été relancées à Paris. Aujourd'hui encore, les propriétaires parisiens devraient procéder à un ravalement des façades au moins tous les 10 ans. S'ils oublient cet engagement alors que l'état de leur immeuble le nécessite, la ville de Paris peut les contraindre à verser une amende de 1 000 à 20 000 FF. Dans leur étude,

F. Virolleaud et M. Laurent [16] indiquent que, sur un échantillon de 100 villes françaises, une trentaine applique un régime de ravalement obligatoire similaire à celui de Paris.

Statistiques de ravalement

Bien qu'il ne soit pas possible d'obtenir des informations détaillées sur les ravalements, nous avons pu réunir quelques données concernant le nombre d'immeubles et les demandes de ravalement autorisés à Paris. Si l'on suppose une fréquence de ravalement de 10 ans, comme l'impose la loi, plus de 11 000 immeubles devraient être ravalés chaque année. En réalité, la fréquence actuelle de ravalement, calculée sur la période 1990-1994, est plutôt d'une quarantaine d'années (*voir* Tableau 3) et proche des 30 ans estimés à partir des déclarations d'impôts.

Coûts de nettoyage/ravalement

À l'aide des publications du Moniteur [17] et d'une enquête téléphonique auprès de six entreprises de ravalement, nous avons pu recenser les prix de nettoyage et de ravalement des façades pratiqués en France. Une estimation de ces prix est indiquée, hors taxe, dans le tableau 4. En moyenne le coût total de rénovation de 1 m² de façade s'élève à 250 FF.

Tableau 3.
Données sur le ravalement des immeubles parisiens.
Data for the cleaning of buildings in Paris.

Nombre d'immeubles à Paris	110 588
Nombre de permis de ravalement	2 714
Fréquence des ravalements	41 ans

Estimation du coût de rénovation annuel des façades de Paris

À partir de ces données sur le coût du ravalement par mètre carré et sur le nombre de ravalements effectués à Paris, il est possible d'estimer le coût du ravalement dans cette capitale. Il suffit au préalable d'estimer la surface moyenne d'une façade d'immeuble parisien. Si l'on suppose que seule la façade donnant sur la rue est exposée à la pollution urbaine et que sa hauteur et sa largeur moyennes sont de 20 m, on

Tableau 4.
Estimation des prix (hors taxe) des opérations de ravalement.
Price list for cleaning of façades (without taxes) ; (1.00 $ = 5 to 6 FF).

Opérations	Prix HTVA (FF/m²)
Nettoyage	
Brossage à sec	30[a]
Gommage	95-115[b]
Jet de sable	79[a]
Lavage au jet et à la brosse	74[a]
Lavage à la vapeur	96[a]
Nettoyage au surpresseur avec produits détergents	60[a]
Protections synthétiques des peintures	89[a]
Traitement des surfaces	
Peinture	150[c]
Revêtement hydrofuge	60-80[b,c]
Plâtre	104[a]
Chaux	134[a]
Ciment	164[a]
Autres	
Échafaudage (location, installation et repliement)	74 à 166[a,b,c]
Bâche de protection (location, installation et repliement)	20 à 40[a,d]

Sources : a. Publications du Moniteur [1994].
b. CPP, Saint-Ouen ; M.Katalinic, communication personnelle.
c. Sarpie, Saint-Michel-sur-Orge, M. Antoine, communication personnelle.
d. Technie Puts, Saint-Ouen ; M.Garnalec, communication personnelle.

en déduit une surface moyenne de 400 m². Dès lors, le coût du ravalement d'une façade s'élève à

$$\text{coût/an} = \frac{\text{coût}}{\text{surface}} \times \frac{\text{surface de façade}}{\text{bâtiment}} \times \text{nombre de bâtiments ravalés/an} \quad (12)$$

= 400 m²/bâtiment × 250 FF/m² × 2 714 bâtiments/an
= 271 MFF/an.

La population parisienne étant de 2,15 millions d'habitants, cela induit une dépense annuelle par habitant de 126 FF. Ce coût n'est très pas éloigné des 133 FF annuels par personne indiqués par le nuage de points (*voir* Figure 2, p. 85).

Comparaison des dépenses de rénovation avec d'autres études

Différentes études européennes ont été menées sur les dépenses de rénovation imputables à la pollution. Trois d'entre elles effectuées en Allemagne, en Grande-Bretagne et dans trois villes européennes (Prague, Stockholm et Sarpsborg) permettent d'établir une comparaison avec le coût obtenu pour la ville de Paris.

Dans l'étude allemande, B. Isecke et al. [18] analysent le cas de la ville de Dortmund qu'ils extrapolent ensuite pour estimer le coût de rénovation en Allemagne de l'Est. Les fréquences de rénovation ont été définies à partir d'une enquête auprès des propriétaires et des sociétés spécialisées dans le ravalement. Seuls les coûts de ravalement et de nettoyage des immeubles situés dans une zone où la concentration de SO_2 excède 30 µg/m³ ont été retenus. Ces coûts permettent ainsi d'estimer les dépenses liées à la corrosion et à l'encrassement.

Dans l'étude scandinave, les trois villes de référence analysées (Prague en République tchèque, Stockholm en Suède et Sarpsborg en Norvège) ont été découpées en quatre zones selon le niveau de concentration ambiante de SO_2 (< 20 µg/m³, [20, 60 µg/m³], [60, 90 µg/m³] et > 90 µg/m³). La fréquence et les coûts de rénovation ont été définis par des enquêtes auprès des entreprises ou à partir des guides de construction [20]. Pour estimer le coût additionnel lié à la corrosion, le modèle suivant a alors été utilisé :

$$K_a = K\,S\,(\frac{1}{L_p} - \frac{1}{L_c}) \quad (13)$$

où

K_a= coût additionnel de rénovation ;

K = coût de rénovation par zone ;

S = surface des matériaux de construction exposée ;

L_p = fréquence de ravalement dans les zones polluées ;

L_c = fréquence de ravalement dans les zones non polluées.

Ce modèle permet d'établir la diminution des dépenses de ravalement que générerait une réduction de la concentration de SO_2 jusqu'à son niveau le plus faible (SO_2 < 20 µg/m³). Les résultats obtenus sont particulièrement élevés, notamment pour la ville de Prague (*voir* Tableau 5). En fait, la nature des matériaux de construction utilisés dans ces villes n'est pas étrangère à ce résultat. À Prague, 24 % des matériaux exposés sont en plâtre et 40 % en métal, ce qui augmente le coût de rénovation de ces façades. Il en est de même pour les façades en bois peint de Sarpsborg.

Tableau 5.
Résultats d'études européennes sur le coût de rénovation des bâtiments lié à la pollution.
Results of several studies for the cost of building renovation due to pollution.

	Surface exposée en m²/pers	**Coût de rénovation en FF/(pers.an)**	Coût de rénovation en FF/(m².an)	Concentration moyenne de SO_2 en µg/m³	Concentration moyenne de PS_{13} en µg/m³
Allemagne de l'Est[a]	55,6	**370**	6,65	> 30	
Prague[b]	83	**757**	9,12	70	
Sarpsborg[b]	165	**358**	2,17	20 – 60	
Stockholm[b]	132	**138**	1,04	< 20	
Grande-Bretagne[c]		**17**			
Paris[d]	*(21[e])*	**35**	*(6,14[e])*	19	26

Source : Anne Pons et al. 1995 [19] (coûts convertis au taux de change de 1991 et corrigés de l'inflation).
Notes :
a : Isecke et al. [18] : corrosion et encrassement ; enquête auprès des propriétaires et des gestionnaires du parc immobilier ;
b : Kucera et al. [20] : corrosion ; enquête auprès des propriétaires et consultation des guides de construction ; calcul des fréquences de rénovation ; prix suédois de référence pour les trois villes ;
c : Newby et al. [12] : encrassement ; enquête auprès des entreprises de ravalement ;
d : étude présente : coûts réels de rénovation établis en supposant que la pollution particulaire n'est à l'origine que de 26 % des coûts totaux de rénovation (133 FF) ;
e : surface de façade seulement, tandis que les autres estimations sont par surface totale.

Contrairement à ces deux études, l'étude de Newby et al. [12] réalisée en Grande-Bretagne repose uniquement sur les dépenses de ravalement engendrées par le phénomène d'encrassement. À l'instar de notre application, il s'agit d'une analyse des dépenses de nettoyage/ravalement fondée sur les prix du marché anglais du ravalement. Elle permet de définir un coût annuel lié à la pollution de l'ordre de 17 FF/personne. Cette estimation reste très inférieure aux coûts obtenus par les Scandinaves et les Allemands, mais elle se rapproche de notre estimation.

Coûts de rénovation des constructions historiques

Il est difficile d'établir un coût générique de rénovation au mètre carré pour le patrimoine bâti. En raison de ses matériaux de construction, de son âge ou encore de sa forme, chaque monument nécessite un traitement particulier. De surcroît, pour ces constructions, la décision de ravaler peut s'inscrire dans un programme national de conservation du patrimoine et n'est donc pas toujours directement reliée au niveau de pollution urbaine.

On sait cependant que le ministère de la Culture a consacré un budget de 1 199 MFF de 1988 à 1992 et de 1 570 MFF de 1994 à 1998 pour la restauration et la rénovation des monuments historiques [21]. Or, ces montants n'ont permis de couvrir que 40 à 50 % des dépenses de rénovation. Ces dernières s'élèvent donc à près de $3{,}0 \times 10^9$ francs par an, ce qui correspond à un montant annuel de 52 FF par personne.

Seule une partie de ce montant peut être attribuée aux dépenses de ravalement liées à la pollution atmosphérique. Si l'on suppose que cette part représente 26 % (par analogie aux dépenses de ravalement des immeubles étudiées plus haut), le coût annuel de la pollution que l'on en déduit est de 13 FF/personne (*voir* Tableau 6). Si l'on compare cette estimation au coût de la pollution sur les habitations estimé plus haut (83,7 FF/personne ou 2,60 FF/(pers.an.µg/m^3) × 32,4.µg/m^3), il apparaît que l'impact de la pollution sur les monuments historiques est nettement plus faible, dans un rapport de :

$$\frac{\text{Dommages, monuments historiques}}{\text{Dommages, immeubles et maisons}} = \frac{52 \text{ FF/(pers.an)}}{83{,}7 \text{ FF/(pers.an)}} = 62 \qquad (14)$$

Conclusion

Au cours d'un programme européen sur les coûts de la pollution [1,2], nous avons examiné les données disponibles en France qui permettraient d'estimer les dommages sur les bâtiments. Puisqu'il n'y a pas d'inventaire de matériaux et de surfaces, il n'est pas possible d'appliquer l'approche « bottom up » avec les fonctions dose-réponse spécifiques qui ont été développées en mesurant l'érosion de différents matériaux en fonction de la concentration ambiante des polluants. En revanche, nous avons estimé les dommages à partir des données sur le montant et la fréquence des dépenses de ravalement que nous avons obtenues auprès de la Direction Générale des Impôts.

En effectuant une régression de ces dépenses sur le revenu et les variables de pollution, nous avons démontré que la pollution particulaire pouvait être à l'origine de la décision de rénover. Contrairement aux particules, nous ne trouvons pas de corrélation positive entre les dépenses de ravalement et la concentration de SO_2. Les incertitudes sont considérables, car les données disponibles ne sont pas suffisamment détaillées et complètes. De plus, la pollution n'est qu'un facteur parmi plusieurs qui influent sur une décision de ravaler : d'une part il y a une détérioration naturelle (due au soleil, à la pluie...), d'autre part les dépenses de ravalement sont fortement corrélées avec le revenu.

Sur la base des régressions obtenues, nous proposons une fonction dose-réponse effective qui donne le coût par personne directement en fonction de la concentration des particules (PS_{13}) dans l'air. Nous avons également montré que le coût total du dommage, y compris la perte d'aménité, est environ le double du coût du ravalement. Avec ce facteur 2, la pente de notre fonction dose-réponse

Tableau 6.
Données de restauration et de rénovation des monuments historiques.
Expenditures for restoration of historical monuments.

Nombre de monuments	12 500
Dépenses totales annuelles	≈ 3 000 MFF (financement privé + public)
Population en France	58 millions d'habitants
Dépenses totales (pers.an)	≈ 52 FF
Part de la pollution de l'air (hypothèse : 26 % du total)	≈ 13 FF/(pers.an)

Source : Ministère de la Culture [21].

Tableau 7.
Synthèse des estimations du coût total des dommages (dépenses de rénovation + perte d'aménité) imputables aux particules de PS_{13} en France.
La dernière colonne montre le bénéfice pour 60 millions de Français si la concentration est diminuée de 10 µg/m³.
Summary of damage costs (renovation cost + amenity loss) due to particle emissions in France. The last column shows the benefit for the population of France (60 million) if the ambient concentration of PM_{13} is reduced by 10 µg/m³.

Catégorie d'impact	FF/(personne·an·µg/m³)	Bénéfice d'une réduction de 10 µg/m³, Milliards F
Immeubles et maisons	1,4	0,8
Bâtiments historiques et monuments	0,9	0,5
Santé	270	160

coût par personne par an, immeubles et maisons
= 1,38 FF/(personne·an·µg/m³) (15)

donne le coût total des dommages des immeubles et des maisons, attribuable à la pollution, par personne par an par µg/m³ de PS_{13} pour un renvenu moyen [43,5 kF/(an·personne)]. À Paris, le revenu est plus important et cette pente est 1,96 FF/(personne·an·µg/m³).

Pour les constructions historiques et les monuments, les données sur les coûts de rénovation sont moins détaillées. Elles montrent toutefois que le coût des dommages liés à la pollution est moins important sur le patrimoine bâti que sur les immeubles et maisons, les dépenses par personnes étant environ 52 FF/(personne·an) comparées aux 83,7 FF/(personne·an) pour les immeubles et maisons. Si l'on suppose que la pente de la fonction dose-réponse pour les bâtiments et monuments historiques est plus faible que l'équation 15, dans un rapport de 52/83,7 on trouve

coût par personne par an, monuments
= 0,86 FF/(personne·an·µg/m³) (16)

Il est intéressant de comparer ces résultats avec une estimation des coûts des impacts de la pollution sur la santé, également effectuée dans le cadre du Projet ExternE [2]. Comme l'ont calculée A. Rabl et J.V. Spadaro [22], et A. Rabl, J.V. Spadaro, P.D. McGavran [23], la somme des coûts de morbidité et de mortalité est 40,7 Euros/(personne·an·µg/m³ par µg/m³ de PS_{10}), d'où :

coût par personne par an, santé
= 268 FF/(personne·an·µg/m³) (17)

(Une estimation avec des hypothèses un peu différentes, mais du même ordre de grandeur, a été publiée dans cette revue par A. Rabl [24]). Même s'il y a une petite différence entre PS_{10} et PS_{13}, il est évident que, comparé au coût des dommages sur la santé lié aux particules, le coût total des dommages sur les bâtiments est faible. Ces résultats arrondis sont résumés dans le tableau 7. Dans la dernière colonne de ce tableau figure aussi ce que nos chiffres pourraient impliquer pour le bénéfice total en France d'une politique environnementale qui réduit les concentrations de particules. À l'heure actuelle, les concentrations de PS_{13} sont de l'ordre de 30 µg/m³. Puisqu'une réduction d'un tiers paraît bien réalisable dans les années à venir, nous montrons, dans la dernière colonne, le bénéfice pour 60 millions de Français d'une diminution de la concentration de 10 µg/m³.

On peut également utiliser ces fonctions dose-réponse pour calculer le dommage dû à une source particulière, par exemple une centrale électrique, mais il faut estimer un élément de plus : la relation entre la composition des particules émises et les particules dans l'air ambiant. Car si l'on décompose les particules dans l'air en Europe [25], on constate que 20 à 50 % seulement sont constituées des particules émises directement par les équipements de combustion, la plupart de la masse restante étant composée de particules secondaires, telles que les sulfates et les nitrates. Ces derniers, étant blancs, contribuent peu à l'encrassement, contrairement aux particules de combustion qui sont noires de suie.

Remerciements

Ce travail a été subventionné en partie par le projet « ExternE » du Programme JOULE de la DG XII de la Commission européenne. Nous tenons à remercier Jérôme Adnot, Nick Eyre, Mike Holland, et Anne Pons pour les discussions fructueuses que nous avons échangées.

Mots clés

Pollution de l'air. Dépenses de ravalement. Coûts des dommages. Perte d'aménité. Encrassement. Érosion.

Keywords

Air pollution. Damage to buildings. Erosion. Soiling. Damage cost. Amenity loss. Renovation expenditures.

Références

1. ExternE 1995. ExternE : Externalities of Energy. ISBN 92-827-5210-0. Vol.1 : Summary ; Vol.2 : Methodology ; Vol.3 : Coal and Lignite ; Vol.5 : Nuclear. Published by European Commission, Directorate-General XII, Science Research and Development. L-2920 Luxembourg.
2. ExternE 1998. ExternE : Externalities of Energy. New results, to be published by ExternE Program of European Commission, Directorate-General XII, Science Research and Development.
3. Mitchell RC, RT Carson. Using Surveys To Value Public Goods : the Contingent Valuation Method. Resources for the Future. Washington, DC 1989.
4. Rabl A. Air Pollution and Buildings : an Estimation of Damage Costs in France. Environmental Impact Assessment Review 1999 ; 19 (4) : 361-85.
5. Lipfert FW. Effects of acidic deposition on the atmospheric deterioration of materials. National Association of Corrosion Engineers. Materials Performance, July 1987 : 12-9.
6. Kucera V. External Building Materials - Quantities and degradation. The National Swedish Institute for Building Research, Gaole, Sweden 1990, Research Report TN : 19.
7. Haneef SJ, JB Johnson, C Dickinson, Thompson GE, Wood GC. Effect of Dry Deposition of NO_x and SO_2 gaseous pollutants on the degradation of calcareous building stones. Atmos Environ 1992 ; 26A (16) : 2963-74.
8. Butlin RN, Coote AT, Devenish M, Hughes ISC, Hutchens CM, Irwin JG, Lloyd GO, Massey SW, Webb AH, Yates TJS. Preliminary results from the analysis of stone tablets from the National Materials Exposure Program (NMEP). Atmos Environ 1992 ; 26B (2) : 189-98.
9. Ball DJ. The soiling of buildings in Europe. In Brasser LJ, Muller WC (eds). Man and his Ecosystem, Proc. 8th World Clean Air Congress, The Hague 11-15 sept. 1989, Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1989 ; 2 : 359-66.
10. Hamilton RS, Mansfield TA. The soiling of materials in the ambient atmosphere. Atmos Environ 1992 ; 26A (18) : 3291-6.
11. Ecotec 1986. Identification and assessment of materials damage to buildings and historic monuments by air pollution. Report to the UK Department of the Environment.
12. Newby PT, Mansfield TA, Hamilton RS. Sources and economic implications of Building soiling in urban areas. Sci Total Environ 1991 ; 100 : 347-65.
13. ADEME 1992. Pollution Atmosphérique en France. Rapport Décembre 1992. ADEME, Service des Réseaux de Mesure. 27, rue Louis Vicat, F-75737 Paris Cedex 15.
14. Stroebel R, Berthelot V, Charré B. La qualité de l'air en France 1993-94 (Air quality in France 1993-94). ADEME, 27 rue Louis Vicat, F-75015 Paris, et ministère de l'Environnement, 20, av. de Ségur, F-75007 Paris 1995.
15. Brandela JP. Présentation du cadre administratif et réglementaire du ravalement à Paris. Journée « Ravalement », Direction de l'Architecture et Direction de la Construction et du Logement, Ville de Paris 1992.
16. Virolleaud F, Laurent M. Le ravalement, guide technique, réglementaire et juridique. Éditions du Moniteur, Paris 1990.
17. Moniteur. Borderau de prix du bâtiment tout corps d'état. Éditions du Moniteur, Paris 1994.
18. Isecke B, Weltscher M, Heinz I. Volkswirtschaftliche Verluste durch umweltverschmutzungsbedingte Materialschäden in der Bundesrepublik Deutschland, Umweltbundesamt 199, Texte 36/91.
19. Pons A, Rabl A, Curtiss PS. The Impact of Air Pollution on Buildings : an Estimation of Damage Costs in France 1995. Rapport du Centre d'Énergétique, École des Mines, 60, boulevard St-Michel, F-75272 Paris. Ce rapport a été inclus en Annexe C, In Rabl et al. [1996].
20. Kucera V, Henriksen J, Knotkova D, Sjöström C. Model for calculations of corrosion cost caused by air pollution and its application in three cities. Report N° 084, Swedish Corrosion Institute 1993, Roslasvägen 101, hus 52.
21. MdC. René Dinkel, personal communication. Direction du patrimoine, ministère de la Culture, Paris 1994.
22. Rabl A, Spadaro JV. Les coûts environnementaux de l'énergie. Centre d'Energétique, École des Mines de Paris, Paris, France 1997, Rapport final pour l'ADEME et la Commission européenne.
23. Rabl A, Spadaro JV, McGavran PD. Effets sur la santé de la pollution atmosphérique due aux incinérateurs : une perspective. Déchets, Sciences & Technique 1998 (9) : 4-22. Version anglaise : Health Risks of Air Pollution from Incinerators : a Perspective. Waste Management & Research 1998 (16) : 365-88.
24. Rabl A. Les bénéfices monétaires d'une amélioration de la qualité de l'air en Ile-de-France. Pollution Atmosphérique 1999 (161) : 83-94.
25. Harrison RM, Jones M. The chemical composition of airborne particles in the UK atmosphere. Science Total Environ 1995 (168) : 195.