

# Pollution par les particules dans l'air ambiant

Synthèse des éléments  
sanitaires en vue d'un appui  
à l'élaboration de seuils  
d'information et d'alerte  
du public pour les particules  
dans l'air ambiant

- **Avis de l'Afsset**
- **Rapport d'expertise collective**



**Le Directeur général**

Maisons-Alfort, le 20 mars 2009

## **AVIS**

### **de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail**

**Relatif à une synthèse des éléments sanitaires en vue d'un appui à  
l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public pour les particules  
dans l'air ambiant**

Saisine Afsset n° 2007/006

---

*L'Afsset a pour mission de contribuer à assurer la sécurité sanitaire dans le domaine de l'environnement et du travail et d'évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter. Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque.*

#### **Présentation de la question posée**

L'Afsset a été saisie le 2 août 2007 par la Direction générale de la santé (DGS) du Ministère chargé de la santé et la Direction de la prévention des pollutions et des risques (DPPR)<sup>1</sup> du Ministère chargé de l'écologie sur la question des particules dans l'air ambiant et des seuils d'information et d'alerte qui leur sont associés. Il était demandé de :

- procéder à une évaluation des risques sanitaires, en particulier pour les populations sensibles, des différentes composantes de la pollution particulaire, notamment du nitrate d'ammonium – composé retrouvé de façon prépondérante lors de récents épisodes de pollution ayant touché la France ;
- disposer d'un avis, tenant compte des connaissances les plus récentes, relatif à des seuils, pertinents sur le plan sanitaire, d'information et de recommandation du public pour les particules dans l'air ambiant, qui seront, le cas échéant, introduits dans la réglementation française.

Suite aux échanges tenus et formalisés avec les ministères, les questions posées ont été redéfinies comme suit :

---

<sup>1</sup> Le suivi de la saisine est depuis assuré par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC)

- présenter une typologie des composantes de la pollution particulaire et fournir des informations sur la toxicité du nitrate d'ammonium ;
- fournir les informations relatives aux liens à court terme entre pollution par les particules et santé, pertinentes à utiliser dans le cadre d'une éventuelle révision des seuils d'information et d'alerte applicables aux particules ;
- réaliser une évaluation des risques pour quelques composantes de la pollution particulaire.

## Contexte

Une réforme de la méthode de mesure des particules dans l'air ambiant a permis de mieux prendre en compte leur composante volatile à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2007. Cela peut conduire à une élévation des concentrations mesurées par rapport aux résultats qui auraient été obtenus avec la méthode antérieure ne prenant pas en compte en totalité cette composante. Les analyses chimiques ont mis en évidence que le nitrate d'ammonium pouvait représenter une fraction importante de cette composante volatile, notamment lors d'épisodes de pollution par les particules.

Ces épisodes ont amené les autorités compétentes à considérer indispensable un renforcement de l'information du public – notamment des personnes sensibles – sur ces polluants, et ce de façon harmonisée sur l'ensemble du territoire.

Il est à noter que, contrairement aux polluants tels que le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et l'ozone, il n'existe pas de seuils d'information et/ou d'alerte pour les particules (PM<sub>10</sub> et/ou PM<sub>2,5</sub>)<sup>2</sup> dans le cadre des directives européennes<sup>3</sup>.

Dans ce cadre, il a été demandé aux préfets (circulaire ministérielle du 12 octobre 2007) de mettre en place un dispositif d'information et d'alerte lors de pics de pollution par les PM<sub>10</sub> sur la base de seuils et de recommandations proposés par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) dans son avis du 6 juin 1996 (seuils d'information et d'alerte respectivement de 80 µg/m<sup>3</sup> et 125 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub> en moyenne sur 24 heures).

L'expertise menée par l'Afsset constitue une aide à la décision quant à la révision ou non de ces seuils et recommandations actuellement appliqués.

## Organisation de l'expertise

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

L'Afsset a confié au Comité d'experts spécialisés (CES) « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine. Ce dernier a mandaté un groupe de travail pour la réalisation des travaux d'expertise.

Les travaux du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le groupe de travail s'est réuni à 7 reprises entre février 2008 et novembre 2008 et le CES a débattu de ses résultats lors des séances des 30 mai, 9 juillet et 2 décembre 2008. Il a adopté lors de cette dernière séance le rapport « Pollution

---

<sup>2</sup> Particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 µm et 2,5 µm, respectivement.

<sup>3</sup> Toutefois, les niveaux de PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> sont réglementés dans les directives européennes par des valeurs limites (journalière et annuelle pour les PM<sub>10</sub>, annuelle pour les PM<sub>2,5</sub>). Pour les PM<sub>10</sub>, la valeur limite journalière en vigueur depuis 2005 est de 50 µg/m<sup>3</sup> à ne pas dépasser plus de 35 fois par an.

par les particules dans l'air ambiant – Synthèse des éléments sanitaires en vue d'un appui à l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public pour les particules dans l'air ambiant ».

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

Cet avis se base pour les aspects scientifiques sur le rapport final issu de cette expertise collective et a été rédigé par l'Afsset.

## Résultats

Les résultats de l'expertise collective mettent en avant que :

- ▶ Les connaissances scientifiques disponibles aujourd'hui montrent des effets indésirables des particules dans l'air ambiant sur la santé humaine qu'il s'agisse d'expositions de court terme ou d'expositions chroniques (par exemple, concernant les expositions de court terme, il existe des relations permettant de quantifier les risques, telles celles présentées dans les tableaux en Annexe).

Les données actuelles tendent à montrer qu'il **n'est pas possible d'observer un seuil de concentration en particules en deçà duquel aucun effet sanitaire ne serait constaté.**

- ▶ **Dans nos régions, l'impact sanitaire prépondérant est dû aux expositions répétées à des niveaux modérés de particules et non aux quelques pics.**

Déjà en 2004, les résultats de travaux coordonnés par l'Afsse sur l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique particulaire urbaine indiquaient : « *Les résultats obtenus soulignent l'importance des expositions chroniques en termes de santé publique et renforcent les conclusions des études d'impact sanitaire réalisées sur les effets liés à des variations à court terme de la qualité de l'air, et qui indiquent que ce sont les expositions les plus fréquentes, correspondant à des niveaux modérés de pollution, qui sont responsables de l'essentiel de l'impact sanitaire* »<sup>4</sup>.

Dans la continuité, les travaux menés dans le cadre de la présente expertise montrent que, par exemple pour l'agglomération parisienne en 2004, en utilisant les données épidémiologiques du Programme de surveillance air et santé (Psas) de l'Institut de veille sanitaire (InVS), 97 % de l'impact sanitaire court terme<sup>5</sup> associé aux particules<sup>6</sup> était attribuable à des niveaux de PM<sub>10</sub> inférieurs à 50 µg/m<sup>3</sup> et seulement 3 % à des niveaux supérieurs à 50 µg/m<sup>3</sup>, du fait de la rareté de ces événements.

- ▶ **Les rares données sur la toxicité du nitrate d'ammonium laissent penser que son rôle direct dans la toxicité aiguë des particules n'est pas prépondérant.** Bien qu'il représente une masse importante de la fraction volatile, il n'est pas exclu, faute de données suffisantes à ce jour, qu'une autre composante de cette fraction possède une toxicité potentiellement plus élevée. La toxicité de la fraction volatile des particules demeure largement méconnue à ce jour.
- ▶ **Il n'apparaît pas possible en l'état actuel des connaissances, de distinguer et de quantifier les risques et/ou impacts sanitaires associés aux différentes composantes chimiques des particules,** notamment le nitrate d'ammonium.

---

<sup>4</sup> Impact sanitaire de pollution atmosphérique urbaine – rapport 1 : 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 projections d'ici 2020. Afsse, mai 2004.

<sup>5</sup> Indicateur sanitaire : décès anticipés (hors causes accidentelles)

<sup>6</sup> « Particules » est entendu ici comme indicateur de la pollution atmosphérique, n'excluant donc pas l'influence de co-polluants.

## Avis

Considérant ces éléments, l'Afsset estime que :

- ▶ **L'abaissement de la valeur moyenne de la concentration particulaire sur le long terme amènerait à un bénéfice sanitaire plus important qu'une stratégie de gestion focalisée sur les pics journaliers de pollution particulaire.** Autrement dit, d'un point de vue strictement sanitaire, la gestion des risques devrait prioritairement viser l'abaissement des niveaux moyens de particules.
- ▶ **Il est encore prématuré, en l'état actuel des connaissances, d'établir des règles de gestion différenciées en fonction des différents composants chimiques des particules.**
- ▶ Si la mise en œuvre de seuils d'information et d'alerte relatifs aux particules ne présente globalement pas de bénéfice sanitaire substantiel, elle vise toutefois une meilleure protection des populations sensibles lors de pics et une sensibilisation du public à la question de la pollution atmosphérique. La fixation de tels seuils ne peut donc se baser que sur des considérants sanitaires, mais doit intégrer d'autres paramètres propres à la gestion des dépassements. Dans ce contexte, l'Afsset émet les recommandations ci-dessous.

## Recommandations

- ▶ Pour une révision des seuils d'information et d'alerte actuellement appliqués aux particules, l'Afsset recommande de considérer conjointement :
  1. Les données du Psas. Elles ont été générées pour un ensemble de villes françaises pour des périodes récentes (postérieures à 2000)<sup>7</sup>. Sur la base de ces données épidémiologiques, les pouvoirs publics pourront considérer les risques associés à différents niveaux journaliers de particules et pour différents événements sanitaires (excès de risques relatifs, fractions attribuables). Les tableaux 1 et 2 en Annexe de cet avis présentent ces relations.

Trois options possibles sont présentées correspondant à des niveaux journaliers de 50, 80 et 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{10}$ <sup>8</sup>. Le premier correspond à la valeur guide « court terme » de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à ne pas dépasser plus de 3 jours par an ; les deux suivants (80 et 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) correspondent aux seuils proposés par le CSHPF en 1996 et actuellement appliqués.

### Remarque 1 :

Pour les données issues du Psas, les indicateurs d'exposition à la pollution atmosphérique particulaire –  $\text{PM}_{10}$  et  $\text{PM}_{2,5}$  – ont été construits à partir des valeurs journalières mesurées sur la zone d'étude par les stations urbaines et péri-urbaines de fond des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) sans prise en compte de la perte en fraction volatile. Si ces données devaient servir de base à l'établissement de seuils d'information et d'alerte du public, il semblerait légitime de respecter le mode de calcul de l'indicateur d'exposition de l'étude sous-jacente : dans le cadre du Psas par exemple, une moyenne journalière (24 heures de minuit à minuit) mesurée sur des stations de fond.

### Remarque 2 :

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2007, les résultats des mesures de particules intègrent la fraction volatile. L'influence de ce changement de mode de mesure sur l'interprétation des relations dose-réponse est complexe et dépend de la toxicité relative des fractions volatile et non volatile des particules. Dans l'hypothèse où la fraction volatile aurait une contribution toxicologique inférieure à celle de la fraction non volatile des particules, il est probable que les relations liant les concentrations atmosphériques de particules (en masse) à un risque sanitaire issues des séries écologiques temporelles et basées sur

---

<sup>7</sup> Ces données concernent la population générale. Au vu des données disponibles, il est apparu difficile d'extraire des relations dose / réponse généralisables à une sous-population sensible.

<sup>8</sup> En lien avec un dispositif de mesures suffisamment déployé sur le territoire national.

des mesures de particules sans correction de la fraction volatile, entraînent une surestimation du risque si elles sont appliquées à des mesures en masse prenant en compte cette fraction volatile.

2. La distribution statistique des niveaux journaliers de particules au niveau national (données disponibles au sein de la Base nationale de données sur la qualité de l'air ambiant – BDQA de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie – Ademe).

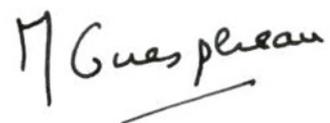
En fonction de l'événement sanitaire qu'ils souhaiteront considérer, de la fraction de risque qu'ils estimeront comme acceptable et de la distribution statistique des niveaux journaliers de particules, les pouvoirs publics pourront fixer les seuils d'information et d'alerte.

- ▶ Le cas échéant, des actions de prévention ciblées en direction de certains sous-groupes de la population pourront concerner en particulier les femmes enceintes, nouveau-nés, enfants, personnes âgées, de personnes atteintes de pathologie cardiovasculaire ou respiratoire (antécédents d'infarctus du myocarde, asthme, etc.), de diabète, ou d'obésité. Les sujets présents de manière répétée ou régulière au proche voisinage de sources de pollution atmosphérique, par exemple ceux vivant à proximité de sources de particules (axes routiers, sites industriels, zones d'activité agricole, etc.) méritent aussi d'être considérés du fait d'une exposition plus importante. Il s'agit d'un cas de gestion des inégalités d'exposition aux polluants de l'environnement.
- ▶ En vue d'une réduction des expositions, les sources d'émissions primaires de particules pourront être ciblées. Selon le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA), les trois principaux émetteurs primaires de particules au niveau national sont le résidentiel/tertiaire (en particulier combustion du bois, du charbon et du fioul), l'industrie manufacturière et l'agriculture/sylviculture. Dans les zones urbaines, les transports contribuent également de manière importante aux émissions primaires de particules.
- ▶ Compte tenu de leur potentiel de dangerosité, il conviendra à terme de considérer plus largement les PM<sub>2,5</sub> pour la gestion de la qualité de l'air.

Enfin, compte tenu des premières lacunes identifiées et/ou des données encore fragmentaires disponibles, l'Afsset encourage :

- ▶ La mise en place de travaux, reposant notamment sur des campagnes de mesures, pour progresser dans la connaissance de l'ensemble des caractéristiques physico-chimiques des particules (pour les différentes fractions granulométriques) et de ses déterminants, ainsi que le recueil de particules pour la réalisation de tests toxicologiques ultérieurs. Le programme PRIMEQUAL-PREDIT est un exemple de plateforme pour encourager cette démarche.
- ▶ Le développement d'études complémentaires permettant une description qualitative et quantitative plus détaillée (autres indicateurs de morbidité, autres pas de temps, etc.) des effets sanitaires associés aux particules en général et à leurs différents composants

**Le Directeur général**



Martin GUESPEREAU

## Annexe

**Tableau 1 : Risques relatifs (RR)<sup>9</sup> obtenus en France dans le cadre du Psas<sup>10</sup>, résultats concernant les périodes d'études les plus récentes (particules mesurées par TEOM<sup>11</sup> non équipés de FDMS<sup>12</sup>).**

**Approche par série temporelle décrivant les effets à court terme de l'exposition.**

**Les relations statistiquement significatives sont en gras.**

Nb. de villes incluses	Périodes d'étude (extremums)	Indicateur de pollution particulaire	Indicateur sanitaire	RR [IC 95 %] pour une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup>	Références	
8	1998-2003	PM <sub>10</sub>	Hospitalisations	pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	<b>1,007 [1,001 ; 1,012]</b>	a, b
				pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	<b>1,011 [1,005 ; 1,017]</b>	a, b
				pour maladies cardiaques, tous âges	<b>1,008 [1,002 ; 1,014]</b>	a, b
				pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	<b>1,015 [1,007 ; 1,022]</b>	a, b
				pour cardiopathies ischémiques, tous âges	<b>1,019 [1,008 ; 1,030]</b>	a, b
				pour cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	<b>1,029 [1,015 ; 1,043]</b>	a, b
				pour accident vasculaire cérébral, tous âges	1,002 [0,984 ; 1,019]	a, b
				pour accident vasculaire cérébral, 65 ans et plus	1,008 [0,991 ; 1,025]	a, b
				pour causes respiratoires, 0-14 ans	1,008 [0,999 ; 1,018]	b
				pour causes respiratoires, 15-64 ans	1,008 [0,998 ; 1,017]	b
6	1998-2003	PM <sub>2,5</sub>	Hospitalisations	pour causes respiratoires, 65 ans et plus	1,010 [0,992 ; 1,029]	b
				pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	1,007 [0,999 ; 1,015]	b
				pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	<b>1,018 [1,005 ; 1,017]</b>	b
				pour maladies cardiaques, tous âges	<b>1,014 [1,004 ; 1,024]</b>	b

<sup>9</sup> Le risque relatif « permet d'exprimer l'association entre exposition et maladie de façon facilement interprétable. C'est le facteur par lequel le risque de maladie est multiplié en présence de l'exposition ». Ainsi par exemple, dans le cas des effets à court terme de l'exposition à la pollution atmosphérique, par rapport à un jour où les niveaux de pollution atmosphérique particulaire atteignent un niveau donné, le risque d'hospitalisation pour causes cardiovasculaires dans la population générale est multiplié par 1,007 (soit une augmentation de 0,7 %) lorsque les niveaux augmentent de 10 µg/m<sup>3</sup>.

<sup>10</sup> Le Psas coordonné par l'InVS réalise des mises à jour régulières des relations à court terme entre pollution atmosphérique et santé dans 9 villes françaises (totalisant un peu plus de 11 millions d'habitants)

<sup>11</sup> Tapered element oscillating microbalance : système de mesurage automatique des particules

<sup>12</sup> Filter dynamic measurement system : module de correction de la perte en fraction volatile

Nb. de villes incluses	Périodes d'étude (extremums)	Indicateur de pollution particulaire	Indicateur sanitaire	RR [IC 95 %] pour une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup>	Références
			pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	<b>1,023 [1,010 ; 1,037]</b>	b
			cardiopathies ischémiques, tous âges	1,023 [0,999 ; 1,047]	b
			cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	<b>1,044 [1,022 ; 1,067]</b>	b
			accident vasculaire cérébral, tous âges	1,005 [0,987 ; 1,023]	b
			accident vasculaire cérébral, 65 ans et plus	1,008 [0,988 ; 1,029]	b
			causes respiratoires, 0-14 ans	1,006 [0,991 ; 1,022]	b
			causes respiratoires, 15-64 ans	1,011 [0,996 ; 1,026]	b
			causes respiratoires, 65 ans et plus	1,006 [0,992 ; 1,029]	b
			toutes causes non accidentelles, tous âges	<b>1,014 [1,007 ; 1,021]</b>	c
			toutes causes non accidentelles, 65 ans et plus	<b>1,014 [1,006 ; 1,022]</b>	c
9	2000-2004	PM <sub>10</sub>	Mortalité		
			pour causes cardio-vasculaires, tous âges	<b>1,024 [1,009 ; 1,039]</b>	c
			pour causes cardio-vasculaires, 65 ans et plus	<b>1,029 [1,013 ; 1,045]</b>	c
			pour causes cardiaques, tous âges	<b>1,020 [1,007 ; 1,034]</b>	c
			pour causes cardiaques, 65 ans et plus	<b>1,025 [1,010 ; 1,039]</b>	c
			toutes causes non accidentelles, tous âges	<b>1,015 [1,007 ; 1,022]</b>	c
			toutes causes non accidentelles, 65 ans et plus	<b>1,015 [1,007 ; 1,024]</b>	c
9	2000-2004	PM <sub>2,5</sub>	Mortalité		
			pour causes cardio-vasculaires, tous âges	<b>1,028 [1,009 ; 1,047]</b>	c
			pour causes cardio-vasculaires, 65 ans et plus	<b>1,034 [1,014 ; 1,054]</b>	c
			pour causes cardiaques, tous âges	<b>1,020 [1,004 ; 1,037]</b>	c
			pour causes cardiaques, 65 ans et plus	<b>1,029 [1,010 ; 1,048]</b>	c

a : Larrieu *et al.* Short term effects of air pollution on hospitalizations for cardiovascular diseases in eight French cities: the PSAS program. *Sci Total Environ*, 2007; 387(1-3): 105-12.

b : InVS, Relations à court terme entre les niveaux de pollution atmosphérique et les admissions à l'hôpital dans huit villes françaises, 2006

c : InVS, Analyse des liens à court terme entre pollution atmosphérique urbaine et mortalité dans neuf villes françaises, 2008

**Tableau 2 : Excès de risque relatif (ERR) et fractions de risque attribuable (FA), en pourcentage, pour différents niveaux journaliers de PM<sub>10</sub> et différents événements sanitaires. Calculs fondés sur les relations concentrations-risque obtenues dans le cadre du Psas et concernant les effets à court terme de l'exposition aux particules. Les FA sont calculées uniquement pour les relations statistiquement significatives (en gras dans le tableau précédent).**

Pour un jour où les niveaux de PM <sub>10</sub> mesurés par TEOM <sup>13</sup> atteignent... par rapport à un jour où les niveaux de PM <sub>10</sub> mesurés par TEOM sont de 20 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>		80 µg/m <sup>3</sup>		125 µg/m <sup>3</sup>	
	ERR	FA	ERR	FA	ERR	FA
Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	2,11%	2,07%	4,27%	4,10%	7,60%	7,06%
Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	3,34%	3,23%	6,78%	6,35%	12,17%	10,85%
Hospitalisations pour maladies cardiaques, tous âges	2,42%	2,36%	4,90%	4,67%	8,73%	8,03%
Hospitalisations pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	4,57%	4,37%	9,34%	8,55%	16,92%	14,47%
Hospitalisations pour cardiopathies ischémiques, tous âges	5,81%	5,49%	11,96%	10,68%	21,85%	17,93%
Hospitalisations pour cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	8,95%	8,22%	18,71%	15,76%	35,01%	25,93%
Mortalité toutes causes non accidentelles, tous âges	4,26%	4,09%	8,70%	8,00%	15,72%	13,58%
Mortalité toutes causes non accidentelles, 65 ans et plus	4,26%	4,09%	8,70%	8,00%	15,72%	13,58%
Mortalité pour causes cardio-vasculaires, tous âges	7,37%	6,87%	15,29%	13,26%	28,28%	22,04%
Mortalité pour causes cardio-vasculaires, 65 ans et plus	8,95%	8,22%	18,71%	15,76%	35,01%	25,93%
Mortalité pour causes cardiaques, tous âges	6,12%	5,77%	12,62%	11,20%	23,11%	18,77%
Mortalité pour causes cardiaques, 65 ans et plus	7,69%	7,14%	15,97%	13,77%	29,60%	22,84%

Sous l'hypothèse que les relations concentrations-risque présentées dans le tableau 1 reflètent une relation causale entre l'exposition aux particules atmosphériques et des effets en termes de mortalité et de morbidité, il est possible de calculer des fractions de risque attribuable (FA) à l'exposition à des niveaux donnés de particules, c'est-à-dire la proportion des cas attribuables, du fait d'effets à court terme, à l'exposition aux particules.

En retenant comme niveau de référence pour les PM<sub>10</sub> 20 µg/m<sup>3</sup>, niveau correspondant à la moyenne annuelle mesurée en France sur l'ensemble des stations de fond urbain en fonctionnement en 2006 (niveaux mesurés par TEOM seul), il est possible de calculer la fraction de risque attribuable (FA) à une journée où les niveaux atteignent un niveau supérieur.

Par exemple, pour un jour où les niveaux de PM<sub>10</sub> mesurés par TEOM atteignent 50 µg/m<sup>3</sup> par rapport à un jour où les niveaux de PM<sub>10</sub> mesurés par TEOM sont de 20 µg/m<sup>3</sup>, 2,07 % des hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, tous âges, sont attribuables à l'augmentation du niveau d'exposition aux particules.

<sup>13</sup> Tapered element oscillating microbalance : système de mesurage automatique des particules

## **Pollution par les particules dans l'air ambiant**

**Synthèse des éléments sanitaires en vue d'un appui à l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public pour les particules dans l'air ambiant**

---

Saisine n° 2007/006

### **RAPPORT d'expertise collective**

**Comité d'experts spécialisés « Evaluation des risques liés aux milieux aériens »**

**Groupe de travail « Pollution par les particules dans l'air ambiant »**

**Mars 2009**

## Mots clés

---

Pollution air ambiant, Exposition, Particules, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, Population générale, Populations sensibles, Relation concentration risque, Nitrate d'ammonium, Effet santé, Toxicologie.

Modèle SAI FORM 04 (février 2008) • version : test 02

**Rapport** : 18/03/2009 • version : 1

## SOMMAIRE

Liste des tableaux.....	6
Liste des figures .....	6
Abréviations .....	8
Présentation des intervenants.....	10
Expertise collective : synthèse et conclusions .....	13
<b>1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine.....</b>	<b>21</b>
1.1 Contexte.....	21
1.2 Objet de la saisine.....	21
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre (Afsset, CES, GT) et organisation ...	22
1.3.1 L'analyse préalable .....	22
1.3.2 Le groupe de travail .....	23
<b>2 Généralités sur les particules et leur mesure en réseau .....</b>	<b>24</b>
2.1 Définition des particules .....	24
2.2 Origine et caractéristiques générales des particules.....	24
2.3 Durée de vie des particules.....	27
2.4 Données sur les émissions en France.....	27
2.5 Surveillance des particules dans l'air ambiant en France .....	27
<b>3 Typologie des particules de l'air ambiant.....</b>	<b>29</b>
3.1 Introduction .....	29
3.2 Les principaux composés chimiques présents dans les particules.....	29
3.3 La variabilité de la composition chimique des particules : quels déterminants ? .....	31
3.3.1 Une composition chimique variable dans l'espace.....	31
3.3.2 Une composition chimique variable dans le temps .....	32
3.3.3 Une composition chimique variable selon la fraction granulométrique .....	34
3.4 Comportement de la fraction volatile des particules dans l'espace et dans le temps : retour d'expérience au niveau français.....	36
3.4.1 Eléments de contexte .....	36
3.4.2 Comportement de la fraction volatile dans l'espace et le temps .....	37
3.5 Pics de concentration en particules dans l'air ambiant : y a-t-il une composante explicative ?.....	40
3.6 Conclusion.....	41
<b>4 Toxicologie des particules : bilan des effets à court terme lors d'expositions humaines contrôlées .....</b>	<b>42</b>
4.1 Effets respiratoires .....	42
4.2 Effets cardiovasculaires.....	43

<b>4.3 Conclusion.....</b>	<b>44</b>
<b>5 Relations concentrations-risque à court terme en population générale ...</b>	<b>45</b>
<b>5.1 Méta-analyse réalisée par l’OMS (2004) .....</b>	<b>48</b>
<b>5.2 Résultats publiés depuis la méta-analyse de l’OMS.....</b>	<b>50</b>
5.2.1 Recherche bibliographique systématique.....	50
5.2.2 Sélection des études prises en compte dans le cadre du traitement de la saisine .....	50
5.2.3 Résultats obtenus en France dans le cadre du Programme de surveillance air et santé .....	54
5.2.4 Récapitulatif .....	57
<b>5.3 Calculs de fractions de risque attribuable.....</b>	<b>57</b>
<b>5.4 Conclusion.....</b>	<b>61</b>
<b>6 Particules dans l’air ambiant et santé : existence de populations à risques.....</b>	<b>62</b>
<b>6.1 Objectif et approche retenue .....</b>	<b>62</b>
<b>6.2 Sensibilité aux polluants aux différents âges et stades de développement .....</b>	<b>64</b>
6.2.1 Femmes enceintes, fœtus .....	64
6.2.2 Période infantile .....	64
6.2.3 Enfance .....	64
6.2.4 Personnes âgées .....	65
<b>6.3 Populations à risque du fait de pathologies préexistantes .....</b>	<b>66</b>
6.3.1 Asthme et autres pathologies respiratoires .....	66
6.3.2 Pathologies coronariennes .....	66
6.3.3 Diabète.....	66
6.3.4 Obésité.....	66
<b>6.4 Populations à risque du fait de facteurs sociaux ou comportementaux.....</b>	<b>67</b>
6.4.1 Catégorie socio-professionnelle .....	67
6.4.2 Activités sportives .....	67
6.4.3 Nutrition.....	67
<b>6.5 Populations à risque du fait de facteurs environnementaux.....</b>	<b>68</b>
6.5.1 Proximité aux sources de particules atmosphériques .....	68
6.5.2 Conditions météorologiques, saison.....	68
<b>6.6 Conclusion.....</b>	<b>69</b>
<b>7 Nitrate d’ammonium .....</b>	<b>70</b>
<b>7.1 Informations générales.....</b>	<b>70</b>
7.1.1 Identification de la substance et propriétés physico-chimiques.....	70
7.1.2 Origine du nitrate d’ammonium particulaire .....	70
7.1.3 Données de concentration dans l’air extérieur .....	71
<b>7.2 Synthèse des données toxicologiques et épidémiologiques .....</b>	<b>71</b>
7.2.1 Données concernant le nitrate d’ammonium .....	72
7.2.1.1 Expositions humaines contrôlées .....	72
7.2.1.2 Données épidémiologiques .....	73
7.2.1.3 Données animales.....	74
7.2.1.4 Données obtenues <i>in vitro</i> .....	75

7.2.1.5	Autres formes de toxicité .....	75
7.2.2	Données concernant le nitrate seul ou d'autres sels de nitrate .....	75
7.2.2.1	Expositions humaines contrôlées .....	75
7.2.2.2	Données épidémiologiques .....	76
<b>7.3</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>77</b>
<b>8</b>	<b>Conclusions, éléments de discussion et recommandations .....</b>	<b>78</b>
<b>8.1</b>	<b>Conclusions.....</b>	<b>78</b>
<b>8.2</b>	<b>Eléments de discussion .....</b>	<b>80</b>
8.2.1	Considérations concernant un seuil d'information/d'alerte du public pour la pollution particulaire .....	80
8.2.2	Considérations concernant la fraction volatile des particules et le nitrate d'ammonium .....	81
8.2.3	Considérations concernant les PM <sub>1</sub> et les effets à long terme, exclus du champ de la saisine.....	81
8.2.4	Considérations concernant une évaluation des risques associés aux différents composants des particules.....	82
<b>8.3</b>	<b>Recommandations .....</b>	<b>82</b>
<b>9</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>83</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>91</b>	
<b>Annexe 1 : Lettre de saisine .....</b>	<b>92</b>	
<b>Annexe 2 : Circulaire relative à l'information du public sur les particules en suspension dans l'air ambiant.....</b>	<b>94</b>	
<b>Annexe 3 : Avis du CSHPF du 6 juin 1996 relatif au projet de directive concernant les particules en suspension dans l'atmosphère .....</b>	<b>106</b>	
<b>Annexe 4 : Recommandations du CSHPF du 16 novembre 1999 sur la prise en compte des particules en suspension dans l'atmosphère dans les procédures d'information et d'alerte .....</b>	<b>110</b>	
<b>Annexe 5 : Excès de risques relatifs (ERR) (%) et leurs intervalles de confiance à 95 % obtenus dans le cadre de méta-analyses et études multicentriques européennes. ..</b>	<b>112</b>	
<b>Annexe 6 : Populations sensibles, interaction : difficultés méthodologiques .....</b>	<b>116</b>	
<b>Annexe 7 : Suivi des mises à jour du rapport .....</b>	<b>118</b>	
<b>Annexe 8 : Synthèse des déclarations publiques d'intérêts des experts par rapport au champ de la saisine .....</b>	<b>119</b>	

## Liste des tableaux

Tableau I : Données prises en compte dans le cadre de la méta-analyse réalisée par l'OMS (Anderson <i>et al.</i> , 2004).	49
Tableau II : Risques relatifs combinés associés à une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup> des niveaux de PM <sub>10</sub> (Anderson <i>et al.</i> , 2004).	50
Tableau III : Caractéristiques et résultats des études européennes sélectionnées.	52
Tableau IV : Risques relatifs obtenus en France dans le cadre du Psas, résultats concernant les périodes d'études les plus récentes (PM mesurées par TEOM non équipés de FDMS).	55
Tableau V : Excès de risque relatif (ERR) et fractions de risque attribuable (FA), en pourcentage, pour différents niveaux journaliers de PM <sub>10</sub> et différents événements sanitaires.	58
Tableau VI : Nombre moyen d'événements sanitaires par jour (Paris et proche couronne), et nombre (arrondi à l'entier le plus proche) de décès anticipés ou d'hospitalisations potentiellement attribuables à une journée où les niveaux de PM <sub>10</sub> mesurés sur les stations de fond atteignent 50, 80 ou 125 µg/m <sup>3</sup> par rapport à une journée où les niveaux seraient de 20 µg/m <sup>3</sup> .	59
Tableau VII : Catégories de facteurs déterminant la sensibilité des enfants aux polluants inhalés (WHO Europe 2005).	65
Tableau VIII : Impact estimé en France d'une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup> de la concentration de PM <sub>10</sub> sur la santé respiratoire de l'enfant. Tiré de Künzli <i>et al.</i> (2000).	65
Tableau IX : Résumé des populations les plus à risque de subir les effets sanitaires de l'exposition aux particules en suspension dans l'air.	69
Tableau X : Exemple hypothétique illustrant que la modification de la mesure de l'effet d'un facteur sur le risque de décès dépend du type de modèle utilisé.	117

## Liste des figures

Figure 1 : Classes d'aérosols selon leur mode de formation et leur taille (CFHA, 2007).	25
Figure 2 : Modélisation de la pénétration des particules inhalées dans l'appareil respiratoire en fonction de la taille (respiration nasale). D'après Oberdorster (2005).	26
Figure 3 : Microscopie électronique à balayage de particules collectées sur filtre dans l'atmosphère parisienne.	30
Figure 4 : PM <sub>10</sub> : Concentrations moyennes annuelles (valeurs absolues) des principaux composants particulaires [source : (Putaud <i>et al.</i> , 2004)].	31
Figure 5 : Composition relative de l'aérosol atmosphérique dans des masses d'air A) marine, B) rurale et C) urbaine. D'après Laj and Sellegri (2003).	32
Figure 6 : Saisonnalité été / hiver de la composition des particules pour la fraction fine et la fraction grossière – Paris, année 2005 ; (Cachier <i>et al.</i> , 2009 soumis).	33
Figure 7 : Exemple de saisonnalité des sels d'ammonium dans la fraction fine de l'aérosol parisien, année 2005 ; (Cachier <i>et al.</i> , 2009 soumis).	33
Figure 8 : Exemple de saisonnalité de la répartition des composés organiques – mode fin – Paris, année 2005 ; (Cachier <i>et al.</i> , 2009 soumis).	34
Figure 9 : Classe granulométrique de quelques types de particules [adapté de Heinsohn & Kabel (1999)].	34

- Figure 10 : Composition moyenne annuelle de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  et ( $PM_{10}-PM_{2,5}$ ) [source : Putaud *et al.* (2004)]. 35
- Figure 11 : Exemple de composition chimique des particules selon la classe granulométrique – Paris – 2005 (moyenne de 6 impacteurs hiver et de 6 impacteurs été) (Paris, année 2005 – (Cachier *et al.*, 2009 soumis)). 36
- Figure 12 : Ecart moyen sur les sites de références sur l'année 2007 (A), l'hiver 2007 (B) et l'été 2007 (C) [Source : LCSQA]. 38
- Figure 13 : Différence entre des valeurs avec et sans correction de la fraction volatile en fonction de la concentration en particules ( $PM_{10}$ ) mesurée par TEOM seul. Données LCSQA. 39
- Figure 14 : Evolution des concentrations en  $PM_{10}$  et composition chimique associée sur sites de référence à Rouen et à Lyon – hiver 2007 – 2008 [Source : LCSQA]. 40
- Figure 15 : Contribution du nitrate d'ammonium à l'écart entre les mesures de TEOM et TEOM+FDMS à Rouen et à Lyon pendant l'hiver 2007-2008. 41
- Figure 16 : Représentation schématique de la relation entre la gravité des événements sanitaires associés à l'exposition à la pollution atmosphérique et la proportion de la population affectée (adapté de OMS, 2001 ; source InVS, 2008). 46
- Figure 17 : Exemples de relations concentration-réponse estimées dans le cadre d'études multicentriques de séries temporelles portant sur la mortalité en lien avec les niveaux de pollution atmosphérique particulaire (adaptés des publications originales ; source Pope and Dockery, 2006). 47
- Figure 18 : Distribution des niveaux journaliers de l'indicateur d'exposition aux  $PM_{10}$  (moyenne journalière des niveaux de  $PM_{10}$  mesurés par les stations de fond, en bleu), distribution du nombre de décès anticipés attribuables (toutes causes non accidentelles, en violet) et RR moyen sur la classe de niveaux de l'indicateur de pollution (en référence à  $10 \mu g/m^3$ ), à Paris et en proche couronne, année 2004. 60

## Abréviations

AASQA : Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

ADN : Acide désoxyribonucléique

AP-1 : Activating protein 1

APHEA : Air pollution and health

ARNm : Acide ribonucléique messenger

BDQA : Base nationale de données sur la qualité de l'air ambiant

CAFE : Clean Air For Europe

CAP : Concentrated ambient air particles

CAS RN : Chemical abstracts service Registry number

Cépi-DC : Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès

CES : Comité d'Experts Spécialisés rattaché à l'Afsset

CITEPA : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique

DART : Developmental and reproductive toxicology database

EC : Elemental carbon = BC : black carbon

EINECS : European INventory of Existing Commercial chemical Substances

EMECAM / EMECAS : Estudio multicéntrico Español sobre la relación entre la contaminación atmosférica u la mortalidad / Estudio multicéntrico Español de contaminación atmosférica y salud = multicentre study on air pollution and mortality in Spain / multicentre study on air pollution and health in Spain

ERR : Excès de risque relatif

FA : Fraction de risque attribuable

FDMS : Filter dynamic measurement system

GRO : Growth related oncogene

HSDB: Hazardous substances data bank

ICAM : Intercellular adhesion molecule

Ig : Immunoglobine

IL : Interleukine

INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques

InVS : Institut de veille sanitaire

LBA : Lavage broncho-alvéolaire

LCSQA : Laboratoire central de la surveillance de la qualité de l'air

MAPkinase : Mitogen-activated protein kinase

NF- $\kappa$ B : Nuclear factor-kappa B

NMMAPS : National morbidity, mortality, and air pollution study

nss SO<sub>4</sub> : non sea salt SO<sub>4</sub> (SO<sub>4</sub> non marin)

OC : Organic carbon (carbone présent dans des composés organiques)

OM : Organic Matter (matière organique)

PM : Particulate matter / PM<sub>10</sub> / PM<sub>2,5</sub>: particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique médian inférieur à 10  $\mu$ m / 2,5  $\mu$ m.

PMA : Phorbol myrystate acetate

Psas : Programme de surveillance air et santé

RIVM : Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu = National Institute for Public Health and the Environment

RR : Risque relatif

RST : Regulated sampling tube

TEOM : Tapered element oscillating microbalance

TSP : Total suspended particulate matter (particules totales en suspension)

TNF- $\alpha$  : Tumor necrosis factor alpha

VCAM : Vascular cell adhesion molecule

vs. : versus (contre)

WHO : World health organization = OMS : Organisation mondiale de la santé

WIOC : Water insoluble organic carbon (carbone organique insoluble dans l'eau)

WSOC : Water soluble organic carbon

## Présentation des intervenants

### GROUPE DE TRAVAIL

---

#### Président

M. Jean-Ulrich MULLOT – Pharmacien (Service de Santé des Armées) – Spécialités : chimie analytique, évaluation des risques environnementaux et professionnels.

#### Membres

Mme Armelle BAEZA – Maître de conférence (Université Paris Diderot) – Spécialités : toxicologie cellulaire, polluants particuliers.

M. Olivier BLANCHARD – Ingénieur de recherche (INERIS) – Spécialités : évaluation des risques sanitaires, pollution atmosphérique.

Mme Véronique DELMAS – Directrice (Air Normand) – Spécialités : surveillance de la qualité de l'air.

M. Christian ELICHEGARAY – Chef du département « Surveillance de la qualité de l'air » (ADEME) – Spécialités : physico-chimie de l'atmosphère, surveillance de la qualité de l'air.

Mme Agnès LEFRANC – Adjointe au responsable du département santé-environnement (InVS) – Spécialités : épidémiologie, évaluation d'impact sanitaire.

Mme Martine RAMEL – Responsable du programme LCSQA (INERIS) – Spécialités : qualité de l'air, polluants de l'air.

M. Rémy SLAMA – Chercheur (INSERM) – Spécialités : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Jacques VENDEL – Chef de laboratoire (IRSN) – Spécialités : aérosols, connaissances métrologie.

### ADOPTION DU RAPPORT PAR LE(S) COMITE(S) D'EXPERTS SPECIALISES

---

Ce rapport a été soumis pour commentaires puis pour approbation au(x) CES :

- « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » – 9 juillet 2008, 2 décembre 2008.

#### Président

M. Christian ELICHEGARAY – Chef du département « Surveillance de la qualité de l'air » (ADEME) – Spécialités : physico-chimie de l'atmosphère, surveillance de la qualité de l'air.

#### Membres

M. René ALARY – Responsable du département Air (Laboratoire central de la préfecture de police) – Spécialités : pollution et chimie atmosphérique.

Mme Isabella ANNESI MAESANO – Responsable de l'équipe « Epidémiologie des maladies allergiques et respiratoires » (Faculté de médecine St-Antoine) – Spécialités : épidémiologie respiratoire.

- M. Olivier BLANCHARD – Ingénieur de recherche (INERIS) – Spécialités : évaluation des risques sanitaires, pollution atmosphérique.
- M. Pierre-André CABANNES – Médecin adjoint au service médical (EDF) – Spécialités : évaluation des risques sanitaires.
- M. Dave CAMPAGNA – Responsable de la mise en place d'une surveillance épidémiologique au sein des agents de la RATP – Spécialités : épidémiologie.
- Mme Véronique DELMAS – Directrice (Air Normand) – Spécialités : surveillance de la qualité de l'air.
- Mme Véronique EZRATTY – Médecin évaluateur de risques (EDF) – Spécialités : évaluation des risques, (risques professionnels).
- M. Robert GARNIER – Médecin toxicologue (Centre antipoisons de Paris) – Maître de conférence (Hôpital Fernand Vidal) – Spécialités : toxicologie.
- M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (EHESP) – Spécialités : épidémiologie, évaluation des risques sanitaires.
- Mme Séverine KIRCHNER – Responsable du secteur « qualité de l'air intérieur » (CSTB) – Spécialités : chimie et pollution de l'atmosphère, air intérieur.
- Mme Agnès LEFRANC – Adjointe au responsable du département santé-environnement (InVS) – Spécialités : épidémiologie, évaluation d'impact sanitaire.
- M. Maurice MILLET – Maître de conférences des universités (Centre de Géochimie de la surface, Université Louis Pasteur) – Spécialités : physique-chimie, pesticides dans l'air.
- M. Alain MARCHEOINE – Directeur Air et Transport (ADEME) – Spécialités : qualité de l'air, émissions dans l'air.
- M. Yannick MOREL – Chef du département détection biologique (Centre d'études du Bouchet) – Spécialités : toxicologie moléculaire.
- M. Jean-Paul MORIN – Chargé de recherche (INSERM) – Spécialités : métrologie et toxicologie des aérosols complexes atmosphériques et de combustion ; dépollution automobile.
- M. Christophe PARIS – Médecin professeur des universités et praticien hospitalier (CHU de Nancy) – Spécialités : épidémiologie, pathologie professionnelles.
- M. Vincent-Henry PEUCH – Chercheur en modélisation numérique de la composition chimique de l'atmosphère (Centre National de Recherches Météorologiques) – Spécialités : modélisation atmosphérique.
- M. Charles POINSOT – Directeur (Atmo Nord-Pas-de-Calais) – Spécialités : surveillance de la qualité de l'air.
- Mme Martine RAMEL – Responsable du programme LCSQA (INERIS) – Spécialités : qualité de l'air, polluants de l'air.
- M. Rémy SLAMA – Chercheur (INSERM) – Spécialités : épidémiologie, pollution atmosphérique.
- M. Fabien SQUINAZI – Médecin biologiste, directeur (Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris) – Spécialités : air intérieur, pathologies professionnelles induites par la qualité de l'air, microbiologie.
- M. Jacques VENDEL – Chef de laboratoire (IRSN) – Spécialités : aérosols, connaissances métrologie.

Après prise en compte des commentaires, le rapport a été approuvé par les membres du groupe de travail.

## **PARTICIPATION AFSSET**

---

### **Coordination scientifique**

M. Ohri YAMADA – Chef de projets scientifiques au Département des expertises en santé environnement et travail – Afsset.

Avec l'appui de :

Mme Valérie PERNELET-JOLY – Chef d'unité au Département des expertises en santé environnement et travail – Afsset.

### **Secrétariat administratif**

Mme Véronique QUESNEL – Afsset.

## **AUDITION DE PERSONNALITES EXTERIEURES**

---

### **Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM) - ERI 11 Evaluation et prévention des risques professionnels et environnementaux**

M. Denis ZMIROU-NAVIER – Directeur

### **Commissariat à l'énergie atomique (CEA) / Centre national de la recherche scientifique (CNRS) – Unité mixte de recherche (UMR) 1572 Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)**

Mme Hélène CACHIER – Chercheur

### **INERIS – Département des risques chroniques**

M. Gilles AYMOZ

## **CONTRIBUTIONS EXTERIEURES AU GROUPE**

---

*Exploitation de mesures de  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$  pour l'interprétation de la cohérence spatiale et temporelle des « écarts » TEOM vs. TEOM+FDMS correspondant à la fraction volatile – (LCSQA).*

## Expertise collective : synthèse et conclusions



agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

### EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Relatives à l'appui à l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public  
pour les particules dans l'air ambiant

Saisine Afsset n°2007/006

Ce document synthétise les travaux du groupe de travail « Pollution par les particules dans l'air ambiant » et présente les éventuels compléments du Comité d'experts spécialisés.

#### Présentation de la question posée

L'Afsset a été saisie le 2 août 2007 par la Direction générale de la santé (DGS) du Ministère de la santé, de la jeunesse et des sports (MSJS)<sup>1</sup> et la Direction de la prévention des pollutions et des risques (DPPR)<sup>2</sup> du Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durable (MEDAD)<sup>3</sup> sur la question des particules dans l'air ambiant et des seuils d'information et d'alerte qui leur sont associés. Suite aux échanges tenus et formalisés avec les ministères, les questions posées ont été définies comme suit :

- présenter une typologie des composantes de la pollution particulaire et fournir des informations sur la toxicité du nitrate d'ammonium ;
- sélectionner des relations dose (en masse) de  $PM_{2,5}$  et/ou  $PM_{10}^4$  / réponse à court terme pour la santé humaine pertinentes à utiliser dans le cadre d'une éventuelle révision des seuils d'information et d'alerte applicables aux particules :
  - pour la population générale d'une part ;
  - et les populations sensibles d'autre part ;
- réaliser une étude des risques pour quelques composantes de la pollution particulaire.

#### Eléments de contexte

Depuis 2007, la méthode de mesure des particules dans l'air ambiant permet de mieux prendre en compte leur composante volatile. Cela peut conduire à une élévation des concentrations mesurées par rapport aux résultats qui auraient été obtenus avec la méthode antérieure ne prenant pas en compte en totalité la composante volatile. Les analyses chimiques ont mis en évidence que le nitrate d'ammonium pouvait représenter une fraction importante de cette composante volatile, notamment lors d'épisodes de pollution par les particules.

<sup>1</sup> Actuel Ministère de la santé et des sports (MSS)

<sup>2</sup> Le suivi de la saisine est depuis assuré par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGECL)

<sup>3</sup> Actuel Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire (MEEDDAT)

<sup>4</sup> Particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique médian inférieur à 2,5 µm et 10 µm, respectivement.



Ces épisodes ont amené les autorités compétentes à considérer indispensable un renforcement de l'information du public – notamment des personnes sensibles – sur ces polluants, et ce de façon harmonisée sur l'ensemble du territoire.

Il est à noter que, contrairement aux polluants tels que le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et l'ozone, il n'existe pas de seuils d'information et/ou d'alerte pour les particules ( $PM_{10}$  et/ou  $PM_{2,5}$ ) dans le cadre des directives européennes<sup>5</sup>.

Dans ce cadre, il a été demandé aux préfets (circulaire ministérielle du 12 octobre 2007) de mettre en place un dispositif d'information et d'alerte lors de pics de polluant par les  $PM_{10}$  sur la base de seuils et de recommandations proposés par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHHPF) dans son avis du 6 juin 1996 (seuils d'information et d'alerte respectivement de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{10}$  en moyenne sur 24 heures).

### Organisation de l'expertise

L'Afsset a confié au Comité d'experts spécialisés (CES) « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine. Ce dernier a mandaté un groupe de travail pour la réalisation des travaux d'expertise.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

### Description de la démarche

En termes de polluants atmosphériques, il n'y a pas eu de restriction aux travaux cherchant à différencier l'effet des particules de celui des autres polluants atmosphériques.

Aucune restriction n'a été imposée au sein des événements de santé susceptibles d'être causés à court terme par les particules. Pour ce qui concerne le type d'études, celles permettant de mettre en évidence des effets aigus, entendus comme ceux produits par une exposition sur une courte durée, ont été privilégiées. La courte durée a été définie comme pouvant aller jusqu'à quelques semaines ou mois.

Pour chaque question posée, la démarche de travail adoptée est présentée ci-dessous.

- Une revue de la littérature scientifique a été réalisée visant d'une part à recenser les principales caractéristiques chimiques des particules, et d'autre part à recenser les connaissances sur la toxicité du nitrate d'ammonium ou d'autres sels de nitrate. Elle a été complétée par l'audition d'experts français menant des travaux sur le sujet.
- Pour la sélection de relations « concentrations – risque » à court terme en population générale, l'approche s'est fondée sur une revue des études épidémiologiques. Les critères retenus par les experts ont été les suivants :
  - études multicentriques européennes ;
  - effets à court-terme ;
  - indicateurs d'exposition retenus compatibles avec le dispositif de surveillance français.

<sup>5</sup> Toutefois, les niveaux de  $PM_{10}$  sont réglementés dans les directives européennes par des valeurs limites (journalière et annuelle). La valeur limite journalière en vigueur depuis 2005 est de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à ne pas dépasser plus de 35 fois par an.

- Pour identifier des sous-groupes de la population présentant une sensibilité accrue aux particules, une revue de la littérature scientifique a été réalisée. Une sensibilité accrue a été considérée comme plausible si l'un des éléments suivants était présent :
  - existence d'arguments biologiques ou toxicologiques ;
  - fréquence plus élevée dans le sous-groupe considéré que dans la population générale d'une maladie dont les particules en suspension constituent un facteur de risque (par exemple de pathologies cardio-pulmonaires), en l'absence d'éléments indiquant que ce sous-groupe pourrait être moins sensible que le reste de la population aux particules ;
  - mise en évidence d'une mesure de l'effet des particules en suspension sur la santé plus importante dans le sous-groupe que dans la population générale ;
  - existence de pathologies ou troubles de la santé pouvant être causés par les particules en suspension, spécifiques au sous-groupe considéré (cas des effets possibles sur le risque de naissance prématurée, spécifiques aux femmes enceintes).

## Résultat de l'expertise collective

### Typologie des particules et toxicité du nitrate d'ammonium

Au regard des connaissances disponibles et considérant en particulier les données relatives aux particules dans l'air ambiant spécifiques du territoire français, il ressort que :

- ▶ Les particules recouvrent un très large spectre de polluants dont les caractéristiques physiques et chimiques sont très variables dans le temps et dans l'espace. Si le nitrate d'ammonium est susceptible d'expliquer une part importante de la masse de la fraction volatile des particules, d'autres composés, notamment organiques, contribuent également à cette fraction dans de moindres proportions.
- ▶ Il reste difficile de distinguer la toxicité globale des particules de celle de leurs divers constituants chimiques, dont le nitrate d'ammonium, qui peuvent en outre interagir.
- ▶ Les rares données sur la toxicité du nitrate d'ammonium laissent penser que son rôle direct dans la toxicité aiguë des particules n'est pas majoritaire. Bien qu'il représente une masse importante de la fraction volatile, il n'est pas exclu, faute de données suffisantes à ce jour, qu'une composante minoritaire (en masse) de cette fraction possède une toxicité différente, voire plus élevée. La toxicité de la fraction volatile des particules demeure largement méconnue à ce jour.

### Liens à court terme entre les niveaux de particules et les indicateurs sanitaires

Les travaux conduits mettent en exergue que :

- ▶ Il existe des liens statistiquement significatifs entre les niveaux de pollution atmosphérique particulaire ( $PM_{10}$ ), la mortalité et la morbidité (respiratoire et cardiovasculaire notamment) cohérents avec les données toxicologiques.
- ▶ Les relations observées ne diffèrent pas significativement de relations sans seuils, ce qui signifie qu'il n'a pas été possible d'observer un seuil de concentration de particules en deçà duquel aucun effet sanitaire ne serait constaté.
- ▶ L'impact sanitaire journalier (décès anticipés et hospitalisations, etc.) des niveaux élevés de pollution est supérieur à celui des niveaux faibles. Toutefois, la fréquence des niveaux modérés étant, dans nos régions, plus élevée, leur impact sanitaire annuel est de ce fait prépondérant.
- ▶ Les risques relatifs quantifiés pour un ensemble de villes françaises métropolitaines pour des périodes récentes (postérieures à 2000) ont permis le calcul de fractions attribuables pour différents niveaux journaliers de  $PM_{10}$  mesurés par les stations de fond (cf. tableau 2 en annexe).

### Populations à risque

La revue bibliographique met en exergue que :

- ▶ Si pour des raisons spécifiques, il y avait un intérêt à cibler les actions de prévention en direction de certains sous-groupes de la population, il semblerait pertinent de considérer en particulier les femmes enceintes, nouveau-nés, enfants, personnes âgées, toute personne atteinte de pathologie cardiovasculaire ou respiratoire (antécédents d'infarctus du myocarde, asthme, etc.), de diabète, voire d'obésité.
- ▶ D'une façon générale, tous les sujets à risque élevé de pathologie cardiovasculaire, respiratoire, ou même de décès en dehors de tout épisode de pollution pourraient être ciblés. Cela concerne notamment les catégories socioprofessionnelles les moins favorisées.
- ▶ Enfin, les sujets présents de manière répétée ou régulière au proche voisinage de sources de pollution atmosphérique, par exemple ceux vivant à proximité de sources de particules (axes routiers, sites industriels, etc.), ainsi que les sportifs, méritent aussi d'être considérés du fait d'une exposition plus importante.

Le Comité d'experts spécialisés « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » adopte le rapport d'expertise collective lors de sa séance du 2 décembre 2008 et fait part de cette adoption à la Direction générale de l'Afsset.

### Conclusions et recommandations de l'expertise collective

Sur la base des travaux réalisés et présentés dans le rapport intitulé « Pollution par les particules dans l'air ambiant : synthèse des éléments sanitaires en vue d'un appui à l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public pour les particules dans l'air ambiant »,

Les experts constatent que :

- ▶ Les connaissances scientifiques disponibles aujourd'hui montrent des effets indésirables des particules dans l'air ambiant sur la santé humaine notamment en lien avec des expositions à court terme mais aussi chroniques.
- ▶ Les impacts sanitaires les plus importants ne sont pas associés, dans nos régions, aux niveaux journaliers de pollution particulaire particulièrement élevés. Ainsi, l'abaissement de la valeur moyenne de la concentration particulaire sur le long terme amènerait à un bénéfice sanitaire plus important qu'une stratégie focalisée sur ces niveaux journaliers de pollution particulaire particulièrement élevés.
- ▶ Il n'apparaît pas possible à l'heure actuelle, de distinguer et de quantifier les risques et/ou impacts sanitaires associés à leurs différentes composantes chimiques, notamment le nitrate d'ammonium.
- ▶ Le déclenchement de la procédure d'information / alerte fondé sur une moyenne sur 24 heures calculée rétrospectivement à partir de mesures n'est pas toujours compatible avec une prévention de l'exposition.

Expertise collective : synthèse et conclusions

Saisine n°2007/006

Considérant ces éléments, les experts recommandent :

- ▶ L'utilisation de relations quantifiées pour un ensemble de villes françaises pour des périodes récentes. Les pouvoirs publics pourront considérer les calculs de fractions attribuables (à partir des risques relatifs quantifiés) pour différents niveaux journaliers de particules. Le tableau 1 en annexe présente ces relations et, à titre d'exemple, les fractions attribuables dérivées pour des niveaux moyens journaliers de  $PM_{10}$  atteignant 50, 80 et 125  $\mu g/m^3$ .

Enfin, compte tenu des premières lacunes identifiées et/ou des données encore fragmentaires disponibles, les experts encouragent :

- ▶ La mise en place de travaux, reposant notamment sur des campagnes de mesures, pour progresser dans la connaissance de l'ensemble des caractéristiques physico-chimiques des particules (pour les différentes fractions granulométriques) et de ses déterminants, ainsi que le recueil de particules pour la réalisation de tests toxicologiques ultérieurs. Le programme PRIMEQUAL-PREDIT est un exemple de plateforme pour encourager cette démarche.
- ▶ Le développement d'études complémentaires permettant une description qualitative et quantitative plus détaillée (autres indicateurs de morbidité, autres pas de temps, etc.) des effets sanitaires associés aux particules en général et à leurs différents composants.

Maisons-Alfort, le 2 décembre 2008



Au nom des experts du CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens »,  
le président du CES, M. Christian ELICHEGARAY

**Annexe**

**Tableau 1 : Risques relatifs obtenus en France dans le cadre du Psas<sup>6</sup>, résumés concernant les périodes d'études les plus récentes (PM mesurées par TEOM non équipés de FDMS).  
Approche par série temporelle décrivant les effets à court terme de l'exposition.**

Nb. de villes incluses	Périodes d'étude (extrêmes)	Indicateur de pollution particulaire	Indicateur sanitaire	RR [IC 95 %] pour une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup>	Références	
8	1998-2003	PM <sub>10</sub>	Hospitalisations	pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	1,007 [1,001 ; 1,012]	a, b
				pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	1,011 [1,005 ; 1,017]	a, b
				pour maladies cardiaques, tous âges	1,008 [1,002 ; 1,014]	a, b
				pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	1,015 [1,007 ; 1,022]	a, b
				pour cardiopathies ischémiques, tous âges	1,019 [1,008 ; 1,030]	a, b
				pour cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	1,025 [1,015 ; 1,043]	a, b
				pour AVC, tous âges	1,002 [0,984 ; 1,019]	a, b
				pour AVC, 65 ans et plus	1,006 [0,991 ; 1,025]	a, b
				pour causes respiratoires, 0-14 ans	1,006 [0,999 ; 1,018]	b
				pour causes respiratoires, 15-64 ans	1,006 [0,998 ; 1,017]	b
		pour causes respiratoires, 65 ans et plus	1,010 [0,992 ; 1,029]	b		
		pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	1,007 [0,999 ; 1,015]	b		
		pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	1,018 [1,005 ; 1,017]	b		
		pour maladies cardiaques, tous âges	1,014 [1,004 ; 1,024]	b		
		pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	1,023 [1,010 ; 1,037]	b		
		cardiopathies ischémiques, tous âges	1,023 [0,999 ; 1,047]	b		
		cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	1,044 [1,022 ; 1,067]	b		
6	1998-2003	PM <sub>2,5</sub>	Hospitalisations	AVC, tous âges	1,005 [0,987 ; 1,023]	b
				AVC, 65 ans et plus	1,006 [0,988 ; 1,029]	b
				causes respiratoires, 0-14 ans	1,006 [0,991 ; 1,022]	b
				causes respiratoires, 15-64 ans	1,011 [0,996 ; 1,026]	b
				causes respiratoires, 65 ans et plus	1,006 [0,992 ; 1,029]	b

<sup>6</sup> Le Programme de surveillance air et santé (Psas) coordonné par l'InVS réalise des mises à jour régulières des relations à court terme entre pollution atmosphérique et santé dans 9 villes françaises (totalisant un peu plus de 11 millions d'habitants).

Saisine n° 2007/006

Expertise collective : synthèse et conclusions

Nb. de villes incluses	Périodes d'étude (extremums)	Indicateur de pollution particulaire	Indicateur sanitaire	RR (IC 95 %) pour une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup>	Références	
9	2000-2004	PM <sub>10</sub>	Mortalité	toutes causes non accidentelles, tous âges	1,014 [1,007 ; 1,021]	c
				toutes causes non accidentelles, 65 ans et plus	1,014 [1,006 ; 1,022]	c
				pour causes cardio-vasculaires, tous âges	1,024 [1,009 ; 1,039]	c
				pour causes cardio-vasculaires, 65 ans et plus	1,029 [1,013 ; 1,045]	c
				pour causes cardiaques, tous âges	1,020 [1,007 ; 1,034]	c
			pour causes cardiaques, 65 ans et plus	1,025 [1,010 ; 1,039]	c	
9	2000-2004	PM <sub>2,5</sub>	Mortalité	toutes causes non accidentelles, tous âges	1,015 [1,007 ; 1,022]	c
				toutes causes non accidentelles, 65 ans et plus	1,015 [1,007 ; 1,024]	c
				pour causes cardio-vasculaires, tous âges	1,028 [1,009 ; 1,047]	c
				pour causes cardio-vasculaires, 65 ans et plus	1,034 [1,014 ; 1,054]	c
				pour causes cardiaques, tous âges	1,020 [1,004 ; 1,037]	c
			pour causes cardiaques, 65 ans et plus	1,029 [1,010 ; 1,048]	c	

a : Larrieu S et al., 2007

b : INVS, Relations à court terme entre les niveaux de pollution atmosphérique et les admissions à l'hôpital dans huit villes françaises, 2006

c : INVS, Analyse des liens à court terme entre pollution atmosphérique urbaine et mortalité dans neuf villes françaises, 2006

**Tableau 2 : Excès de risque relatif (ERR) et fractions de risque attribuables (FA), en pourcentage, pour différents niveaux journaliers de PM<sub>10</sub> et différents événements sanitaires. Calculs fondés sur les relations concentrations-risque obtenues dans le cadre du Psas et concernant les effets à court terme de l'exposition aux particules. Les FA sont calculées uniquement pour les relations statistiquement significatives (en gras dans le tableau précédent).**

Pour un jour où les niveaux de PM <sub>10</sub> mesurés par TEOM atteignent... par rapport à un jour où les niveaux de PM <sub>10</sub> mesurés par TEOM sont de 20 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>		80 µg/m <sup>3</sup>		125 µg/m <sup>3</sup>	
	ERR	FA	ERR	FA	ERR	FA
Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	2,11%	2,07%	4,27%	4,10%	7,60%	7,06%
Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	3,34%	3,23%	6,78%	6,35%	12,17%	10,85%
Hospitalisations pour maladies cardiaques, tous âges	2,42%	2,36%	4,90%	4,67%	8,73%	8,03%
Hospitalisations pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	4,57%	4,37%	9,34%	8,55%	16,92%	14,47%
Hospitalisations pour cardiopathies ischémiques, tous âges	5,81%	5,49%	11,96%	10,68%	21,85%	17,93%
Hospitalisations pour cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	8,95%	8,22%	18,71%	15,76%	35,01%	25,93%
Mortalité toutes causes non accidentelles, tous âges	4,26%	4,09%	8,70%	8,00%	15,72%	13,58%
Mortalité toutes causes non accidentelles, 65 ans et plus	4,26%	4,09%	8,70%	8,00%	15,72%	13,58%
Mortalité pour causes cardio-vasculaires, tous âges	7,37%	6,87%	15,29%	13,26%	28,28%	22,04%
Mortalité pour causes cardio-vasculaires, 65 ans et plus	8,95%	8,22%	18,71%	15,76%	35,01%	25,93%
Mortalité pour causes cardiaques, tous âges	6,12%	5,77%	12,62%	11,20%	23,11%	18,77%
Mortalité pour causes cardiaques, 65 ans et plus	7,69%	7,14%	15,97%	13,77%	29,60%	22,84%

Pour les données issues du Psas, les indicateurs d'exposition à la pollution atmosphérique particulaire - PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> – ont été construits à partir des valeurs journalières mesurées sur la zone d'étude par les stations urbaines et péri-urbaines de fond des AASQA sans prise en compte de la perte en fraction volatile. Si ces relations dose-réponse devaient servir de base à l'établissement de seuils d'information du public, il semblerait légitime de respecter le mode de calcul de l'indicateur d'exposition de l'étude sous-jacente : dans le cadre du programme Psas par exemple, une moyenne journalière (24 heures de minuit à minuit) mesurée sur des stations de fond.

Depuis le 1er janvier 2007, les résultats des mesures de particules intègrent la fraction volatile. L'influence de ce changement de mode de mesure sur l'interprétation des relations dose-réponse est complexe et dépend de la toxicité relative des fractions volatiles et non volatiles des particules. Dans l'hypothèse où la fraction volatile aurait une contribution toxicologique inférieure à celle d'autres composantes des PM, il est probable que les relations liant les concentrations atmosphériques de PM (en masse) à un risque sanitaire issues des séries écologiques temporelles et basées sur des mesures de PM sans correction de la fraction volatile, entraînent une surestimation du risque si elles sont appliquées à des mesures en masse prenant en compte cette fraction volatile.

# 1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

## 1.1 Contexte

Les conditions météorologiques du printemps 2007, remarquables par la douceur des températures, ainsi que des situations anticycloniques prolongées en diverses périodes de l'année, ont été à l'origine d'épisodes de pollution particulaire lors de l'année 2007. L'année 2007 a été également marquée par la mise en application d'une nouvelle méthode d'ajustement des mesures des particules, afin de mieux prendre en compte leur composante volatile, ce qui a conduit à une élévation des concentrations mesurées par rapport aux résultats qui auraient été obtenus en l'absence d'ajustement. Les analyses chimiques réalisées par le LCSQA sur des filtres prélevés par les AASQA à cette occasion ont mis en évidence la contribution prépondérante du nitrate d'ammonium dans cette composante volatile.

Ces épisodes ont amené les autorités compétentes à considérer indispensable un renforcement de l'information du public – notamment des personnes sensibles – sur ces polluants, et ce de façon harmonisée sur l'ensemble du territoire. C'est dans ce cadre qu'a été rédigée la circulaire du 12 octobre 2007. Déjà absents dans la précédente directive 1999/30/CE, les seuils d'information ou d'alerte pour les particules (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) n'ont pas été introduits dans la récente directive 2008/50/CE concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur en Europe. Ainsi, les deux seuils aujourd'hui utilisés sont ceux qui ont été proposés par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) dans son avis du 6 juin 1996 : 80 µg/m<sup>3</sup> et 125 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub> en moyenne sur 24 heures (Annexe 3 et Annexe 4). Au-delà de ces seuils, les Préfets sont chargés de diffuser aux populations des recommandations sanitaires et comportementales.

## 1.2 Objet de la saisine

Dans ce contexte, la Direction générale de la santé (DGS) du ministère chargé de la santé et la Direction de la prévention des pollutions et des risques (DPPR)<sup>1</sup> du ministère chargé de l'écologie ont saisi l'Afsset sur la question des particules dans l'air ambiant et des seuils d'information et d'alerte qui leur sont associés. Suite aux échanges tenus et formalisés avec les ministères, les questions posées ont été définies comme suit :

- fournir les informations relatives aux liens à court terme entre pollution par les particules et santé (proposition de relations dose (en masse) de PM<sub>2,5</sub> et/ou PM<sub>10</sub> / réponse à court terme), pertinentes à utiliser dans le cadre d'une éventuelle révision des seuils d'information et d'alerte applicables aux particules ;
- fournir des informations sur la toxicité du nitrate d'ammonium ;
- présenter une typologie des composantes de la pollution particulaire ;
- réaliser une évaluation des risques pour quelques composantes de la pollution particulaire.

---

<sup>1</sup> Le suivi de la saisine est depuis assuré par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC)

## 1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre (Afsset, CES, GT) et organisation

L'Afsset a confié au CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine. Ce dernier a mandaté le groupe de travail « Pollution par les particules dans l'air ambiant » pour la réalisation des travaux d'expertise.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

### 1.3.1 L'analyse préalable

A l'occasion d'une première phase d'analyse de la saisine, une présentation de la demande formulée a été organisée lors de la séance plénière du CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » du 10 octobre 2007. A l'issue de la présentation réalisée, le CES a donné un avis globalement favorable à l'instruction de cette saisine, sur la base cependant de modifications substantielles des questions posées. Les observations et propositions des experts ont été les suivantes :

#### Observations

Sur le fond, les experts ont identifié trois questions :

1. un avis sur les seuils d'information et de recommandation du public pour les particules dans l'air ambiant ;
2. une évaluation des risques sanitaires liés au nitrate d'ammonium ;
3. une caractérisation des composants des particules et une évaluation de leurs risques sanitaires.

Vu le temps imparti, les experts ont jugé nécessaire de revoir les objectifs de la demande.

Estimant que l'avis sur les seuils était prioritaire, les experts ont accepté d'instruire la première question.

Pour la deuxième question, les experts ont jugé qu'une évaluation des risques sanitaires n'était pas réalisable dans le délai accordé. C'est pourquoi ils ont souhaité s'engager pour la production d'un document traitant uniquement des effets sur la santé du nitrate d'ammonium.

Pour la troisième question, étant donnée la complexité de la composition des particules, les experts ont proposé qu'elle soit instruite ultérieurement.

#### Propositions

Compte tenu des observations faites ci-dessus, deux priorités de travail ont été proposées en réponse à la saisine :

- disposer d'un avis sur les seuils d'information et de recommandation du public pour les particules dans l'air ambiant ;
- produire un document sur les effets sur la santé du nitrate d'ammonium.

Puis dans un second temps :

- réaliser une évaluation des risques sanitaires du nitrate d'ammonium ;
- caractériser les composants des particules et d'évaluer leurs risques sanitaires.

Par courrier en date du 20 novembre 2007, l'Afsset a rendu compte à la DGS et à la DGPR des observations et propositions présentées ci-dessus. Le 10 décembre 2007, la DGS et la DGPR ont adressé à l'Afsset un courrier d'acceptation formelle des propositions d'instruction présentées.

### 1.3.2 Le groupe de travail

Le groupe de travail rattaché au CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » a été constitué par décision de la Directrice générale de l'Afsset, en date du 15 janvier 2008. La création du groupe de travail « Pollution par les particules dans l'air ambiant » a fait l'objet d'une consultation :

- Appel à candidature d'experts du CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens », dans sa séance du 10 octobre 2007 ;
- Sollicitation directe de deux experts (Mme Armelle Baeza et M. Jean-Ulrich Mullot) en toxicologie, compétence identifiée comme étant la seule manquante à la composition du groupe de travail sur la base des candidatures des experts du CES.

L'examen des candidatures s'est déroulé le 13 décembre 2007 au regard des compétences scientifiques et techniques, mais également de l'indépendance vis-à-vis des questions posées et de la probité des candidats.

La création du groupe de travail a été soumise à l'accord du président du CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens », le 19 décembre 2007.

Comme le prévoit le protocole de traitement de saisine, une révision de la demande est possible en cours d'instruction. Ainsi, le mandat du groupe de travail a été redéfini comme suit lors de sa première séance le 5 février 2008 à l'occasion de l'audition des mandants :

- proposer des relations dose (en masse) de  $PM_{2,5}$  et/ou  $PM_{10}$  / réponse à court terme pour la santé humaine pour la population générale d'une part et les populations sensibles d'autre part ;
- fournir des informations sur la toxicité du nitrate d'ammonium ;
- proposer une typologie des composantes de la pollution particulaire.

Il a été décidé de statuer sur la faisabilité de réaliser une étude des risques pour quelques composantes de la pollution particulaire à l'issue de la restitution de cette première phase de travaux. Celle-ci a eu lieu le 11 septembre 2008 et il a été convenu qu'il était prématuré, en l'état actuel des connaissances, de réaliser une expertise collective sur une évaluation des risques associés aux différents composants des particules.

Le groupe de travail s'est réuni à cinq reprises en formation plénière entre les mois de février 2008 et juin 2008. Les travaux du groupe ont été éclairés par :

- l'audition de M. Denis Zmirou-Navier (INSERM),
- l'audition de Mme Hélène Cachier (CEA / CNRS - LSCE),
- l'audition de M. Gilles Aymoz (INERIS),
- l'exploitation de mesures de  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$  pour l'interprétation de la cohérence spatiale et temporelle des « écarts » TEOM vs. TEOM+FDMS correspondant à la fraction volatile – (LCSQA).

Un espace de travail informatique sécurisé a été mis à la disposition des membres du groupe de travail.

## 2 Généralités sur les particules et leur mesure en réseau

Ce court chapitre a pour objet le rappel de généralités sur la physico-chimie des particules dans l'air ambiant et leurs sources.

### 2.1 Définition des particules

L'atmosphère qui nous entoure n'est pas constituée seulement de composés gazeux et l'on désigne habituellement sous le terme de « particules » l'ensemble des fines particules solides et liquides qui s'y trouvent en suspension. Le terme d'aérosols est très proche de celui de particules et il est également fréquemment utilisé dans le domaine des sciences de l'atmosphère pour désigner des particules en suspension dans un gaz, à l'exception des gouttelettes formées par des cristaux nuageux, de la neige, des brouillards et des pluies, que l'on désigne par le vocable d'hydrométéores.

Le terme de particules est ici retenu dans le cadre de ce rapport et il recouvre en fait des éléments dont les propriétés physiques (taille et granulométrie, morphologie, état de surface, etc.) et la composition chimique sont très variables. Ces propriétés dépendent notamment des sources primaires d'émissions et des processus de formation des particules, ainsi que de l'évolution physico-chimique des particules après leur formation et leur rejet dans l'air.

### 2.2 Origine et caractéristiques générales des particules

Les particules présentes dans l'air ambiant sont constituées :

- d'une part de particules « primaires », c'est-à-dire de particules directement émises par des sources naturelles (volcanisme, embruns et aérosols marins, érosion éolienne, combustion naturelle de biomasse et feux de forêts, etc.) ou anthropiques (combustions, etc.),
- et d'autre part de particules dites « secondaires », c'est-à-dire de particules formées dans l'air par des processus chimiques complexes, à partir notamment de précurseurs gazeux tels que les oxydes de soufre et d'azote, l'ammoniac, et les composés organiques présents dans l'air.

La taille de ces diverses particules est l'une de leurs caractéristiques importantes car elle détermine leur temps de séjour dans l'air ainsi que leur aptitude à pénétrer et demeurer plus ou moins profondément dans l'appareil respiratoire. On distingue ainsi classiquement les trois classes granulométriques suivantes (Figure 1) :

- Les particules dites ultrafines, d'un diamètre aérodynamique médian inférieur à 0,1  $\mu\text{m}$ ; elles résultent notamment de processus de nucléation (formation de particules solides ou liquides à partir de précurseurs gazeux, en phase homogène ou hétérogène). Leur durée de vie est brève car elles disparaissent en grossissant par coagulation entre elles ou avec des particules plus grosses.
- Les particules fines, d'un diamètre aérodynamique médian inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$ ; elles proviennent notamment de phénomènes de coagulation par suite de chocs entre particules plus petites formées par nucléation, et aussi de condensation de gaz sur les particules.
- Les particules grossières, d'un diamètre aérodynamique médian supérieur à 2,5  $\mu\text{m}$ ; elles sont le plus souvent issues de processus mécaniques (remises en suspension, érosions, etc.) et leur composition est en général celle du matériau d'origine.

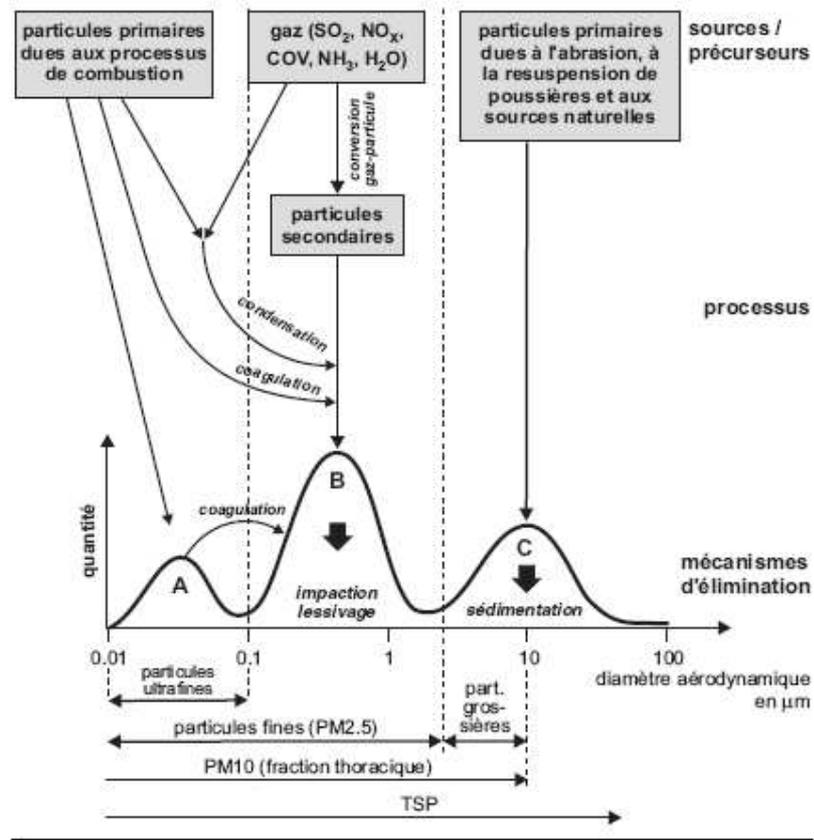
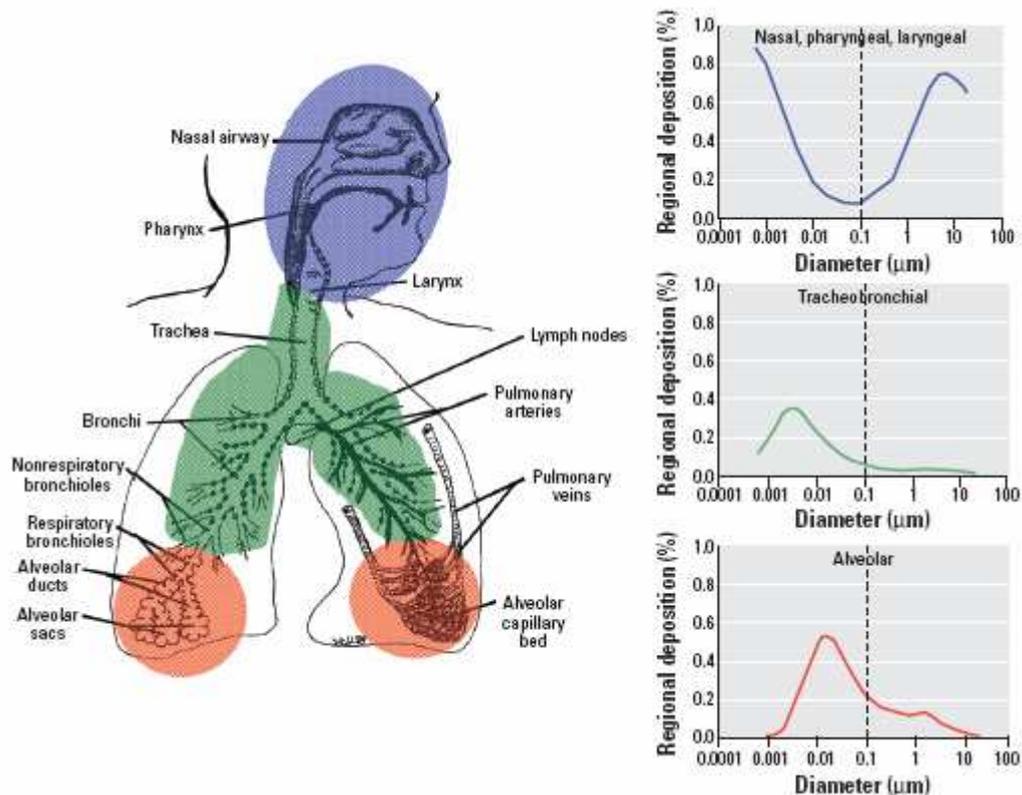


Figure 1 : Classes d'aérosols selon leur mode de formation et leur taille (CFHA, 2007).

En complément de cette classification on désigne également généralement sous le terme de PM<sub>10</sub> les particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 μm ; elles peuvent passer la barrière du nez par inhalation, et parvenir jusque dans les bronches et les alvéoles pulmonaires (Figure 2). De manière analogue, le terme de PM<sub>2,5</sub> désigne les particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 2,5 μm et celui de PM<sub>1</sub> les particules d'un diamètre aérodynamique médian inférieur à 1 μm. L'abréviation TSP (total suspended particulate matter) désigne quant à elle la masse totale de particules en suspension et regroupe habituellement les particules jusqu'à un diamètre de 40 μm.



**Figure 2 : Modélisation de la pénétration des particules inhalées dans l'appareil respiratoire en fonction de la taille (respiration nasale). D'après Oberdorster (2005)<sup>2</sup>.**

Les particules issues des processus de combustion sont généralement très petites, avec un diamètre compris entre quelques nanomètres et quelques centaines de nanomètres. Les particules issues de processus mécaniques ont généralement une taille supérieure au micromètre. Entre les deux, on trouve avant tout des aérosols, ou des particules secondaires issues de précurseurs gazeux et de particules produites par coagulation.

Ce sont les particules grossières qui constituent la fraction granulométrique la plus importante en masse dans l'air, en général. Ce sont en revanche les particules ultrafines qui en nombre représentent la population de particules la plus importante dans l'atmosphère. Cela peut avoir un impact du point de vue toxicologique selon que les effets dépendent du nombre ou de la masse de particules inhalées.

Comme évoqué précédemment la morphologie des particules est également très variable, pouvant aller de particules sphériques agglomérées (cas des particules Diesel ou de combustion) à des formes cristallines organisées (cas des aérosols issus d'embrun marins).

Si la taille et la composition chimique des particules sont souvent considérées comme les caractéristiques les plus importantes, il convient de noter que leur surface spécifique, voire leur morphologie et leur état de surface, peuvent également jouer un rôle dans leurs propriétés toxicologiques ou écotoxicologiques.

<sup>2</sup> Modèle initialement développé dans le cadre de travaux intéressant la radioprotection et découlant de travaux réalisés avec des particules radioactives.

## 2.3 Durée de vie des particules

Le temps de vie et de séjour des particules dans l'air dépend de plusieurs facteurs (taille, réactivité chimique, solubilité, etc.). En raison de leur masse, les particules grossières se déposent relativement vite sous l'effet de la gravité. Pour leur part, en raison de leur taille, les particules ultrafines se comportent pratiquement comme des gaz et grossissent assez rapidement par condensation à leur surface de gaz peu volatils (noyaux de condensation) et par collision entre elles (essentiellement en milieu concentré). En définitive, ce sont les particules comprises entre 0,1 et 1 µm qui ont les durées de vie les plus élevées. On les classe dans le mode « accumulation » et leur durée de vie peut aller jusqu'à une semaine environ et elles peuvent ainsi transporter des composés toxiques sur de très longues distances.

## 2.4 Données sur les émissions en France

Seules les émissions primaires, exprimées en masse de particules, font l'objet d'évaluations, et celles-ci sont entachées d'incertitudes notables s'agissant en particulier des émissions diffuses.

Les données 2007 du Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA, 2008) évaluent à environ 508 kt les émissions annuelles de PM<sub>10</sub> (2005) et ces émissions sont en baisse (- 28 % entre 1990 et 2005). Les principaux émetteurs du fait de leur contribution aux émissions de PM<sub>10</sub> en France (référence 2005) sont :

- l'agriculture/sylviculture (30 %), en particulier les labours,
- l'industrie manufacturière (28 %), en particulier le BTP et l'exploitation de carrières,
- le résidentiel/tertiaire (27 %), en particulier la combustion du bois, du charbon et du fioul,
- le transport routier (11 %),
- la transformation d'énergie (2 %),
- les autres transports, hors transport routier (2 %).

S'agissant des PM<sub>2,5</sub>, les émissions étaient de l'ordre de 329 kt en 2005, et ont baissé de 33 % entre 1990 et 2005, les principaux émetteurs étant :

- le résidentiel / tertiaire (41 % des émissions totales en France métropolitaine),
- l'industrie manufacturière (26 %),
- le secteur de l'agriculture/sylviculture (17 %),
- le secteur du transport routier (12 %).

Au sein des trois premiers secteurs, les principaux émetteurs sont la combustion (bois, charbon et fioul), l'exploitation des carrières, les chantiers et le BTP ainsi que les labours.

Bien entendu, ces données annuelles établies au niveau national peuvent notablement varier selon les régions et les zones du territoire. Ainsi, les contributions des transports aux émissions de PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> sont de l'ordre de 11 % à l'échelle de la France mais elles sont supérieures à 30 % pour les PM<sub>10</sub> et à 43 % pour les PM<sub>2,5</sub> en ce qui concerne les émissions en Île-de-France.

## 2.5 Surveillance des particules dans l'air ambiant en France

Les modalités de surveillance des concentrations de particules PM<sub>10</sub> ont été fixées par la directive 1999/30/CE du 22 avril 1999 et reprises dans la nouvelle directive unifiée 2008/50/CE du 14 avril 2008. Ces modalités stipulent que la mesure doit être réalisée en utilisant la méthode de référence décrite dans la norme NF EN 12341. Cette méthode, dite « gravimétrique », n'est cependant pas adaptée à une surveillance opérationnelle en continu et ne permet pas de répondre aux obligations d'information imposées par la directive. En France, les Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), tout comme un grand nombre de réseaux européens, se sont donc

équipées de systèmes de mesurage automatique de type TEOM, ou d'analyseurs de type « jauge radiométrique bêta ».

A titre indicatif, les moyennes annuelles exprimées en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{10}$  mesurées par ces dispositifs et calculées sur l'ensemble des sites fixes des AASQA étaient les suivantes pour l'année 2006 (données BDQA – ADEME), et on peut noter que les niveaux les plus élevés s'observent au voisinage de sites « trafic » :

Stations représentatives des niveaux de pollution de fond en zones urbaines	: 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Stations de proximité de trafic automobile	: 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Stations de proximité de zones industrielles	: 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Stations rurales	: 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Les analyseurs de type TEOM et bêta peuvent toutefois sous-estimer les mesures de particules car ils nécessitent d'être chauffés et peuvent donc évaporer la quasi-totalité de la fraction volatile des  $\text{PM}_{10}$ . Cette sous-estimation peut être comprise entre un facteur 1,1 et 1,5 en moyenne annuelle, et atteindre 2,5 en valeur journalière. La sous-estimation de la mesure des PM est en général plus faible en été car en cette saison la fraction volatile des particules est déjà à l'état gazeux dans l'atmosphère – donc non collectée par les préleveurs de particules – du fait des températures ambiantes.

A partir de 2002, des améliorations techniques ont été proposées par les constructeurs des appareils de type TEOM et bêta pour pallier à ces problèmes de mesure. Un module appelé « FDMS » s'agissant des appareils de type TEOM, ou un module appelé « RST » s'agissant des appareils à jauge bêta, peut être mis en place sur ces instruments afin de compenser leurs artefacts de mesure. Une série d'études du LCSQA a permis de démontrer l'équivalence des appareils équipés de ces modules avec la méthode de référence lors de campagnes d'essais sur le territoire (Blanchard, 2003). La mise en œuvre de ces technologies permet de disposer d'appareils automatiques équivalents à la méthode de référence et dotés de temps de réponses analytiques compatibles avec les obligations d'information européennes et nationales.

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2007, chaque AASQA a été dotée d'au moins une station de référence équipée d'un doublet d'appareil TEOM ou bêta dont l'un est équipé du module de correction (FDMS pour les TEOM ou RST pour les analyseurs bêta). Ces doublets permettent de calculer à chaque heure et pour chaque AASQA une valeur d'ajustement de la fraction volatile en  $\text{PM}_{10}$  applicable aux autres points de mesure non équipés d'un module de correction (Blanchard, 2004).

D'autres pays en Europe ont adopté une méthode moins rigoureuse et fondée sur l'usage d'un facteur de correction unique applicable sur l'ensemble de leur territoire.

Sur les données de l'ensemble des 50 doublets des AASQA recensées au sein de la BDQA de l'ADEME, les valeurs d'ajustement moyennes saisonnières en 2007 étaient au minimum de 1,1 en été, et au maximum de 1,4 en automne en métropole. On a observé aussi en 2007 des variations régionales de ces valeurs d'ajustement pouvant osciller en moyenne annuelle de 1,1 en régions Aquitaine et Midi Pyrénées, à 1,5 dans des régions telles que PACA, Nord Pas de Calais, Alsace. Des valeurs plus élevées peuvent être observées sur de courts pas de temps (horaires notamment) et sur certains doublets.

## 3 Typologie des particules de l'air ambiant

### 3.1 Introduction

Tel que vu au chapitre précédent, les particules de l'air ambiant sont issues de diverses sources. Ainsi, du fait même de leur mode de production, les particules ne sont que rarement constituées d'une seule espèce chimique et forment un mélange extrêmement complexe. La composition chimique des particules est par ailleurs très variable. Elle est tout d'abord fonction des zones et de leurs activités émettrices : zone urbaine, à proximité du trafic, zone rurale, zone littorale, etc. L'activité de ces sources est en outre variable en fonction de la saison : combustions liées au besoin de chauffage en hiver, épandages agricoles au printemps, vents sahariens au printemps, etc. Ensuite, les particules sont soumises à des réactions chimiques (oxydoréduction, acidification, photolyse, etc.) et des transformations physiques (condensation, adsorption, nucléation, coagulation, etc.), ces réactions physico-chimiques présentant elles-mêmes une certaine saisonnalité. Ainsi, la composition chimique des particules varie dans l'espace et dans le temps. Enfin, elle dépend également de la fraction granulométrique considérée ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ).

Dans ce chapitre, après une présentation des principaux composants des particules, les variations de composition en fonction du temps, de l'espace et de la fraction granulométrique sont exposées. Enfin, sur la base des connaissances et données disponibles au niveau français, un focus sur la fraction volatile et des premiers éléments relatifs aux pics de pollution particulaire pouvant être observés sont exposés. Un pic est entendu comme un niveau journalier de pollution particulaire particulièrement élevé.

Il existe différentes manières de décrire la typologie des particules (Bloemen *et al.*, 2008) et le paragraphe suivant repose sur une typologie par composante chimique, compte tenu du contexte de la saisine.

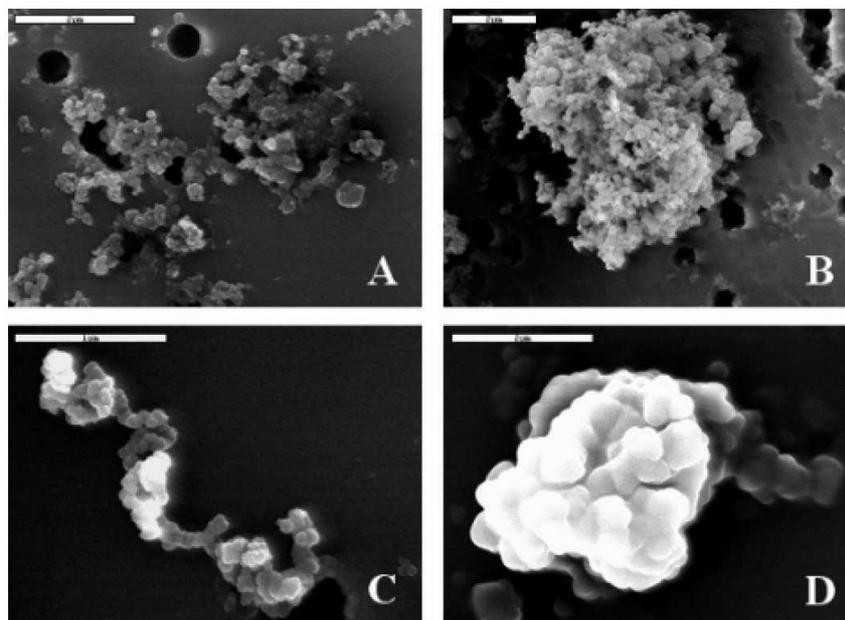
### 3.2 Les principaux composés chimiques présents dans les particules

On trouve dans les particules des éléments et des composés minéraux, ainsi que des composés organiques et biologiques, dont les principales composantes sont habituellement les suivantes :

- du **sulfate d'ammonium** et du **nitrate d'ammonium** formés dans l'atmosphère à partir de l'ammoniac et des acides sulfurique et nitrique produits par oxydation des oxydes de soufre et d'azote.
- du **carbone élémentaire (EC)**, encore appelé **carbone suie** ou **Black Carbon (BC)** qui existe sous deux formes cristallines, le diamant et le graphite. Le graphite peut être présent dans les résidus de combustion en mélange pauvre. Il est susceptible d'adsorber du carbone organique imbrulé au cours de la phase de refroidissement de la combustion, c'est un processus bien connu par exemple dans le cas des particules émises par les moteurs Diesel ou lors de la combustion du charbon ou du bois. Des microparticules de carbone élémentaire sont également émises lors de l'abrasion des pneus, le graphite étant un composé majeur dans les caoutchoucs employés.
- du **carbone organique (OC)** présent dans des composés organiques issus notamment de combustions incomplètes (moteurs et foyers fixes de combustion, feux de biomasse, etc.). Une partie de ce carbone organique particulaire est présent au sein de **composés organiques secondaires (SOA)**, issus de la chimie atmosphérique des composés organiques volatils primaires d'origine naturelle (terpènes, etc.) ou anthropique (échappement des véhicules automobiles, foyers de combustion, etc.). Globalement, on a identifié la présence de plusieurs centaines de composés organiques différents dans les particules en suspension et parmi ceux-ci, on peut trouver des espèces toxiques comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

- des **composés minéraux** et des **sels** (silicates d'aluminium, carbonate de calcium, chlorure de sodium etc.) issus de phénomènes d'abrasion et d'envols de poussières (chantiers, gravières, travail des sols en agriculture, érosion des routes et des sols, poussières désertiques, embruns, etc.).
- des **métaux** provenant de processus d'abrasion (envolées de poussières, freinage des véhicules, etc.), d'émissions liées à des processus industriels (métallurgie, etc.) et aux combustions (chauffages, incinérations, etc.).
- des **composés d'origine biogène** comme les pollens, les spores et divers micro-organismes (virus, bactéries, champignons), constitués en général de grosses particules.

La majeure partie de la masse des PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> est constituée de nitrates, sulfates, ammonium, sel marin, carbone et matière organique, dans des proportions qui sont toutefois variables. La fraction minérale peut représenter de 40 à 70 % de la masse des particules et constitue généralement la fraction dominante. Dans l'atmosphère, ces composés chimiques peuvent former des particules différentes ou être associés sur une même particule, à la suite de la condensation d'un gaz sur une particule déjà existante (nucléation hétérogène). Ainsi, souvent les particules sont constituées d'un noyau central de carbone élémentaire entouré d'une couche de surface comportant des composés minéraux et des composés organiques : c'est le cas des particules Diesel (Figure 3).



**Figure 3 : Microscopie électronique à balayage de particules collectées sur filtre dans l'atmosphère parisienne.**

**(A) particules sphériques individuelles de quelques 10 nm de diamètre (B) chaînes et amas de particules de quelques 100 nm (C et D) coalescence de particules de suie de quelques µm (Baulig et al., 2004).**

Ainsi, la caractérisation chimique détaillée des particules demeure un problème extrêmement complexe en raison de la diversité des molécules et des composés présents. L'analyse de la fraction minérale pose habituellement moins de difficultés que celle de la fraction organique car cette dernière comporte généralement de nombreux composés, souvent à l'état de traces.

Enfin, il convient de signaler que la classification et les indicateurs retenus par les auteurs pour rendre compte de la composition chimique des particules peuvent dépendre des techniques de laboratoire utilisées ce qui entraîne parfois une variabilité d'expression dans les résultats. Par conséquent, les résultats obtenus entre différents laboratoires doivent être comparés en tenant compte de cette considération.

### 3.3 La variabilité de la composition chimique des particules : quels déterminants ?

#### 3.3.1 Une composition chimique variable dans l'espace

La composition chimique des particules varie de manière significative en fonction notamment des sources de polluants présentes sur les zones géographiques où elles sont collectées et une récente publication de Putaud *et al.* (2004) a permis de recenser ces caractéristiques chimiques sur divers sites en Europe au cours de la période 1990-2000. La Figure 4 qui en est extraite traduit notamment cette variabilité de composition sur cinq types de zones différentes : naturelle, rurale, périurbaine, urbaine, et à proximité du trafic routier.

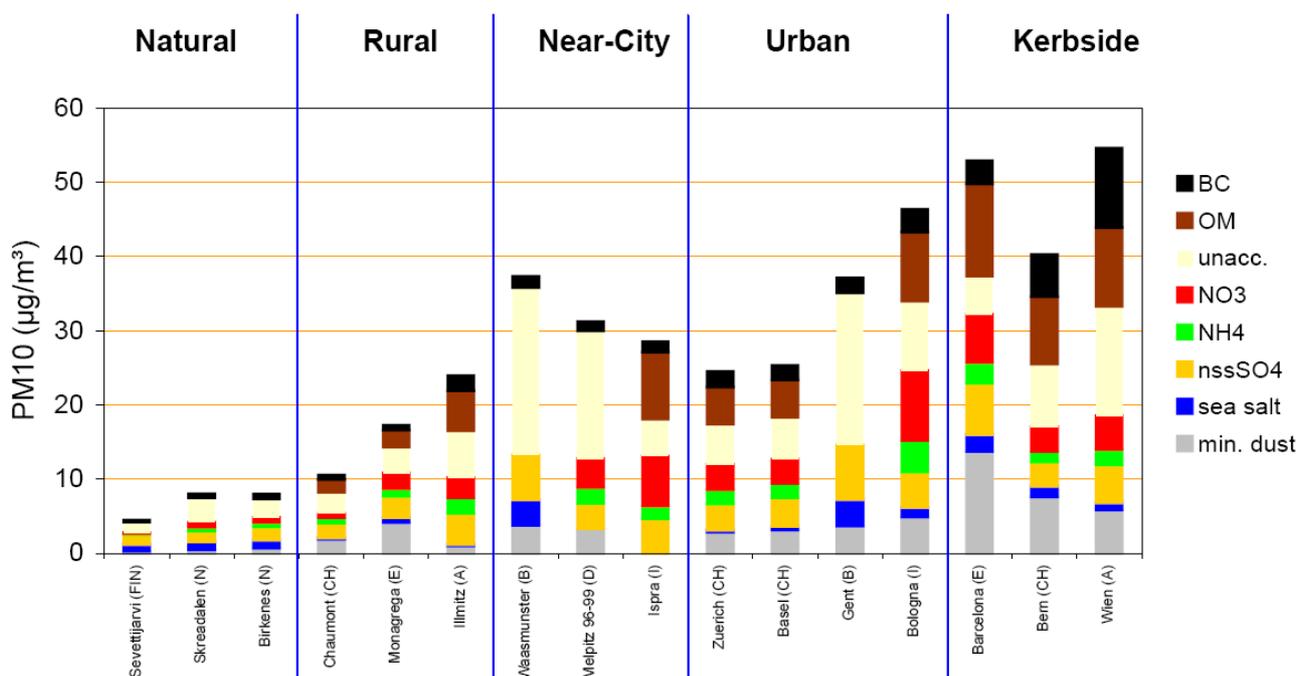


Figure 4 : PM<sub>10</sub> : Concentrations moyennes annuelles (valeurs absolues) des principaux composants particulaires [source : (Putaud *et al.*, 2004)].

Ainsi, la matière organique (OM) (qui correspond ici à la masse de carbone organique multipliée par un facteur de conversion de 1,4) apparaît comme l'une des composantes majeures des particules en site de proximité trafic (kerbside) et urbain, alors qu'une situation différente s'observe en sites naturels. La contribution relative des sulfates qui ne sont pas liés à des embruns marins (non sea salt SO<sub>4</sub>) ou d'autres composés comme les poussières minérales (min dust) est également variable selon les sites. Les composés minéraux représentent une part non négligeable des PM<sub>10</sub> mesurées au niveau de sites de proximité au trafic routier (kerbside). Le carbone élémentaire (BC) représente également une part de la masse de PM<sub>10</sub> pouvant atteindre 15 à 20 % sur ces mêmes sites. Ces observations sont en particulier à relier à la proximité de la source « Trafic » : émissions directes (combustion incomplète) et remises en suspension.

Parmi d'autres auteurs, Laj and Sellegri (2003) rapportent également une composition moyenne de l'aérosol fin pour plusieurs types de masses d'air caractéristiques de zones rurales, marines et urbaines. La Figure 5 montre un exemple de composition chimique pour ces trois types de masses d'air. Elles se différencient par les concentrations relatives des différentes espèces chimiques qui les composent. Ces proportions ne sont qu'indicatrices et de grandes variabilités locales peuvent être rencontrées.

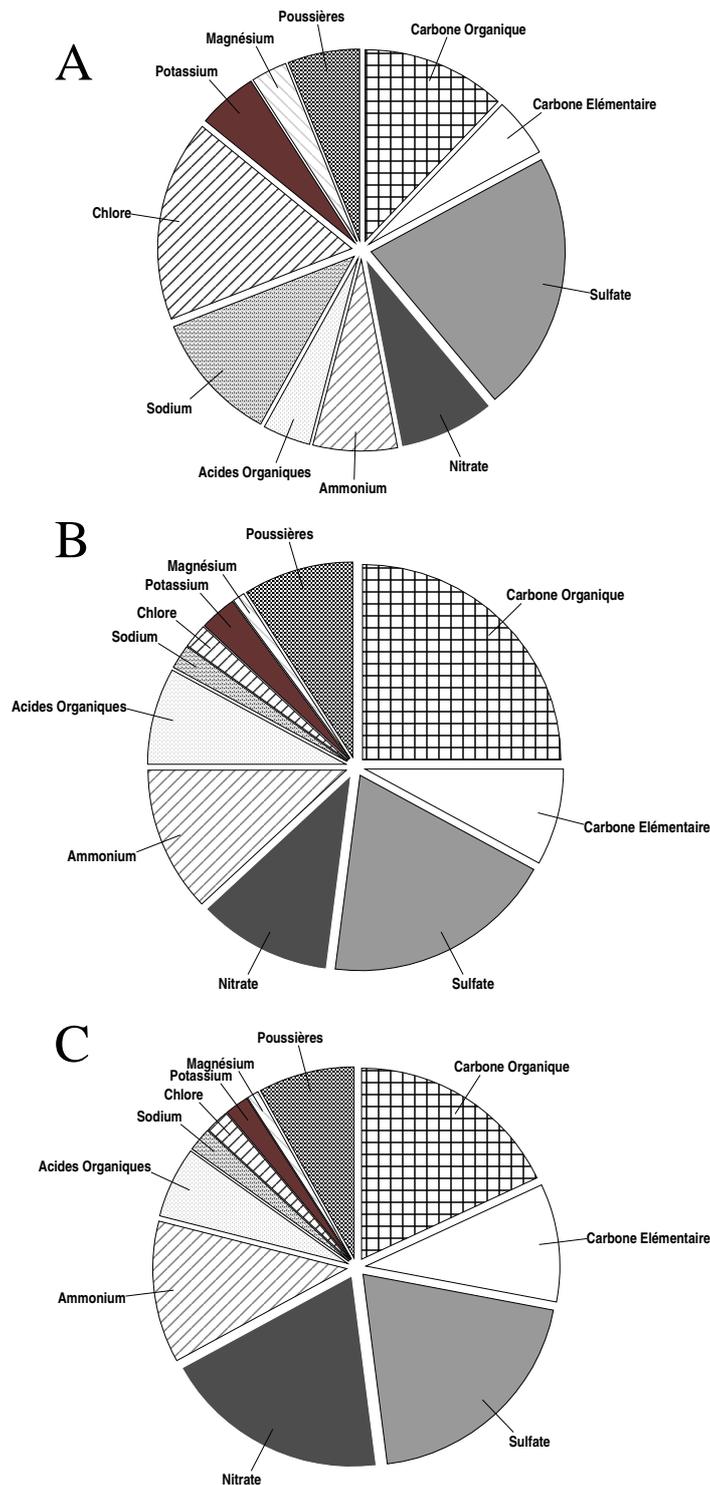


Figure 5 : Composition relative de l'aérosol atmosphérique dans des masses d'air A) marine, B) rurale et C) urbaine. D'après Laj and Sellegri (2003).

### 3.3.2 Une composition chimique variable dans le temps

L'activité des sources émettrices ainsi que les conditions météorologiques influençant les réactions physico-chimiques à l'origine de particules secondaires étant variables en cours d'année, il en résulte une forte saisonnalité de la composition chimique des particules. De nombreux exemples de cette saisonnalité ont été publiés et on retiendra ici ceux récemment relatés par les travaux de Cachier *et al.* (2009 soumis) (Figure 6) et de Putaud *et al.* (2004), sur plusieurs villes européennes et pour les PM<sub>10</sub> et les PM<sub>2,5</sub>.

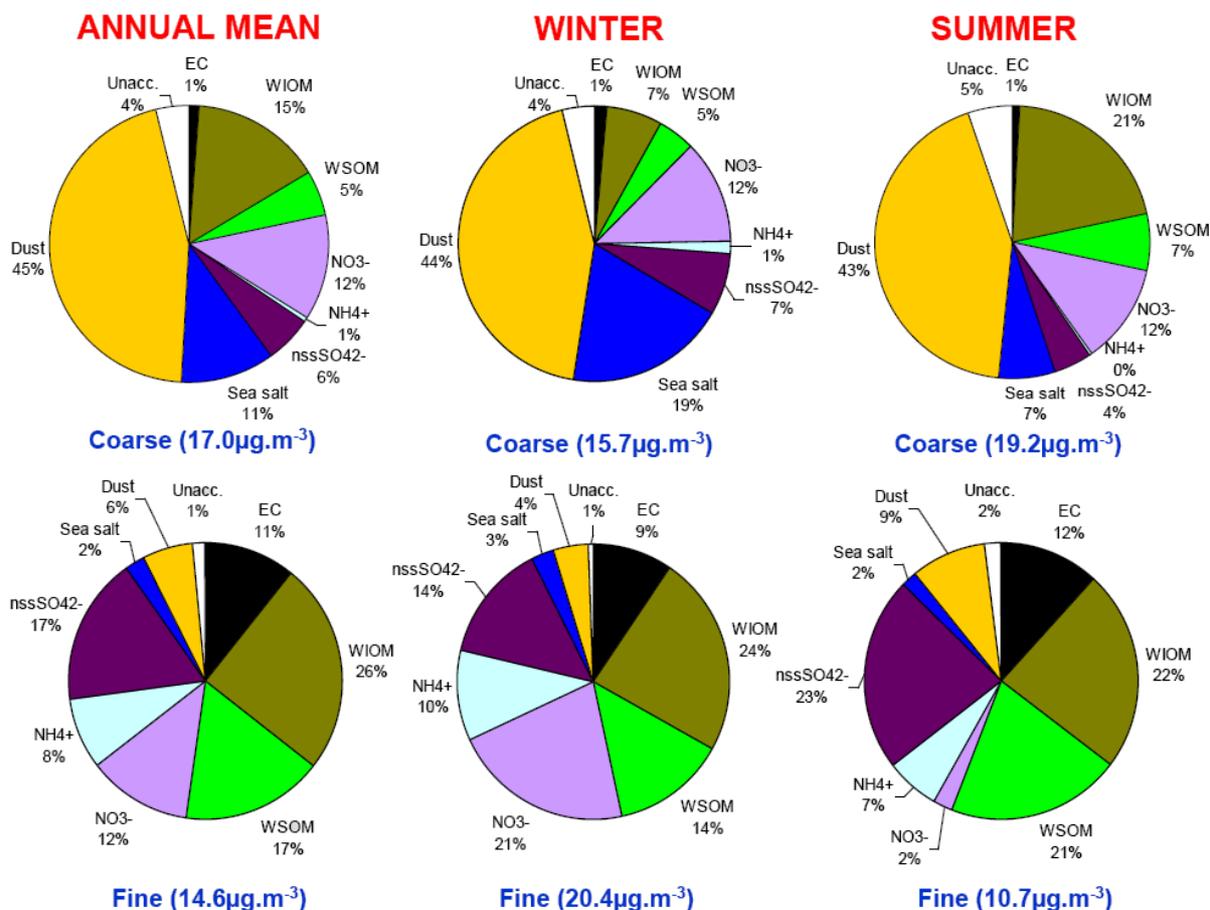


Figure 6 : Saisonnalité été / hiver de la composition des particules pour la fraction fine et la fraction grossière – Paris, année 2005 ; (Cachier et al., 2009 soumis).

Pour la ville de Paris, on observe ainsi que la part de matière organique soluble (water soluble organic matter) présente dans les fractions fines est plus importante en été qu'en hiver (Figure 6). Les Figure 7 et Figure 8 montrent également sur Paris une forte saisonnalité du contenu des particules en nitrate d'ammonium et carbone organique.

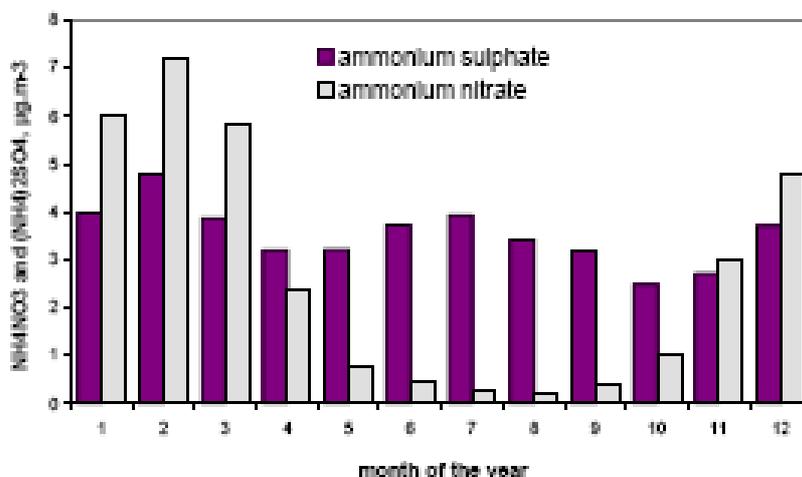


Figure 7 : Exemple de saisonnalité des sels d'ammonium dans la fraction fine de l'aérosol parisien, année 2005 ; (Cachier et al., 2009 soumis).

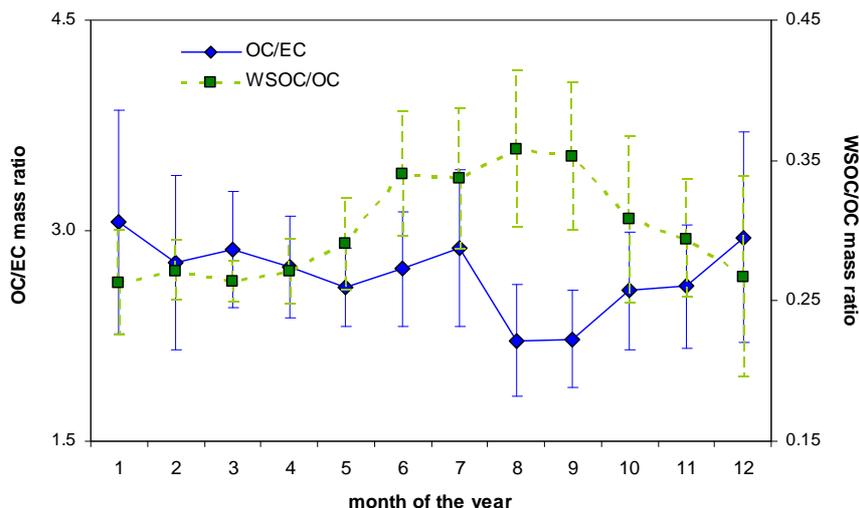


Figure 8 : Exemple de saisonnalité de la répartition des composés organiques – mode fin – Paris, année 2005 ; (Cachier *et al.*, 2009 soumis).

### 3.3.3 Une composition chimique variable selon la fraction granulométrique

En première approche, rappelons que des différences s’observent en fonction des familles de particules (en lien avec leurs sources). La Figure 9 illustre dans quelle classe granulométrique peuvent se situer différents types de particules.

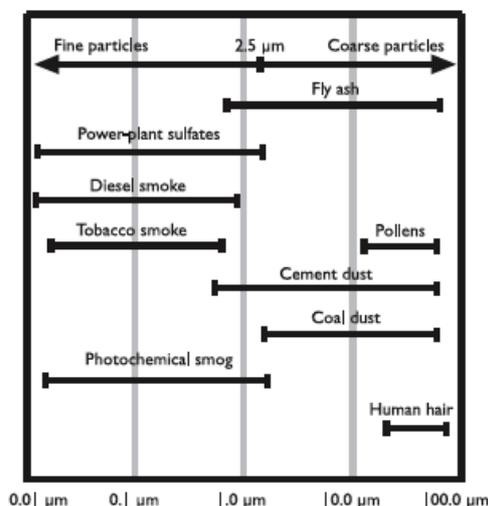


Figure 9 : Classe granulométrique de quelques types de particules [adapté de Heinsohn & Kabel (1999)].

Bien que toutes les composantes soient présentes dans les différentes fractions granulométriques, leurs contributions relatives y sont très variables. Les minéraux et le sel de mer contribuent davantage à la fraction grossière alors que les sels d’ammonium, la matière organique, le carbone élémentaire et les nitrates contribuent plus à la fraction fine (Putaud *et al.*, 2004).

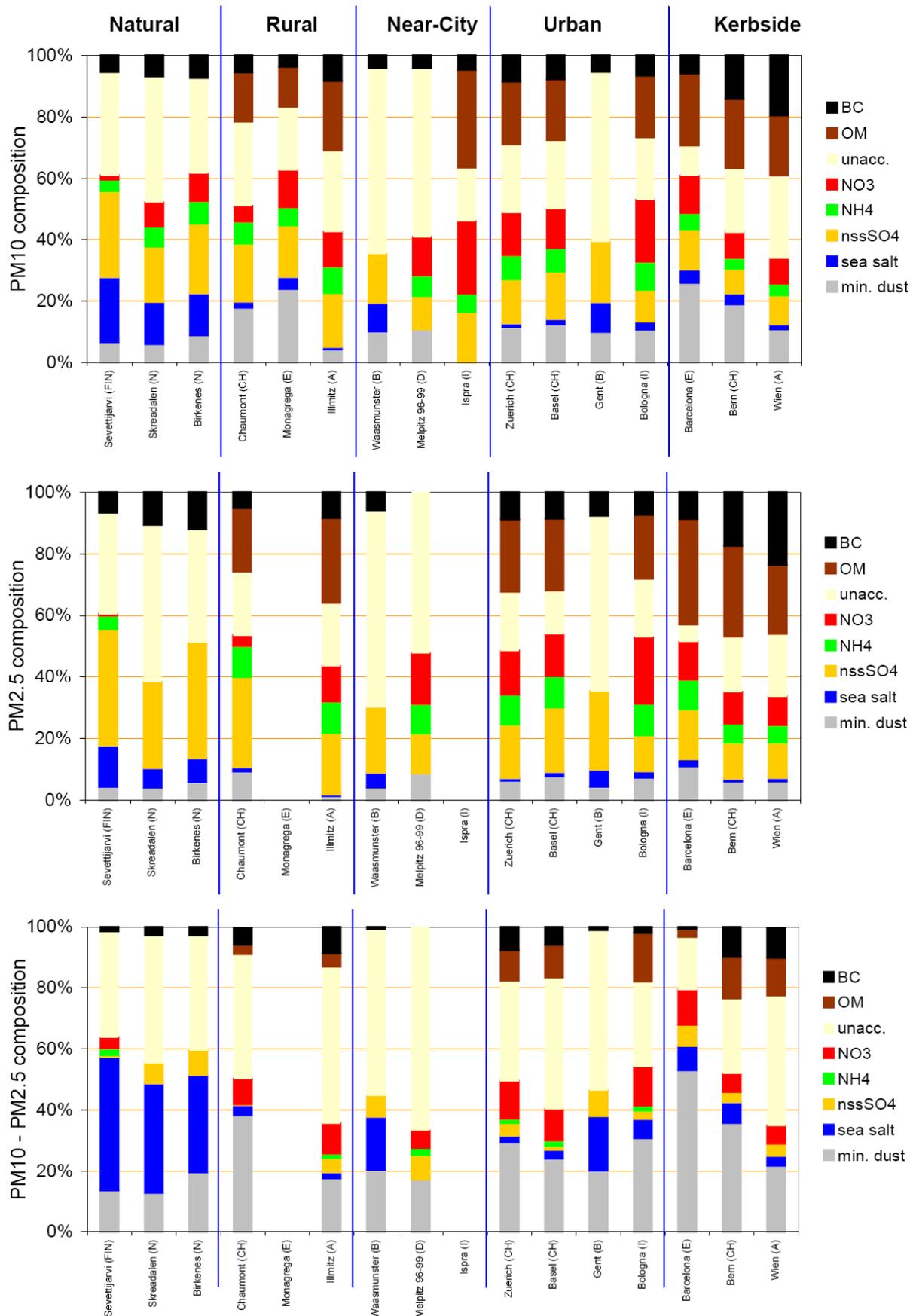


Figure 10 : Composition moyenne annuelle de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> et (PM<sub>10</sub>-PM<sub>2,5</sub>) [source : Putaud et al. (2004)].

La Figure 11, extraite de travaux de Cachier *et al.* (2009 soumis), confirme également pour la région parisienne les données précédentes en matière de variabilité de composition chimique des particules selon leur fraction granulométrique et la saison.

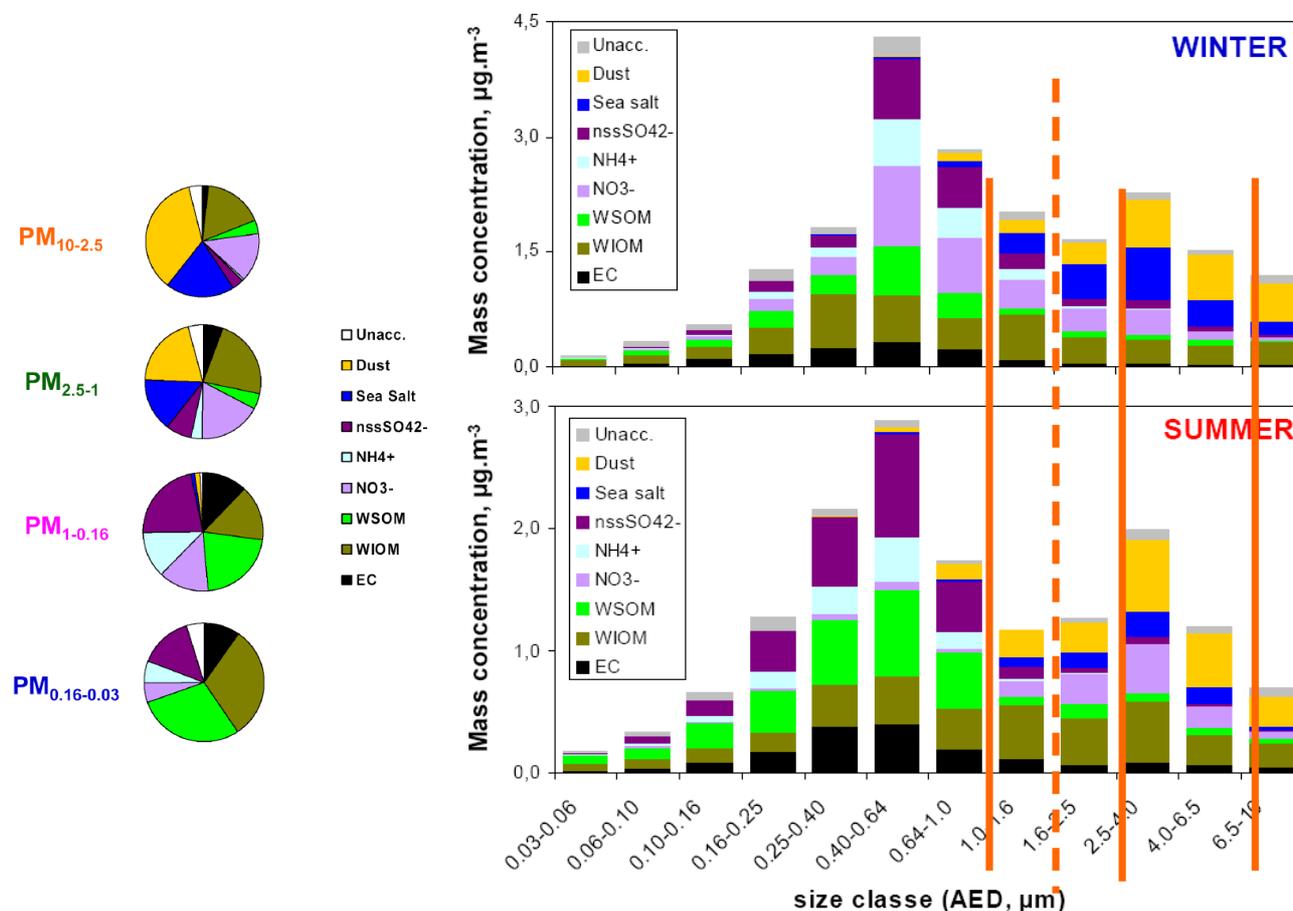


Figure 11 : Exemple de composition chimique des particules selon la classe granulométrique – Paris – 2005 (moyenne de 6 impacteurs hiver et de 6 impacteurs été) (Paris, année 2005 – (Cachier *et al.*, 2009 soumis)).

### 3.4 Comportement de la fraction volatile des particules dans l'espace et dans le temps : retour d'expérience au niveau français

#### 3.4.1 Éléments de contexte

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2007, les AASQA mesurent les PM<sub>10</sub> (et PM<sub>2,5</sub>) en tenant compte de la fraction volatile des aérosols. Cette nouvelle méthode permet de corriger une sous-estimation de la masse qui aurait été mesurée par l'ancienne méthode, d'un facteur moyen compris entre 1,1 et 1,5 en moyenne annuelle, mais pouvant atteindre 2,5 sur des valeurs journalières.

Il a été montré, notamment au sein du LCSQA, qu'une grande partie de la fraction volatile est constituée de nitrate d'ammonium (Aymoz et Bessagnet, 2007). Cette espèce est formée à partir d'ammoniac et d'acide nitrique en phase gazeuse ( $\text{NH}_3 + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3$ ). L'humidité et la température sont des facteurs déterminants dans sa formation. Par ailleurs, les travaux du LCSQA ont aussi montré qu'une part de la fraction volatile des particules pouvait être constituée d'espèces organiques primaires et secondaires, sans qu'il ait été possible de la quantifier.

### 3.4.2 Comportement de la fraction volatile dans l'espace et le temps

Les 50 sites de référence équipés de doublets depuis le début de l'année 2007 ont permis de dresser un premier bilan des mesures réalisées, et de la cohérence spatiale et temporelle des « écarts » mesurés compte tenu de la fraction volatile présente sur les  $PM_{10}$  (travaux du LCSQA non publiés).

L'écart moyen en masse observé sur les moyennes annuelles est de l'ordre de  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , quelle que soit la typologie des sites de mesure (rural, urbain, trafic). L'ajout de cet écart aux moyennes annuelles est proche du résultat obtenu *via* un facteur multiplicatif de 1,3.

Si l'on s'intéresse par contre au nombre de dépassements de la valeur limite journalière de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (à ne pas dépasser plus de 35 jours par an), l'impact de la fraction volatile varie selon la typologie des sites de mesure et la prise en compte de la fraction volatile fait basculer 20 % des sites urbains et 50 % des sites trafic en situation de dépassements. Le facteur multiplicatif de 1,3 n'est, compte tenu de ces différences spatio-temporelles, plus en toute rigueur applicable.

Au niveau du territoire national, les écarts moyens sur les sites de référence ont pu être cartographiés (Figure 12).

Il ressort de cette analyse le peu d'homogénéité spatiale ou temporelle des écarts massiques liés à la fraction volatile, à l'échelle nationale.

Les nettes différences saisonnières selon les régions semblent indiquer des « origines diverses » des écarts mesurés, ne permettant de tirer de règle générale quant au comportement de la fraction volatile dans l'espace et selon les saisons.

Enfin, toujours d'après des travaux du LCSQA, en termes de composition chimique, le nitrate d'ammonium semble expliquer une grande part des écarts observés, même si l'écart entre TEOM et TEOM+FDMS ne peut pas être systématiquement expliqué par le nitrate d'ammonium. Ces tendances sont cependant à moduler compte tenu de certaines limites associées à ces travaux, en particulier le fait du peu de données de chimie disponible et d'un manque d'homogénéité au niveau des types de prélèvements et analyses effectués.

Si le *ratio* de 1,3 entre une mesure automatique avec et sans correction de la fraction volatile est une estimation robuste en moyenne annuelle, cette valeur peut être très variable dans le temps et dans l'espace. La Figure 13, extraite des données du LCSQA représente la différence entre toutes les valeurs mesurées en France métropolitaine en 2007 avec et sans correction de la fraction volatile en fonction de la concentration en particules mesurée sur un appareil sans correction.

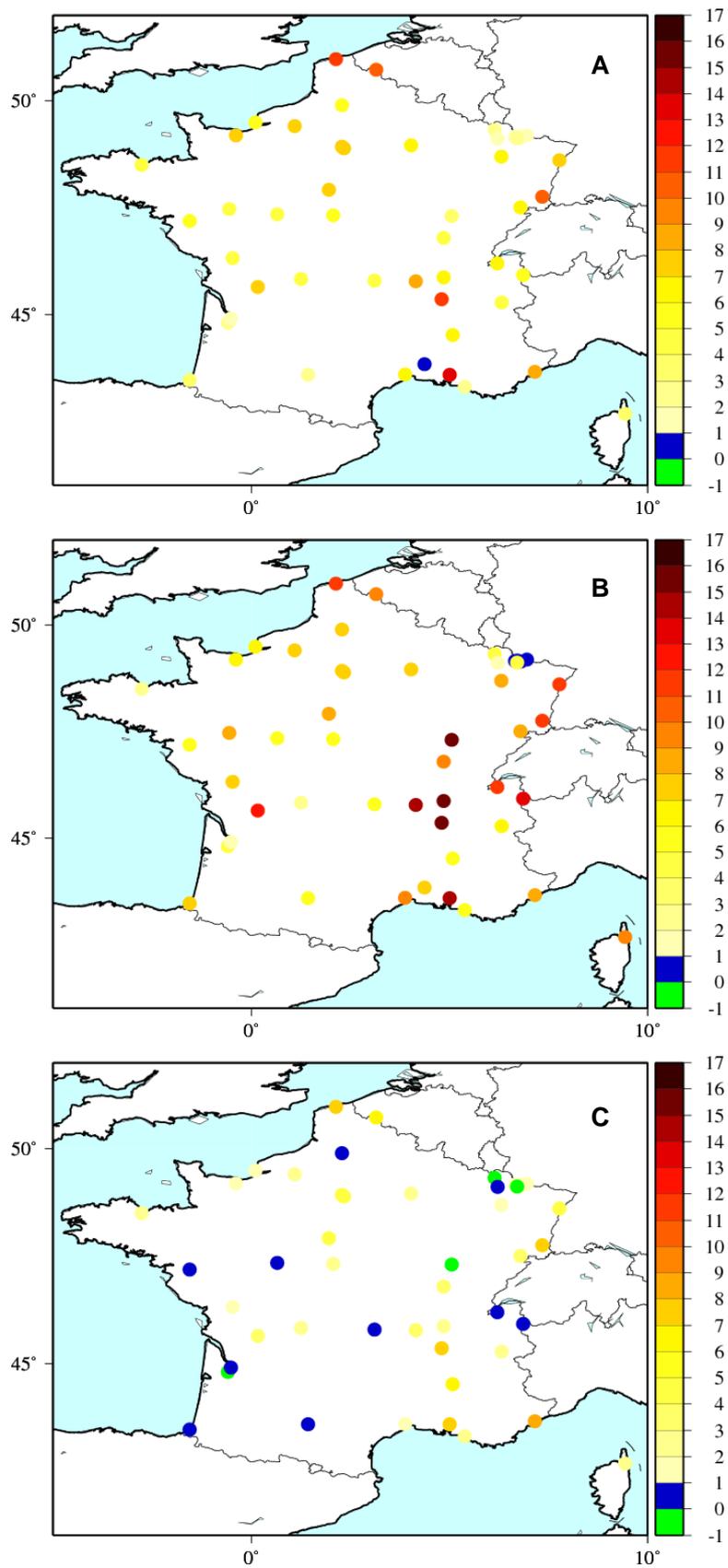


Figure 12 : Ecart moyen sur les sites de références sur l'année 2007 (A), l'hiver 2007 (B) et l'été 2007 (C) [Source : LCSQA].

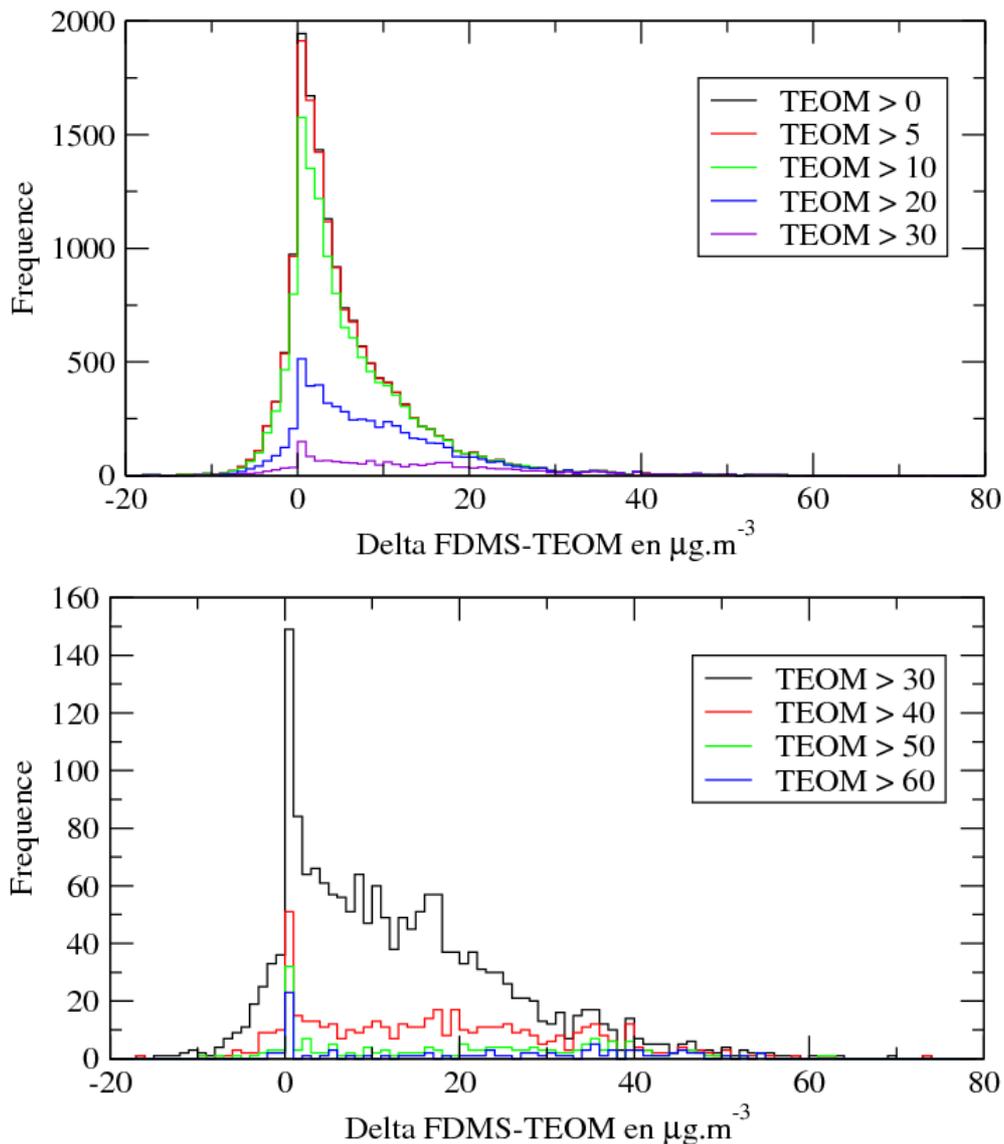


Figure 13 : Différence entre des valeurs avec et sans correction de la fraction volatile en fonction de la concentration en particules (PM<sub>10</sub>) mesurée par TEOM seul. Données LCSQA.

On constate graphiquement, en particulier que pour les concentrations en poussières supérieures à 30 µg/m<sup>3</sup> mesurées avec un appareil sans correction (épisodes de pollution particulaire importante), les différences entre les modes de mesure représentent un *continuum* entre 0 et 60 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub>. Pour une concentration en poussières entre 40 et 50 µg/m<sup>3</sup> mesurée avec un appareil sans correction de la fraction volatile par exemple, les probabilités d'observer une différence entre 0 et 40 µg/m<sup>3</sup> sont globalement équivalentes (soit un *ratio* entre 1 et 2). En outre, ces différences peuvent simultanément refléter des réalités géographiques différentes, des modes de pollution particuliers certains jours, des effets de saison etc.

### 3.5 Pics de concentration en particules dans l'air ambiant : y a-t-il une composante explicative ?

Des travaux menés par le LCSQA sur des pointes de concentration en PM<sub>10</sub> sur fin 2007 – début 2008 (mesures réalisées à Rouen, Mulhouse et Lyon), tendent à montrer que les pics de concentration en particules ne sont pas systématiquement expliqués par le nitrate d'ammonium (Figure 14 et Figure 15). Le carbone organique semble contribuer pour une bonne part aux pics de concentration observés. En période hivernale, la combustion de biomasse pourrait expliquer en partie ces niveaux de carbone organique dans ce cas présent.

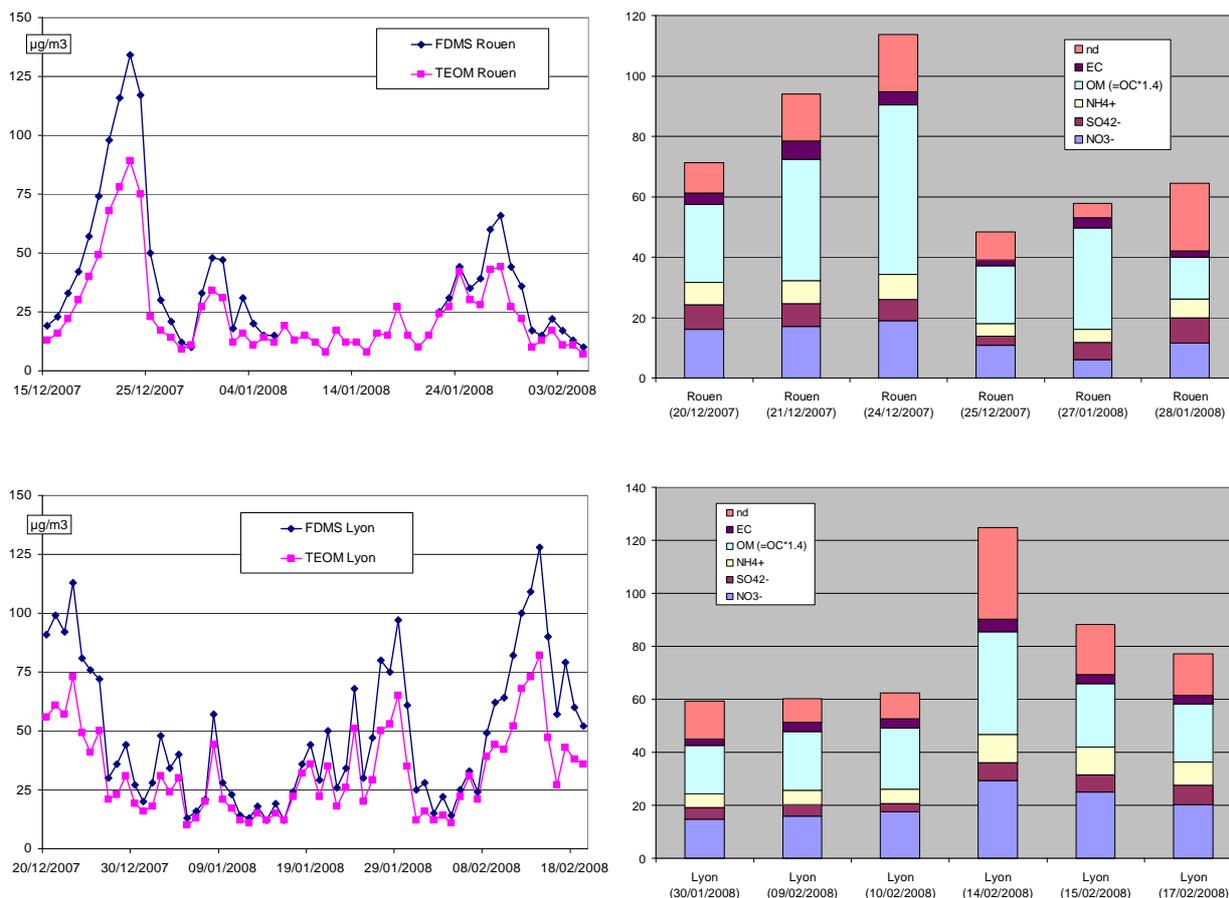


Figure 14 : Evolution des concentrations en PM<sub>10</sub> et composition chimique associée sur sites de référence à Rouen et à Lyon – hiver 2007 – 2008 [Source : LCSQA].

Ainsi, les pics de concentration en particules qui ont pu être étudiés jusqu'ici ne permettent pas d'identifier une composante chimique unique explicative de ces phénomènes ponctuels dans le temps et dans l'espace.

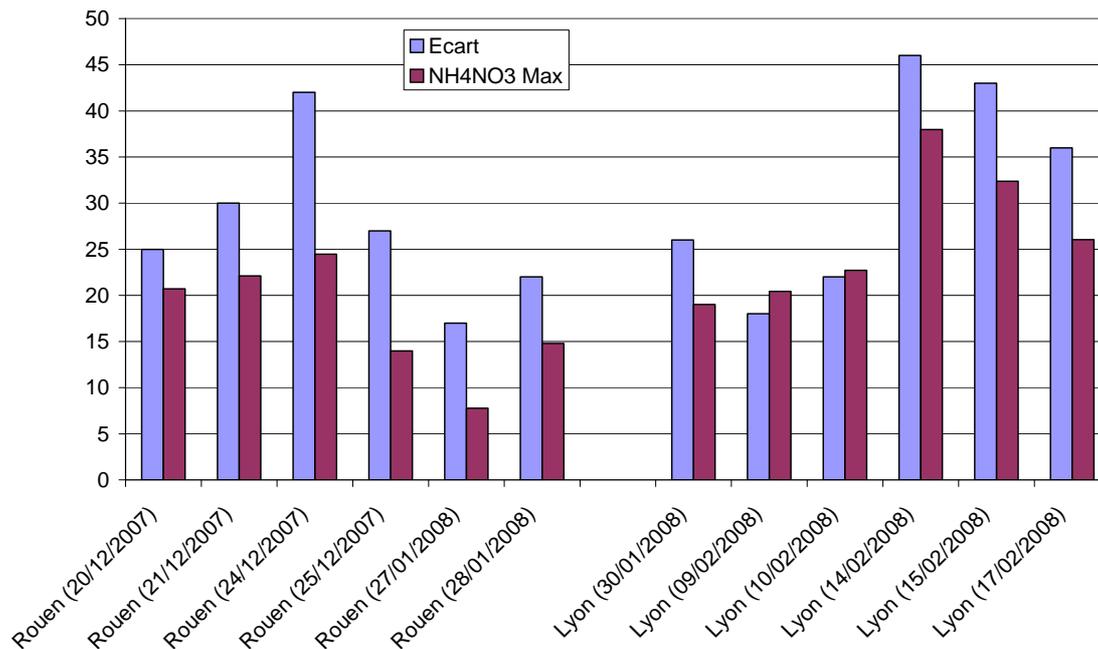


Figure 15 : Contribution du nitrate d'ammonium à l'écart entre les mesures de TEOM et TEOM+FDMS à Rouen et à Lyon pendant l'hiver 2007-2008.

### 3.6 Conclusion

- ▶ Les particules recouvrent un très large spectre de polluants dont les caractéristiques physiques et chimiques sont variées dans le temps et dans l'espace.
- ▶ Les connaissances sur la composition chimique des particules et leur variabilité dans le temps et dans l'espace, demeurent fragmentaires à l'échelle nationale et européenne, ce qui rend très difficile une mise en relation non équivoque avec des indicateurs sanitaires.
- ▶ Le nitrate d'ammonium est susceptible d'expliquer la part la plus importante de la masse de la fraction volatile des particules, mais d'autres composés, notamment organiques, contribuent également à cette fraction dans de moindres proportions.
- ▶ Les pics de concentration en particules qui ont pu être étudiés jusqu'ici en France ne permettent pas d'identifier formellement une composante chimique unique explicative de tous ces phénomènes.
- ▶ Il reste de ce fait difficile de distinguer la toxicité générale des particules de celle de leurs divers constituants qui peuvent en outre agir en synergie. *A fortiori*, l'étude de la toxicité spécifique de la fraction volatile rencontre les mêmes limites.

## 4 Toxicologie des particules : bilan des effets à court terme lors d'expositions humaines contrôlées

L'évaluation de l'impact des PM sur la santé a été réalisée aux travers d'études expérimentales chez l'homme, l'animal et *in vitro* sur différents types cellulaires. Cette synthèse s'est principalement focalisée sur les études réalisées chez l'homme car elles contribuent à étayer une relation causale entre l'exposition aux particules et les effets sur la santé révélés par les études épidémiologiques.

Les expositions ont été réalisées soit par des instillations nasales soit par des inhalations de particules chez des volontaires sains ou souffrants de pathologies respiratoires. La grande majorité des études a été faite avec des particules Diesel (une des sources importantes en milieu urbain) prises comme modèle de PM<sub>2,5</sub>. Suite au développement des concentrateurs de particules, quelques études ont été réalisées avec des particules atmosphériques concentrées (Concentrated ambient particles : CAP).

### 4.1 Effets respiratoires

Une série d'études d'exposition de volontaires à des particules Diesel a été faite en Suède par le groupe de T. Sandstrom. Les individus placés dans une chambre d'inhalation et réalisant un exercice physique modéré sont soumis à des expositions contrôlées d'échappements Diesel (particules + gaz, notamment NO<sub>2</sub>). Des concentrations élevées en particules (300 µg/m<sup>3</sup>) associées à 1,6 ppm (soit 3 000 µg/m<sup>3</sup>) de NO<sub>2</sub> ne provoquent pas, après 1 h d'exposition, de changements dans les fonctions pulmonaires mais induisent une inflammation pulmonaire et systémique (Salvi *et al.*, 1999, 2000). En effet, 6 h après une exposition de 1 h, il a été observé une augmentation de neutrophiles et de plaquettes dans le sang périphérique (Salvi *et al.*, 1999). Dans les lavages broncho-alvéolaires (LBA), la présence de cellules inflammatoires (granulocytes neutrophiles et lymphocytes B) et de médiateurs de l'inflammation (histamine, fibronectine) est augmentée. Dans les biopsies bronchiques, on observe une augmentation de cellules inflammatoires (neutrophiles, mastocytes, lymphocytes T), une expression accrue des molécules d'adhérence (vascular cell adhesion molecule-1, VCAM-1 et intercellular cell adhesion molecule-1, ICAM-1) et des chimiokines interleukine-8, IL-8 et growth related protein- $\alpha$ , GRO- $\alpha$  (Salvi *et al.*, 2000). Il est également mis en évidence une activation des facteurs de transcription sensibles au stress oxydant (nuclear factor-kappa B, NF- $\kappa$ B et activating protein, AP-1) et des voies de signalisation des mitogen-activated protein kinases, MAPkinases (Pourazar *et al.*, 2005) qui avait été identifiées dans des approches toxicologiques *in vitro* (Bonvallot *et al.*, 2001). Les auteurs attribuent ces effets aux particules et non au NO<sub>2</sub> car les concentrations (1,6 ppm ou 3 000 µg/m<sup>3</sup>) et le temps d'exposition (1 h) sont inférieurs à ceux nécessaires pour que le NO<sub>2</sub> induisent des effets inflammatoires (2 ppm ou 3 800 µg/m<sup>3</sup>, 4 h) (Blomberg *et al.*, 1997, 1999). A des concentrations moins élevées de particules Diesel (environ 100 µg/m<sup>3</sup>, 2 h et toujours en présence de NO<sub>2</sub>) on note à nouveau une présence accrue de neutrophiles, lymphocytes B et mastocytes et une augmentation de l'expression de l'IL-8 et l'IL-6 dans les voies respiratoires (Lavages et biopsies bronchiques 6 à 18 h après l'exposition) associées à une augmentation de la résistance des voies respiratoires (Behndig *et al.*, 2006 ; Stenfors *et al.*, 2004 ; Holgate *et al.*, 2003a). Ces effets sont similaires que les individus exposés soient en bonne santé ou légèrement asthmatiques (Stenfors *et al.*, 2004).

L'exposition de volontaires sains à des particules Diesel par instillation nasale (0,3 mg par narine) a montré que ces particules induisent une réponse inflammatoire allergique caractérisée par une augmentation des cytokines et de chimiokines dans les lavages de nez ainsi que des niveaux

d'immunoglobulines E (IgE) mais pas des autres immunoglobulines (Diaz-Sanchez *et al.*, 1994, 1996). Les particules Diesel pourraient avoir un effet adjuvant. En effet, l'instillation intranasale de particules associées à l'allergène Amb a I de l'ambrosie augmente fortement la réponse IgE spécifique de l'allergène. Celle-ci est associée à une augmentation des ARNm des cytokines pro-inflammatoires (Diaz-Sanchez *et al.*, 1997).

Des expositions contrôlées de sujets humains à des particules ambiantes ont pu être réalisées grâce à l'utilisation de concentrateurs de particules (Harvard). Au cours de ce processus de concentration des particules (facteur de concentration : 6 à 10), les particules ultrafines sont exclues et les gaz ne sont pas concentrés. Plusieurs études ont été effectuées à Chapel Hill (USA) par des équipes de l'EPA, où des volontaires sains (18-40 ans), alternant repos et exercice, ont été exposés pendant 2 h à des PM<sub>2,5</sub> (environ 23 à 311 µg/m<sup>3</sup> selon les concentrations extérieures). Comme lors des expositions aux particules Diesel, les fonctions pulmonaires ne sont pas affectées et la présence des neutrophiles dans les voies respiratoires 18 h après l'exposition est augmentée, bien que de façon modérée. Cependant, on ne distingue pas de signe d'inflammation dans les biopsies proximales des sujets exposés, pas de changements dans les phénotypes immunologiques tels que l'expression des marqueurs lymphocytaires ou des macrophages, ni dans les fonctions de phagocytose, de génération de stress oxydant ou d'expression des cytokines inflammatoires par les macrophages (Ghio *et al.*, 2000 ; Holgate *et al.*, 2003b ; Harder *et al.*, 2001). Par contre on observe une augmentation du fibrinogène, marqueur d'inflammation systémique, dans la circulation sanguine (Ghio *et al.*, 2000 ; Holgate *et al.*, 2003b ; Ghio *et al.*, 2003) accompagnée d'une diminution du nombre de globules blancs (Ghio *et al.*, 2003).

Une autre étude réalisée avec des PM<sub>2,5</sub> (99-224 µg/m<sup>3</sup>, 2 h) de Los Angeles, quant à elle ne révèle pas de signes d'inflammation pulmonaire, mais on retrouve l'augmentation de marqueurs d'inflammation systémique (ICAM-1 et IL-6) (Gong *et al.*, 2003) qui affecte aussi bien les sujets en bonne santé que ceux asthmatiques.

Les effets inflammatoires pulmonaires semblent donc plus marqués pour les expositions aux échappements Diesel que lors d'expositions aux PM<sub>2,5</sub>. Peuvent être en cause i) la présence de copolluants associés aux particules dans les échappements, ii) la nature des particules qui dans le cas des Diesel sont fraîchement générées contrairement aux PM<sub>2,5</sub> qui ont subi un processus de vieillissement dans l'atmosphère, iii) l'exclusion des ultrafines ou encore iv) la composition chimique.

## 4.2 Effets cardiovasculaires

Des expositions de volontaires sains (20-38 ans) à des échappements Diesel (300 µg/m<sup>3</sup>, 1 h en présence de gaz – 1,6 ppm ou 3 000 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub>) dont il a été précédemment montré l'implication dans l'inflammation respiratoire (Salvi *et al.*, 1999), produisent 6 h plus tard des atteintes de deux fonctions vasculaires importantes : la régulation du tonus vasculaire et de la fibrinolyse (Mills *et al.*, 2005). En effet, il est observé une diminution de la vasodilatation qui pourrait résulter du stress oxydant consécutif à l'inflammation pulmonaire ou au passage des particules dans le flux sanguin (Mills *et al.*, 2007). L'activateur tissulaire du plasminogène impliqué dans la fibrinolyse est diminué (Mills *et al.*, 2005) ce qui laisse entrevoir un effet prothrombotique des particules. 24 h après l'arrêt de l'exposition, une inflammation systémique est observée caractérisée par une augmentation des cytokines plasmatiques (tumor necrosis factor, TNFα et IL-6) (Tornqvist *et al.*, 2007). Enfin chez des individus ayant un antécédent d'infarctus du myocarde, les modifications du tonus vasculaire caractéristiques de ces patients ne sont pas aggravées par l'exposition aux échappements Diesel (300 µg/m<sup>3</sup>, 1 ppm NO<sub>2</sub>) mais les capacités de fibrinolyse sont réduites et l'ischémie myocardique est favorisée (Mills *et al.*, 2007).

Des expositions à des PM<sub>2,5</sub> (40 µg/m<sup>3</sup>, 2 h) de personnes âgées (60-80 ans) en bonne santé induit une diminution immédiate et persistante sur 24 h de la variabilité du rythme cardiaque (Devlin *et al.*, 2003) alors que celle-ci reste inchangée chez des individus plus jeunes (18-40 ans).

La comparaison d'individus en bonne santé (68 ans) à ceux souffrants de BPCO (71 ans) exposés à  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM fines pendant 2 h, révèle une plus grande sensibilité des individus sains qui présentent une augmentation des basophiles dans le sang, une diminution de l'oxygénation artérielle et de la variabilité du rythme cardiaque (Gong *et al.*, 2004). L'exposition à des  $\text{PM}_{2,5}$  ( $99-224 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2 h) de Los Angeles provoque une diminution de la variabilité du rythme cardiaque chez des personnes en bonne santé comme chez des asthmatiques (Gong *et al.*, 2003). La variabilité du rythme cardiaque est contrôlée par le système nerveux autonome et les modalités d'interaction des particules avec le système nerveux restent à identifier. Une libération locale de cytokines inflammatoires ou l'interaction directe de particules internalisées avec les terminaisons nerveuses sont les hypothèses actuellement formulées (Mills *et al.*, 2007). Enfin, une exposition à des  $\text{PM}_{3-0,02}$  ( $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2 h) d'un site de pollution de fond à Edinburgh, caractérisé par une faible teneur en particules carbonées issues des processus de combustion, n'a eu aucun impact sur les fonctions vasomotrices et fibrinolytiques de personnes saines ou souffrant de pathologies coronariennes (Mills *et al.*, 2008).

### 4.3 Conclusion

- ▶ **En résumé, dans ces études d'exposition humaine contrôlée examinées dans le cadre de la saisine, une inflammation pulmonaire est observée pour des expositions de courte durée (1 à 2 heures) à des concentrations en  $\text{PM}_{2,5}$  de l'ordre de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et des effets cardiovasculaires sont observés pour des concentrations de l'ordre de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .**

## 5 Relations concentrations-risque à court terme en population générale

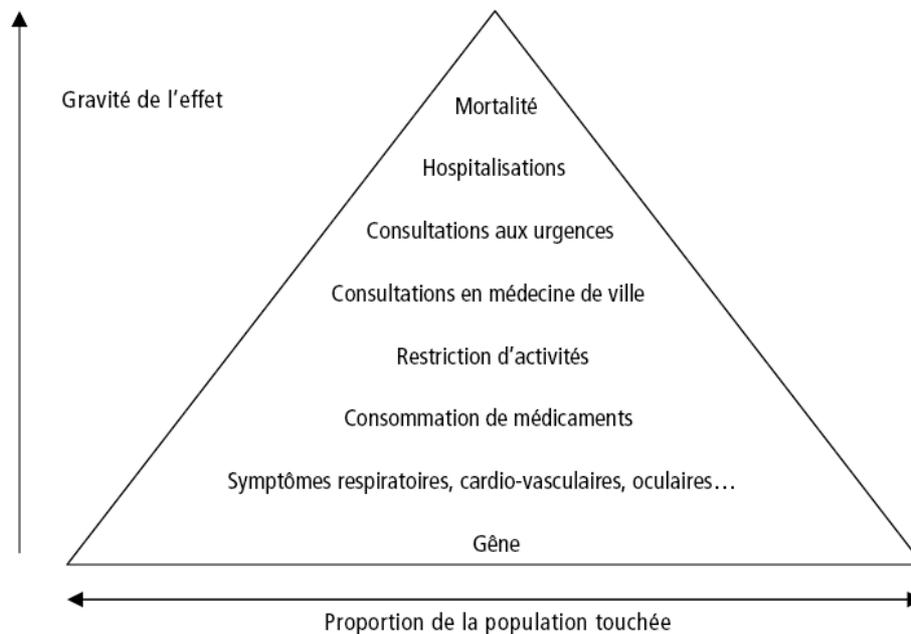
L'objet de ce qui suit n'est pas de justifier à nouveau l'existence d'effets sanitaires de la pollution atmosphérique particulaire sur la santé. On considérera en effet comme acquises les conclusions de l'OMS (OMS, 2006), qui indiquent que « les données sur les particules en suspension dans l'air et leurs effets sur la santé publique sont uniformes<sup>3</sup> et montrent des effets indésirables sur la santé aux expositions auxquelles les populations urbaines sont actuellement soumises dans les pays développés comme dans les pays en développement. L'éventail des effets sur la santé est large, mais ce sont surtout les systèmes respiratoires et cardio-vasculaires qui sont affectés. L'ensemble de la population est touché, mais la sensibilité à la pollution peut montrer des variations selon l'état de santé et l'âge. On a montré que le risque augmentait avec l'exposition pour diverses pathologies et rien ne permet de penser qu'il existe un seuil au-dessous duquel on pourrait s'attendre à ce qu'il n'y ait aucun effet indésirable pour la santé [...] Les données épidémiologiques montrent des effets indésirables des particules suite à des expositions à court et à long terme ».

Des liens à court terme entre les niveaux ambiants de pollution atmosphérique particulaire et de nombreux événements sanitaires ont en effet été observés dans le cadre d'études épidémiologiques. Ces événements sanitaires diffèrent dans leur gravité, allant de modifications fonctionnelles infra-cliniques à des symptômes variés, des limitations d'activité (arrêts maladies ou absences scolaires), des recours au système de soins (consultations en médecine de ville, passages aux urgences, admissions à l'hôpital...) ou même des décès. Ils se rapportent majoritairement aux systèmes cardio-vasculaire (infarctus du myocarde, altérations du rythme cardiaque et de sa variabilité, accidents vasculaires cérébraux, infarctus du myocarde...) et respiratoire (exacerbations de l'asthme et des bronchites chroniques, altération de la fonction respiratoire) (Dockery and Pope, 1994 ; Brook *et al.*, 2004 ; Künzli and Tager, 2005 ; Pope and Dockery, 2006 ; Franchini and Mannucci, 2007).

Il est possible de schématiser ces effets de gravité et de nature variable sous forme d'une « pyramide » (WHO, 2001), qui rend compte de la proportion variable de sujets affectés par ces effets dans la population, qui diminue avec leur gravité (Figure 16).

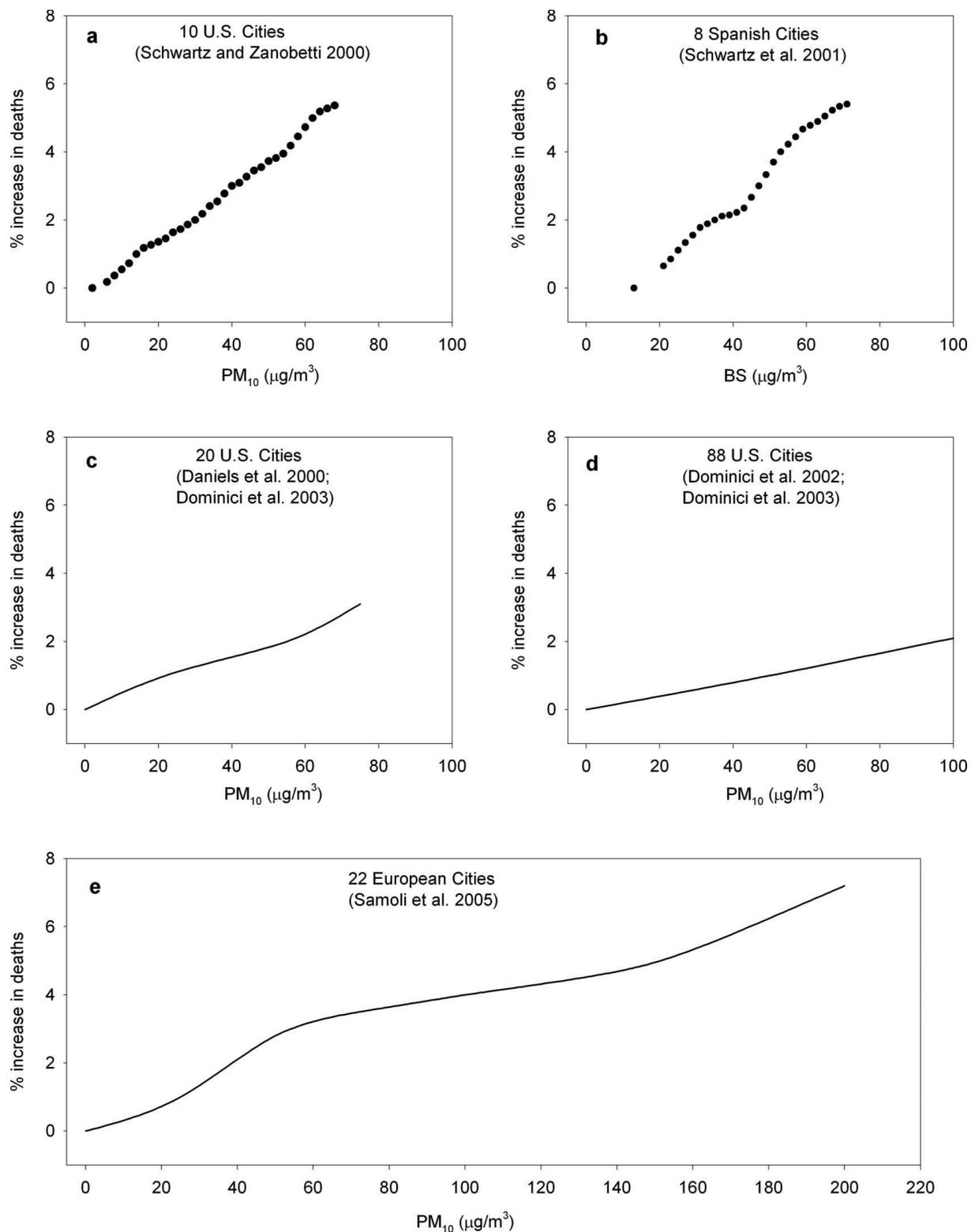
---

<sup>3</sup> « uniforme » est le terme employé par l'OMS, et peut être interprété comme « cohérent »



**Figure 16 : Représentation schématique de la relation entre la gravité des événements sanitaires associés à l'exposition à la pollution atmosphérique et la proportion de la population affectée (adapté de OMS, 2001 ; source InVS, 2008).**

Les études ayant pour objectif d'étudier la forme des relations entre les niveaux de pollution atmosphérique particulaire ambiants et les effets sanitaires vont dans le sens de l'existence de relations sans seuil, au moins pour les gammes de concentrations présentes dans l'air ambiant des villes étudiées. La Figure 17 illustre ce point au travers de quelques exemples de relations concentration-réponse obtenues dans le cadre d'études multicentriques des liens entre pollution atmosphérique et mortalité (Pope and Dockery, 2006). L'analyse menée pour 22 villes européennes par Samoli *et al.* (2005) conclut en outre que la relation concentration-réponse obtenue ne diffère pas significativement d'une relation linéaire.



**Figure 17 : Exemples de relations concentration-réponse estimées dans le cadre d'études multicentriques de séries temporelles portant sur la mortalité en lien avec les niveaux de pollution atmosphérique particulaire (adaptés des publications originales ; source Pope and Dockery, 2006).**

Les éléments qui suivent présentent quelques-uns des éléments disponibles à ce jour concernant la quantification des relations à court terme entre niveaux de particules dans l'air ambiant et risque sanitaire en population générale.

## 5.1 Méta-analyse réalisée par l'OMS (2004)

Dans le cadre de la revue systématique réalisée par l'OMS pour la mise à jour de ses valeurs guides pour la qualité de l'air (avec une participation financière de l'Europe, dans le cadre du programme Clean Air For Europe – CAFE), une méta-analyse des études européennes de séries temporelles (individuelles et écologiques) a été réalisée (Anderson *et al.*, 2004).

Les indicateurs de pollution particulaire retenus étaient les PM<sub>10</sub>, les PM<sub>2,5</sub>, les particules grossières et les fumées noires. Seuls les résultats concernant les PM<sub>10</sub> et les PM<sub>2,5</sub> sont présentés ici, pour des raisons de compatibilité avec les paramètres mesurés en routine en France dans le cadre de la surveillance réglementaire de la qualité de l'air par les AASQA.

En population générale, les indicateurs sanitaires considérés étaient :

- la mortalité
  - toutes causes non accidentelles,
  - pour causes respiratoires,
  - pour causes cardio-vasculaires
- les admissions à l'hôpital
  - pour causes respiratoires, par tranche d'âges (0-14 ans, 15-64 ans, 65 ans et plus),
  - pour causes cardio-vasculaires chez les 65 ans et plus.

Le Tableau I présente de façon synthétique les données prises en compte dans le cadre de ces méta-analyses.

Tableau I : Données prises en compte dans le cadre de la méta-analyse réalisée par l'OMS (Anderson *et al.*, 2004).

Indicateur de pollution	Indicateur sanitaire	Nb villes incluses (dont villes françaises)	Sources prise en compte			Extremums des périodes d'étude considérées	
			Nb publications	Date publication min	Date publication max	Début	Fin
<i>PM<sub>10</sub></i>	<i>Mortalité toutes causes non accidentelles</i>	33 (5)	9	1996	2001	1975	1999
<i>PM<sub>10</sub></i>	<i>Mortalité pour causes cardiovasculaires</i>	17 (4)	8	1999	2001	1986	1999
<i>PM<sub>10</sub></i>	<i>Mortalité pour causes respiratoires</i>	18 (5)	10	1991	2001	1977	1999
<i>PM<sub>10</sub></i>	<i>Admissions pour causes respiratoires, 65 ans et plus</i>	8 (1)	3	1998	2001	1981	1997
<i>PM<sub>10</sub></i>	Admissions pour causes respiratoires, 15-64 et 0-14 ans	3 (0)	3	1999	2001	1992	1997
<i>PM<sub>10</sub></i>	Admissions pour causes cardiovasculaires, 65 ans et plus	2 (0)	2	1998	1999	1981	1995
PM <sub>2,5</sub>	Mortalité toutes causes non accidentelles, tous âges	3 (0)	3	2000	2001	1982	1998
PM <sub>2,5</sub>	Mortalité pour causes cardiovasculaires, tous âges	1 (0)	1	2001	2001	1994	1996
PM <sub>2,5</sub>	Mortalité pour causes respiratoires, tous âges	1 (0)	1	2001	2001	1994	1996
PM <sub>2,5</sub>	Admissions pour causes respiratoires, 65 ans et plus	1 (0)	1	2001	2001	1994	1996
PM <sub>2,5</sub>	Admissions pour causes respiratoires, 15-64 et 0-14 ans	1 (0)	1	2001	2001	1994	1996
PM <sub>2,5</sub>	Admissions pour causes cardiovasculaires, 65 ans et plus	0 (SO)	0	SO	SO	SO	SO

SO : sans objet.

Les couples indicateurs de pollution / indicateur sanitaire pour lesquels des résultats concernant plus de 4 villes européennes étaient disponibles apparaissent en italique.

A partir de ces données, pour les couples indicateur de pollution particulaire / indicateur sanitaire pour lesquels des résultats étaient disponibles pour plus de 4 villes européennes, des risques relatifs (RR) combinés ont été calculés. Ces résultats ne concernent donc que l'indicateur PM<sub>10</sub>, les données n'étant pas disponibles en nombre suffisant pour les PM<sub>2,5</sub>. Les RR combinés associés à une augmentation de 10 µg/m<sup>3</sup> des niveaux de PM<sub>10</sub> sont présentés dans le Tableau II.

**Tableau II : Risques relatifs combinés associés à une augmentation de 10 µg/m<sup>3</sup> des niveaux de PM<sub>10</sub> (Anderson *et al.*, 2004).**

Indicateur sanitaire	Risque relatif [intervalle de confiance à 95 %]
Mortalité toutes causes non accidentelles, tous âges	1,006 [1,004 ; 1,008]
Mortalité pour causes respiratoires, tous âges	1,013 [1,005 ; 1,020]
Mortalité pour causes cardio-vasculaires, tous âges	1,009 [1,005 ; 1,013]
Admissions à l'hôpital pour causes respiratoires, 65 ans et plus	1,007 [1,002 ; 1,013]

Ainsi pour les 33 villes prises en compte (dont les résultats proviennent pour 22 d'entre elles du programme APHEA), l'excès de risque relatif (ERR) combiné de mortalité associé à une augmentation de 10 µg/m<sup>3</sup> des niveaux de PM<sub>10</sub> est de 0,6 %. A titre de comparaison, dans le cadre de l'étude multicentrique NMMAPS portant sur 90 des plus grandes villes américaines, l'ERR associé à une même augmentation des PM<sub>10</sub> était de 0,21 %. Selon les experts de l'OMS (WHO, 2006) cette différence pourrait résulter d'une part de différences méthodologiques entre les différentes études, et d'autre part refléter des écarts réels dans les effets sanitaires des particules entre les deux continents, du fait notamment de caractéristiques différentes des particules elles-mêmes et des expositions.

## 5.2 Résultats publiés depuis la méta-analyse de l'OMS

### 5.2.1 Recherche bibliographique systématique

Une recherche systématique réalisée dans la base Medline avec la chaîne (« acute » OR « short term ») AND « air pollution » AND (particle\* OR particulate OR PM) produit 643 résultats dont 370 ont été publiés postérieurement à janvier 2002 (date de la publication la plus récente prise en compte dans la méta-analyse de l'OMS, Anderson *et al.*, 2004).

### 5.2.2 Sélection des études prises en compte dans le cadre du traitement de la saisine

Compte tenu de l'abondance de ces études, des critères supplémentaires ont été appliqués.

D'une part, les indicateurs d'exposition retenus sont ceux compatibles avec le dispositif de surveillance français : c'est-à-dire que les niveaux d'exposition à la pollution atmosphérique particulaire étaient évalués à partir de mesures effectuées dans l'air ambiant, en utilisant des indicateurs de pollution particulaire et des méthodes de mesure compatibles avec celles préconisées dans le cadre du dispositif français de surveillance réglementaire de la qualité de l'air (en pratique, mesure des niveaux de PM<sub>10</sub> et/ou PM<sub>2,5</sub>).

D'autre part, les études dont les résultats étaient déjà pris en compte dans la méta-analyse réalisée par l'OMS (certains résultats identiques étant repris dans plusieurs publications, dont certaines antérieures à 2002) ont été éliminées.

Au final, parmi les articles répondant à ces critères, et compte tenu du temps imparti dans le cadre du traitement de la saisine, l'existence de plusieurs études multicentriques européennes portant sur des indicateurs sanitaires identiques à ceux retenus dans la méta-analyse de l'OMS (mortalité et admissions à l'hôpital, Anderson *et al.*, 2004) a amené à se restreindre à ces seules études, et ainsi tous les résultats présentés ici proviennent de trois sources :

- une étude multicentrique espagnole : EMECAM / EMECAS,
- une étude multicentrique française : Psas,
- la deuxième phase de l'étude multicentrique européenne APHEA.

Ainsi, il est à noter que ces restrictions dans les études prises en compte ont amené à ne pas présenter de résultats concernant des événements sanitaires tels que la survenue d'infarctus du myocarde, d'arythmies cardiaques, l'augmentation de certains marqueurs de l'inflammation, l'exacerbation de pathologies respiratoires, etc. Des synthèses (le plus souvent qualitatives) des études concernant ces effets sanitaires sont par ailleurs disponibles (Maitre *et al.*, 2006 ; Pope and Dockery, 2006 ; Franchini and Mannucci, 2007).

Au final, les principales caractéristiques des études retenues ici, ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau III.

Tableau III : Caractéristiques et résultats des études européennes sélectionnées.

Référence	Nb. villes incluses	Localisation	Périodes d'étude (extremums)	Indicateur de pollution particulaire	Indicateur sanitaire	RR [IC 95 %] pour une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup>
Ballester <i>et al.</i> 2002	3	Espagne	1990-1993	PM <sub>10</sub>	Mortalité toutes causes non accidentelles	1,006 [0,998 ; 1,015]
					Mortalité pour causes cardio-vasculaires	1,012 [1,005 ; 1,018]
					Mortalité pour causes respiratoires	1,013 [1,001 ; 1,026]
Le Tertre <i>et al.</i> 2002	8 (7 avec des mesures de PM <sub>10</sub> et une de PM <sub>13</sub> )	Europe (dont 1 en France)	1990-1997	PM <sub>10</sub>	Admissions pour maladies cardiaques, tous âges	1,005 [1,002 ; 1,008]
					Admissions pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	1,007 [1,004 ; 1,010]
					Admissions pour cardiopathies ischémiques, moins de 65 ans	1,003 [0,998 ; 1,007]
					Admissions pour cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	1,008 [1,003 ; 1,012]
Aga <i>et al.</i> 2003	21	Europe (dont 2 en France)	Années 90	PM <sub>10</sub>	Mortalité toutes causes non accidentelles, 65 ans et plus	1,0074 [1,0052 ; 1,0095]
Eilstein <i>et al.</i> 2004	3 (une avec des mesures de PM <sub>10</sub> et deux de PM <sub>13</sub> )	France	1992-1997	PM <sub>10</sub>	Mortalité toutes causes non accidentelles	1,008 <sup>f</sup> significatif
					Mortalité pour causes cardio-vasculaires	1,003 non significatif
	4 (deux avec des mesures de PM <sub>10</sub> et deux de PM <sub>13</sub> )	France	1994-1999	PM <sub>10</sub>	Mortalité pour causes respiratoires	1,006 non significatif
					Admissions pour maladies cardio-vasculaires, 15-64 ans	1,000 <sup>f</sup> non significatif
					Admissions pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	1,001 <sup>f</sup> non significatif
					Admissions pour maladies respiratoires, 0-14 ans	1,000 <sup>f</sup> non significatif
					Admissions pour maladies respiratoires, 65 ans et plus	1,008 <sup>f</sup> non significatif

Référence	Nb. villes incluses	Localisation	Périodes d'étude (extremums)	Indicateur de pollution particulaire	Indicateur sanitaire	RR [IC 95 %] pour une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup>
Analitis <i>et al.</i> 2004	21	Europe (dont 2 en France)	Années 90	PM <sub>10</sub>	Mortalité pour causes cardio-vasculaires	1,0076 [1,0047 ; 1,0105]
					Mortalité pour causes respiratoires	1,0071 [1,0022 ; 1,0120]
Ballester <i>et al.</i> 2006	5	Espagne	1995-1999	PM <sub>10</sub>	Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	1,0091 [1,0035 ; 1,0147]
					Hospitalisations pour maladies cardiaques, tous âges	1,0156 [1,0082 ; 1,0231]
Larrieu <i>et al.</i> 2007	8	France	1998-2003	PM <sub>10</sub>	Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	1,007 [1,001 ; 1,012]
					Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	1,011 [1,005 ; 1,017]
					Hospitalisations pour maladies cardiaques, tous âges	1,008 [1,002 ; 1,014]
					Hospitalisations pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	1,015 [1,007 ; 1,022]
					Hospitalisations pour cardiopathies ischémiques, tous âges	1,019 [1,008 ; 1,030]
					Hospitalisations pour cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	1,029 [1,015 ; 1,043]
					Hospitalisations pour AVC, tous âges	1,002 [0,984 ; 1,019]
Hospitalisations pour AVC, 65 ans et plus	1,008 [0,991 ; 1,025]					

f : estimation obtenue à l'aide d'un modèle à effet fixe. Les estimations obtenues à l'aide de ce type de modèle n'ont été retenues que lorsqu'elles étaient les seules disponibles. Dans tous les autres cas, les estimations présentées sont obtenues à l'aide de modèles à effets aléatoires.

### 5.2.3 Résultats obtenus en France dans le cadre du Programme de surveillance air et santé

Le Programme de surveillance air et santé (Psas) coordonné par l'InVS réalise des mises à jour régulières des relations à court terme entre pollution atmosphérique et santé dans 9 villes françaises (totalisant un peu plus de 11 millions d'habitants).

L'approche retenue est celle des études de séries temporelles, qui permet d'étudier les liens existant entre les variations journalières des niveaux d'indicateurs de pollution atmosphérique et les variations journalières d'un nombre d'événements sanitaires. Pour chaque ville, une zone d'étude a été définie de telle sorte que les variations journalières de l'indicateur d'exposition représentent de façon non biaisée les variations journalières de la moyenne des expositions individuelles. Pour les périodes étudiées, le nombre journalier de décès toutes causes non accidentelles, cardio-vasculaires et cardiaques survenus dans chacune de ces zones a été obtenu auprès du Cépi-DC, et le nombre journalier d'admissions à l'hôpital pour causes respiratoires, cardio-vasculaires, cardiaques et cardiopathies ischémiques a été obtenu auprès des Départements d'information médicale des établissements hospitaliers. Les indicateurs d'exposition à la pollution atmosphérique particulaire -  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  - ont été construits pour la même période à partir des valeurs journalières mesurées sur la zone d'étude par les stations urbaines et péri-urbaines de fond des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air. Pour chaque ville, les variations journalières des indicateurs sanitaires ont été modélisées en fonction des variations de l'exposition aux indicateurs de pollution du jour de l'événement et de la veille (exposition 0-1 jours) en prenant en compte les cofacteurs pouvant biaiser les estimations : tendances à long et moyen terme, jour de la semaine, jours fériés, paramètres météorologiques, comptes polliniques et épidémies de grippe (ainsi que les vacances scolaires pour les hospitalisations uniquement). Un coefficient combiné pour l'ensemble des villes a ensuite été estimé par un modèle à effets aléatoires, permettant de calculer les RR pour une augmentation journalière de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  du niveau des indicateurs de pollution.

Les principales caractéristiques des deux études les plus récentes ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau IV.

Il convient de souligner que les mesures de  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  sur lesquelles se fondent les résultats présentés dans Tableau IV sont toutes réalisées à l'aide de microbalances à élément oscillant (TEOM), sans dispositif de prise en compte des pertes éventuelles de matière volatile liées au chauffage à  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  des prélèvements préalablement à la pesée. Ainsi les chiffres présentés ici rendent compte des liens entre les concentrations de  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  non volatiles et le risque relatif de décès ou d'hospitalisation. En l'absence d'éléments définitifs sur la toxicité relative de la part volatile au regard de la part non volatile des particules ambiantes, il n'est pas possible d'inférer à partir de ces relations entre les concentrations mesurées par TEOM et les risques relatifs de mortalité ou d'hospitalisation ce que pourraient être les relations entre les concentrations mesurées par TEOM équipés de FDMS et ces mêmes risques relatifs.

**Tableau IV : Risques relatifs obtenus en France dans le cadre du Psas, résultats concernant les périodes d'études les plus récentes (PM mesurées par TEOM non équipés de FDMS).**

**Approche par série temporelle décrivant les effets à court terme de l'exposition.**

Nb. de villes incluses	Périodes d'étude (extremums)	Indicateur de pollution particulaire	Indicateur sanitaire	RR [IC 95 %] pour une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup>	Références	
8	1998-2003	PM <sub>10</sub>	Hospitalisations	pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	<b>1,007 [1,001 ; 1,012]</b>	a, b
				pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	<b>1,011 [1,005 ; 1,017]</b>	a, b
				pour maladies cardiaques, tous âges	<b>1,008 [1,002 ; 1,014]</b>	a, b
				pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	<b>1,015 [1,007 ; 1,022]</b>	a, b
				pour cardiopathies ischémiques, tous âges	<b>1,019 [1,008 ; 1,030]</b>	a, b
				pour cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	<b>1,029 [1,015 ; 1,043]</b>	a, b
				pour AVC, tous âges	1,002 [0,984 ; 1,019]	a, b
				pour AVC, 65 ans et plus	1,008 [0,991 ; 1,025]	a, b
				pour causes respiratoires, 0-14 ans	1,008 [0,999 ; 1,018]	b
				pour causes respiratoires, 15-64 ans	1,008 [0,998 ; 1,017]	b
			pour causes respiratoires, 65 ans et plus	1,010 [0,992 ; 1,029]	b	
6	1998-2003	PM <sub>2,5</sub>	Hospitalisations	pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	1,007 [0,999 ; 1,015]	b
				pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	<b>1,018 [1,005 ; 1,017]</b>	b
				pour maladies cardiaques, tous âges	<b>1,014 [1,004 ; 1,024]</b>	b
				pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	<b>1,023 [1,010 ; 1,037]</b>	b
				pour cardiopathies ischémiques, tous âges	1,023 [0,999 ; 1,047]	b
				pour cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	<b>1,044 [1,022 ; 1,067]</b>	b
				pour AVC, tous âges	1,005 [0,987 ; 1,023]	b
				pour AVC, 65 ans et plus	1,008 [0,988 ; 1,029]	b
				pour causes respiratoires, 0-14 ans	1,006 [0,991 ; 1,022]	b
				pour causes respiratoires, 15-64 ans	1,011 [0,996 ; 1,026]	b
			pour causes respiratoires, 65 ans et plus	1,006 [0,992 ; 1,029]	b	

Nb. de villes incluses	Périodes d'étude (extremums)	Indicateur de pollution particulaire	Indicateur sanitaire	RR [IC 95 %] pour une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup>	Références	
9	2000-2004	PM <sub>10</sub>	Mortalité	toutes causes non accidentelles, tous âges	1,014 [1,007 ; 1,021]	c
				toutes causes non accidentelles, 65 ans et plus	1,014 [1,006 ; 1,022]	c
				pour causes cardio-vasculaires, tous âges	1,024 [1,009 ; 1,039]	c
				pour causes cardio-vasculaires, 65 ans et plus	1,029 [1,013 ; 1,045]	c
				pour causes cardiaques, tous âges	1,020 [1,007 ; 1,034]	c
				pour causes cardiaques, 65 ans et plus	1,025 [1,010 ; 1,039]	c
9	2000-2004	PM <sub>2,5</sub>	Mortalité	toutes causes non accidentelles, tous âges	1,015 [1,007 ; 1,022]	c
				toutes causes non accidentelles, 65 ans et plus	1,015 [1,007 ; 1,024]	c
				pour causes cardio-vasculaires, tous âges	1,028 [1,009 ; 1,047]	c
				pour causes cardio-vasculaires, 65 ans et plus	1,034 [1,014 ; 1,054]	c
				pour causes cardiaques, tous âges	1,020 [1,004 ; 1,037]	c
				pour causes cardiaques, 65 ans et plus	1,029 [1,010 ; 1,048]	c

a : Larrieu S *et al.*, 2007

b : InVS, Relations à court terme entre les niveaux de pollution atmosphérique et les admissions à l'hôpital dans huit villes françaises, 2006

c : InVS, Analyse des liens à court terme entre pollution atmosphérique urbaine et mortalité dans neuf villes françaises, 2008

Les ERR obtenus dans le cadre de la mise à jour la plus récente réalisée dans le cadre du Programme de surveillance air et santé français (apparaissant sous les références Psas 2008 dans les graphiques en Annexe 5) apparaissent dans leur grande majorité légèrement plus élevés que ceux publiés précédemment pour un ensemble de villes européennes (OMS 2004 et APHEA) ou espagnoles (EMECAM 2002). Ils demeurent cependant du même ordre de grandeur. Il convient également de souligner que parmi les résultats présentés ici, ce sont ceux qui ont été obtenus sur les périodes d'étude les plus récentes.

#### 5.2.4 Récapitulatif

Les graphiques en Annexe 5 reprennent les résultats présentés dans les tableaux précédents pour la mortalité. Les résultats sont présentés sous forme d'ERR, en pourcentage, associés à une augmentation de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  des niveaux de particules. Ces ERR en pourcentage sont déduits des RR associés à cette même augmentation des niveaux de particules, en leur retranchant 1 ( $\text{ERR} = \text{RR} - 1$ ), puis en exprimant le résultat obtenu sous forme de pourcentage.

### 5.3 Calculs de fractions de risque attribuable

Sous l'hypothèse que les relations concentrations-risque présentées précédemment reflètent une relation causale entre l'exposition aux particules atmosphériques et des effets en termes de mortalité et de morbidité, il est possible de calculer des fractions de risque attribuable à l'exposition à des niveaux donnés de particules, c'est-à-dire la proportion des cas attribuables, du fait d'effets à court terme, à l'exposition aux particules.

Au delà du calcul des fractions de risque attribuable, des méthodes permettant la quantification des impacts sanitaires à court terme de la pollution atmosphérique en termes de nombre de cas attribuables (InVS, 2008) sont disponibles. Cependant, compte tenu du temps imparti dans le cadre du traitement de la saisine, il n'a pas été possible de les mettre en œuvre ici à l'échelle de plusieurs agglomérations françaises. A noter qu'une mise à jour des évaluations de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique dans les neuf villes françaises participant au programme de surveillance air et santé (incluant l'évaluation des impacts à court terme de la pollution atmosphérique particulaire) est en cours à l'InVS et devrait être disponible début 2009. De plus, les références de l'ensemble des évaluations de l'impact sanitaires de la pollution atmosphérique urbaine conduites à ce jour en France sont disponibles sur le site de l'InVS<sup>4</sup>. Il faut cependant noter que selon leur période de réalisation, les relations concentrations-risque sur lesquelles elles se fondent diffèrent, ainsi que les indicateurs sanitaires considérés. Ainsi il n'est pas possible de synthétiser les résultats obtenus dans ces différentes évaluations d'impact sanitaire.

Compte tenu de la relative cohérence des risques relatifs obtenus dans le cadre du Psas avec ceux obtenus dans le cadre d'autres études multicentriques européennes, et du fait que ces données sont obtenues pour des années récentes et pour des villes françaises, le groupe de travail a retenu ces risques relatifs pour le calcul de fractions de risque attribuable.

En considérant que la totalité de la population considérée est exposée à la pollution atmosphérique, la fraction de risque attribuable (FA) se calcule comme suit :

$\text{FA} = (\text{RR}_\Delta - 1) / \text{RR}_\Delta$ , avec  $\text{RR}_\Delta$  le risque relatif associé au différentiel de niveau de pollution  $\Delta$  (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) considéré.

$\text{RR}_\Delta$  est déduit de la valeur du RR associé à une augmentation de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\text{RR}_{10}$ ) selon la

formule suivante :  $\text{RR}_\Delta = \exp\left(\frac{\Delta}{10} \ln(\text{RR}_{10})\right)$

<sup>4</sup> [http://www.invs.sante.fr/surveillance/psas9/publications\\_EIS.html](http://www.invs.sante.fr/surveillance/psas9/publications_EIS.html)

En retenant comme niveau de référence pour les PM<sub>10</sub> 20 µg/m<sup>3</sup>, niveau correspondant à la moyenne annuelle mesurée en France sur l'ensemble des stations de fond urbain en fonctionnement en 2006 (niveaux mesurés par TEOM seul, MEDAD 2007), il est possible de calculer la fraction de risque attribuable à une journée où les niveaux atteignent un niveau supérieur ( $\Delta$  est alors égal à ce niveau auquel on retranche 20 µg/m<sup>3</sup>).

Le Tableau V présente les résultats obtenus en se fondant sur les relations concentration-risque obtenues dans le cadre du Psas, lorsque les niveaux de 50 µg/m<sup>3</sup> (seuil de dépassement défini par la directive 2008/50/CE), de 80 et 125 µg/m<sup>3</sup> (seuils d'information et d'alerte en vigueur du CSHPF) sont atteints.

**Tableau V : Excès de risque relatif (ERR) et fractions de risque attribuable (FA), en pourcentage, pour différents niveaux journaliers de PM<sub>10</sub> et différents événements sanitaires.**

**Calculs fondés sur les relations concentrations-risque obtenues dans le cadre du Psas et concernant les effets à court terme de l'exposition aux particules. Les FA sont calculées uniquement pour les relations statistiquement significatives.**

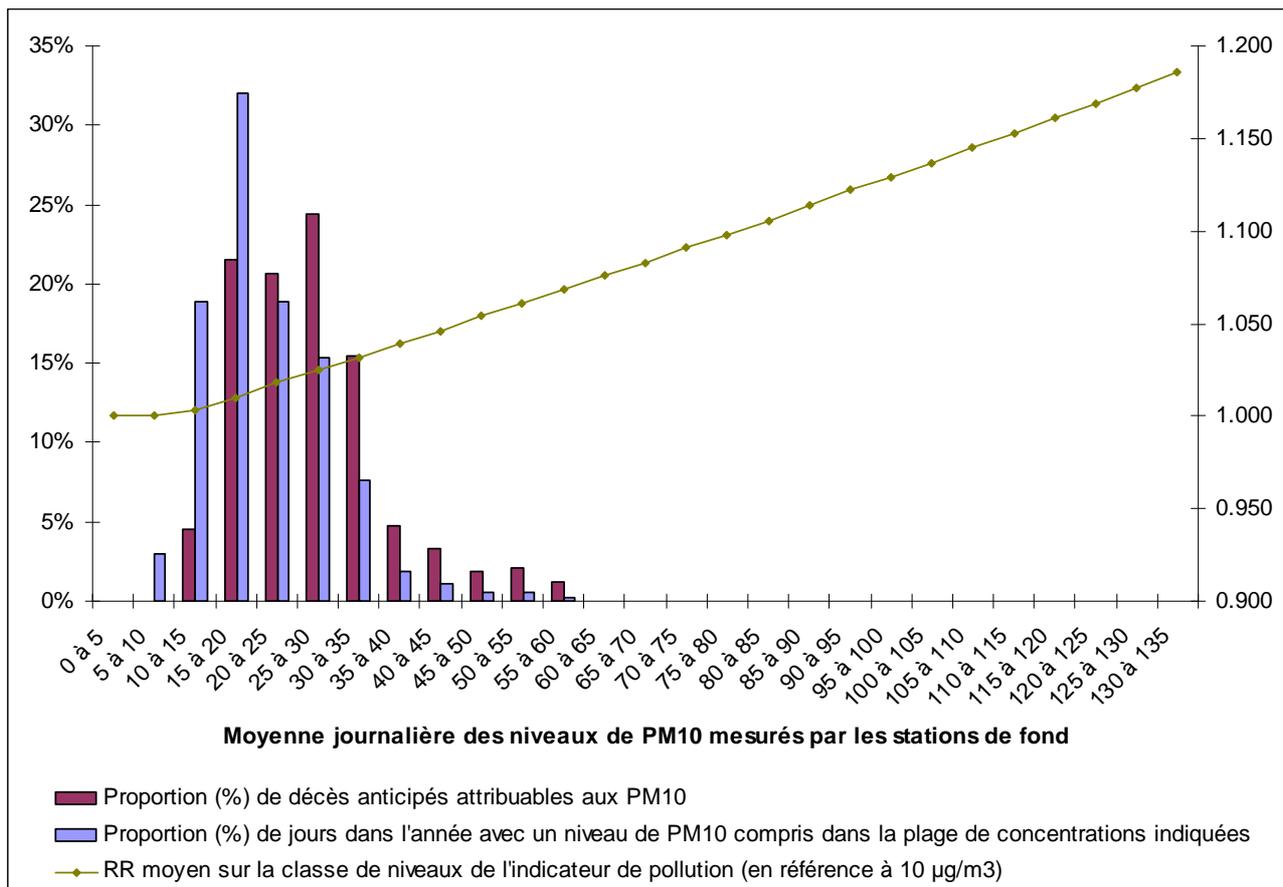
Pour un jour où les niveaux de PM <sub>10</sub> mesurés par TEOM atteignent... par rapport à un jour où les niveaux de PM <sub>10</sub> mesurés par TEOM sont de 20 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>		80 µg/m <sup>3</sup>		125 µg/m <sup>3</sup>	
	ERR	FA	ERR	FA	ERR	FA
Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	2,11%	2,07%	4,27%	4,10%	7,60%	7,06%
Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	3,34%	3,23%	6,78%	6,35%	12,17%	10,85%
Hospitalisations pour maladies cardiaques, tous âges	2,42%	2,36%	4,90%	4,67%	8,73%	8,03%
Hospitalisations pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	4,57%	4,37%	9,34%	8,55%	16,92%	14,47%
Hospitalisations pour cardiopathies ischémiques, tous âges	5,81%	5,49%	11,96%	10,68%	21,85%	17,93%
Hospitalisations pour cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	8,95%	8,22%	18,71%	15,76%	35,01%	25,93%
Mortalité toutes causes non accidentelles, tous âges	4,26%	4,09%	8,70%	8,00%	15,72%	13,58%
Mortalité toutes causes non accidentelles, 65 ans et plus	4,26%	4,09%	8,70%	8,00%	15,72%	13,58%
Mortalité pour causes cardio-vasculaires, tous âges	7,37%	6,87%	15,29%	13,26%	28,28%	22,04%
Mortalité pour causes cardio-vasculaires, 65 ans et plus	8,95%	8,22%	18,71%	15,76%	35,01%	25,93%
Mortalité pour causes cardiaques, tous âges	6,12%	5,77%	12,62%	11,20%	23,11%	18,77%
Mortalité pour causes cardiaques, 65 ans et plus	7,69%	7,14%	15,97%	13,77%	29,60%	22,84%

A titre d'illustration, ces fractions de risque attribuable peuvent être rapportées au nombre moyen journalier d'événements sanitaires (décès ou hospitalisations) à Paris et en proche couronne (une des neuf agglomérations sur lesquelles ces relations exposition-risque ont été établies) au cours des périodes 2000-2003 (hospitalisations) et 2000-2004 (mortalité, à l'exclusion de la période exceptionnelle d'août 2003). La multiplication des fractions de risque attribuable par ces effectifs permet d'établir un nombre de décès anticipés ou d'hospitalisations en excès attribuables à une journée où les niveaux atteignent le niveau de 50, 80 ou 125 µg/m<sup>3</sup>, par rapport à une journée où le niveau serait de 20 µg/m<sup>3</sup> (Tableau VI).

**Tableau VI : Nombre moyen d'événements sanitaires par jour (Paris et proche couronne), et nombre (arrondi à l'entier le plus proche) de décès anticipés ou d'hospitalisations potentiellement attribuables à une journée où les niveaux de PM<sub>10</sub> mesurés sur les stations de fond atteignent 50, 80 ou 125 µg/m<sup>3</sup> par rapport à une journée où les niveaux seraient de 20 µg/m<sup>3</sup>.  
Calculs fondés sur les relations concentrations-risque obtenues dans le cadre du Psas et concernant les effets à court terme de l'exposition aux particules.**

Événement sanitaire	Nombre moyen d'événements sanitaires à Paris et en proche couronne	Nombre d'événements sanitaires potentiellement attribuables à une journée où les niveaux atteignent... par rapport à une journée où les niveaux de PM <sub>10</sub> seraient de 20 µg/m <sup>3</sup>		
		50 µg/m <sup>3</sup>	80 µg/m <sup>3</sup>	125 µg/m <sup>3</sup>
Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, tous âges	91,9	2	4	6
Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires, 65 ans et plus	52,3	2	3	6
Hospitalisations pour maladies cardiaques, tous âges	63,9	2	3	5
Hospitalisations pour maladies cardiaques, 65 ans et plus	36,8	2	3	5
Hospitalisations pour cardiopathies ischémiques, tous âges	17,9	1	2	3
Hospitalisations pour cardiopathies ischémiques, 65 ans et plus	9,6	1	2	2
Mortalité toutes causes non accidentelles, tous âges	109,4	4	9	15
Mortalité toutes causes non accidentelles, 65 ans et plus	83,1	3	7	11
Mortalité pour causes cardio-vasculaires, tous âges	29,8	2	4	7
Mortalité pour causes cardio-vasculaires, 65 ans et plus	26,4	2	4	7
Mortalité pour causes cardiaques, tous âges	20,7	1	2	4
Mortalité pour causes cardiaques, 65 ans et plus	18,4	1	3	4

Il est important de souligner que ces chiffres doivent également être rapportés au nombre de journées au cours desquelles le dépassement de ces niveaux se produit. Cet exercice a été réalisé pour Paris et la proche couronne pour l'année 2004 à titre d'illustration. Il apparaît ainsi clairement que si les impacts sanitaires potentiels (par exemple, le nombre de cas attribuables sur une année complète) d'une journée où les niveaux dépassent 80 ou 125 µg/m<sup>3</sup> sont élevés (Tableau VI), cette situation ne s'étant en pratique pas produite à Paris et en proche couronne au cours de l'année 2004, les impacts sanitaires des jours où les niveaux sont inférieurs sont beaucoup plus élevés (Figure 18).



**Figure 18 : Distribution des niveaux journaliers de l'indicateur d'exposition aux PM<sub>10</sub> (moyenne journalière des niveaux de PM<sub>10</sub> mesurés par les stations de fond, en bleu), distribution du nombre de décès anticipés attribuables (toutes causes non accidentelles, en violet) et RR moyen sur la classe de niveaux de l'indicateur de pollution (en référence à 10 µg/m<sup>3</sup>), à Paris et en proche couronne, année 2004.**

Source des données : Cépi-DC Inserm et Airparif. Exploitation : ORS Île-de-France / InVS.

## 5.4 Conclusion

- ▶ Les études épidémiologiques disponibles en population générale mettent en évidence des liens statistiquement significatifs entre les niveaux de pollution atmosphérique particulaire (PM<sub>10</sub>), la mortalité et la morbidité (respiratoire et cardiovasculaire notamment).
- ▶ Les relations observées ne diffèrent pas significativement de relations linéaires sans seuils, ce qui signifie qu'il n'a pas été possible d'observer un seuil de concentration de PM<sub>10</sub> en deçà duquel aucun effet sanitaire ne serait constaté.
- ▶ De ce fait, les impacts sanitaires (par exemple, le nombre de cas attribuables sur une année complète) les plus importants ne sont pas associés aux niveaux de pollution les plus élevés mais plutôt aux niveaux de fond plus faibles habituellement rencontrés. Cela est à prendre en compte lors de toute réflexion relative à l'opportunité de fixation de seuils d'information/d'alerte du public.
- ▶ Dans le cadre du Psas, ces relations ont été quantifiées pour un ensemble de villes françaises métropolitaines pour des périodes récentes (postérieures à 2000). Les risques relatifs ainsi quantifiés permettent le calcul de fractions de risque attribuable pour différents niveaux journaliers de PM<sub>10</sub>.
- ▶ L'ensemble de ces données, compatibles avec le dispositif national de mesure des particules, peut permettre d'étayer la réflexion sur les seuils d'information et d'alerte.

## 6 Particules dans l'air ambiant et santé : existence de populations à risques

### 6.1 Objectif et approche retenue

L'objectif de ce chapitre est de présenter les connaissances concernant l'existence de sous-groupes de la population facilement identifiables présentant une sensibilité accrue aux particules dans l'air ambiant, en termes d'effet sanitaire. Dans l'affirmative, cela permettrait de différencier l'information ou les interventions envers les différents groupes de la population en cas de pic de pollution par les particules.

D'un point de vue méthodologique, l'identification d'un effet accru des particules sur la santé dans certains sous-groupes pose plusieurs difficultés, qui ne sont pas spécifiques au polluant considéré. Ces difficultés sont détaillées en Annexe 6.

Notre approche a reposé sur une revue de la littérature scientifique. Nous avons considéré comme plausible une sensibilité accrue d'un sous-groupe de la population si l'un des éléments suivants était présent :

- Existence d'arguments biologiques ou toxicologiques.
- Fréquence plus élevée dans le sous-groupe considéré que dans la population générale d'une maladie dont les particules en suspension constituent un facteur de risque (par exemple de pathologies cardio-pulmonaires), en l'absence d'éléments indiquant que ce sous-groupe pourrait être moins sensible que le reste de la population aux particules.
- Mise en évidence d'une mesure de l'effet des particules en suspension sur la santé plus importante dans le sous-groupe que dans la population générale. Par exemple dans le cadre d'une étude épidémiologique, pour correspondre à une interaction biologique, une telle augmentation de la mesure de l'effet doit être mise en évidence sur une échelle additive. Toutefois nous avons aussi retenu les études mettant en évidence une telle augmentation de la mesure de l'effet sur une échelle multiplicative lorsque la fréquence de base (c'est-à-dire chez les non ou moins exposés aux polluants atmosphériques) de l'événement de santé dans le sous-groupe pour lequel le sur-risque de maladie associé à la pollution particulaire est le plus élevé (sur l'échelle multiplicative) est plus important que dans le sous-groupe pour lequel le sur-risque de maladie associé à la pollution particulaire est le plus faible (sur l'échelle multiplicative)<sup>5</sup>. En effet, dans ce cas, une augmentation de la mesure de l'effet sur une échelle multiplicative entraîne aussi une sur une échelle additive.
- Existence de pathologies ou troubles de la santé pouvant être causés par les particules en suspension, spécifiques au sous-groupe considéré (cas des effets possibles sur le risque de naissance prématurée, spécifiques aux femmes enceintes).

A ces populations, il faut ajouter celles particulièrement exposées, ou celles chez qui l'exposition est fortement sous-estimée par les systèmes de surveillance, et qui pourraient aussi faire l'objet

---

<sup>5</sup> En d'autres termes, si la fréquence de la maladie chez les non-exposés (aux particules) vaut  $F_1$  dans le groupe 1 et  $F_2$  dans le groupe 2, si  $RR_1$  et  $RR_2$  sont les risques relatifs de maladie associés à l'exposition aux particules dans les groupes 1 et 2, respectivement, et si  $F_1 \geq F_2$  et  $RR_1 > RR_2$  (augmentation de la mesure de l'effet sur une échelle multiplicative), alors l'augmentation de la fréquence de la maladie associée à l'exposition  $\Delta F$  mesurée sur une échelle additive sera plus élevée pour le groupe 1 que pour le groupe 2 ( $\Delta F_1 \geq \Delta F_2$ ).

d'un suivi ou d'informations spécifiques, dans la mesure où l'exposition cumulée, et donc l'effet sanitaire attendu, est plus élevée dans ce groupe que dans le reste de la population.

Cela nous a amenés à considérer *a priori* les caractéristiques suivantes, associées à une sensibilité proprement dite et/ou à une possible surexposition :

- caractéristiques biologiques, tel que l'âge, le sexe des sujets, l'existence de pathologies préexistantes (diabète, maladie coronarienne, obésité, etc.) ;
- comportements, par exemple le fait de fumer ou consommer de l'alcool ;
- caractéristiques sociologiques (catégories sociales, stress, etc.) ;
- caractéristiques environnementales (co-exposition à d'autres facteurs environnementaux, conditions météorologiques, saison, etc.) ;
- caractéristiques associées à une sous-estimation de l'exposition par les systèmes de surveillance.

Ces caractéristiques sont généralement dépendantes les unes des autres ; la catégorie sociale peut par exemple être considérée comme un marqueur de certains comportements ou expositions (tabagisme passif, expositions professionnelles).

Dans le cadre de ce rapport, nous avons fait le choix de nous restreindre aux caractéristiques facilement mesurables et pouvant être connues des sujets ou des pouvoirs publics ; nous avons donc exclu du champ considéré les caractéristiques génétiques des sujets, qui, si elles peuvent moduler la sensibilité de l'individu aux facteurs environnementaux, ne sont en général pas connues et peuvent donc difficilement servir de base à une action de santé publique ciblée<sup>6</sup>.

En termes de polluants atmosphériques, nous avons fait le choix de ne pas nous restreindre aux travaux – très peu nombreux – cherchant à différencier l'effet des particules de celui des autres polluants atmosphériques.

En termes d'événements de santé, nous n'avons pas imposé de restriction.

Pour ce qui concerne le type d'études, nous avons privilégié celles permettant de mettre en évidence des effets aigus, entendus comme ceux produits par une exposition sur une courte durée. La courte durée a été définie comme pouvant aller jusqu'à quelques semaines. Pour des raisons méthodologiques, et notamment du fait des corrélations pouvant exister dans une zone géographique donnée entre une exposition mesurée sur une courte durée et sur une « longue » durée (typiquement, l'année), il faut noter que toutes les études ne permettent pas toujours d'attribuer avec certitude les effets sanitaires à l'exposition de courte durée ; certaines approches, comme celle des séries temporelles, permettent elles de considérer uniquement les effets des expositions sur une courte durée, avec une tendance à la sous-estimation de l'effet (Künzli *et al.*, 2001).

Dans la mesure du possible, nous nous sommes appuyés sur des revues et travaux de synthèse récents, que nous avons complétés le cas échéant par des articles publiés ultérieurement.

---

<sup>6</sup> Pour une revue du rôle possible des caractéristiques génétiques sur la sensibilité aux particules atmosphériques, voir par exemple (WHO Regional Office for Europe,2006).

## 6.2 Sensibilité aux polluants aux différents âges et stades de développement

### 6.2.1 Femmes enceintes, fœtus

De nombreux travaux ont étudié l'influence de l'exposition de la femme enceinte à la pollution atmosphérique sur l'issue de la grossesse (revu par Glinianaia *et al.*, 2004 ; Lacasana *et al.*, 2005 ; Maisonet *et al.*, 2004 ; Ritz and Wilhelm (in press) ; Slama *et al.*, 2008 ; Sram *et al.*, 2005). Peu d'expérimentations ont été réalisées chez l'animal, mais certaines tendent à conforter les associations mises en évidence chez l'homme (Rocha E Silva *et al.*, 2008). Un rapport de l'OMS considère que la littérature ne permet pas de tirer des conclusions fermes, mais suggère une association entre pollution atmosphérique d'une part et restriction de croissance intra-utérine et prématurité d'autre part (WHO Europe, 2005). Trop peu de travaux ont été réalisés sur le risque de mortinatalité (Pereira *et al.*, 1998) ou de malformation congénitale (Gilboa *et al.*, 2005 ; Ritz *et al.*, 2002) pour conclure sur ces événements.

A titre d'illustration, une augmentation de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  du niveau moyen de particules fines durant la grossesse était associée, dans une étude californienne, à une diminution ajustée de 29 g du poids de naissance (intervalle de confiance à 95 %, 16 à 42 g) (Parker *et al.*, 2005). Les études ne sont pas concordantes pour ce qui est de savoir si l'exposition la plus pertinente est l'exposition moyenne durant la grossesse ou celle durant un trimestre ou un mois particulier de grossesse.

Une autre étude californienne, de type cas-témoins, a rapporté un *odds-ratio* ajusté de naissance prématurée de 1,2 (intervalle de confiance à 95 %, 1,1-1,3) en association avec un niveau moyen de  $\text{PM}_{2,5}$  supérieur à  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durant le premier mois de grossesse (Huynh *et al.*, 2006). Ce point mérite une considération particulière dans la mesure où la prématurité peut avoir des conséquences importantes à court terme (en termes de mortalité post-natale) mais aussi moyen et long terme sur la santé (Larroque *et al.*, 2008 ; Saigal and Doyle, 2008).

### 6.2.2 Période infantile

L'exposition aux particules pourrait influencer le risque de mortalité infantile (Ritz, 2006 ; Woodruff *et al.*, 1997 ; Woodruff *et al.*, 2006). Un rapport de l'OMS (WHO Europe, 2005) considère le niveau de preuve suffisant pour montrer que la pollution atmosphérique, aux concentrations rencontrées dans de nombreuses villes européennes, augmente le risque de décès pour cause respiratoire dans la période post-néonatale (c'est-à-dire entre 28 jours et un an après la naissance). Une étude d'impact concernant 23 métropoles des Etats-Unis a estimé que la proportion de décès post-néonataux pour cause respiratoire attribuable aux  $\text{PM}_{10}$  au-dessus d'un niveau  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  était de 24 % (IC 95 %, 7 à 44 %) (Kaiser *et al.*, 2004).

### 6.2.3 Enfance

Plusieurs types de facteurs rendent les enfants potentiellement plus sensibles aux polluants atmosphériques (Heinrich and Slama, 2007 ; WHO Europe, 2005) (voir aussi le Tableau VI).

**Tableau VII : Catégories de facteurs déterminant la sensibilité des enfants aux polluants inhalés (WHO Europe 2005).**

Facteurs liés à la croissance et au développement pulmonaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vulnérabilité des voies respiratoires durant le développement et la croissance</li> <li>• Immaturité des mécanismes de défense</li> </ul>
Facteurs liés à l'activité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps passé à l'extérieur</li> <li>• Accroissement de la ventilation lors des jeux et de l'exercice physique</li> </ul>
Facteurs liés aux maladies chroniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prévalence élevée de l'asthme</li> <li>• Augmentation de la prévalence de la mucoviscidose</li> </ul>
Facteurs liés aux maladies aiguës	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux élevé d'infections respiratoires aiguës</li> </ul>

Au niveau épidémiologique, une étude réalisée en ex-Allemagne de l'Est a indiqué un effet à court terme plus important des particules chez les enfants asthmatiques que les adultes asthmatiques (Peters *et al.*, 1996).

Une étude a quantifié l'impact des PM<sub>10</sub> sur la santé de la population de la France, la Suisse et l'Autriche (Künzli *et al.*, 2000), selon une approche considérée conservative. Les résultats concernant la santé respiratoire des enfants spécifiques à la France sont présentés dans le Tableau VIII.

**Tableau VIII : Impact estimé en France d'une augmentation de 10 µg/m<sup>3</sup> de la concentration de PM<sub>10</sub> sur la santé respiratoire de l'enfant. Tiré de Künzli *et al.* (2000).**

Événement de santé (enfants de moins de 15 ans)	Risque relatif (IC 95 %)	Fréquence de l'événement*	Nombre de cas attribuables (IC 95 %)	
			à une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup> *	total, pour la France entière†
Episodes de bronchite	1,306	23 530	4 830	450 000
	(1,135-1,502)		(2 130-8 730)	(198 500-813 600)
Crises d'asthme	1,044	62 800	2 600	243 000
	(1,027-1,062)		(1 600-3 620)	(149 000-337 000)

\* Par million d'habitants et par an.

† En prenant en compte la distribution de l'exposition de la population française, comme indiqué dans le tableau 3 de (Künzli *et al.*, 2000)

#### 6.2.4 Personnes âgées

Les études épidémiologiques rapportent des risques relatifs de décès chez les personnes âgées similaires ou supérieurs à ceux observés dans le reste de la population adulte. A titre d'illustration, parmi les sujets de 65 ans et plus résidant dans quatre villes des Etats-Unis, un âge supérieur à 75 ans était associé à une augmentation de l'effet des niveaux de PM<sub>10</sub> sur le risque d'admission hospitalière pour pathologie cardiovasculaire, par rapport à l'effet observé chez les sujets de 65 à 74 ans (Zanobetti and Schwartz, 2002). Dans une étude dans neuf villes italiennes, une augmentation de 10 µg/m<sup>3</sup> des niveaux de PM<sub>10</sub> était associée à une augmentation de 0,5 % du risque de décès chez les sujets de 65-74 ans (IC 95 %, de 0,1 à 1,0 %), de 0,6 % chez ceux de 75

à 84 ans (IC 95 %, 0,2, à 1,0 %) et de 1,0 % (IC 95 %, 0,5 à 1,4 %) chez les sujets de 85 ans et plus (Forastiere *et al.*, 2008). Voir les Tableau IV à Tableau VI pour une illustration à partir de données françaises. Le Tableau VI montre notamment que, pour l'Île de France, la majorité du nombre de décès pour causes cardio-vasculaires attribuables aux effets à court terme de la pollution atmosphérique surviennent chez des sujets de plus de 65 ans.

La fréquence plus importante des pathologies cardiovasculaires et respiratoires, ainsi que du risque de décès, chez les personnes âgées par rapport au reste des adultes, rend le nombre de cas de décès attribuables aux polluants atmosphériques dans cette tranche d'âge bien plus important que dans le reste de la population adulte.

## 6.3 Populations à risque du fait de pathologies préexistantes

### 6.3.1 Asthme et autres pathologies respiratoires

Un antécédent de pathologie respiratoire augmente les effets des niveaux de PM<sub>10</sub> sur le risque d'admission hospitalière pour maladie cardiovasculaire (Zanobetti *et al.*, 2000).

L'exposition aux particules atmosphériques est susceptible d'augmenter le risque de survenue de crise d'asthme chez les sujets asthmatiques. Dans une étude longitudinale chez des enfants de 9 à 17 ans, la moyenne des PM<sub>10</sub> sur une période de 8 heures était plus fortement associée à la survenue de symptômes d'asthme que la moyenne sur 24 heures (Delfino *et al.*, 1998). L'étude d'impact pilotée par l'OMS (Künzli *et al.*, 2000) a abouti à une estimation de 243 000 crises d'asthme par an attribuables à la pollution par les PM<sub>10</sub> chez les enfants de moins de 15 ans en France.

### 6.3.2 Pathologies coronariennes

Parmi une population de 65 000 personnes âgées résidant à Chicago ayant déjà été hospitalisées pour une pathologie cardiaque ou pulmonaire, une étude de type *case-crossover* a indiqué une tendance à un effet plus important des PM<sub>10</sub> sur la mortalité parmi les sujets avec un antécédent d'infarctus du myocarde ou de diabète (Bateson and Schwartz, 2004).

### 6.3.3 Diabète

Le diabète est un facteur de sensibilité accrue aux effets des particules dans l'air (WHO Europe, 2006 ; Zanobetti and Schwartz, 2001 ; Zanobetti and Schwartz, 2002). A titre d'illustration, une étude réalisée selon la méthodologie des séries temporelles dans l'Illinois auprès de sujets de 65 ans et plus a indiqué qu'une augmentation de 10 µg/m<sup>3</sup> du niveau de PM<sub>10</sub> était associée à une augmentation de 0,9 % (IC 95 %, 0,6-1,3 %) du risque d'admission hospitalière pour un trouble cardiaque chez les sujets non diabétiques, contre 2,0 % (IC 95 %, 1,4-2,6 %) chez les sujets diabétiques (Zanobetti and Schwartz, 2001). Il n'y avait pas de distinction selon le type de diabète.

### 6.3.4 Obésité

Le surpoids ou l'obésité sont des facteurs de risque de diabète. A ce titre, surpoids ou obésité pourraient modifier la sensibilité aux polluants atmosphériques. Une étude réalisée parmi une population adulte exposée professionnellement à des particules fines de métal a mis en évidence un effet des particules de métal sur la fonction cardiaque plus important chez les hommes obèses que chez ceux qui ne l'étaient pas (Chen *et al.*, 2007). Il existe encore peu d'études similaires concernant l'exposition aux particules fines en population générale, qui permettraient notamment de distinguer les rôles respectifs du diabète et du surpoids (Dubowsky *et al.*, 2006). Toutefois, le fait que l'obésité soit un facteur de risque de pathologie cardiovasculaire fait des sujets obèses une population pouvant être considérée comme à risque.

## 6.4 Populations à risque du fait de facteurs sociaux ou comportementaux

### 6.4.1 Catégorie socio-professionnelle<sup>7</sup>

Effet de la pollution sur la mortalité : une synthèse de la littérature concernant l'effet du statut économique sur la relation entre pollution atmosphérique et mortalité (Laurent *et al.*, 2007) indiquait que les articles publiés ne permettaient pas de conclure de façon catégorique à une modification de l'effet à court terme de la pollution atmosphérique sur la mortalité par les caractéristiques socio-économiques, mais que les résultats tendent à indiquer un effet plus fort de la pollution dans les populations les moins favorisées du point de vue socio-économique. Cette revue reposait sur 10 études de série temporelle, 4 études de type *case-crossover* et une cohorte, dans lesquelles un écart à un effet multiplicatif du niveau socio-économique et des niveaux de particules sur la mortalité était recherché. Cela n'est donc pas incompatible avec un écart par rapport à un effet additif (qui correspondrait à une interaction « biologique »). De plus, les sujets issus des catégories socio-professionnelles les plus défavorisées ont un risque de décès plus important que le reste de la population.

Effet de la pollution sur la santé respiratoire : une étude réalisée à Strasbourg n'a pas mis en évidence de modification de l'association entre  $PM_{10}$  et des appels aux services médicaux d'urgence pour crise d'asthme par un indicateur de précarité défini à l'échelle de l'Iris (Laurent *et al.*, 2008) ; la puissance de l'étude pour mettre en évidence une telle modification était toutefois vraisemblablement limitée dans la mesure où il n'y avait pas non plus d'association nette entre les niveaux de  $PM_{10}$  et les appels pour crise d'asthme. Une étude avec une taille plus importante et une méthodologie similaire réalisée à Vancouver (Canada) réalisée parmi les enfants de 6 à 12 ans avait mis en évidence des associations plus fortes entre les oxydes d'azote (dont les niveaux sont souvent corrélés aux particules) et le risque d'hospitalisation pour asthme dans les zones avec des niveaux de revenu plus faible (Lin *et al.*, 2004).

### 6.4.2 Activités sportives

La fraction de particules ultrafines ( $PM_{0,1}$ ) qui se dépose dans les voies respiratoires augmente en cas d'exercice physique ; ceci, en combinaison avec la ventilation respiratoire accrue lors d'un exercice physique, entraîne une augmentation importante du nombre total de particules déposées dans les voies respiratoires lors d'un exercice physique, par rapport au repos (Daigle *et al.*, 2003).

### 6.4.3 Nutrition

La nutrition pourrait modifier la sensibilité aux particules atmosphériques. Une étude randomisée a observé que l'effet néfaste des  $PM_{2,5}$  sur la variabilité de la fréquence cardiaque était atténué par la consommation d'huile de poisson (source d'acide gras polyinsaturés de type Oméga 3) (Romieu *et al.*, 2005). Une revue sur la question a conclu que le stress oxydatif était un mécanisme d'action possible de la pollution atmosphérique sur l'organisme, et que certains suppléments nutritionnels, en particulier de nature anti-oxydante, pourraient moduler les effets aigus des polluants atmosphériques (Romieu *et al.*, 2008).

---

<sup>7</sup> A noter qu'un numéro de la revue *Extrapol* a été consacré à la thématique « Pollution atmosphérique, niveau socio-économique et santé » en juin 2007 : [http://www.invs.sante.fr/publications/extrapol/31/extrapol\\_31.pdf](http://www.invs.sante.fr/publications/extrapol/31/extrapol_31.pdf).

## 6.5 Populations à risque du fait de facteurs environnementaux

### 6.5.1 Proximité aux sources de particules atmosphériques

L'existence d'une source de particules en suspension (axe avec un trafic important par exemple) à proximité d'un des lieux de vie d'un sujet entraîne en moyenne une exposition aux particules plus élevée, ainsi que le dépassement de certains niveaux d'exposition plus fréquemment qu'à distance de sources de pollution. A titre d'illustration, la concentration en  $PM_{10}$  en 2006 était en moyenne d'environ  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur l'ensemble des sites urbains de fond recensés dans la base de données sur la qualité de l'air, contre un peu plus de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur l'ensemble des sites en proximité trafic. L'exposition cumulée des sujets vivant ou travaillant à proximité de telles sources est donc supérieure à celle du reste de la population, et à ce titre, les impacts sanitaires attendus du fait de l'exposition aux particules plus important que dans le reste de la population, et ce d'autant plus dans les zones où la proximité d'une source trafic est associée à d'autres facteurs associés à une fréquence accrue de troubles de la santé, tels que l'appartenance à des catégories sociales peu favorisées.

### 6.5.2 Conditions météorologiques, saison

L'association observée à court terme entre le niveau de particules dans l'air ambiant et la mortalité pourrait varier en fonction de la saison d'exposition. Une étude de type *case-crossover* dans neuf villes italiennes réalisée entre 1997 et 2004 a indiqué un effet apparent d'une augmentation donnée des niveaux de  $PM_{10}$  sur la mortalité plus élevée en été qu'en hiver (Stafoggia *et al.*, 2008). Ainsi, une augmentation de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans la concentration de  $PM_{10}$  estimée par les stations de surveillance de la qualité de l'air était associée à une augmentation de 2,5 % du risque de décès pour cause naturelle le jour suivant en été (IC 95 %, de 1,3 à 3,8 %) et à une augmentation de 0,2 % du risque de décès en hiver (IC 95 %, - 0,1 à 0,5 %). L'interprétation de tels résultats est délicate. Si, d'un point de vue biologique, il est concevable que la réponse de l'organisme à la chaleur (par des mécanismes cardiovasculaires, respiratoires ou de sudation) et une activité physique accrue en été puissent influencer l'absorption des particules, des questions liées à l'estimation de l'exposition pourraient aussi expliquer une telle modification d'effet. L'aération des domiciles étant en effet plus importante en été qu'en hiver, l'estimation de l'exposition personnelle des sujets par les stations de surveillance de la qualité de l'air est vraisemblablement meilleure en été qu'en hiver, ce qui pourrait entraîner une sous-estimation de la pente de l'association entre  $PM_{10}$  et mortalité en hiver. De plus, le mélange de polluants auquel la population est exposée est très variable en fonction des saisons. Enfin en termes de nombre de cas attribuables aux particules, un effet plus important des particules en été pourrait être compensé par un niveau de particules dans l'air plus important en hiver qu'en été.

## 6.6 Conclusion

- ▶ Sur la base des éléments présentés ci-avant, si pour des raisons spécifiques, il y avait un intérêt à cibler les actions de prévention en direction de certains sous-groupes de la population, il semblerait pertinent de considérer en particulier les femmes enceintes, nouveau-nés, enfants, personnes âgées, toute personne atteinte de pathologie cardiovasculaire ou respiratoire (antécédents d'infarctus du myocarde, asthme, etc.), de diabète, voire d'obésité (Tableau IX).
- ▶ D'une façon générale, tous les sujets à risque élevé de pathologie cardiovasculaire, respiratoire, ou même de décès en dehors de tout épisode de pollution (autres facteurs de risques) pourraient être ciblés. Cela concerne en particulier les catégories socio-professionnelles les moins favorisées.
- ▶ Enfin, les sujets présents de manière répétée ou régulière au proche voisinage de sources de pollution atmosphérique, par exemple ceux vivant à proximité d'axes routiers avec un trafic important, ainsi que les sportifs, méritent aussi d'être considérés du fait d'une exposition plus importante en dehors même des pics de pollution.

Tableau IX : Résumé des populations les plus à risque de subir les effets sanitaires de l'exposition aux particules en suspension dans l'air.

Caractéristique population	ou	Effet sanitaire considéré	Eléments justifiant la sensibilité accrue de cette population
Nouveau-nés		Mortalité	
Enfants		Santé respiratoire	Arguments biologiques Fréquence accrue des troubles de la santé respiratoire (notamment l'asthme)
Femmes enceintes		Croissance foétale, éventuellement prématurité	Effets sanitaires spécifiques à cette population, et pouvant avoir des effets à long terme sur la santé de l'enfant à naître
Personnes âgées		Pathologies cardio-pulmonaires ; mortalité	Arguments biologiques Fréquence accrue des pathologies considérées
Sujets asthmatiques		Crises d'asthme	Effet sanitaire spécifique à cette population
Sujets avec des pathologies respiratoires ou coronariennes		Pathologies cardio-pulmonaires, mortalité	Arguments biologiques Fréquence accrue des troubles de la santé respiratoire
Sujets diabétiques ou obèses		Pathologies cardiovasculaires	Fréquence accrue de troubles cardiovasculaires
Sportifs		<i>A priori</i> toutes celles pouvant être induites par les particules	Exposition accrue aux particules
Catégories socio-professionnelles les moins favorisées		<i>A priori</i> toutes celles pouvant être induites par les particules	Fréquence généralement accrue des différentes maladies considérées
Sujets vivant à proximité de sources de particules		<i>A priori</i> toutes celles pouvant être induites par les particules	Exposition accrue aux particules

## 7 Nitrate d'ammonium

### 7.1 Informations générales

#### 7.1.1 Identification de la substance et propriétés physico-chimiques

Numéro CAS, EINECS	CASRN 6484-52-2 ; EINECS 229-347-8
Nom	Nitrate d'ammonium
Synonymes	Fr : Nitrate d'ammonium En : Ammonium nitrate
Formule brute	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>
Forme physique	Solide incolore à blanc hygroscopique
Poids moléculaire	80,06 g.mol <sup>-1</sup>
Point d'ébullition	210 °C à pression normale (décomposition)
Point de fusion	169-170 °C
Masse volumique	1,72 à 25 °C
Facteurs de conversion	1 ppm = 5,465 mg.m <sup>-3</sup> à 20 °C
Point éclair	Non inflammable
Température d'auto-inflammation	Non applicable
Limites d'inflammabilité en volume dans l'air	Non inflammable
Solubilité	213 g pour 100 g d'eau à 25 °C
Source : Hazardous substances data bank (HSDB)	

#### 7.1.2 Origine du nitrate d'ammonium particulaire

Le nitrate d'ammonium entre dans la composition de l'aérosol secondaire. Il se forme par réactions chimiques entre l'acide nitrique avec l'ammoniac dans l'atmosphère. L'acide nitrique provient lui-même de réactions chimiques atmosphériques impliquant les oxydes d'azote (Schlesinger, 2007).

Selon les évaluations du CITEPA disponibles pour l'année 2006, concernant les oxydes d'azote tous les secteurs contribuent aux émissions dans des proportions supérieures à 5 % mais le secteur du transport routier en est la première source (53 % des émissions totales de la France métropolitaine). Concernant l'ammoniac, parmi les différents secteurs d'activité, l'agriculture/sylviculture contribue majoritairement aux émissions : 98 % des émissions de la France métropolitaine en 2006 (CITEPA, 2008).

En raison de leur mode de formation, les particules de nitrate d'ammonium se trouvent particulièrement dans la fraction la plus fine des particules habituellement mesurées : PM<sub>1,5</sub> à Paris environ (Cachier *et al.*, 2009 soumis ; Aymoz and Bessagnet, 2007).

### 7.1.3 Données de concentration dans l'air extérieur

Le nitrate d'ammonium est rarement mesuré directement et en règle général, ses concentrations sont calculées à partir des concentrations en ions nitrates et ammonium mesurés dans des particules prélevées sur des filtres indépendants de ceux présents dans les analyseurs automatiques.

On distingue schématiquement deux méthodes de mesure : la mesure en différé et la mesure semi-continue (Solomon and Sioutas, 2008).

Dans la mesure différée, les poussières d'une fraction granulométrique donnée sont prélevées sur un support (filtre) dans des conditions limitant les pertes de nitrate d'ammonium par volatilisation mais aussi les interférences par condensation de polluants gazeux (acide nitrique par exemple). Le contenu du filtre, ou une partie, est ensuite solubilisé dans l'eau et les ions nitrate et ammonium sont dosés indépendamment, typiquement par chromatographie ionique. La masse de nitrate d'ammonium ainsi calculée est rapportée à la quantité d'air échantillonné sur le support (valeur moyenne, typiquement exprimée sur 24 heures).

Il existe également des dispositifs expérimentaux permettant d'automatiser en ligne et en continu toutes les étapes précédemment décrites d'échantillonnage et d'analyse, et donc de fournir une information quant à la teneur en nitrate d'ammonium avec un pas de temps plus court, typiquement de l'ordre de quelques minutes. Ces matériels, actuellement trop complexes pour imaginer un déploiement à grande échelle, fournissent une information temporelle plus riche, indispensable pour mieux comprendre les phénomènes de pollution particulaire.

A l'échelle mondiale, les concentrations en nitrate d'ammonium rapportées dans l'air extérieur sont extrêmement variables dans le temps et dans l'espace : de quelques  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne annuelle jusqu'à plusieurs dizaines de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  lors d'épisodes de pollution particuliers et/ou dans certaines régions (Californie par exemple).

En France, les caractérisations d'aérosols réalisées ponctuellement par les AASQA et le LCSQA en 2003 et 2007 sur différents sites rapportent des concentrations variant entre 0 et  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  avec une concentration moyenne entre janvier et mai 2003 de l'ordre de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour des stations de fond répartie sur le territoire national (Aymoz and Bessagnet, 2007).

Notons toutefois que bien que parfaitement compatible avec la compréhension actuelle de la formation des aérosols secondaires, l'hypothèse selon laquelle le nitrate d'ammonium existe en tant que composé dans les particules peut parfois correspondre à une construction intellectuelle. En effet ce sont les ions nitrates et l'ammonium qui sont habituellement mesurés indépendamment l'un de l'autre au sein des particules, pour dans un second temps, faisant l'hypothèse qu'ils sont combinés, en déduire une concentration de nitrate d'ammonium. Les données sur les interactions chimiques entre les espèces au sein des particules sont peu documentées. Par suite, il n'est pas établi que tous les ions et espèces analysés dans les particules aient le même potentiel d'interaction avec l'appareil respiratoire lors de l'inhalation de particules.

## 7.2 Synthèse des données toxicologiques et épidémiologiques

A notre connaissance, aucune étude ne traite spécifiquement du devenir des particules de nitrate d'ammonium dans le tractus respiratoire humain ou animal. Cependant, dans les études d'inhalation d'aérosols purs de nitrate de sodium ( $< 1 \mu\text{m}$ ), proche du nitrate d'ammonium, réalisées chez l'homme par Utell *et al.* (1979), 32 à 78 % ont été retenus et se sont déposés au niveau pulmonaire.

## 7.2.1 Données concernant le nitrate d'ammonium

### 7.2.1.1 Expositions humaines contrôlées

Une série d'études, commanditées par le California Air Resources Board, a eu lieu au début des années 2000 et a consisté en l'exposition simultanée d'hommes et d'animaux à des fins d'évaluation de la toxicité de certaines composantes particulaires dont un mélange (noir de carbone + nitrate d'ammonium). Les résultats de ces études sont disponibles essentiellement sous forme de rapports publiés sur le site internet du California Air Resources Board et sont résumés ci-après (Solomon *et al.*, 2004 ; Pinkerton *et al.*, 2004 ; Kleinman *et al.*, 2004).

Dans l'étude de Solomon *et al.* (2004), 25 sujets légèrement à modérément asthmatiques ont été exposés une seule fois pendant 4 heures à : soit de l'air filtré, soit un mélange particulaire synthétique (noir de carbone + nitrate d'ammonium) à 250 µg/m<sup>3</sup> en moyenne (particules de 0,6 µm en moyenne), soit ce même mélange particulaire additionné d'ozone à 200 ppb. Selon des résultats préliminaires, les 250 µg/m<sup>3</sup> d'aérosol respiré par les sujets contiendraient environ 91 % de noir de carbone et 9 % de nitrate d'ammonium. Pendant les 4 heures d'exposition, les sujets étaient soumis à 4 périodes de 30 minutes d'exercice sur tapis roulant ou ergocycle. De nombreux paramètres ont été observés : spirométrie, bronchoscopie avec analyse qualitative et quantitative du liquide de lavage broncho-alvéolaire (comptage des cellules, dosage de protéines, expression d'ARNm), réactivité bronchique non spécifique (métacholine) et étude de la variabilité du rythme cardiaque (sans contrôle simultané du rythme respiratoire). Par rapport à une exposition à de l'air filtré, l'exposition aux particules seules s'est traduit par une légère altération des tests spirométriques non retrouvée 18 heures après l'exposition unique, et une diminution de la variabilité du rythme cardiaque de signification clinique non précisée par les auteurs. Par ailleurs, en raison du très grand nombre de tests statistiques effectués, les auteurs n'excluent pas que ces observations soient le fait du hasard. Enfin, en présence d'ozone, les effets sont nettement plus marqués avec augmentation des cellules et de marqueurs de l'inflammation, diminutions plus prononcées et cliniquement significatives des performances spirométriques et de la variabilité du rythme cardiaque. Ces effets sont majoritairement attribués par les auteurs à l'ozone.

Dans l'étude de Pinkerton *et al.* (2004), les mêmes 25 sujets légèrement à modérément asthmatiques ont été soumis, 18 heures après chaque exposition, à un examen bronchoscopique pendant lequel des biopsies endobronchiques étaient réalisées. Sur ces biopsies, l'expression des ARN codant pour des protéines de l'inflammation (12 cytokines) a été quantifiée avant et après culture de 24 heures en présence d'un allergène spécifique de chaque patient. Immédiatement après exposition aux particules, l'expression des gènes codant pour l'IL1α, l'IL1β et l'IL12p35 a été considérée comme élevée. Dans une moindre mesure les gènes codant pour l'IL8, le TNFα et l'IL10 ont également été considérés comme surexprimés. Après culture avec des allergènes spécifiques, l'IL1β n'était plus considérée comme surexprimée mais l'IL15 le devenait. Lors d'exposition simultanée aux particules et à l'ozone, il n'a plus été noté aucun changement dans l'expression des gènes codant pour les cytokines, avec ou sans culture en présence des allergènes spécifiques. L'interprétation toxicologique de ces observations est délicate mais selon les auteurs, elle confirmerait que les cellules du tractus respiratoire constituent des cibles lors de l'exposition aux particules et que les manifestations induites passent, même après une exposition unique, par une activation des voies de signalisation de l'inflammation.

Enfin, dans l'étude de Kleinman *et al.* (2004), la production de radicaux superoxydes par les macrophages présents dans le liquide de lavage broncho-alvéolaire de 10 patients exposés dans les mêmes conditions que rapportées précédemment a été quantifiée par chimiluminescence, avant et après activation non spécifique de la production de cytokines (ajout de phorbol myristate acetate – PMA – dans le milieu de culture des macrophages). Bien qu'une augmentation de la production de radicaux superoxydes ait été notée après exposition unique aux particules, celle-ci n'a été significative qu'après exposition simultanée aux particules et à l'ozone.

Dans les trois études précédentes, les sujets légèrement à modérément asthmatiques ont également été exposés pendant 4 heures par jour, trois jours de suite : soit à de l'air filtré, soit à un

mélange particulaire synthétique (noir de carbone + nitrate d'ammonium) à  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne (particules de  $0,6 \mu\text{m}$  en moyenne), soit ce même mélange particulaire additionné d'ozone à 200 ppb. Comme pour les expositions uniques, Solomon *et al.* (2004) rapportent une légère altération des tests spirométriques et des changements mineurs dans la cytologie des cellules alvéolaires (diminution du nombre de lymphocytes et augmentation du nombre de cellules épithéliales). Pinkerton *et al.* (2004) notent le même type d'effets sur l'expression des gènes codant pour les cytokines que lors d'une exposition unique, avec une expression croissante au cours du temps de l'IL10. Enfin, Kleinman *et al.* (2004) n'observent pas de différence significative pour la production de radicaux superoxydes par les macrophages présents dans le liquide de lavage broncho-alvéolaire de patients exposés 3 jours.

En résumé, les effets observés après 3 jours sont qualitativement et quantitativement identiques à ceux observés après une exposition unique, soutenant la thèse que les effets directs des particules dans les voies respiratoires sont d'installation rapide (< 1 jour avec 4 heures d'exposition).

### 7.2.1.2 Données épidémiologiques

En raison des utilisations agricoles du nitrate d'ammonium (engrais), une population importante de travailleurs a pu être exposée par voie respiratoire à ce produit, permettant la réalisation d'études épidémiologiques. Les résultats de ces études sont résumés ci-après. Toutefois, outre les précautions habituelles d'interprétation des études épidémiologiques en milieu professionnel, l'attention est attirée sur la nature et la présentation de l'ammonitrate à usage agricole probablement différentes de celles du nitrate d'ammonium formé secondairement dans un aérosol (pureté, granulométrie), rendant délicate la transposition de ces observations.

Al-Dabbagh *et al.* (1986) rapportent les résultats d'une étude de cohorte réalisée chez 1 327 travailleurs masculins de l'industrie des engrais exposés entre 1946 et 1981, notamment au nitrate d'ammonium, et suivis jusqu'en 1981. Par comparaison du nombre et des causes de décès, en particulier par cancer, avec le nombre attendu de cas (statistiques de mortalité de la région Nord de l'Angleterre), il n'a été noté aucun excès significatif de mortalité générale ou par cancer, y compris dans le sous-groupe des personnels régulièrement exposés au moins un an à plus de  $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Les travailleurs exposés plus de 10 ans et observés plus de 20 ans après la première exposition présentent un taux légèrement plus élevé de cancers du poumon que les autres travailleurs mais ce résultat, non statistiquement significatif, non corrigé de facteurs individuels de risque comme le tabagisme par exemple et non initialement prévu dans les objectifs de l'étude, est uniquement présenté par les auteurs comme un point à approfondir dans d'autres études.

Fraser *et al.* (1989) rapportent les résultats de deux cohortes constituées en 1961 et 1971 respectivement avec 862 et 652 travailleurs masculins de l'industrie des engrais, notamment exposés au nitrate d'ammonium et suivis jusqu'en 1985. Par comparaison du nombre et des causes de décès, en particulier par cancer, avec le nombre attendu de cas (statistiques de mortalité de la région d'étude), il n'a été noté aucun excès significatif de mortalité générale ou par cancer. Il convient toutefois de noter que le nombre de cancers observés dans la cohorte de 1971 était supérieur au nombre attendu, sans que la différence soit statistiquement significative et qu'une tendance comparable peut être notée pour certains cas de cancers dans l'étude précédemment citée. Un excès significatif de mortalité générale et par cancer (poumon et organes digestifs) est observé en lien avec les niveaux d'exposition des employés de la cohorte de 1971 aux poussières contenant des nitrates (mesure d'exposition non explicitée). En revanche, une association négative et significative est observée entre le fait de manipuler des engrais contenant du nitrate (vs. d'autres types d'engrais) et le risque de décès par cancer des organes digestifs. La faiblesse des effectifs, la non prise en compte du tabagisme et la non-concordance des résultats entre niveau d'exposition et type d'engrais rendent impossible, selon les auteurs, une conclusion quant à l'effet propre de l'exposition respiratoire aux nitrates.

Enfin, Frandrem *et al.* (1993) rapportent les résultats d'une étude de cohorte réalisée chez 2 023 travailleurs masculins exposés entre 1945 et 1979 à divers engrais contenant des nitrates et suivis

jusqu'en 1988. Ces travailleurs ont été exposés professionnellement à des concentrations en poussières contenant de 29 à 60 % de nitrate et variant entre 2,7 et 17,8 mg/m<sup>3</sup>. La comparaison du nombre et de la localisation des cancers observés chez ces travailleurs aux données attendues dans la population locale ne permet pas de mettre en évidence d'augmentation significative d'un type de cancer, ni de lien entre le niveau d'exposition et la survenue d'un type particulier de cancer.

### 7.2.1.3 Données animales

Cassee *et al.* (1999a) pour le RIVM ont exposé 36 rats normaux et 36 rats chez qui une hypertension pulmonaire avait expérimentalement été induite par la monocrotaline à des particules ultrafines (40-70 nm) de nitrate d'ammonium, 4 heures par jour et pendant 3 jours consécutifs (respectivement 418 et 361 µg/m<sup>3</sup>). Après sacrifice des animaux, les examens histopathologiques, biologiques (activités enzymatiques et protéines) ou cytologiques pratiqués au niveau des voies aériennes supérieures n'ont pas permis de mettre en évidence de signe de cytotoxicité particulier chez les rats exposés. Les auteurs concluent à une absence de toxicité du nitrate d'ammonium, à ces concentrations, chez des animaux sensibilisés ou non. Toutefois, le déroulement de cette expérimentation a été perturbé par une infection virale intercurrente, ce qui a fait dire par ailleurs à certains auteurs de cette étude que le nitrate d'ammonium pourrait diminuer la résistance des animaux aux infections (Schlesinger and Cassee, 2003). Cette hypothèse n'a jamais été confirmée par ailleurs.

Cassee *et al.* (1999b) pour le RIVM ont également exposé 20 souris normales et 20 souris chez qui un asthme avait expérimentalement été induit par l'ovalbumine à des particules fines (0,3 µm) ou ultrafines (30 nm) de nitrate d'ammonium, 4 heures par jour et pendant 3 jours consécutifs (concentrations moyennes respectives de 140 et 250 µg/m<sup>3</sup>). Après sacrifice des animaux, les examens histopathologiques, biologiques (activités enzymatiques et protéines) ou cytologiques pratiqués au niveau des voies aériennes supérieures n'ont pas permis de mettre en évidence d'augmentation significative de cytotoxicité chez les souris exposées. Cependant, *in vitro*, la réactivité bronchique caractéristique de la sévérité de l'asthme a été plus importante chez les souris exposées aux particules fines (évaluée par étude de la contractilité de la trachée en présence de métabolite, 24 heures après la dernière exposition), qu'il s'agisse des souris normales ou asthmatiques. Ces effets n'ayant pas été constatés pour les particules ultrafines pourtant présentes en plus forte concentration, les auteurs indiquent une influence probable de la granulométrie des particules influant leur dépôt dans l'arbre bronchique. Au final, les auteurs concluent à toxicité « marginale » du nitrate d'ammonium, à ces concentrations, chez des animaux asthmatiques ou non.

Pinkerton *et al.* (2004) ont développé un modèle animal utilisant des rats Brown Norway sensibilisés à l'ovalbumine afin d'étudier les effets des particules en relation avec l'asthme, l'hyper-réactivité bronchique et l'inflammation induits chez ces animaux reproduisant des phénomènes physiopathologiques observés chez des sujets asthmatiques. Ces rats sensibilisés et des rats témoins ont été exposés à un mélange de particules de carbone (concentration estimée : 100 µg/m<sup>3</sup>) et de nitrate d'ammonium (concentration estimée : 150 µg/m<sup>3</sup>) de diamètre aérodynamique moyen proche de 1 µm. Plusieurs paramètres biologiques et biochimiques ont été mesurés après exposition afin d'évaluer l'effet de l'exposition aux particules : fonction pulmonaire, liquide de lavage broncho-alvéolaire, synthèse de l'ADN, perméabilité cellulaire et histopathologie.

Dans une première expérience, des rats sensibilisés et exposés 2 jours consécutifs, 6 heures par jour, au mélange de particules ont présenté peu de différences statistiquement significatives avec les animaux témoins (non sensibilisés ou exposés à de l'air filtré) : sur tous les paramètres testés, seul le taux d'IgE sériques et la synthèse d'ADN dans les cellules épithéliales bronchiques se sont avérés significativement plus élevés chez les animaux sensibilisés et exposés au mélange particulaire.

Dans une seconde expérience, des rats sensibilisés et témoins ont été exposés 3 ou 6 jours à raison de 6 heures par jour, soit au mélange particulaire, soit à de l'air filtré. Après 3 jours

d'exposition, des signes d'inflammation éosinophile et une augmentation significative de synthèse de l'ARNm codant pour l'IL-4 ont été rapportés chez les animaux exposés et sensibilisés mais ces signes n'étaient plus notés chez les animaux exposés 6 jours. Les auteurs en concluent que l'exposition au mélange de particules testées pourrait induire une inflammation transitoire dans les premiers jours mais que celle-ci s'atténuerait au fur et à mesure de l'exposition répétée.

Kleinman *et al.* (2004) ont étudié l'effet sur les fonctions cardiaque et respiratoire de l'exposition de rats Fischer 344N sénescents (22 à 24 mois) à un mélange de particules de carbone (cible  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et de nitrate d'ammonium (concentration estimée :  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de diamètre aérodynamique moyen proche de  $0,7 \mu\text{m}$ . L'exposition de 4 heures par jour était unique ou répétée 3 jours, avec ou sans addition d'ozone (200 ppb). Les données relatives à la fonction cardiaque des animaux étaient enregistrées (pression sanguine et données électrocardiographiques) et le contenu cellulaire du liquide de lavage broncho-alvéolaire prélevé 24 h après l'exposition était analysé.

Après exposition unique au mélange particulaire sans ozone, aucun changement significatif n'a été observé, ni sur le contenu cellulaire du liquide de lavage broncho-alvéolaire, ni sur la fonction cardiaque.

Après exposition répétée de 3 jours au mélange particulaire seul, peu d'effets ont été notés sur la composition du liquide de lavage broncho-alvéolaire, la pression sanguine était abaissée significativement dès le premier jour, aucun effet n'a été observé sur le niveau du rythme cardiaque mais la variabilité du rythme cardiaque s'est abaissée progressivement et significativement au cours des 3 jours. Ce phénomène de diminution du rythme cardiaque, dont la signification chez le rat est incertaine, est à rapprocher de phénomènes comparables observés chez l'homme après exposition aux particules et associés à la morbidité et mortalité cardiaques.

#### 7.2.1.4 Données obtenues *in vitro*

Par une approche *in vitro*, la cytotoxicité du nitrate d'ammonium a été comparée à celle de particules ( $\text{PM}_{2,5}$ ) de la Cache Valley de l'Utah particulièrement chargée en nitrate d'ammonium. Les particules diminuent de 39 % la viabilité des cellules épithéliales bronchiques humaines pour une concentration élevée de  $1\ 100 \mu\text{g}/\text{mL}$ .  $800 \mu\text{g}/\text{mL}$  de nitrate d'ammonium sont nécessaires pour obtenir une même baisse de la viabilité soulignant, selon les auteurs, que la toxicité de ces PM n'est pas principalement associée à ce composé (Watterson *et al.*, 2007).

#### 7.2.1.5 Autres formes de toxicité

Le test de Ames pratiqué avec les souches TA 98, 100, 1535, 1537 et 1538 avec et sans activation métabolique a été négatif (HSDB). Il n'existe pas de preuve, directe ou indirecte, de cancérogénicité du nitrate d'ammonium, ni de reprotoxicité pour l'homme (base de données DART).

### 7.2.2 **Données concernant le nitrate seul ou d'autres sels de nitrate**

#### 7.2.2.1 Expositions humaines contrôlées

Une série d'études d'exposition humaine contrôlée à un sel de nitrate particulaire date des années 1980. Ces études ont en commun un faible effectif et une exposition à des concentrations très fortes au regard des expositions environnementales.

Utell *et al.* (1979) rapportent l'exposition de 10 sujets sains et 11 sujets asthmatiques à  $7\ 000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de nitrate de sodium sous forme de particules de  $0,46 \mu\text{m}$  de diamètre aérodynamique pendant 16 minutes (double aveugle croisé, les patients respirant soit du chlorure de sodium soit du nitrate de sodium). Sur la base des résultats d'explorations fonctionnelles respiratoires et d'un test de réactivité bronchique (carbacol), les auteurs concluent à une absence d'altération de la fonction pulmonaire consécutive à l'inhalation de nitrate de sodium particulaire.

En 1980, la même équipe publia les résultats d'une étude en tous points comparable mais avec 11 patients souffrant de grippe bénigne. Lors de la phase aiguë de la maladie et une semaine après l'exploration initiale, l'inhalation de nitrate de sodium s'est accompagnée d'une augmentation de la résistance des voies aériennes et d'une diminution du débit expiratoire. Ces troubles avaient disparu à la troisième semaine de suivi et les auteurs concluent à une possible action bronchostrictive du nitrate de sodium chez les patients atteints d'affection respiratoire aiguë (Utell *et al.*, 1980).

Enfin, Sackner *et al.* (1979) ont rapporté les travaux d'exposition d'adultes sains et asthmatiques à 1 000 µg/m<sup>3</sup> de nitrate de sodium sous forme d'aérosol submicronique pendant 10 minutes et ont conclu à l'absence d'effets immédiats sur la fonction cardiaque ou respiratoire.

#### 7.2.2.2 Données épidémiologiques

Dans une revue effectuée en 2007, Schlesinger (2007) rapporte les résultats de cinq autres études épidémiologiques liant exposition aux particules et impact sanitaire à court terme, incluant la variable « nitrate » entre 2000 et 2007. Parmi ces cinq études, deux n'ont pas démontré d'effet statistiquement significatif du nitrate alors que trois ont montré l'inverse. Malgré tout, l'auteur concluait en 2007 que la somme des preuves épidémiologiques et toxicologiques pour le nitrate était telle qu'en l'état actuel des connaissances, il était peu probable que les concentrations environnementales en nitrate soient associées à des effets sanitaires adverses, y compris chez des sujets sensibles comme les asthmatiques.

Cette conclusion est modulée par l'étude réalisée en Californie (19 comtés, 44 millions de personnes) par Ostro *et al.* (2007) dans laquelle une association significative entre mortalité et nitrate (sans correction de l'effet des autres composantes de la pollution particulaire) a été retrouvée. Notons toutefois que dans cette dernière étude, la variable nitrate était la plus corrélée à la variable PM<sub>2,5</sub> et que pour la mortalité toutes causes et la mortalité cardiovasculaire, le nitrate est plus faiblement associé que les PM<sub>2,5</sub> prises globalement. En outre dans cette étude, 9 composantes chimiques des particules sur 19 testées ont été significativement associées à la mortalité (15 sur 19 en saison froide).

Enfin, Franklin *et al.* (2008), ont également étudié l'effet de différentes composantes chimiques des PM<sub>2,5</sub> sur la mortalité toutes causes à partir de données obtenues entre 2000 et 2005 dans 25 agglomérations des Etats-Unis d'Amérique. L'aluminium, le sulfate, le nickel et l'arsenic ont été considérés comme des composantes augmentant significativement l'effet des particules alors que, dans cette étude, le nitrate est associé à une diminution non significative ( $p = 0,07$ ) de l'effet des particules sur la mortalité.

Au final, ces conclusions en apparence contradictoires entre les études, n'apportent pas d'élément complémentaire décisif quant à la toxicité du nitrate particulaire. Par ailleurs, et comme rappelé par Franklin *et al.* (2008), ces résultats témoignent probablement du fait que des composés individuels comme le sulfate ou le nitrate par exemple, ne sont que des marqueurs d'une chimie plus complexe des particules mais peuvent provenir d'origines multiples et donc être associés à d'autres éléments de manière non uniforme dans le temps et l'espace, modulant plus fortement les propriétés toxiques des particules prises dans leur ensemble. Par suite, il pourrait être plus cohérent d'associer des événements sanitaires, non plus à un composé chimique unique mais à un groupe de composés traduisant mieux, par exemple, une origine particulaire corrélée à un comportement toxicologique particulier.

## 7.3 Conclusion

- ▶ La revue des connaissances disponibles n'apporte pas de preuve scientifique étayée pour attribuer au nitrate d'ammonium une toxicité propre, distincte de celle des particules dans la composition desquelles il entre, aux niveaux de concentrations habituellement mesurés.
- ▶ La somme, bien que réduite, des données disponibles quant à la toxicité propre du nitrate d'ammonium laisse penser que son rôle direct dans la toxicité aiguë des particules n'est pas majoritaire.

## 8 Conclusions, éléments de discussion et recommandations

### 8.1 Conclusions

Ce rapport s'attache essentiellement à apporter des éléments de réponse sur :

- les déterminants de la typologie des particules dans l'air ambiant,
- la toxicité des particules,
- les relations concentration-risque reliant particules de l'air ambiant et événements de santé,
- la toxicité du nitrate d'ammonium, constituant identifié, mais non exclusif, de la fraction volatile des particules dans l'air ambiant.

Afin d'instruire ces sujets, le groupe de travail a notamment :

- travaillé à la recherche et à la synthèse d'éléments bibliographiques,
- auditionné plusieurs experts,
- analysé des données de pollution particulaire françaises et européennes.

Sur la base de l'ensemble des éléments présentés dans ce rapport, les points soulignés par le groupe de travail sont les suivants :

#### Concernant la typologie des particules de l'air ambiant :

- ▶ Les particules recouvrent un très large spectre de polluants dont les caractéristiques physiques et chimiques sont très variées dans le temps et dans l'espace.
- ▶ Les connaissances sur la composition chimique des particules et leur variabilité dans le temps et dans l'espace, demeurent fragmentaires à l'échelle nationale et européenne, ce qui rend très difficile une mise en relation non équivoque avec des indicateurs sanitaires.
- ▶ Le nitrate d'ammonium est susceptible d'expliquer la part la plus importante de la masse de la fraction volatile des particules, mais d'autres composés, notamment organiques, contribuent également à cette fraction dans de moindres proportions.
- ▶ Les pics de concentration en particules qui ont pu être étudiés jusqu'ici en France ne permettent pas d'identifier formellement une composante chimique unique explicative de tous ces phénomènes.
- ▶ Il reste de ce fait difficile de distinguer la toxicité générale des particules de celle de leurs divers constituants qui peuvent en outre agir en synergie. *A fortiori*, l'étude de la toxicité spécifique de la fraction volatile rencontre les mêmes limites.

#### Concernant l'évaluation de l'impact des particules sur la santé aux travers d'études expérimentales chez l'homme :

- ▶ Dans les études d'exposition humaine contrôlée examinées dans le cadre de la saisine, une inflammation pulmonaire est observée pour des expositions de courte durée (1 à 2 heures) à des concentrations en PM<sub>2,5</sub> de l'ordre de 100 µg/m<sup>3</sup> et des effets cardiovasculaires sont observés pour des concentrations de l'ordre de 40 µg/m<sup>3</sup>.

### Concernant les relations concentration-risque reliant particules de l'air ambiant et indicateurs sanitaires :

En population générale :

- ▶ Les études épidémiologiques disponibles en population générale mettent en évidence des liens statistiquement significatifs entre les niveaux de pollution atmosphérique particulaire (PM<sub>10</sub>), la mortalité et la morbidité (respiratoire et cardiovasculaire notamment).
- ▶ Les relations observées ne diffèrent pas significativement de relations linéaires sans seuils, ce qui signifie qu'il n'a pas été possible d'observer un seuil de concentration de PM<sub>10</sub> en deçà duquel aucun effet sanitaire ne serait constaté.
- ▶ De ce fait, les impacts sanitaires (par exemple, le nombre de cas attribuables sur une année complète) les plus importants ne sont pas associés aux niveaux de pollution les plus élevés mais plutôt aux niveaux de fond plus faibles habituellement rencontrés. Ceci est à prendre en compte lors de toute réflexion relative à l'opportunité de fixation de seuils d'information/d'alerte du public.
- ▶ Dans le cadre du Psas, ces relations ont été quantifiées pour un ensemble de villes françaises métropolitaines pour des périodes récentes (postérieures à 2000). Les risques relatifs ainsi quantifiés permettent le calcul de fractions de risque attribuable pour différents niveaux journaliers de PM<sub>10</sub>.
- ▶ L'ensemble de ces données, compatibles avec le dispositif national de mesure des particules, peut permettre d'étayer la réflexion sur les seuils d'information et d'alerte.

Pour les populations sensibles :

- ▶ Sur la base des éléments présentés, si pour des raisons spécifiques, il y avait un intérêt à cibler les actions de prévention en direction de certains sous-groupes de la population, il semblerait pertinent de considérer en particulier les femmes enceintes, nouveau-nés, enfants, personnes âgées, toute personne atteinte de pathologie cardiovasculaire ou respiratoire (antécédents d'infarctus du myocarde, asthme, etc.), de diabète, voire d'obésité.
- ▶ D'une façon générale, tous les sujets à risque élevé de pathologie cardiovasculaire, respiratoire, ou même de décès en dehors de tout épisode de pollution (autres facteurs de risques) pourraient être ciblés. Cela concerne notamment les catégories socio-professionnelles les moins favorisées.
- ▶ Enfin, les sujets présents de manière répétée ou régulière au proche voisinage de sources de pollution atmosphérique, par exemple ceux vivant à proximité d'axes routiers avec un trafic important, ainsi que les sportifs, méritent aussi d'être considérés du fait d'une exposition plus importante en dehors même des pics de pollution.

### Concernant le nitrate d'ammonium :

- ▶ La revue des connaissances disponibles n'apporte pas de preuve scientifique étayée pour attribuer au nitrate d'ammonium une toxicité propre, distincte de celle des particules dans la composition desquelles il entre, aux niveaux de concentrations habituellement mesurés.
- ▶ La somme, bien que réduite, des données disponibles quant à la toxicité du nitrate d'ammonium laisse penser que son rôle direct dans la toxicité aiguë des particules n'est pas majoritaire.

## 8.2 Éléments de discussion

Lors des travaux du groupe instruisant cette saisine, certaines questions complémentaires, certains éléments intéressants sont apparus sans entrer directement dans le champ de la question posée. Ces réflexions constituent les éléments de discussion présentés ci-après.

### 8.2.1 Considérations concernant un seuil d'information/d'alerte du public pour la pollution particulaire

Les connaissances actuelles sur les conséquences sanitaires de l'exposition aux particules indiquent qu'il n'a pas été possible d'observer un seuil en deçà duquel aucun lien ne serait constaté, au moins pour certains effets sanitaires tels que la mortalité. Ainsi, si les seules considérations sanitaires devaient être prises en compte pour la construction des seuils de déclenchement du dispositif d'information / alerte, ces seuils devraient être le plus bas possible. En outre, les impacts sanitaires les plus importants à l'échelle d'une année ne sont pas associés aux niveaux journaliers de pollution particulaire particulièrement élevés, car les occurrences de ces niveaux particulièrement élevés sont rares ; c'est plutôt en abaissant la valeur moyenne de la concentration particulaire qu'un bénéfice sanitaire important est attendu. Si les seuils sont très bas et que les mesures de gestion visent à réduire leur dépassement, il y aura également une baisse du niveau moyen des particules.

Les éléments de relation dose-réponse pour la population générale présentés au chapitre 5 ont été obtenus dans des contextes méthodologiques particuliers, notamment concernant la mesure de l'exposition. Pour les données issues du Psas par exemple, les indicateurs d'exposition à la pollution atmosphérique particulaire -  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  - ont été construits à partir des valeurs journalières mesurées sur la zone d'étude par les stations urbaines et péri-urbaines de fond des AASQA sans prise en compte de la perte en fraction volatile. Si ces relations dose-réponse devaient servir de base à l'établissement de seuils d'information du public, il semblerait légitime de respecter le mode de calcul de l'indicateur d'exposition de l'étude sous-jacente : dans le cadre du programme Psas par exemple, une moyenne journalière (24 heures de minuit à minuit) mesurée sur des stations de fond. L'attention est attirée sur les éléments suivants :

- Les éléments de relation dose-réponse ont été obtenus à partir de mesures sur des stations de fond alors que le déclenchement du dispositif d'information / alerte repose sur « le dépassement concomitant du seuil concerné par au moins deux capteurs dont un de fond » (voir Annexe 2 pour le texte de la circulaire) ; en d'autres termes, la prise en compte d'une station de proximité est possible. Ainsi, en supposant que les stations de proximité présentent des niveaux de particules significativement plus élevés que les stations de fond, le dispositif d'information / alerte peut actuellement être déclenché dans des situations de contamination particulaire pour lesquelles le programme Psas ne permet pas d'effectuer une évaluation des risques sanitaires (pas de prise en compte des stations de proximité).
- Dans la mesure où des incertitudes subsistent sur la quantification des émissions des composés particuliers et sur la connaissance de certains processus de formation secondaire, les modèles développés aujourd'hui pour la prédiction des concentrations en particules, en tout lieu du territoire, présentent des limites.
- Une moyenne sur 24 heures calculée rétrospectivement à partir de mesures n'est pas toujours compatible avec l'idée d'un seuil d'information du public permettant de prévenir l'exposition.
- Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2007, chaque AASQA a été dotée d'au moins une station de référence équipée d'un doublet d'appareil TEOM ou bêta dont l'un est équipé du module de correction (FDMS pour les TEOM ou RST pour les analyseurs bêta). Ces doublets permettent de calculer à chaque heure et pour chaque AASQA une valeur d'ajustement de la fraction volatile des  $PM_{10}$  applicable aux autres points de mesure non équipés d'un

module de correction. L'influence de ce changement de mode de mesure sur l'interprétation des relations dose-réponse est complexe et dépend de la toxicité relative des fractions volatiles et non volatiles des PM. Dans l'hypothèse où la fraction volatile aurait une contribution toxicologique inférieure à celle de la fraction non volatile des PM, il est probable que les relations liant les concentrations atmosphériques de PM (en masse) à un risque sanitaire issues des séries écologiques temporelles et basées sur des mesures de PM sans correction de la fraction volatile, entraînent une surestimation du risque si elles sont appliquées à des mesures en masse prenant en compte cette fraction volatile.

- Les niveaux mesurés par les stations de fond du dispositif de surveillance des AASQA constituent un indicateur d'exposition, compatible avec le dispositif national de surveillance et dont les variations temporelles à court terme sont, selon le consensus scientifique actuel, corrélées à l'exposition réelle des individus. Cependant, en aucun cas il ne s'agit d'une mesure de l'exposition individuelle. Par conséquent, appliquer ces relations dose-réponse avec d'autres modes d'expression de l'exposition (mesure individuelle par exemple) serait une erreur méthodologique.

### **8.2.2 Considérations concernant la fraction volatile des particules et le nitrate d'ammonium**

La fraction volatile (à 50 °C) des particules en suspension est généralement assimilée au nitrate d'ammonium du fait notamment des connaissances relatives à la formation de ce composé dans l'atmosphère. C'est à ce composé que l'on a attribué également la plus forte contribution, en masse, à la fraction volatile des particules. Il convient toutefois de souligner plusieurs éléments :

- Il apparaît clairement que la composition de cette fraction volatile peut varier dans le temps et dans l'espace et peut contenir un grand nombre d'autres espèces chimiques parmi lesquelles, par exemple, des acides organiques volatils ou du carbone organique issu de la combustion de la biomasse. De ce fait il ne serait pas pertinent d'attribuer la toxicité de la fraction volatile des particules au seul nitrate d'ammonium. Bien que le nitrate d'ammonium représente une masse importante de la fraction volatile, il n'est pas exclu, faute de données suffisantes à ce jour, qu'une composante minoritaire (en masse) de cette fraction possède une toxicité différente, voire plus élevée le cas échéant.
- Du fait de la grande variabilité dans le temps et dans l'espace de la composition chimique des particules et/ou de leur fraction volatile, il convient de ne pas généraliser trop rapidement des observations ou des éléments de compréhension acquis sur un petit nombre d'événements, sur une échelle spatiale ou temporelle donnée. Enfin, pour des raisons métrologiques évidentes, l'incertitude associée à la mesure des différentes fractions chimiques particulières (volatile ou non) augmente avec le niveau de complexité analytique nécessaire pour mesurer cette fraction.

### **8.2.3 Considérations concernant les PM<sub>1</sub> et les effets à long terme, exclus du champ de la saisine**

Bien que les PM<sub>1</sub> soient suspectées de posséder des effets sanitaires, en raison notamment de leur capacité de pénétration dans l'organisme, elles n'ont pas été considérées dans l'instruction de cette saisine car elles ne sont pas mesurées en routine par les AASQA et elles ne peuvent donc pas faire l'objet d'un dispositif d'information / alerte.

De même, le champ de la saisine a conduit à se focaliser sur les effets à court terme des particules, en retenant de ne pas traiter les effets à long terme, non pertinents dans le cadre d'une problématique de seuils d'information / alerte. Mais dans le cadre d'une gestion globale des particules, les effets à long terme ne peuvent être ignorés et doivent également faire l'objet de mesures.

### 8.2.4 Considérations concernant une évaluation des risques associés aux différents composants des particules

Il est prématuré, en l'état actuel des connaissances, de réaliser une expertise collective sur une évaluation des risques associés à quelques composantes de la pollution particulaire. A l'heure actuelle, il existe peu de données sur la typologie des particules par nature chimique en France. De tels travaux seraient à engager, par exemple au travers de programmes de recherche. En outre, la réalisation d'une évaluation des risques composante par composante apparaît prématurée. Sans connaissance de données d'exposition composante par composante et de leur évolution dans le temps et dans l'espace au niveau du territoire national, une telle évaluation de risque ne peut être correctement menée. Dans l'état actuel des connaissances, seule une synthèse bibliographique pourrait être réalisée ; elle fournirait des éléments sur les toxicités respectives des différentes composantes chimiques mais pas sur les risques associés au regard de la pollution particulaire globale. Concernant les particules issues du trafic automobile, il existe déjà une synthèse de l'OMS (Krzyzanowski *et al.*, 2005).

## 8.3 Recommandations

- ▶ Concernant la réflexion à mener sur la fixation ou la révision de seuils d'information et d'alerte pour les particules dans l'air ambiant, le groupe de travail propose, si l'idée de fixation de seuils est retenue, l'exploitation des relations concentration-risque élaborées dans le cadre du programme Psas, notamment présentées dans ce rapport. Ces relations ont été quantifiées pour un ensemble de villes françaises pour des périodes récentes (postérieures à 2000). Les pouvoirs publics pourront aussi considérer les calculs de fractions de risque attribuable (à partir des risques relatifs quantifiés) pour différents niveaux journaliers de PM.

Enfin, compte tenu des premières lacunes identifiées et/ou des données encore fragmentaires disponibles, le groupe de travail recommande également de :

- ▶ Promouvoir la mise en place de travaux, reposant notamment sur des campagnes de mesures, pour progresser dans la connaissance et les déterminants de la composition chimique des particules (pour les différentes fractions granulométriques), ainsi que le recueil de particules pour la réalisation de tests toxicologiques ultérieurs. La durée et le déroulement de ces travaux doivent en outre prendre en compte les besoins nécessaires à l'utilisation des données recueillies dans le cadre d'études épidémiologiques. Cela suppose des échanges entre métrologistes, épidémiologistes et toxicologues dès l'élaboration des protocoles.
- ▶ Promouvoir le développement d'études complémentaires permettant une description qualitative et quantitative plus détaillée (autres indicateurs de morbidité, autres pas de temps, etc.) des effets sanitaires associés aux particules en général et à leurs différents composants, compatible avec le dispositif national ou européen de surveillance.

## 9 Bibliographie

- Aga E, Samoli E, Touloumi G, Anderson HR, Cadum E, Forsberg B *et al.* Short-term effects of ambient particles on mortality in the elderly: results from 28 cities in the APHEA2 project. *Eur Respir J Suppl*, 2003; 40: 28s-33s.
- Al-Dabbagh S, Forman D, Bryson D, Stratton I, Doll R. Mortality of nitrate fertiliser workers. *Br J Ind Med*, 1986; 43(8): 507-15.
- Anderson HR, Atkinson RW, Peacock JL, Marston L, Konstantinou K. Meta-analysis of time series studies and panel studies of particulate matter and ozone – Report of a WHO task group. Organisation mondiale de la santé. 73 pages. 2004. <http://www.euro.who.int/document/e82792.pdf>
- Aymoz G, Bessagnet B. Les épisodes de PM<sub>10</sub> en France durant le printemps 2007. Rapport LCSQA. 37 pages. Juillet 2007. [http://www.lcsqa.org/system/files/Rapport\\_LCSQA-PM10-Mars-Avril2007.pdf](http://www.lcsqa.org/system/files/Rapport_LCSQA-PM10-Mars-Avril2007.pdf)
- Ballester F, Rodriguez P, Iniguez C, Saez M, Daponte A, Galan I *et al.* Air pollution and cardiovascular admissions association in Spain: results within the EMECAS project. *J Epidemiol Community Health*, 2006; 60(4): 328-36.
- Ballester F, Saez M, Perez-Hoyos S, Iniguez C, Gandarillas A, Tobias A *et al.* The EMECAM project: a multicentre study on air pollution and mortality in Spain: combined results for particulates and for sulfur dioxide. *Occup Environ Med*, 2002; 59(5): 300-8.
- Bateson TF and Schwartz J. Who is sensitive to the effects of particulate air pollution on mortality? A case-crossover analysis of effect modifiers. *Epidemiology*, 2004; 15(2): 143-9.
- Baulig A, Poirault JJ, Ausset P, Schins R, Shi T, Baralle D *et al.* Physicochemical characteristics and biological activities of seasonal atmospheric particulate matter sampling in two locations of Paris. *Environ Sci Technol*, 2004; 38(22): 5985-92.
- Behndig AF, Mudway IS, Brown JL, Stenfors N, Helleday R, Duggan ST *et al.* Airway antioxidant and inflammatory responses to diesel exhaust exposure in healthy humans. *Eur Respir J*, 2006; 27(2): 359-65.
- Blanchard O. Caractérisation de l'aérosol atmosphérique en milieu urbain. Rapport final. Rapport LCSQA (Convention 115/2003). 49 pages. 2003. [http://www.lcsqa.org/system/files/Etude9\\_883.pdf](http://www.lcsqa.org/system/files/Etude9_883.pdf)
- Blanchard O. Caractérisation de l'aérosol atmosphérique en milieu urbain. Etude n°4 – Caractérisation de l'aérosol atmosphérique (Rapport 1/2). Rapport LCSQA (Convention 87/2004). 39 pages. 2004. [http://www.lcsqa.org/system/files/etude\\_04\\_rapport\\_1\\_2+obi\\_+227a.pdf](http://www.lcsqa.org/system/files/etude_04_rapport_1_2+obi_+227a.pdf)
- Bloemen HJT, Mooibroek D, Cassee FR, van Putten EM. Composition and sources of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in the Netherlands. RIVM Report 863001007/2008. 54 pages. 2008. <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/863001007.pdf>
- Blomberg A, Krishna MT, Bocchino V, Biscione GL, Shute JK, Kelly FJ *et al.* The inflammatory effects of 2 ppm NO<sub>2</sub> on the airways of healthy subjects. *Am J Respir Crit Care Med*, 1997; 156(2 Pt 1): 418-24.
- Blomberg A, Krishna MT, Helleday R, Soderberg M, Ledin MC, Kelly FJ *et al.* Persistent airway inflammation but accommodated antioxidant and lung function responses after repeated daily exposure to nitrogen dioxide. *Am J Respir Crit Care Med*, 1999; 159(2): 536-43.
- Bonvallot V, Baeza-Squiban A, Baulig A, Brulant S, Boland S, Muzeau F *et al.* Organic compounds from diesel exhaust particles elicit a proinflammatory response in human airway epithelial cells and induce cytochrome p450 1A1 expression. *Am J Respir Cell Mol Biol*, 2001; 25(4): 515-21.

Brook RD, Franklin B, Cascio W, Hong Y, Howard G, Lipsett M *et al.* Air pollution and cardiovascular disease: a statement for healthcare professionals from the Expert Panel on Population and Prevention Science of the American Heart Association. *Circulation*, 2004; 109(21): 2655-71.

Cachier H *et al.* soumis. 2009.

Cassee FR, Arts JH, Fokkens PH, Spoor SM, Boere AJ, van Bree L *et al.* Pulmonary effects of ultrafine and fine ammonium salts aerosols in healthy and monocrotaline-treated rats following short-term exposure. *Inhal Toxicol*, 2002; 14(12): 1215-29.

Cassee FR, Boere AJF, Fokkens PHB, Dormans JAMA, Bree L Van, Rombout PJA. Toxicity of Ambient Particulate Matter - Toxicity of Ambient Particulate Matter IV: Acute toxicity study in pulmonary hypertensive rats after exposure to model compounds for the secondary aerosol fraction of PM<sub>10</sub> - ammonium bisulfate, ferrosulfate and nitrate. RIVM Report 650010016. 26 pages. 1999a. <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/650010016.pdf>

Cassee FR, Dormans JAMA, Loveren H van, Bree L van, Rombout PJA. Toxicity of Ambient Particulate Matter. III. Acute toxicity study in asthmatic mice following 3-day exposure to ultrafine and fine ammonium nitrate, a model compound for secondary aerosol fraction of PM<sub>10</sub>. RIVM Report 650010013. 27 pages. 1999b. <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/650010013.pdf>

Chen JC, Cavallari JM, Stone PH, Christiani DC. Obesity is a modifier of autonomic cardiac responses to fine metal particulates. *Environ Health Perspect*, 2007; 115(7): 1002-6.

CITEPA – Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique : Emissions dans l'air en France – métropole - Substances relatives à l'acidification, l'eutrophisation et à la pollution photochimique. Paris, 17 pages. Mai 2008. [http://www.citepa.org/emissions/nationale/Aep/Emissions\\_FRmt\\_AEP.pdf](http://www.citepa.org/emissions/nationale/Aep/Emissions_FRmt_AEP.pdf)

Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA). Les poussières fines en Suisse. Rapport de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air. Berne, 142 pages. 2007. <http://www.ekl.admin.ch/fileadmin/ekl-dateien/dokumentation/f-bericht-feinstaub-2008.pdf>

Daigle CC, Chalupa DC, Gibb FR, Morrow PE, Oberdorster G, Utell MJ *et al.* Ultrafine particle deposition in humans during rest and exercise. *Inhal Toxicol*, 2003; 15(6): 539-52.

Delfino RJ, Zeiger RS, Seltzer JM, Street DH. Symptoms in pediatric asthmatics and air pollution: differences in effects by symptom severity, anti-inflammatory medication use and particulate averaging time. *Environ Health Perspect*, 1998; 106(11): 751-61.

Devlin RB, Ghio AJ, Kehrl H, Sanders G, Cascio W. Elderly humans exposed to concentrated air pollution particles have decreased heart rate variability. *Eur Respir J Suppl*, 2003; 40: 76s-80s.

Diaz-Sanchez D, Dotson AR, Takenaka H, Saxon A. Diesel exhaust particles induce local IgE production *in vivo* and alter the pattern of IgE messenger RNA isoforms. *J Clin Invest*, 1994; 94(4): 1417-25.

Diaz-Sanchez D, Tsien A, Casillas A, Dotson AR, Saxon A. Enhanced nasal cytokine production in human beings after *in vivo* challenge with diesel exhaust particles. *J Allergy Clin Immunol*, 1996; 98(1): 114-23.

Diaz-Sanchez D, Tsien A, Fleming J, Saxon A. Combined diesel exhaust particulate and ragweed allergen challenge markedly enhances human *in vivo* nasal ragweed-specific IgE and skews cytokine production to a T helper cell 2-type pattern. *J Immunol*, 1997; 158(5): 2406-13.

Dockery DW and Pope CA, 3rd. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annu Rev Public Health*, 1994; 15: 107-32.

- Dubowsky SD, Suh H, Schwartz J, Coull BA, Gold DR. Diabetes, obesity, and hypertension may enhance associations between air pollution and markers of systemic inflammation. *Environ Health Perspect*, 2006; 114(7): 992-8.
- Eilstein D, Declercq C, Prouvost H, Pascal L, Nunes C, Filleul L *et al.* [The impact of air pollution on health. The "Programme de Surveillance Air et Sante 9 villes" (Air and Health surveillance program in 9 cities)]. *Presse Med*, 2004; 33(19 Pt 1): 1323-7.
- Fandrem SI, Kjuus H, Andersen A, Amlie E. Incidence of cancer among workers in a Norwegian nitrate fertiliser plant. *Br J Ind Med*, 1993; 50(7): 647-652.
- Forastiere F, Stafoggia M, Berti G, Bisanti L, Cernigliaro A, Chiusolo M *et al.* Particulate matter and daily mortality: a case-crossover analysis of individual effect modifiers. *Epidemiology*, 2008; 19(4): 571-80.
- Franchini M and Mannucci PM. Short-term effects of air pollution on cardiovascular diseases: outcomes and mechanisms. *J Thromb Haemost*, 2007; 5(11): 2169-74.
- Franklin M, Koutrakis P, Schwartz J. The role of particle composition on the association between PM<sub>2.5</sub> and mortality. *Epidemiology*, 2008; 19(5): *in press*.
- Fraser P, Chilvers C, Day M, Goldblatt P. Further results from a census based mortality study of fertiliser manufacturers. *Br J Ind Med*, 1989; 46(1): 38-42.
- Ghio AJ, Hall A, Bassett MA, Cascio WE, Devlin RB. Exposure to concentrated ambient air particles alters hematologic indices in humans. *Inhal Toxicol*, 2003; 15(14): 1465-78.
- Ghio AJ, Kim C, Devlin RB. Concentrated ambient air particles induce mild pulmonary inflammation in healthy human volunteers. *Am J Respir Crit Care Med*, 2000; 162(3 Pt 1): 981-8.
- Gilboa SM, Mendola P, Olshan AF, Langlois PH, Savitz DA, Loomis D *et al.* Relation between ambient air quality and selected birth defects, seven county study, Texas, 1997-2000. *Am J Epidemiol*, 2005; 162(3): 238-52.
- Glinianaia SV, Rankin J, Bell R, Pless-Mulloli T, Howel D. Particulate air pollution and fetal health: a systematic review of the epidemiologic evidence. *Epidemiology*, 2004; 15(1): 36-45.
- Gong H, Jr., Linn WS, Sioutas C, Terrell SL, Clark KW, Anderson KR *et al.* Controlled exposures of healthy and asthmatic volunteers to concentrated ambient fine particles in Los Angeles. *Inhal Toxicol*, 2003; 15(4): 305-25.
- Gong H, Linn WS, Terrell SL, Anderson KR, Clark KW, Sioutas C *et al.* Exposures of elderly volunteers with and without chronic obstructive pulmonary disease (COPD) to concentrated ambient fine particulate pollution. *Inhal Toxicol*, 2004; 16(11-12): 731-44.
- Grahame TJ and Schlesinger RB. Health effects of airborne particulate matter: do we know enough to consider regulating specific particle types or sources? *Inhal Toxicol*, 2007; 19(6-7): 457-81.
- Harder SD, Soukup JM, Ghio AJ, Devlin RB, Becker S. Inhalation of PM<sub>2.5</sub> does not modulate host defense or immune parameters in blood or lung of normal human subjects. *Environ Health Perspect*, 2001; 109 Suppl 4: 599-604.
- Hazardous Substances Data Bank, Monographie « Ammonium Nitrate ». Consulté via Toxnet. <http://toxnet.nlm.nih.gov/>. Dernière consultation le 17 juin 2008.
- Heinrich J and Slama R. Fine particles, a major threat to children. *Int J Hyg Environ Health*, 2007; 210(5): 617-22.

- Holgate ST, Sandström T, Frew AJ, Stenfors N, Nördenhall C, Salvi S *et al.* Health effects of acute exposure to air pollution. Part I: Healthy and asthmatic subjects exposed to diesel exhaust. *Res Rep Health Eff Inst.* 2003a;(112):1-30; discussion 51-67.
- Holgate ST, Devlin RB, Wilson SJ, Frew AJ. Health effects of acute exposure to air pollution. Part II: Healthy subjects exposed to concentrated ambient particles. *Res Rep Health Eff Inst.* 2003b; (112): 31-50; discussion 51-67.
- Huynh M, Woodruff TJ, Parker JD, Schoendorf KC. Relationships between air pollution and preterm birth in California. *Paediatr Perinat Epidemiol.* 2006; 20(6): 454-461.
- InVS. Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine. Concepts et méthodes. Saint Maurice, 2008. <http://www.invs.sante.fr>
- Kaiser R, Romieu I, Medina S, Schwartz J, Krzyzanowski M, Künzli N. Air pollution attributable postneonatal infant mortality in U.S. metropolitan areas: a risk assessment study. *Environ Health.* 2004; 3(1): 4.
- Kleinman MT, Meacher D, Hamade A, Solomon C, Pinkerton KE. Mechanisms of Particulate Toxicology: Systemic Effects in Sensitive Animal Models and Susceptible Humans. Final Report, Prepared for the California Air Resources Board And the California Environmental Protection Agency (Contract Number: 99-316). 52 pages. 2004. <http://www.arb.ca.gov/research/apr/past/99-316.pdf>
- Krzyzanowski M, Kuna-Dibbert B, Schneider J. Health effects of transport-related air pollution. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe. 205 pages. 2005. <http://www.euro.who.int/document/e86650.pdf>
- Künzli N and Tager IB. Air pollution: from lung to heart. *Swiss Med Wkly.* 2005; 135(47-48): 697-702.
- Künzli N, Kaiser R, Medina S, Studnicka M, Chanel O, Filliger P *et al.* Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet.* 2000; 356(9232): 795-801.
- Künzli N, Medina S, Kaiser R, Quenel P, Horak F, Jr., 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(11): 1050-5.
- Lacasana M, Esplugues A, Ballester F. Exposure to ambient air pollution and prenatal and early childhood health effects. *Eur J Epidemiol.* 2005; 20(2): 183-99.
- Laj P, Sellegri K. Les aérosols atmosphériques: Impacts locaux, effets globaux. *Revue Française des Laboratoires.* 2003 ; 349 : 23-34.
- Larrieu S, Jusot JF, Blanchard M, Prouvost H, Declercq C, Fabre P *et al.* Short term effects of air pollution on hospitalizations for cardiovascular diseases in eight French cities: the PSAS program. *Sci Total Environ.* 2007; 387(1-3): 105-12.
- Larroque B, Ancel PY, Marret S, Marchand L, Andre M, Arnaud C *et al.* Neurodevelopmental disabilities and special care of 5-year-old children born before 33 weeks of gestation (the EPIPAGE study): a longitudinal cohort study. *Lancet.* 2008; 371(9615): 813-20.
- Laurent O, Bard D, Filleul L, Segala C. Effect of socioeconomic status on the relationship between atmospheric pollution and mortality. *J Epidemiol Community Health.* 2007; 61(8): 665-75.
- Laurent O, Pedrono G, Segala C, Filleul L, Havard S, Deguen S *et al.* Air pollution, asthma attacks, and socioeconomic deprivation: a small-area case-crossover study. *Am J Epidemiol.* 2008; 168(1): 58-65.

- Le Tertre A, Medina S, Samoli E, Forsberg B, Michelozzi P, Boumghar A *et al.* Short-term effects of particulate air pollution on cardiovascular diseases in eight European cities. *J Epidemiol Community Health*, 2002; 56(10): 773-9.
- Lin M, Chen Y, Villeneuve PJ, Burnett RT, Lemyre L, Hertzman C *et al.* Gaseous air pollutants and asthma hospitalization of children with low household income in Vancouver, British Columbia, Canada. *Am J Epidemiol*, 2004; 159(3): 294-303.
- Maisonet M, Correa A, Misra D, Jaakkola JJ. A review of the literature on the effects of ambient air pollution on fetal growth. *Environ Res*, 2004; 95(1): 106-15.
- Maitre A, Bonneterre V, Huillard L, Sabatier P, de Gaudemaris R. Impact of urban atmospheric pollution on coronary disease. *Eur Heart J*, 2006; 27(19): 2275-84.
- MEDAD 2006. Bilan de la qualité de l'air en France en 2006 et des principales tendances observées au cours de la période 1999-2006. 24 pages. 2007. [http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/bilan\\_QA\\_2006-V13032007.pdf](http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/bilan_QA_2006-V13032007.pdf)
- Mills NL, Tornqvist H, Gonzalez MC, Vink E, Robinson SD, Soderberg S *et al.* Ischemic and thrombotic effects of dilute diesel-exhaust inhalation in men with coronary heart disease. *N Engl J Med*, 2007; 357(11): 1075-82.
- Mills NL, Tornqvist H, Robinson SD, Gonzalez M, Darnley K, MacNee W *et al.* Diesel exhaust inhalation causes vascular dysfunction and impaired endogenous fibrinolysis. *Circulation*, 2005; 112(25): 3930-6.
- Mills NL., Newby DE, Mac Nee W., Donaldson K., Effects of particles on the cardiovascular system. In "Particle toxicology" Donaldson and Borm Eds, p 259-273, 2007
- Mills NL, Robinson SD, Fokkens PH, Leseman DL, Miller MR, Anderson D, *et al.* Exposure to concentrated ambient particles does not affect vascular function in patients with coronary heart disease. *Environ Health Perspect*. 2008 Jun;116(6):709-15.
- Oberdorster G, Oberdorster E, Oberdorster J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect*, 2005; 113(7): 823-39.
- Organisation mondiale de la santé (OMS). Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre. Mise à jour mondiale 2005. Synthèse de l'évaluation des risques. 21 pages. 2006. [http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_fre.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_fre.pdf)
- Ostro B, Feng WY, Broadwin R, Green S, Lipsett M. The effects of components of fine particulate air pollution on mortality in California: results from CALFINE. *Environ Health Perspect*, 2007; 115(1): 13-9.
- Parker JD, Woodruff TJ, Basu R, Schoendorf KC. Air pollution and birth weight among term infants in California. *Pediatrics*, 2005; 115(1): 121-8.
- Pereira LA, Loomis D, Conceicao GM, Braga AL, Arcas RM, Kishi HS *et al.* Association between air pollution and intrauterine mortality in Sao Paulo, Brazil. *Environ Health Perspect*, 1998; 106(6): 325-9.
- Peters A, Goldstein IF, Beyer U, Franke K, Heinrich J, Dockery DW *et al.* Acute health effects of exposure to high levels of air pollution in eastern Europe. *Am J Epidemiol*, 1996; 144(6): 570-81.
- Pinkerton KE, Miller LA, Schelegle ES, Plopper CG, Sherman JG. Mechanisms of Particulate Toxicity: Effects on the Respiratory System of Sensitive Animals and Asthmatic Humans. Final Report, Prepared for the California Air Resources Board And the California Environmental Protection Agency (Contract Number: 99-315). 126 pages. 2004. <http://www.arb.ca.gov/research/apr/past/99-315.pdf>

- Pope CA, 3rd and Dockery DW. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J Air Waste Manag Assoc*, 2006; 56(6): 709-42.
- Pourazar J, Mudway IS, Samet JM, Helleday R, Blomberg A, Wilson SJ *et al.* Diesel exhaust activates redox-sensitive transcription factors and kinases in human airways. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*, 2005; 289(5): L724-30.
- Putaud JP, Raes F, Van Dingenen R, Brüggemann E, Facchini MC, Decesari S *et al.* A European aerosol phenomenology – 2: Chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmos. Environ.*, 2004; 38(16): 2579-95.
- Reiss R, Anderson EL, Cross CE, Hidy G, Hoel D, McClellan R *et al.* Evidence of health impacts of sulfate-and nitrate-containing particles in ambient air. *Inhal Toxicol*, 2007; 19(5): 419-49.
- Ritz B and Wilhelm M (in press). Ambient air pollution and adverse birth outcomes: what do we know? *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*.
- Ritz B, Wilhelm M, Zhao Y. Air pollution and infant death in southern California, 1989-2000. *Pediatrics*, 2006; 118(2): 493-502.
- Ritz B, Yu F, Fruin S, Chapa G, Shaw GM, Harris JA. Ambient air pollution and risk of birth defects in Southern California. *Am J Epidemiol*, 2002; 155(1): 17-25.
- Rocha ESIR, Lichtenfels AJ, Amador Pereira LA, Saldiva PH. Effects of ambient levels of air pollution generated by traffic on birth and placental weights in mice. *Fertil Steril*, 2008; (In Press).
- Romieu I, Castro-Giner F, Künzli N, Sunyer J. Air pollution, oxidative stress and dietary supplementation: a review. *Eur Respir J*, 2008; 31(1): 179-97.
- Romieu I, Tellez-Rojo MM, Lazo M, Manzano-Patino A, Cortez-Lugo M, Julien P *et al.* Omega-3 fatty acid prevents heart rate variability reductions associated with particulate matter. *Am J Respir Crit Care Med*, 2005; 172(12): 1534-40.
- Sackner MA, Dougherty RD, Chapman GA, Zarzecki S, Zarzemski L, Schreck R. Effects of sodium nitrate aerosol on cardiopulmonary function of dogs, sheep, and man. *Environ Res*, 1979; 18(2): 421-36.
- Saigal S and Doyle LW. An overview of mortality and sequelae of preterm birth from infancy to adulthood. *Lancet*, 2008; 371(9608): 261-9.
- Salvi S, Blomberg A, Rudell B, Kelly F, Sandstrom T, Holgate ST *et al.* Acute inflammatory responses in the airways and peripheral blood after short-term exposure to diesel exhaust in healthy human volunteers. *Am J Respir Crit Care Med*, 1999; 159(3): 702-9.
- Salvi SS, Nordenhall C, Blomberg A, Rudell B, Pourazar J, Kelly FJ *et al.* Acute exposure to diesel exhaust increases IL-8 and GRO-alpha production in healthy human airways. *Am J Respir Crit Care Med*, 2000; 161(2 Pt 1): 550-7.
- Samoli E, Analitis A, Touloumi G, Schwartz J, Anderson HR, Sunyer J *et al.* Estimating the exposure-response relationships between particulate matter and mortality within the APHEA multicity project. *Environ Health Perspect*, 2005; 113(1): 88-95. Erratum in: *Environ Health Perspect*. 2005;113(5):A297.
- Schlesinger RB and Cassee F. Atmospheric secondary inorganic particulate matter: the toxicological perspective as a basis for health effects risk assessment. *Inhal Toxicol*, 2003; 15(3): 197-235.
- Schlesinger RB. The health impact of common inorganic components of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in ambient air: a critical review. *Inhal Toxicol*, 2007; 19(10): 811-832.

- Slama R, Darrow L, Parker J, Woodruff TJ, Strickland M, Nieuwenhuijsen M *et al.* Meeting report: atmospheric pollution and human reproduction. *Environ Health Perspect*, 2008; 116(6): 791-8.
- Solomon C, Balmes JR, Power K, Miller L. Mechanisms of Particulate Toxicity: Health Effects in Susceptible Humans. Final Report, Prepared for the California Air Resources Board And the California Environmental Protection Agency (Contract Number: 99-314). 59 pages. 2004. <http://www.arb.ca.gov/research/apr/past/99-314.pdf>
- Solomon PA and Sioutas C. Continuous and semicontinuous monitoring techniques for particulate matter mass and chemical components: a synthesis of findings from EPA's Particulate Matter Supersites Program and related studies. *J Air Waste Manag Assoc*, 2008; 58(2): 164-95.
- Sram RJ, Binkova B, Dejmek J, Bobak M. Ambient air pollution and pregnancy outcomes: a review of the literature. *Environ Health Perspect*, 2005; 113(4): 375-82.
- Stafoggia M, Schwartz J, Forastiere F, Perucci CA. Does temperature modify the association between air pollution and mortality? A multicity case-crossover analysis in Italy. *Am J Epidemiol*, 2008; 167(12): 1476-85.
- Stenfors N, Nordenhall C, Salvi SS, Mudway I, Soderberg M, Blomberg A *et al.* Different airway inflammatory responses in asthmatic and healthy humans exposed to diesel. *Eur Respir J*, 2004; 23(1): 82-6.
- Tornqvist H, Mills NL, Gonzalez M, Miller MR, Robinson SD, Megson IL *et al.* Persistent endothelial dysfunction in humans after diesel exhaust inhalation. *Am J Respir Crit Care Med*, 2007; 176(4): 395-400.
- Utell MJ, Aquilina AT, Hall WJ, Speers DM, Douglas RG, Jr., Gibb FR *et al.* Development of airway reactivity to nitrates in subjects with influenza. *Am Rev Respir Dis*, 1980; 121(2): 233-41.
- Utell MJ, Swinburne AJ, Hyde RW, Speers DM, Gibb FR, Morrow PE. Airway reactivity to nitrates in normal and mild asthmatic subjects. *J Appl Physiol*, 1979; 46(1): 189-96.
- Watterson TL, Sorensen J, Martin R, Coulombe RA, Jr. Effects of PM<sub>2.5</sub> collected from Cache Valley Utah on genes associated with the inflammatory response in human lung cells. *J Toxicol Environ Health A*, 2007; 70(20): 1731-1744.
- Woodruff TJ, Grillo J, Schoendorf KC. The relationship between selected causes of postneonatal infant mortality and particulate air pollution in the United States. *Environ Health Perspect*, 1997; 105(6): 608-12.
- Woodruff TJ, Parker JD, Schoendorf KC. Fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) air pollution and selected causes of postneonatal infant mortality in California. *Environ Health Perspect*, 2006; 114(5): 786-90.
- World Health Organization (WHO), Regional Office for Europe. Quantification of the health effects of exposure to air pollution. Report of a WHO working group. Bilthoven, Netherlands, 20-22 November 2000. 34 pages. 2001. <http://www.euro.who.int/document/e74256.pdf>
- World Health Organization (WHO), Regional Office for Europe. Effect of air pollution on children's health and development. A review of the evidence. 185 pages. 2005. <http://www.euro.who.int/document/E86575.pdf>
- World Health Organization (WHO), Regional Office for Europe. Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. 484 pages. 2006. <http://www.euro.who.int/Document/E90038.pdf>
- Zanobetti A and Schwartz J. Are diabetics more susceptible to the health effects of airborne particles? *Am J Respir Crit Care Med*, 2001; 164(5): 831-3.
- Zanobetti A and Schwartz J. Cardiovascular damage by airborne particles: are diabetics more susceptible? *Epidemiology*, 2002; 13(5): 588-92.

Zanobetti A, Schwartz J, Gold D. Are there sensitive subgroups for the effects of airborne particles? Environ Health Perspect, 2000; 108(9): 841-5.

---

# ANNEXES

---

## Annexe 1 : Lettre de saisine



2 AOUT 2007

MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DES SOLIDARITÉS

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU  
DEVELOPPEMENT DURABLE

Direction générale de la santé

Direction de la prévention des pollutions et des  
risques

072003

Le Directeur général de la santé

Le Directeur de la prévention des pollutions et  
des risques

à

Madame la Directrice générale de l'Agence  
Française de Sécurité Sanitaire de  
l'Environnement et du Travail  
253 Avenue du Général Leclerc  
94701 Maisons-Alfort**Objet :** Pollution par les particules dans l'air ambiant**P. J. :** - Projet de circulaire relative à l'information du public sur les particules en suspension dans l'air ambiant  
- Avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France des 6 juin 1996 et 16 novembre 1999**Copie :** DGT

Des épisodes récents de pollution par les particules, constatés de façon récurrente dans certaines régions depuis 2007, amènent à considérer comme indispensable un renforcement de l'information du public - notamment des personnes sensibles - sur ce polluant, ce de façon harmonisée sur l'ensemble du territoire. Une circulaire aux Préfets, actuellement en consultation auprès des acteurs concernés et dont vous trouverez copie ci-jointe, devrait donc être signée prochainement sur ce thème.

Si, pour certains polluants (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>), des seuils réglementaires, à partir desquels l'information du public est obligatoire, ont été fixés par la réglementation européenne, il n'existe pas de seuil de ce type pour les particules. Il devrait en être de même dans la future directive unifiée - actuellement en discussion dans les instances européennes - qui remplacera à terme l'ensemble des directives actuelles concernant la qualité de l'air ambiant.

En l'absence de ces éléments, la circulaire susvisée se base sur 2 seuils (80 µg/m<sup>3</sup> et 125 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub> -particules de taille inférieure à 10 µm - en moyenne sur 24 heures) proposés par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France dans son avis du 6 juin 1996, dont vous trouverez copie ci-jointe, au-delà desquels les Préfets sont chargés de diffuser aux populations des recommandations sanitaires.

Concernant l'impact sanitaire de ces polluants, des études de l'Organisation Mondiale de la Santé, notamment celle de juin 2004 (*Health aspects of air pollution: results from the who project « systematic review of health aspects of air pollution in Europe »*<sup>1</sup>), ont mis en évidence que des effets significatifs sur la santé humaine, concernant le système respiratoire ainsi que le système cardiovasculaire, sont constatés même à de très faibles doses et principalement pour des expositions à long terme.

Toutefois, les particules demeurent des polluants relativement complexes, compte tenu que leurs effets sur la santé dépendent d'une part de leur granulométrie et d'autre part de leur composition chimique, et qu'il faut également distinguer les particules primaires (véhicules, combustion du bois, etc. ou érosion) des particules secondaires résultant de transformations dans l'atmosphère (par exemple le dioxyde d'azote et l'ammoniac réagissent pour former du nitrate d'ammonium). De plus, comme la plupart des polluants atmosphériques, les particules peuvent être d'origine anthropique ou naturelle (sables du Sahara, etc.) et peuvent être transportées sur de longues distances (notamment pour les particules les plus fines telles les PM<sub>2,5</sub>).

Dans ce contexte général, nous sollicitons votre agence afin, en lien avec les organismes compétents :

- de procéder à une évaluation des risques sanitaires, en particulier pour les populations sensibles, des différentes composantes de la pollution particulaire, notamment du nitrate d'ammonium – composé retrouvé de façon prépondérante lors des récents épisodes de pollution ayant touché la France –
- de disposer d'un avis, tenant compte des connaissances les plus récentes, relatif à des seuils, pertinents sur le plan sanitaire, d'information et de recommandation du public pour les particules dans l'air ambiant (PM<sub>10</sub> ou PM<sub>2,5</sub> : ces composés étant actuellement réglementés – ou en cours de réglementation – par les directives européennes et mesurés par les AASQA<sup>2</sup>), qui seront, le cas échéant, introduits dans la réglementation française.

Nous vous remercions d'inscrire ces travaux à votre programme de travail pour 2008, de nous faire parvenir avant fin 2007 une note sur leur organisation, et de nous remettre votre rapport final pour la fin du premier semestre 2008.

Nos services se tiennent à votre disposition pour de plus amples renseignements. Nous vous proposons notamment d'organiser une réunion préalable au lancement de vos travaux et nous vous invitons à transmettre des propositions de dates à nos services (contact : Sylvie Drugeon, sylvie.drugeon@ecologie.gouv.fr).

Le Directeur général de la santé

LE CHEF DE SERVICE  
ADJOINT DU DIRECTEUR GÉNÉRAL  
DE LA SANTÉ PAR INTERIM

Didier EYSSARTIER

<sup>1</sup> <http://ec.europa.eu/environment/air/cafe/activities/pdf/e83080.pdf>

<sup>2</sup> Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air

Le Directeur de la prévention des pollutions  
et des risques

Le directeur adjoint de la prévention  
des pollutions et des risques

Jean-Pierre HENRY

## Annexe 2 : Circulaire relative à l'information du public sur les particules en suspension dans l'air ambiant



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT  
ET DE L'AMÉNAGEMENT DURABLES

*Direction de la prévention des pollutions  
et des risques*

Paris, le 12 octobre 2007

*Service de l'environnement industriel*

*Bureau de la pollution atmosphérique,  
des équipements énergétiques et des transports*

Affaire suivie par : Nadia HERBELOT  
Tél : 01 42 19 14 35 - Fax : 01 42 19 14 71

Le ministre d'Etat, ministre de l'Écologie, du Développement  
et de l'Aménagement durables

à

Mesdames et Messieurs les préfets de département,  
Monsieur le préfet de police de Paris,  
Mesdames et Messieurs les préfets de région (*pour information*)

Objet : Circulaire relative à l'information du public sur les particules en suspension dans l'air ambiant

Les épisodes récents de pollution par les particules, constatés de façon récurrente dans certaines régions depuis 2007, amènent à considérer comme indispensable un renforcement de l'information du public - notamment des personnes sensibles - sur ce polluant, et ce de façon harmonisée sur l'ensemble du territoire.

La pollution de l'air ambiant par les particules ne constitue pas un phénomène nouveau et différentes actions des pouvoirs publics visent à réduire de manière pérenne les émissions de ces polluants dans l'air ambiant ainsi que de leurs précurseurs. Mais les nouvelles modalités de mesure des particules (voir annexe 1) ont conduit à constater aujourd'hui des pics dont l'ampleur et la fréquence n'étaient pas attendues.

L'information du public, qui est l'un des objectifs principaux de la surveillance des polluants dans l'air, constitue une mission essentielle du Préfet qui peut s'appuyer à cet effet sur les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA).

La réglementation européenne relative à l'air ambiant, transposée en droit français, exige une information actualisée quotidiennement - notamment concernant le dépassement des valeurs limites - ainsi que la mise en œuvre de plans et programmes visant à réduire à long terme les concentrations dans l'air ambiant.

20, avenue de Ségur - 75302 Paris 07 SP  
Tél : 01 42 19 20 21 - [www.medad.gouv.fr](http://www.medad.gouv.fr)

Contrairement à d'autres polluants (comme l'ozone, le dioxyde d'azote et le dioxyde de soufre), il n'existe pas pour les particules de seuils réglementaires, différents des valeurs limites, à partir desquels l'information du public et la diffusion de consignes sanitaires soient obligatoires. Il devrait en être de même dans la future directive unifiée - actuellement en discussion dans les instances européennes - qui remplacera à terme l'ensemble des directives actuelles concernant la qualité de l'air ambiant.

En conséquence, le MEDAD a saisi l'AFSSET, afin de disposer d'un avis, tenant compte des connaissances les plus récentes, relatif à des seuils pertinents d'information de la population.

### 1. Pics de pollution

Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, vous voudrez bien organiser, par voie d'arrêté préfectoral ou interpréfectoral, un dispositif d'information et d'alerte lors des pics de pollution par les PM<sub>10</sub> sur la base des éléments qui suivent :

- dans l'attente de l'avis rendu par l'AFSSET, vous considérerez les niveaux de concentration en PM<sub>10</sub> suivants : 80 µg/m<sup>3</sup> et 125 µg/m<sup>3</sup> en moyenne sur 24 heures, seuils au-delà desquels vous diffuserez :
  - des recommandations sanitaires, conformes aux préconisations de l'annexe 2, par le biais de messages succincts et facilement compréhensibles, de manière similaire aux pratiques en vigueur pour les autres polluants
  - des recommandations comportementales en vous appuyant sur l'annexe 3.
- le déclenchement du dispositif reposera sur le dépassement concomitant du seuil concerné par au moins deux capteurs<sup>1</sup> dont un de fond, constaté à partir des données arrêtées à 8 heures et à 14 heures (en prenant en compte la moyenne calculée sur les 24 heures précédentes).
- dans la mesure du possible, le dispositif devra permettre d'informer de manière préventive, tout particulièrement les personnes sensibles, de la dégradation de la qualité de l'air et de l'évolution possible de la situation dans les jours à venir, ce malgré les fortes incertitudes attachées à la prévision pour ce polluant (dires d'expert).

A cet effet, vous pourrez vous appuyer sur l'AASQA compétente territorialement.

Lors des épisodes de grande ampleur, une information nationale (par exemple par voie de communiqué de presse) pourra venir compléter les dispositifs préfectoraux mis en place.

### 2. Dépassements des valeurs limites

Le dispositif ci-dessus viendra compléter l'information des populations, exigée par les directives européennes, que vous devez effectuer concernant les dépassements des valeurs limites annuelle et journalière applicables aux PM<sub>10</sub> (nombre de jours de dépassement du niveau de 50 µg/m<sup>3</sup> notamment), au travers de sites internet, de communiqués de presse ...

Dans le cadre des informations délivrées lors des pics de pollution (1.) ou en cas de dépassements des valeurs limites (2.), les niveaux atteints, la nature et l'origine des particules, leurs effets sanitaires, les modalités de leur mesure dans l'air ambiant pourront être utilement développés, en s'appuyant en tant que de besoin sur l'annexe 1 de la présente circulaire.

<sup>1</sup> à défaut un capteur s'il n'en existe pas d'autre dans la zone couverte par la procédure

Les mesures visant à réduire les émissions de particules de façon pérenne pourront également être évoquées, en se reportant notamment à cette même annexe. A cet égard, l'existence - voire la prééminence lors de certains pics - de particules secondaires du type nitrate d'ammonium doit amener à considérer également des sources agricoles (épandage d'engrais).

Vous voudrez bien me faire part sous le présent timbre des difficultés éventuelles rencontrées pour la mise en œuvre de la présente circulaire et me transmettre, sous 6 mois, un état d'avancement des dispositions que vous aurez prises.

Dans les quelques zones où une procédure d'information relative aux particules a d'ores et déjà été mise en place ou est en cours d'adoption, vous examinerez sa comptabilité avec la présente circulaire et jugerez de l'opportunité de modifier ses modalités, dans le respect de deux objectifs : la cohérence de l'ensemble du dispositif mis en place sur le territoire français et la continuité de l'action publique, gage d'une bonne compréhension par le public des actions mises en place par l'Etat.

Pour le ministre et par délégation :  
Le directeur de la prévention des pollutions et des risques,  
délégué aux risques majeurs

signé

Laurent MICHEL

## ANNEXE 1

ELEMENTS DE CONTEXTE  
RELATIFS AUX PARTICULESI - MESURE DES PARTICULES

Les particules en suspension dans l'air ambiant sont mesurées depuis très longtemps sur le territoire français : dans un premier temps, la méthode des fumées noires était mise en œuvre puis elle a été progressivement remplacée, du fait notamment des contraintes en matière d'information du public, par l'utilisation d'appareils automatiques.

Au début des années 2000, des articles scientifiques ont évoqué une sous-estimation par ces appareils et, dans certaines conditions, de la fraction volatile des particules concernant en particulier le nitrate d'ammonium, dont la quantité est très variable en fonction des conditions climatiques et de l'origine des masses d'air.

Des travaux réalisés<sup>2</sup> en conséquence ont mené à la modification depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2007 de la mesure et des modalités d'ajustement des données de particules PM<sub>10</sub> ce qui, conjugué à des conditions météorologiques défavorables en ce début d'année, a conduit à une augmentation sensible, dans certaines régions, des concentrations journalières par rapport à celles constatées auparavant. Des investigations et modélisations sont actuellement en cours (LCSQA) pour essayer d'analyser précisément la genèse et la composition des pics récemment constatés. De façon à améliorer les connaissances, une procédure permettant de collecter et d'analyser les échantillons prélevés par les AASQA lors des pics est en cours de mise en place, sous l'égide du MEDAD, avec l'appui du LCSQA.

II – EFFETS SANITAIRES

Les particules constituent des polluants relativement complexes, compte tenu que leurs effets sur la santé dépendent :

- d'une part, de leur granulométrie : elles pénètrent d'autant plus profondément dans l'appareil respiratoire que leur diamètre est faible,
- et d'autre part, de leur composition chimique : elles peuvent en effet contenir des produits toxiques, tels que des métaux ou des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dont certains sont considérés comme cancérogènes.

Des études de l'Organisation Mondiale de la Santé<sup>3</sup> ont mis en évidence que des effets significatifs sur la santé humaine sont constatés même à de très faibles doses et principalement pour des expositions à long terme, sachant que les particules issues de la combustion sont identifiées comme étant particulièrement dangereuses et que les composés comme le nitrate d'ammonium présentent une moindre toxicité.

Une évaluation plus précise de l'impact sanitaire des particules, et notamment du nitrate d'ammonium, retrouvé de façon prépondérante lors de récents épisodes de pollution ayant touché la France, a été demandée à l'AFSSET.

<sup>2</sup> par le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA), à la demande du MEDAD, en liaison avec les AASQA et l'ADEME

<sup>3</sup> Health aspects of air pollution - Results from the WHO project « Systematic review of health aspects of air pollution in Europe » - juin 2004

**III – ORIGINE DES PARTICULES**

Il faut distinguer :

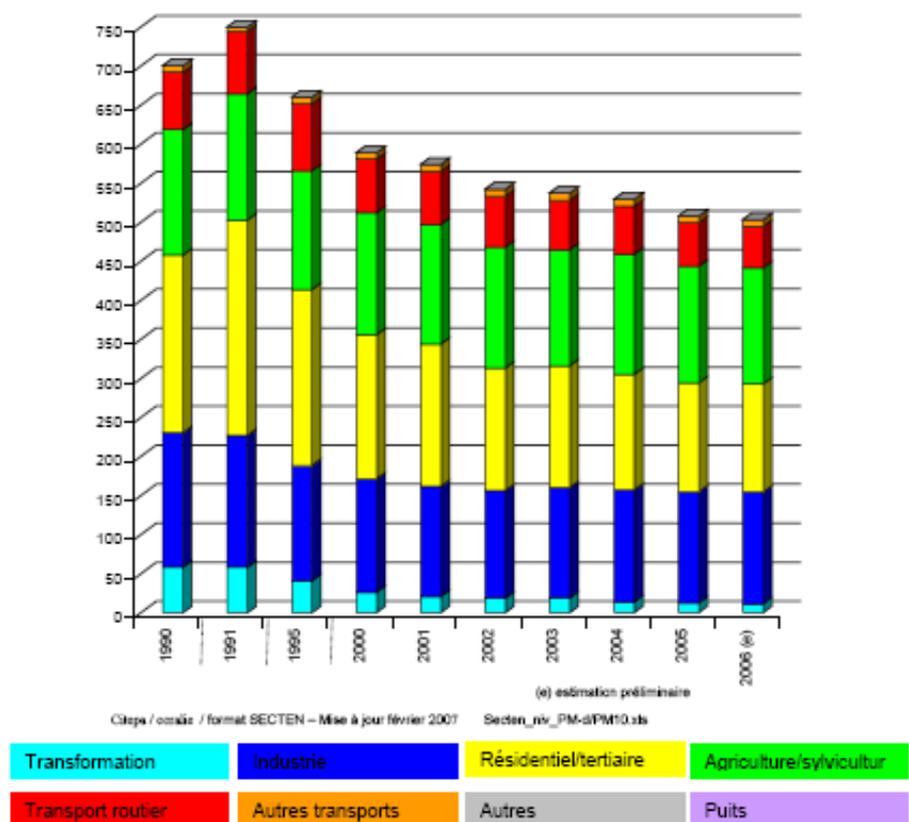
- les particules primaires issues de la combustion ou de l'érosion ; parmi les sources les plus importantes de particules de combustion, on peut citer les véhicules ou poids lourds diesel, la combustion du bois, notamment dans le secteur résidentiel, l'industrie ou la production d'énergie ;

- les particules secondaires, qui résultent de transformations dans l'atmosphère, ainsi par exemple le dioxyde d'azote et l'ammoniac réagissent pour former du nitrate d'ammonium ; l'ammoniac provient essentiellement de sources agricoles (élevages, épandages d'engrais).

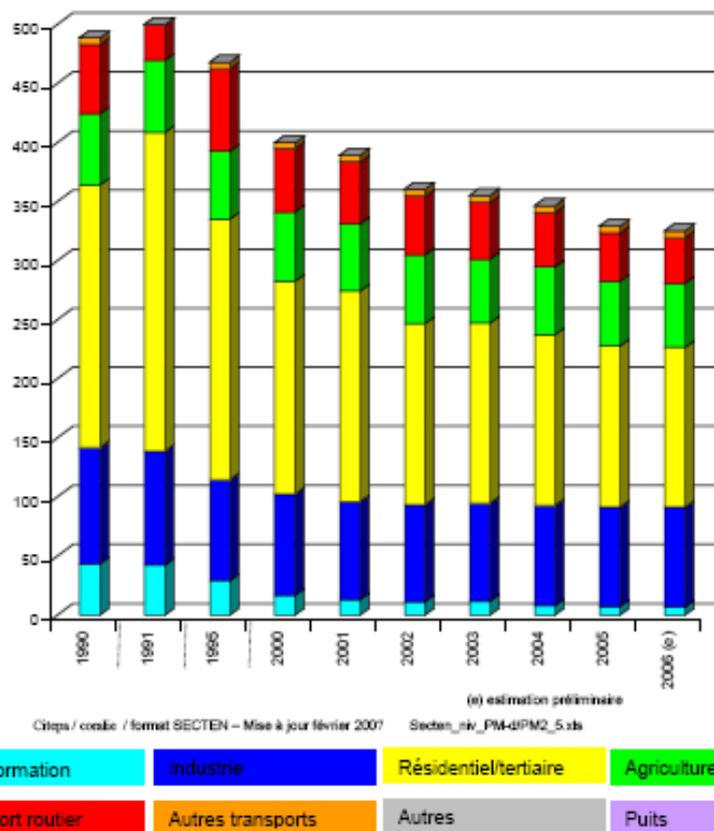
De plus, comme la plupart des polluants atmosphériques, les particules peuvent être d'origine anthropique (liée à l'activité humaine) ou naturelle (sables du Sahara, etc.).

En outre, les particules, notamment les PM<sub>2,5</sub> (de taille inférieure à 2,5 µm) sont des polluants qui peuvent être transportés à longue distance, et dans certaines situations des apports extérieurs contribuent de façon prépondérante aux concentrations mesurées dans l'air ambiant.

*Emissions atmosphériques de PM<sub>10</sub> primaires par secteurs en France métropolitaine (en kilotonnes)*



*Emissions atmosphériques de PM<sub>2,5</sub> primaires par secteurs en France métropolitaine (en kilotonnes)*



**IV – MESURES PERENNES DE REDUCTION DES EMISSIONS**

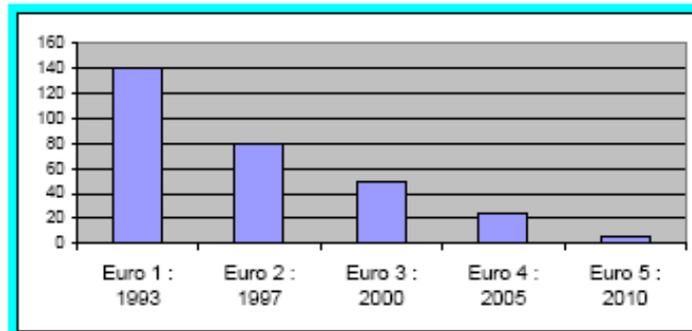
Concernant la réduction des émissions, il est nécessaire de tenir compte à la fois des textes adoptés et des actions menées aux niveaux européen, national et local, multiples échelles de travail pertinentes compte tenu des phénomènes en cause.

Les réductions d'émissions doivent par ailleurs couvrir les particules primaires mais également les polluants à l'origine de particules secondaires, comme les oxydes d'azote, combinés à l'ammoniac. Ces deux polluants sont couverts par le programme national de réduction des émissions du 8 juillet 2003 pris en application de la Directive 2001/81/CE du 23 octobre 2001 fixant des plafonds d'émissions pour chaque pays de l'Union Européenne. Ce programme est actuellement en révision et couvrira bientôt également les particules primaires, ce qui donnera une visibilité plus grande aux actions menées.

Concernant les particules primaires, on peut noter, pour les principaux secteurs émetteurs, les actions suivantes :

- Transports :

Concernant les transports diesel : des normes d'émission successives, applicables aux véhicules neufs (normes EURO), ont été négociées à Bruxelles par les Etats Membres de l'Union Européenne dont la France. Plus particulièrement, en 2005/2006, les négociations ont porté sur la norme EURO 5, qui aboutira compte tenu du niveau d'émissions exigé, à la généralisation des filtres à particules sur les véhicules particuliers neufs à l'horizon 2010.



Normes d'émission de particules applicables aux véhicules particuliers diesel, en mg/km

Les réductions d'émissions engendrées sont conséquentes, mais ne prennent effet qu'au fur et à mesure du renouvellement du parc de véhicules diesel.

Les normes applicables aux poids lourds diesel suivent les mêmes évolutions et de nouvelles normes EURO seront en négociation à la fin de l'année 2007. Le paramètre particules sera considéré.

Les évolutions sur la qualité des carburants ou encore l'encouragement des véhicules peu émetteurs (qu'il s'agisse de véhicules particuliers ou de poids lourds) contribuent également à la diminution des émissions de particules du transport routier.

Par ailleurs, des initiatives locales, souvent relatives aux transports, visent à juguler les émissions de particules dans les agglomérations, en fonction des sources et problématiques particulières dans les agglomérations concernées (réductions de vitesse sur les grands axes routiers existants, comme à Toulouse par exemple, restrictions de circulation en fonction de la norme EURO). Ces mesures peuvent être envisagées dans le cadre des plans de protection de l'atmosphère élaborés par les Préfets.

- Industries :

Il est procédé à la sévèrisation des valeurs limites d'émission en poussières par arrêtés ministériels applicables aux installations classées (exemples des secteurs du verre ou encore des installations de combustion), avec pour conséquence notamment l'équipement des industriels en systèmes de dépoussiérage.

*Illustration : pour le secteur du verre, la valeur limite est passée de 50 ou 150 mg/Nm3 selon les installations (en 1996) à 30 mg/Nm3 (en 2003) ; ceci conduira à une division par 4 des émissions du secteur verrier à l'horizon 2008 (passage de 2 à 0,5 kt émis)*

- Résidentiel-tertiaire :

La combustion du bois dans le secteur domestique représente la plus large part des émissions de particules de ce secteur.

La politique de l'Etat dans ce domaine consiste en une réorientation des aides et de la communication publiques sur le chauffage au bois (ADEME, crédits d'impôts) en faveur des installations les moins polluantes, par la mise en place de critères de performance notamment. Il convient de privilégier l'usage du bois-combustible dans des chaudières industrielles ou de collectivités, dont la taille est suffisante pour permettre la mise en place de procédés de dépollution (électro-filtres ou filtres à manche) à un coût économiquement acceptable.

## ANNEXE 2

## RECOMMANDATIONS SANITAIRES

L'information de la population concernant les recommandations sanitaires devra faire l'objet d'une attention particulière.

L'arrêté interministériel du 11 juin 2003 relatif à l'information du public en cas de dépassement ou de risque de dépassement des seuils d'information et de recommandation ou des seuils d'alerte résume les conduites à tenir lors des épisodes de pollution atmosphérique édictées par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France dans son avis du 18 avril 2000. Cet avis est reproduit ci-dessous.

Je vous invite à veiller à ce que les conseils et les recommandations énoncés dans cet avis soient largement relayés dans les crèches et établissements scolaires, les maisons de retraite, auprès des organisateurs d'activités physiques et sportives (clubs, centres de vacances et de loisirs...) et tout particulièrement auprès des personnes très sensibles (patients souffrant d'une pathologie chronique, asthmatiques, insuffisants respiratoires ou cardiaques...) ou qui peuvent s'avérer sensibles (personnes âgées).

**Avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (section des milieux de vie)  
relatif aux conduites à tenir lors des épisodes de pollution atmosphérique  
Séance du 18 avril 2000**

Considérant le droit à l'information inscrit dans l'article 4 de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30 décembre 1996 ;

Considérant la procédure d'alerte, les mesures d'urgence et d'information sur la qualité de l'air prévues aux titres II et III du décret n° 98-380 du 6 mai 1998 ;

Considérant l'arrêté du 17 août 1998 relatif aux seuils de recommandation et aux conditions de déclenchement de la procédure d'alerte ;

Considérant la directive 1999/30/CE du conseil du 22 avril 1999 relative à la fixation de valeurs limites pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant ;

Considérant les consignes sanitaires fournies en annexe des avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France des 27 avril 1995, 6 juin 1996, 4 juillet 1996, 1<sup>er</sup> octobre 1997 relatifs à l'ozone, aux particules en suspension, au dioxyde d'azote et au dioxyde de soufre ;

Considérant l'existence d'une sensibilité individuelle à la pollution atmosphérique, sensibilité dont les critères prédictifs sont difficiles à établir, les personnes sensibles ne constituant pas un groupe homogène ;

Considérant que certaines activités physiques ou certains déplacements en proximité du trafic automobile peuvent conduire à une exposition accrue des individus à la pollution atmosphérique ambiante ;

Considérant la nécessité pour les responsables de collectivités, notamment d'enfants, de pouvoir disposer de consignes précises sur les conduites à tenir lors des épisodes de pollution atmosphérique,

**Le Conseil :**

Souligne que la situation lors des épisodes de pollution ne justifie pas des mesures de confinement ; il convient donc de ne pas modifier les pratiques habituelles d'aération et de ventilation ;

Attire l'attention des professionnels de santé, notamment des médecins généralistes, pédiatres, allergologues et pneumologues, sur l'existence d'une sensibilité individuelle aux polluants atmosphériques ; pour un enfant comme pour un adulte c'est l'expérience ou, chez un patient l'évolution de sa maladie qui permet de savoir si la pollution atmosphérique a un impact perceptible sur sa santé ;

9/12

Demande aux parents et à tous les personnels s'occupant d'enfants (puéricultrices, assistantes maternelles, enseignants, éducateurs, responsables d'éducation physique et sportive) d'être vigilants vis à vis de l'apparition de symptômes évocateurs (toux, gêne respiratoire, irritation de la gorge, des yeux) lors des épisodes de pollution et de ne pas hésiter à prendre un avis médical ; ces pics pourraient, en effet, révéler une sensibilité particulière de certains enfants. Il convient également de ne pas aggraver les effets de cette pollution en ajoutant des facteurs irritants : fumée de tabac, utilisations de solvants ;

Conseille aux parents d'enfants asthmatiques de signaler l'asthme de leur enfant aux responsables de la structure qui l'accueille. Il est rappelé qu'en milieu scolaire l'enfant asthmatique peut bénéficier d'un projet d'accueil individualisé (PAI) ;

Recommande aux patients souffrant d'une pathologie chronique, asthmatiques, insuffisants respiratoires ou cardiaques de respecter rigoureusement leur traitement de fond, d'être vigilants par rapport à toute aggravation de leur état et de ne pas hésiter à consulter leur médecin ;

Rappelle aux patients asthmatiques qui sont sujets à des crises d'asthme déclenchées par l'effort qu'ils peuvent, lors des épisodes de pollution atmosphérique, avoir recours à un bronchodilatateur inhalé en prévention, selon les recommandations de leur médecin traitant.

GROUPES	ACTIVITES	DEPASSEMENT	
		Seuil d'information	Seuil d'alerte
Enfants âgés de moins de 6 ans  (crèches, écoles maternelles)	Déplacements habituels  (domicile – lieu de garde ou école)	Ne pas modifier les déplacements habituels	Ne pas modifier les déplacements indispensables mais éviter les promenades
	Récréation ou temps équivalent	Laisser les enfants s'aérer et ne pas modifier les activités prévues sauf pour les sujets connus comme étant sensibles ou qui présenteraient une gêne à cette occasion ; pour eux, éviter les exercices physiques intenses et privilégier les activités calmes	Eviter les activités à l'extérieur

GROUPES	ACTIVITES	DEPASSEMENT	
		Seuil d'information	Seuil d'alerte
Enfants âgés de 6 à 15 ans  (écoles primaires, collèges, centres aérés...)	Déplacements habituels  (domicile – lieu de garde ou école)	Ne pas modifier les déplacements habituels	Ne pas modifier les déplacements habituels
	Récréation ou temps équivalent sans activité sportive organisée	Laisser les enfants s'aérer normalement	Eviter les activités à l'extérieur

10/12

Activités sportives	Ne pas modifier les activités sportives, sauf pour les sujets connus comme étant sensibles ou qui présenteraient une gêne à cette occasion ; privilégier pour eux les exercices physiques moins intenses, voire suspendre leur activité	Eviter les sports extérieurs et privilégier, à l'intérieur des locaux, les exercices physiques d'intensité moyenne ou faible  NB : un exercice physique d'intensité moyenne n'oblige pas à respirer par la bouche
Compétitions sportives	Ne pas modifier les compétitions sauf pour les sujets connus comme étant sensibles ou qui présenteraient une gêne à cette occasion ; il leur est recommandé de s'abstenir de concourir	Reporter toute compétition, qu'elle soit prévue à l'extérieur ou à l'intérieur des locaux
NB : dans le cas de l'ozone, dans les régions où le seuil d'information est franchi fréquemment il est recommandé, pendant les périodes estivales, d'organiser les activités sportives en matinée (avant 12 heures)		

GROUPES	ACTIVITES	DEPASSEMENT	
		Seuil d'information	Seuil d'alerte
Adolescents et adultes	Déplacements	Ne pas modifier les déplacements prévus	Ne pas modifier les déplacements prévus
	Activités sportives	Ne pas modifier les activités sportives, sauf pour les sujets connus comme étant sensibles ou qui présenteraient une gêne à cette occasion ; privilégier pour eux les exercices physiques moins intenses, voire suspendre leur activité	Eviter à l'extérieur des locaux, les activités sportives violentes et les exercices d'endurance  Privilégier les activités sportives dans les gymnases pour les personnes connues comme étant sensibles ou qui présenteraient une gêne à cette occasion, adapter ou suspendre l'activité physique en fonction de la gêne ressentie
	Compétitions sportives	Ne pas modifier les compétitions sauf pour les sujets connus comme étant sensibles ou qui présenteraient une gêne à cette occasion ; il leur est recommandé de s'abstenir de concourir	Déplacer, dans la mesure du possible, les compétitions prévues à l'extérieur des locaux  NB : il incombe aux sportifs de haut niveau de juger de l'opportunité de leur participation à la compétition, en fonction de leur expérience et de l'avis de leur médecin
	NB : dans le cas de l'ozone, dans les régions où le seuil d'information est franchi fréquemment il est recommandé, pendant les périodes estivales, d'organiser les activités sportives en matinée (avant 12 heures)		

11/12

## ANNEXE 3

## RECOMMANDATIONS COMPORTEMENTALES

En cas de dépassement du seuil de 80 µg/m<sup>3</sup> :

Les recommandations visées ci-dessous concernent les émissions primaires de particules.

- réduire les vitesses de tous les véhicules
- pratiquer le covoiturage, utiliser les transports en commun
- pour les émetteurs industriels, s'assurer du bon fonctionnement des dispositifs de dépoussiérage
- éviter d'allumer des feux d'agrément (bois)
- reporter les activités de brûlage de déchets verts (y compris l'écobuage).

En cas de dépassement du seuil de 125 µg/m<sup>3</sup> :

Les recommandations visées ci-dessous concernent les émissions primaires et les émissions de polluants à l'origine des particules secondaires.

- limiter l'usage des véhicules diesel non équipés de filtres à particules
- limiter les transports routiers de transit
- pour les émetteurs industriels, limiter les émissions de particules et d'oxydes d'azote
- éviter le chauffage par le bois et le charbon
- limiter les activités de loisir génératrices de particules (manifestations publiques de sports mécaniques, feux d'artifice, etc.)
- limiter l'usage d'outils d'entretien non électriques
- reporter les épandages agricoles d'engrais.

## Annexe 3 : Avis du CSHPF du 6 juin 1996 relatif au projet de directive concernant les particules en suspension dans l'atmosphère

CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE

AVIS

RELATIF AU PROJET DE DIRECTIVE CONCERNANT  
LES PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'ATMOSPHERE

6 juin 1996

Considérant l'avis du Conseil rendu le 1er juillet 1993 concernant la révision des valeurs limites relatives aux teneurs en particules en suspension dans l'atmosphère,

Considérant, que par delà la diversité des populations, des situations géoclimatiques et des sources d'émission (donc de la nature des particules mesurées), les résultats des nombreux travaux publiés au plan international montrent une grande cohérence et une grande logique dans les manifestations sanitaires observées (altération de la fonction respiratoire, prévalence ou incidence de phénomènes irritatifs, excès de crises d'asthme, de recours aux soins d'urgence ambulatoires ou hospitaliers, de mortalité spécifique),

Considérant les résultats de travaux publiés depuis 1991 montrant l'impact à court terme sur la mortalité générale ou spécifique (respiratoire et/ou cardio-vasculaire) de l'exposition aux particules et considérant les résultats d'études menées sur deux cohortes de survie aux Etats-Unis montrant un impact à long terme de la pollution particulaire,

Considérant les récentes technologies qui ont permis de tester des modèles animaux exposés à une atmosphère urbaine concentrée et bien caractérisée sur le plan granulométrique, lesquels confirment les phénomènes d'inflammation des voies respiratoires, de broncho-constriction, de réduction possible de la fonction bactéricide des macrophages ainsi qu'une plus grande sensibilité avec l'âge et la présence d'une bronchite chronique,

Considérant en l'état actuel des connaissances, que c'est moins l'exposition de pointe, brève (quelques minutes ou heures), que l'exposition sur la durée (un ou plusieurs jours) qui est à craindre,

Le Conseil :

1° Conclut que les particules en suspension représentent, d'un point de vue sanitaire, un indicateur majeur de qualité de l'air mais qu'il convient d'être prudent, en l'état actuel des connaissances, avant de leur attribuer spécifiquement la totalité des effets biologiques et sanitaires observés, tant sont fortes et variables les corrélations entre les divers polluants présents dans l'air.

2° Prend en compte les résultats des dernières études qui montrent que l'essentiel des effets attribuables aux particules est le fait de celles inférieures à 2 - 3 µm de diamètre (PM 2,5), leur taille leur permettant d'atteindre les voies respiratoires les plus profondes avec un taux de déposition élevé. Si leur masse, en regard de l'ensemble des PM10 est relativement modeste, leur nombre est beaucoup plus élevé et la surface de contact avec les muqueuses des

voies aériennes est considérablement plus grande. En raison de leur origine (processus de combustion et chimie atmosphérique), leur composition (teneur en acides, métaux, sulfates et hydrocarbures aromatiques polycycliques ... etc) leur confère une plus grande toxicité voire génotoxicité. Mais, les données météorologiques sont aujourd'hui largement insuffisantes pour fonder des valeurs de référence sur les PM<sub>2,5</sub>.

3° Observe que les populations sensibles sont les enfants et personnes âgées, les personnes présentant des pathologies chroniques des voies respiratoires ainsi que celles atteintes de maladies cardio-vasculaires; que ces populations sont d'autant plus sensibles que leur pathologie est importante.

4° Recommande que les seuils à partir desquelles les personnes sensibles doivent être informées pour qu'elles se protègent doivent être les mêmes dans tous les pays européens soumis à la directive.

5° Recommande que la stratégie d'implantation des capteurs permette de distinguer les ambiances de proximité de sources (trafic routier, émissions industrielles) et les ambiances représentatives de l'exposition urbaine de fond.

6° Propose que les capteurs représentatifs des pollutions de proximité soient utilisés pour apprécier les risques encourus par les populations qui résident ou qui travaillent aux abords de ces sources de pollution et servent à la politique de réduction des rejets polluants concernant ces sources.

Et, propose que seules les expositions urbaines de fond soient utilisées pour caractériser l'exposition de la population générale et apprécier le respect des valeurs de référence dans la future directive concernant les particules en suspension, en veillant à ce que ces principes d'organisation de la surveillance de la qualité de l'air soient les mêmes pour les différents pays de l'Union Européenne.

7° Propose que le contenu des messages d'information à caractère sanitaire en cas de dépassements des seuils de précaution ou d'alerte soient semblables à ceux diffusés lors d'une pollution par l'ozone. Le contenu des messages figure en annexe.

8° Souhaite que l'indicateur global de pollution mis en place en France par le ministère de l'environnement et appelé "ATMO" soit accompagné d'une information sur les risques pour la santé et qu'il soit en concordance avec les valeurs seuils d'information du public fixées par les réglementations européennes et nationales en vigueur.

9° Demande que des études soient réalisées sur l'exposition individuelle des citoyens et les risques encourus du fait du poids ou du nombre de particules inhalées, en particulier par les enfants et lors d'activités ou de séjours dans des lieux fortement pollués. Demande aussi que soient conduites des études pour caractériser l'exposition aux particules fines (PM<sub>2,5</sub>) dans l'air extérieur (teneur, nature ...) afin de préparer une future révision des valeurs de référence pour les particules en suspension, par référence aux recommandations de l'Agence américaine de l'environnement;

10° Recommande des objectifs de réduction plus ambitieux que ceux évoqués dans son avis de juillet 1993 pour assurer la protection des enfants et des asthmatiques et de ce fait des valeurs de référence fondées sur la mesure des particules de diamètre aérodynamique inférieure à 10µm (PM10) :

- 30 µg/m<sup>3</sup> en moyenne annuelle des teneurs journalières comme objectif de qualité,
- 80 µg/m<sup>3</sup> en moyenne mobile 24 h des valeurs horaires des différents capteurs des réseaux comme seuil de précaution, au delà duquel, les populations les plus sensibles doivent être informées afin qu'elles puissent prendre des mesures de précaution,
- 125 µg/m<sup>3</sup> en moyenne mobile 24 h comme seuil d'alerte pour la population générale, information qui devrait être accompagnée de mesures visant à réduire les principales sources d'émissions de particules, qu'elles soient fixes ou mobiles.

11° Demande que le déclenchement de l'information soit fait quand il y a un dépassement concomitant pour au moins deux capteurs représentatifs de l'exposition de fond du réseau.

12° Propose qu'un calendrier soit établi par l'Union Européenne pour permettre aux Etats membres de prendre les dispositions pour se conformer à ces dispositions (achat des capteurs adaptés à la mesure des PM10 et susceptibles d'évoluer vers la mesure des PM 2,5, reconfiguration des réseaux de surveillance ...). Le délai d'application ne devrait pas être supérieure à 2 ans après la publication de la directive sur les particules en suspension.

13° Recommande qu'à titre de transition, en attendant une éventuelle introduction d'une norme PM 2,5, les capteurs actuels de fumées noires (FN) soient préservés là où ils existent ; ils permettront en effet de comparer les résultats des mesures PM10 et des FN pour assurer la continuité des chroniques de qualité de l'air et semblent par ailleurs plus représentatifs que les capteurs de PM10 des particules issues des processus de combustion. Les résultats des capteurs des FN ne peuvent en revanche servir à calculer les moyennes citées au point 10.

*Cet avis ne peut être diffusé que dans sa totalité sans suppression ni ajout*

ANNEXE : CONSIGNES SANITAIRES
-------------------------------

**\* A PARTIR DU SEUIL DE PRECAUTION**

Il est recommandé aux populations sensibles :

- d'éviter toutes les activités physiques et sportives intenses augmentant de façon importante le volume d'air et de polluants inhalés ;
- de veiller à ne pas aggraver les effets de cette pollution par d'autres facteurs irritants, tels l'usage de solvants sans protection appropriée, et surtout par la fumée de tabac qui joue un rôle majeur dans la survenue notamment de l'expression clinique de l'allergie respiratoire et de l'asthme ;
- de respecter scrupuleusement son traitement médical en cours à visée respiratoire ou de l'adapter sur avis du médecin

**\* A PARTIR DU SEUIL D'ALERTE**

Il est recommandé à l'ensemble de la population :

- d'éviter toutes les activités physiques et sportives intenses augmentant de façon importante le volume d'air et de polluants inhalés ;
- de veiller à ne pas aggraver les effets de cette pollution par d'autres facteurs irritants, tels l'usage de solvants sans protection appropriée, et surtout par la fumée de tabac qui joue un rôle majeur dans la survenue notamment de l'expression clinique de l'allergie respiratoire et de l'asthme ;

et aux personnes sous traitement thérapeutique à visée respiratoire, de le respecter scrupuleusement ou de l'adapter sur avis du médecin.

## Annexe 4 : Recommandations du CSHPF du 16 novembre 1999 sur la prise en compte des particules en suspension dans l'atmosphère dans les procédures d'information et d'alerte

### CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE

#### Section des milieux de vie

#### Recommandations sur la prise en compte des particules en suspension dans l'atmosphère dans les procédures d'information et d'alerte

Séance du 16 novembre 1999

Considérant les nombreuses données épidémiologiques et expérimentales faisant état des effets des particules fines sur la santé,

Considérant qu'en l'état actuel des connaissances épidémiologiques, ces effets sont toujours associés à des teneurs de particules moyennées sur une période d'au moins 24 heures et non à des valeurs horaires,

Considérant que si, pour des raisons pratiques, les concentrations moyennes de particules sont calculées, le plus souvent, de minuit à minuit, notamment dans les études écologiques temporelles, elles couvrent aussi parfois d'autres plages horaires de 24 heures, par exemple de 8 heures à 8 heures,

Considérant que le délai entre l'accroissement des teneurs particulaires et l'effet sanitaire à court terme s'étend sur une période allant de un à quelques jours,

Considérant l'intérêt sanitaire et pédagogique des procédures d'information et d'alerte destinées à assurer la protection des personnes, en particulier les plus fragilisées,

Considérant que l'indice ATMO intègre le paramètre « particules » et qu'il est important de maintenir une cohérence dans les différents outils d'information du public et des décideurs,

Considérant l'avis du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France du 6 juin 1996, relatif au projet de directive concernant les particules en suspension dans l'atmosphère,

Considérant les avis du Conseil National de l'Air, du 16 février 1999 relatif à la gestion des épisodes de pollution et du 7 avril 1999 relatif à l'indice ATMO,

Considérant la directive européenne du 22 avril 1999 qui, dans son article 10 « Rapport et réexamen », prend en considération la question de savoir si des seuils d'alerte peuvent être fixés, sur les particules en suspension dans l'atmosphère ou sur certaines fractions granulométriques d'entre elles ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ),

le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France :

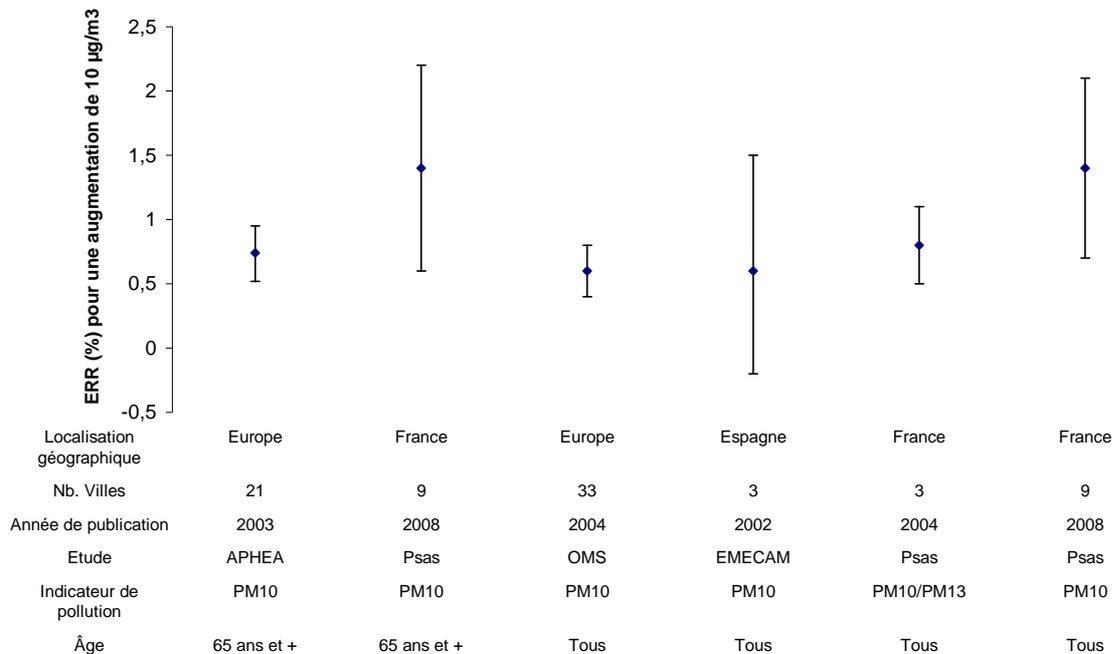
- estime que les particules fines en suspension dont les effets sanitaires ont été largement décrits dans la littérature internationale doivent entrer dans une procédure d'alerte, au même titre que les autres polluants qui y figurent déjà,

- avait, dans son précédent avis du 6 juin 1996, recommandé comme seuil de précaution et d'alerte, des valeurs de référence exprimées en moyennes mobiles sur 24 heures ; le choix de ces moyennes mobiles, c'est-à-dire de valeurs qui évoluent au cours des heures, obéissait à une double logique : un souci d'anticipation des épisodes de pollution et la nécessité de représenter l'exposition des 24 heures précédentes,
- se félicite qu'un réseau ait testé l'application des moyennes mobiles et publié ses résultats sur la gestion des procédures d'information et des mesures d'urgence pour les particules fines en suspension,
- estime que d'un point de vue opérationnel, il appartient aux gestionnaires des réseaux de surveillance de qualité de l'air de choisir les modalités les plus adéquates leur permettant de respecter les recommandations, soit en utilisant les moyennes mobiles, soit en considérant des équivalences en valeurs horaires, soit en ayant recours à des modèles de prévision, approche que le Conseil encourage vivement car c'est la seule qui puisse garantir la diffusion, en temps utile, des messages sanitaires et des informations sur les activités responsables de l'épisode de pollution,
- souhaite que ces différentes modalités soient testées par plusieurs réseaux de surveillance de la qualité de l'air, en tenant compte de la diversité des situations locales, de façon à ce qu'un bilan puisse être dressé,
- estime qu'un tel bilan constitue un des éléments de nature à consolider la position française dans les discussions au niveau européen.

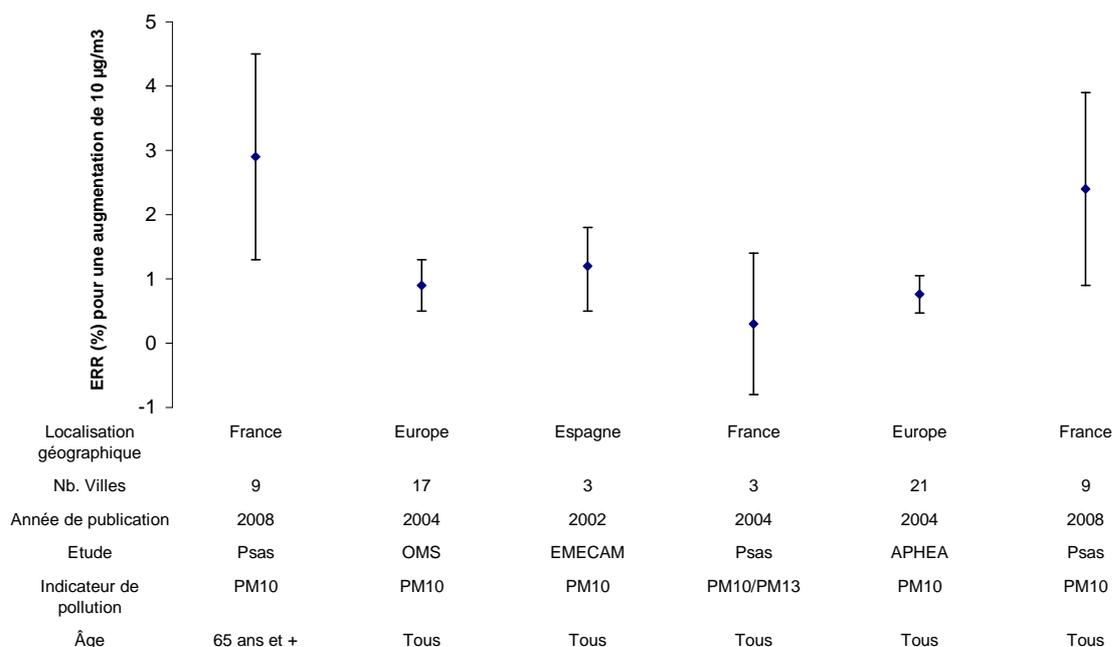
*Cet avis ne peut être diffusé que dans sa totalité, sans suppression ni ajout.*

## Annexe 5 : Excès de risques relatifs (ERR) (%) et leurs intervalles de confiance à 95 % obtenus dans le cadre de méta-analyses et études multicentriques européennes.

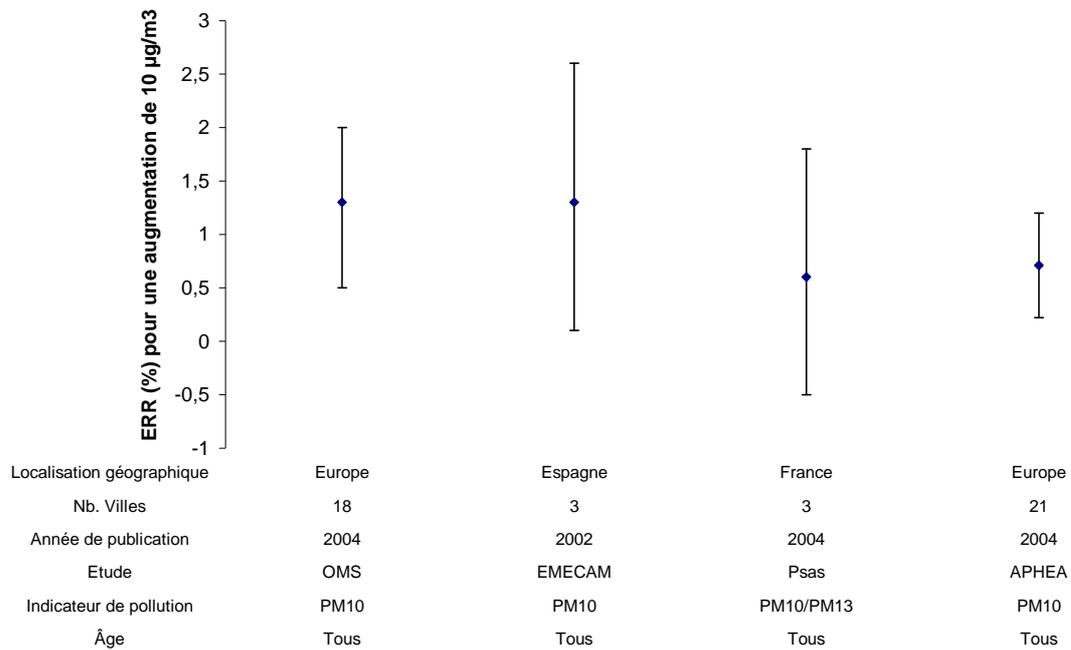
### Mortalité toutes causes non accidentelles



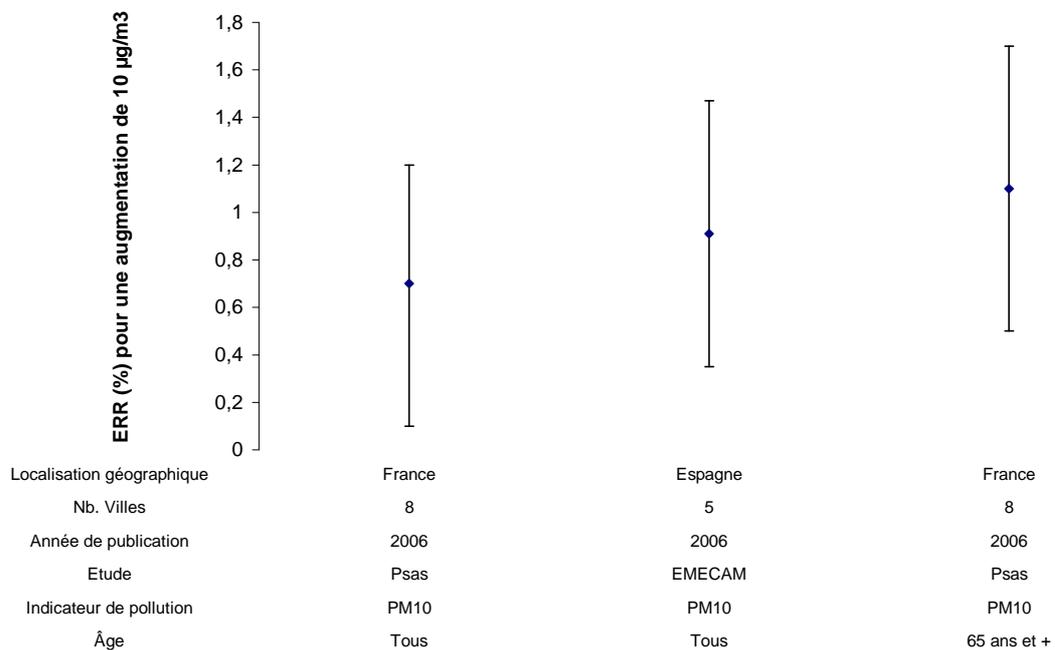
### Mortalité pour causes cardiovasculaires



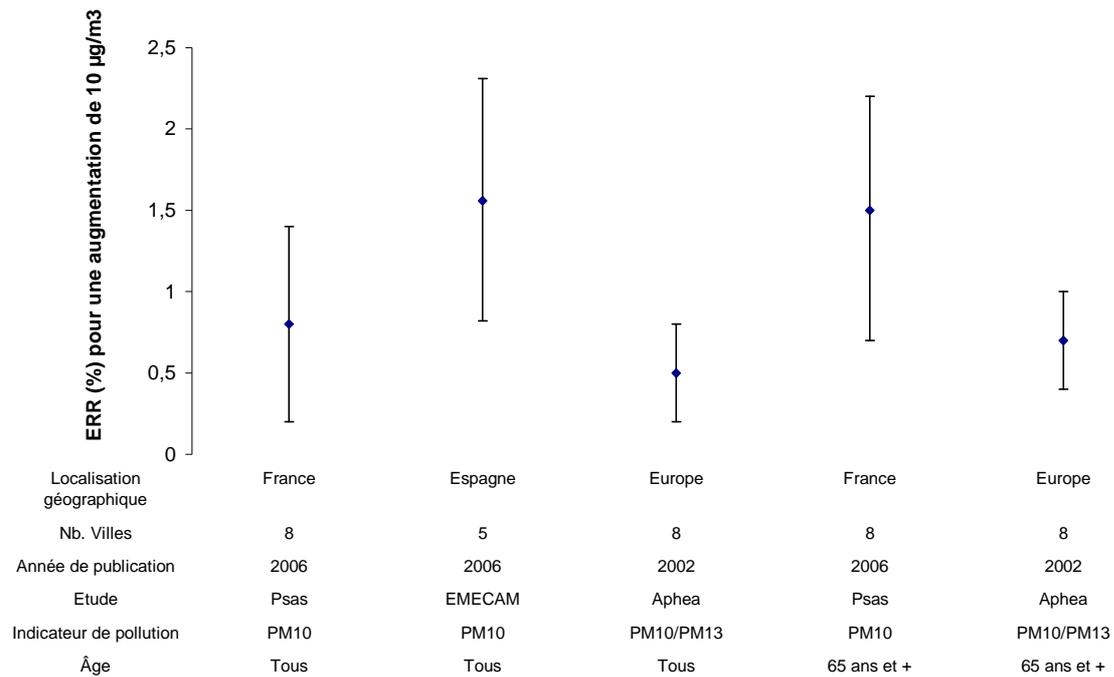
### Mortalité pour causes respiratoires



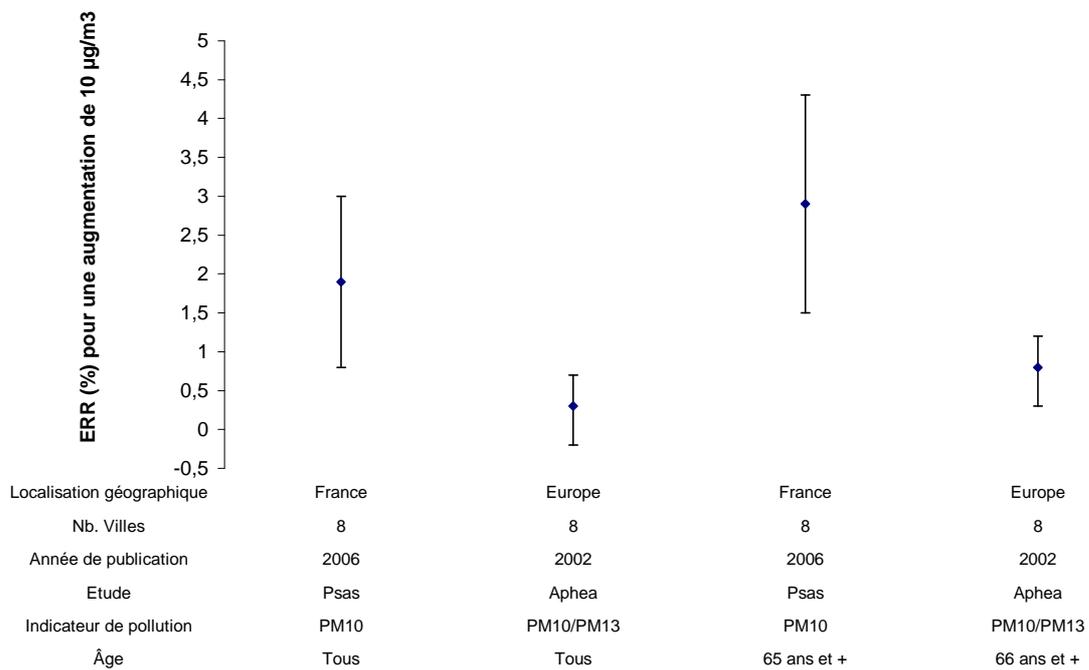
### Hospitalisations pour maladies cardio-vasculaires



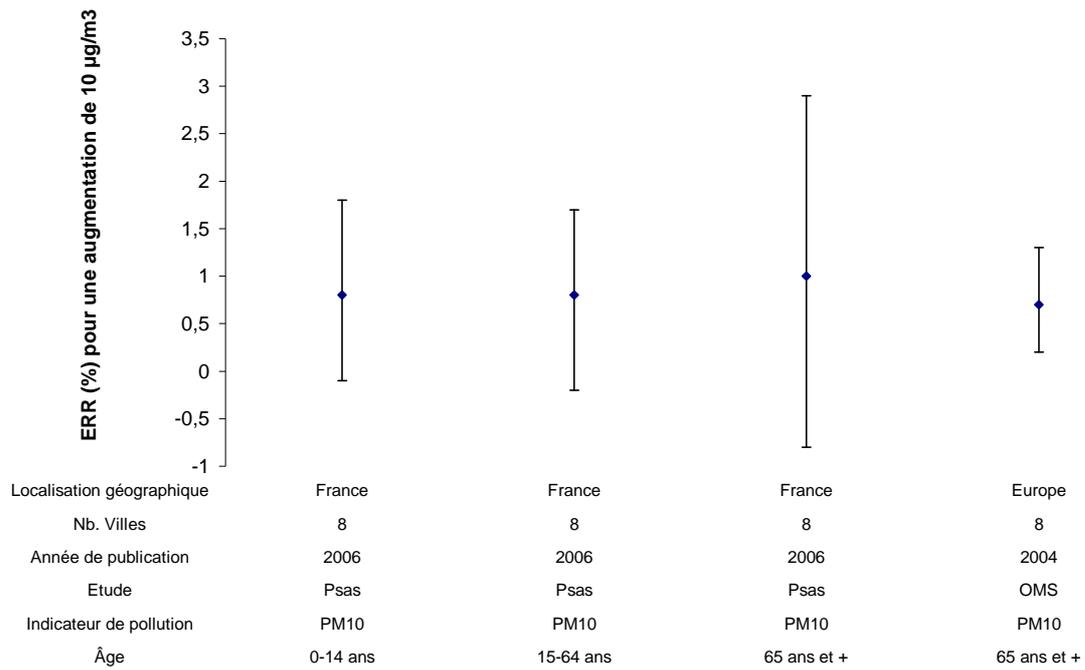
### Hospitalisations pour maladies cardiaques



### Hospitalisations pour cardiopathies ischémiques



Hospitalisations pour maladies respiratoires



## Annexe 6 : Populations sensibles, interaction : difficultés méthodologiques

- Les notions d'interaction statistique (ou modification de la mesure de l'effet d'un facteur par un autre facteur) et d'interaction biologique (correspondant ici à un effet biologique des particules différent sur l'organisme en fonction de caractéristiques biologiques ou comportementales des individus) sont distinctes. C'est un écart par rapport à un effet additif qui est considéré correspondre à une interaction biologique (Rothman and Greenland, 1998<sup>8</sup>) et qui serait vraisemblablement le plus pertinent pour identifier une population « sensible » qui serait ciblée par une action de santé publique ; or les modèles de régression utilisés dans les études épidémiologiques sont bien souvent de nature multiplicative (cas du modèle logistique), ce qui ne permet pas d'identifier directement un écart à un effet additif. L'utilisation de modèles multiplicatifs peut donc ne pas être la plus adaptée dans une optique de gestion du risque : par exemple, si une étude met en évidence un risque relatif de décès de 1,2 (c'est-à-dire une augmentation relative de 20 %) associé à une augmentation donnée des niveaux de particules dans l'air chez les sujets de 40 à 50 ans, ainsi que chez les sujets de 70 à 80 ans, ceci peut être interprété comme un effet similaire des particules dans ces deux classes d'âge ; or, comme le risque de base de décès (le risque de décès chez les sujets non exposés au polluant) est beaucoup plus important chez les sujets de 70 ans et plus que chez ceux de 40 à 50 ans, cette augmentation de 20 % se traduira par une augmentation absolue du nombre de décès attribuables aux particules bien plus important chez les sujets de 70 à 80 ans que chez ceux de 40 à 50 ans (Tableau X).
- Pouvoir identifier une différence dans l'effet d'un facteur entre deux groupes de sujets nécessite de pouvoir quantifier précisément l'effet de ce facteur dans les deux groupes ; si l'effectif d'un des deux groupes est limité, les fluctuations aléatoires dans l'effet estimé du polluant environnemental dans ce groupe pourront être importantes, donnant éventuellement l'impression (erronée) que cet effet est différent de celui observé dans l'autre groupe, ou conférant peu de puissance statistique à un test visant à mettre en évidence un écart dans la sensibilité de deux populations à un polluant.
- En pratique, de nombreuses études ont été conduites sur des groupes spécifiques, *a priori* sélectionnés pour la fréquence plus élevée de l'événement de santé considéré par rapport à la population générale (ce qui peut conférer une puissance statistique accrue à l'étude) ; de telles études, très nombreuses, ne permettent pas de comparer l'effet de l'exposition aux particules en suspension entre le sous-groupe et le reste de la population générale (en l'absence de groupe censé représenter la population générale).
- L'identification d'interactions statistiques implique, en l'absence d'hypothèses *a priori* définies et peu nombreuses, de nombreux tests ; les auteurs ne corrigent pas systématiquement les résultats des études pour prendre en compte ces tests multiples.

---

<sup>8</sup> Rothman, KJ and Greenland S. (1998) Modern epidemiology. 2nd edn, Lippincott-Raven, Philadelphia, PA.

**Tableau X : Exemple hypothétique illustrant que la modification de la mesure de l'effet d'un facteur sur le risque de décès dépend du type de modèle utilisé.**

**Ici, l'effet de l'exposition aux particules est le même quel que soit l'âge quand on le quantifie par un risque relatif sur une échelle multiplicative, alors qu'il est 5 fois plus important chez les sujets de 65 ans et plus quand on le quantifie par l'excès de mortalité (modèle additif). TI : taux d'incidence.**

<b>Population</b>	TI chez les sujets les moins exposés aux particules (pour 100 000 PA)	TI chez les sujets les plus exposés aux particules (pour 100 000 PA)	Risque relatif de mortalité associé à l'exposition aux particules	Excès de mortalité associé à l'exposition aux particules (cas pour 100 000 PA)
Adultes 40-50 ans	1,2	1,44	$1,44 / 1,2 = 1,2$	$1,44 - 1,20 = 0,24$
Adultes 70-80 ans	6,0	7,2	$7,2 / 6 = 1,2$	$7,2 - 6,0 = 1,2$



## Annexe 8 : Synthèse des déclarations publiques d'intérêts des experts par rapport au champ de la saisine

### RAPPEL DES RUBRIQUES DE LA DECLARATION PUBLIQUE D'INTERETS

<b>IP-A</b>	Interventions ponctuelles : autres
<b>IP-AC</b>	Interventions ponctuelles : activités de conseil
<b>IP-CC</b>	Interventions ponctuelles : conférences, colloques, actions de formation
<b>IP-RE</b>	Interventions ponctuelles : rapports d'expertise
<b>IP-SC</b>	Interventions ponctuelles : travaux scientifiques, essais, etc.
<b>LD</b>	Liens durables ou permanents (Contrat de travail, rémunération régulière ...)
<b>PF</b>	Participation financière dans le capital d'une entreprise
<b>SR</b>	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Parents salariés dans des entreprises visées précédemment)
<b>SR-A</b>	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Participation à conseils d'administration, scientifiques d'une firme, société ou organisme professionnel)
<b>VB</b>	Activités donnant lieu à un versement au budget d'un organisme

### SYNTHESE DES DECLARATIONS PUBLIQUES D'INTERETS DES MEMBRES DU CES PAR RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE

NOM	Prénom	Date de déclaration des intérêts
	<b>Rubrique de la DPI</b>	
	Description de l'intérêt	
<b>Analyse Afsset :</b>	<i>en cas de lien déclaré</i>	
<b>ALARY</b>	<b>René</b>	06 février 2007 27 mars 2008 13 juin 2008
	Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset :</b>	/	
<b>ANNESI-MAESANO</b>	<b>Isabella</b>	08 novembre 2006 27 novembre 2007
	<b>SR-A</b>	
	Participation au Conseil Scientifique de PRIMEQUAL-PREDIT II)	
<b>Analyse Afsset :</b>	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.	

<p><b>BLANCHARD Olivier</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> /</p>	<p>21 mars 2007</p> <p>05 février 2008</p> <p>20 juin 2008</p>
<p><b>CABANES Pierre-André</b></p> <p><b>LD</b></p> <p>Rédacteur en chef de la revue « Environnement, risques et Santé » aux Editions John Libbey (emploi complémentaire)</p> <p><b>SR-A</b></p> <p>Participation au Conseil Scientifique de l'Institut National de l'Environnement industriel et des Risques (INERIS)</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>09 février 2007</p> <p>23 janvier 2008</p> <p>27 mars 2008</p> <p>13 juin 2008</p>
<p><b>CAMPAGNA Dave</b></p> <p><b>SR</b></p> <p>Conjoint Médecin épidémiologiste à l'Institut national de Veille Sanitaire (InVS)</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>13 décembre 2006</p> <p>03 décembre 2007</p> <p>27 mars 2008</p> <p>12 juin 2008</p>
<p><b>DELMAS Véronique</b></p> <p><b>LD</b></p> <p>Directrice de Air Normand</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>22 mars 2007</p> <p>05 février 2008</p>
<p><b>ELICHEGARAY Christian</b></p> <p><b>IP-RE</b></p> <p>Expertises et avis scientifiques, rapports ponctuels sur des sujets de recherches pour le CNRS et des instances publiques (ministères, établissements publics)</p>	<p>21 mars 2007</p> <p>05 février 2008</p> <p>23 juin 2008</p>

	<p><b>IP-CC</b></p> <p>Conférences et actions de formation sur la pollution de l'air pour des universités (Orléans, Paris 7, Pau, Pays de l'Adour) et l'Institut supérieur d'agriculture de Beauvais</p> <p><b>SR-A</b></p> <p>Participation au Conseil Scientifique de la revue « Pollution atmosphérique »</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	
<p><b>EZRATTY Véronique</b></p> <p><b>Analyse Afsset :</b> /</p>	<p>Aucun lien déclaré</p>	<p>10 octobre 2007 13 juin 2008</p>
<p><b>GARNIER Robert</b></p> <p><b>Analyse Afsset :</b> /</p>	<p>Aucun lien déclaré</p>	<p>12 octobre 2006 20 février 2008 12 juin 2008</p>
<p><b>GLORENNEC Philippe</b></p> <p><b>LD</b></p> <p>Membre du Conseil d'Administration de l'Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air en Bretagne (Air Breizh)</p> <p><b>IP-AC</b></p> <p>Groupes de travail et validation de documents pour l'Institut national de Veille Sanitaire (InVS)</p> <p><b>IP-CC</b></p> <p>Membre de la Commission Scientifique des risques chroniques de l'Institut National de l'Environnement industriel et des Risques (INERIS) (2002-2005)</p> <p>Membre du Conseil Scientifique de la commission locale d'information et de surveillance pour Metaleurop Nord (2003-en cours)</p> <p>Membre du Conseil Scientifique « Risques sanitaires liés à la Vallée de l'Orbiel, Salsigne » pour la Préfecture de l'Aude (2006-2007)</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>		<p>23 novembre 2006 03 décembre 2007 27 mars 2008 16 juin 2008</p>

<p><b>KIRCHNER Séverine</b></p> <p><i>LD</i></p> <p>Ingénieur au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)</p> <p><i>IP-RE</i></p> <p>Rapport « Survey methods for Environmental Health Assessments » pour l'OMS</p> <p>Participation aux groupes de travail pour l'European Collaborative Action « Urban air, indoor environment an human exposure »</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>17 juin 2003</p> <p>27 mars 2008</p>
<p><b>LEFRANC Agnès</b></p> <p><i>IP-CC</i></p> <p>Formateur sur le thème « air et santé » à l'Institut national agronomique de Paris-grignon et l'Institut de formation en soins infirmiers de Necker (janvier 2007)</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>10 octobre 2007</p> <p>05 février 2008</p> <p>12 juin 2008</p>
<p><b>MILLET Maurice</b></p> <p><i>VB</i></p> <p>Encadrement de thèses et conventions de recherches scientifiques en collaboration avec TOTAL dans le cadre du CNRS</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>21 mars 2007</p> <p>07 décembre 2007</p> <p>27 mars 2008</p> <p>17 septembre 2008</p>
<p><b>MORCHEOINE Alain</b></p> <p><i>IP-CC</i></p> <p>Conférence sur les transports et l'environnement à l'Université de Cergy et l'École des hautes Études en Santé Publique (EHESP)</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>17 juillet 2003</p> <p>27 mars 2008</p>

<p><b>MOREL Yannick</b></p> <p><i>PF</i></p> <p>Quelques actions Renault</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>12 février 2007</p> <p>27 mars 2008</p> <p>23 juin 2008</p>
<p><b>MORIN Jean-Paul</b></p> <p><i>IP-SC</i></p> <p>Coordination du programme de recherche MAAPHRI (Multidisciplinary Approaches ti Airborne Pollutant Health Issues) pour la Communauté Européenne</p> <p><i>IP-RE</i></p> <p>Expertise scientifique pour la Communauté européenne (2004-2008) et pour le Health Effect Institute (2003-2004)</p> <p><i>IP-CC</i></p> <p>Conférencier : « Methodologies for the evaluation of cardio-respiratory impact of complex aerosols » pour EURO V (Milan, décembre 2003), « Organotypic cultures of lung slices for the study of complex aerosols lung toxicity » pour IVTOX (Birmingham, 2003) et « Methodologies for the evaluation of respiratory impact of complex aerosols » pour ACES/HEI (Denver, novembre 2003)</p> <p><i>IP-A</i></p> <p>Encadrement de thèses : co-tutelle Centre d'Étude et de Recherche technologique en Aérothermique et Moteurs (CERTAM)-INSERM en collaboration avec Renault dans le cadre de l'INSERM et contrat d'accompagnement Renault-CERTAM.</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>26 février 2007</p> <p>27 novembre 2007</p> <p>27 mars 2008</p> <p>19 juin 2008</p>
<p><b>PARIS Christophe</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> /</p>	<p>09 janvier 2006</p> <p>27 mars 2008</p> <p>20 juin 2008</p>

<p><b>PEUCH Vincent-Henri</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> /</p>	<p>11 février 2007</p> <p>29 novembre 2007</p> <p>13 juin 2008</p>
<p><b>POINSOT Charles</b></p> <p><b>LD</b></p> <p>Directeur de ATMO Nord-Pas de Calais</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>18 juin 2006</p> <p>12 juin 2008</p>
<p><b>RAMEL Martine</b></p> <p><b>SR</b></p> <p>Conjoint chez Vivendi Environnement</p> <p><b>SR-A</b></p> <p>Vice-présidente du Conseil d'administration de l'INERIS</p> <p>Participation au Conseil Scientifique de PRIMEQUAL-PREDIT II</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>24 juin 2003</p> <p>05 février 2008</p>
<p><b>SLAMA Rémy</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> /</p>	<p>10 octobre 2007</p> <p>12 juin 2008</p>
<p><b>SQUINAZI Fabien</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> /</p>	<p>10 octobre 2007</p>
<p><b>VENDEL Jacques</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> /</p>	<p>1<sup>er</sup> juillet 2005</p> <p>10 octobre 2007</p>

**SYNTHESE DES DECLARATIONS PUBLIQUES D'INTERETS DES MEMBRES DU GT PAR RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE**

<b>NOM</b>	<b>Prénom</b>	<b>Date de déclaration des intérêts</b>
<b>Rubrique de la DPI</b> Description de l'intérêt <b>Analyse Afsset :</b>		
<b>BAEZA</b>	<b>Armelle</b>	02 avril 2007 14 avril 2007 05 février 2008 12 septembre 2008
<b>IP-SC</b> Travaux scientifiques sur la réponse inflammatoire des cellules épithéliales des voies aériennes exposées à des particules diesel, en lien avec le GIE Renault-PSA-INSERM (2001-2003) <b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.		
<b>BLANCHARD</b>	<b>Olivier</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés -- aux milieux aériens »)	21 mars 2007 05 février 2008 20 juin 2008
Aucun lien déclaré <b>Analyse Afsset :</b> /		
<b>DELMAS</b>	<b>Véronique</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens »)	22 mars 2007 05 février 2008
<b>LD</b> Directrice de Air Normand <b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.		
<b>ELICHEGARAY</b>	<b>Christian</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens »)	21 mars 2007 05 février 2008 23 juin 2008
<b>IP-RE</b> Expertises et avis scientifiques, rapports ponctuels sur des sujets de recherches pour le CNRS et des instances publiques (ministères, établissements publics) <b>IP-CC</b> Conférences et actions de formation sur la pollution de l'air pour des universités (Orléans, Paris 7, Pau, Pays de l'Adour) et l'Institut supérieur d'agriculture de Beauvais		

	<p><b>SR-A</b></p> <p>Participation au Conseil Scientifique de la revue « Pollution atmosphérique »</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	
<b>LEFRANC</b>	<p><b>Agnès</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens »)</p> <p><b>IP-CC</b></p> <p>Formateur sur le thème « air et santé » à l'Institut national agronomique de Paris-grignon et l'Institut de formation en soins infirmiers de Necker (janvier 2007)</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>10 octobre 2007</p> <p>05 février 2008</p> <p>12 juin 2008</p>
<b>MULLOT</b>	<p><b>Jean-Ulrich</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> /</p>	<p>30 novembre 2005</p> <p>05 février 2008</p> <p>15 juillet 2008</p>
<b>RAMEL</b>	<p><b>Martine</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens »)</p> <p><b>SR</b></p> <p>Conjoint chez Vivendi Environnement</p> <p><b>SR-A</b></p> <p>Vice-présidente du Conseil d'administration de l'INERIS</p> <p>Participation au Conseil Scientifique de PRIMEQUAL-PREDIT II</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p>24 juin 2003</p> <p>05 février 2008</p>
<b>SLAMA</b>	<p><b>Rémy</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens »)</p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> /</p>	<p>10 octobre 2007</p> <p>12 juin 2008</p>
<b>VENDEL</b>	<p><b>Jacques</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens »)</p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset :</b> /</p>	<p>1<sup>er</sup> juillet 2005</p> <p>10 octobre 2007</p>

## Notes

---



))) **afsset** .)))

agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

253, avenue du Général Leclerc  
94701 Maisons-Alfort Cedex  
Tél. +33 1 56 29 19 30  
[afsset@afsset.fr](mailto:afsset@afsset.fr)  
[www.afsset.fr](http://www.afsset.fr)

ISBN 978-2-11-097832-5

