

**Université Libre de Bruxelles**

IGEAT

Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire

\* \* \*

Diplôme d'Etudes Spécialisées en Gestion de l'Environnement

**Analyse de données européennes sur la matière  
particulaires. Nécessité de révision des normes.**

Travail de Fin d'Etudes présenté par  
Mónica Gabriela Collado  
en vue de l'obtention du grade académique de  
Diplômée d'Etudes Spécialisées en Gestion de l'Environnement

Directeur: M. J. Kummer  
Assesseurs: M. W. Hecq  
M. C. Debrouwer  
Mme C. Bouland  
Mme A. Meurnes

Année Académique : 2005-2006

# Remerciements

---

Je tiens à remercier M. Jacques Kummer qui m'a guidée avec patience dans la réalisation de ce travail.

Un grand merci à mon compagnon Ricardo tant pour son encouragement que pour son soutien inconditionnel tout au long du DES.

Je remercie aussi Nathalie pour son aide avec la langue française et son engagement dans la correction de ce travail. De même, merci à Olivier pour son encouragement et ses conseils et à Audrey et Marinette pour la soigneuse relecture. Je voudrais remercier le Dr Declaire pour son aide concernant le chapitre sur la santé et M. De Brouwer pour son avis. Enfin, un grand merci à mes proches qui m'ont encouragée au cours de la réalisation de ce travail.

*La passion pour le bien-être et la qualité de vie est-elle un virus passager?  
Non, c'est une culture!  
Elle ne s'achète pas, elle s'installe tout doucement.*

*Marc Degrez*

## Avant-Propos

---

La pollution atmosphérique est un sujet d'actualité. Le trafic routier comme source de particules et d'autres polluants, l'effet de serre, les changements climatiques, les déchets dangereux et les nuisances que les différents types de pollution entraînent sur la santé de la population, sont quelques exemples des préoccupations qui rentrent dans la vie de tous les jours des citoyens européens.

Ainsi, ces préoccupations ont précipité l'aboutissement à de changements importants, tant au niveau des réglementations que de l'attitude des citoyens. Ceci dit, les médias, en général, ont parfois tendance à traiter les sujets d'actualité de façon émotionnelle.

Traiter le sujet de la pollution par les particules de manière plus neutre, plus objective, plus scientifique est le but de mon travail.

Plusieurs étudiants de ma promotion se sont également penchés sur la problématique des particules atmosphériques. Dès lors, ce travail fait partie intégrante d'une approche plus large sur les particules fines. Ainsi, Me Virginie Crabbe, M. Olivier Regniers et moi-même Gabriela Collado, nous participons à ce défi.

Le sujet est tellement vaste qu'il nous a été possible de réaliser des études à la fois différentes et complémentaires.

Me Crabbe traite dans son travail de fin d'études de la redéfinition des normes environnementales de qualité de l'air concernant les particules ultrafines, dans le cadre de la réglementation sur l'Enregistrement, l'Evaluation et l'Autorisation des Produits chimiques (REACH).

Cette étude sera réalisée sur base d'études scientifiques en expérimentation animale et leur extrapolation à l'organisme humain.

M. Regniers pour sa part, traite des différentes méthodologies de mesures et des instruments actuellement utilisés pour mesurer les particules ultrafines issues des moteurs diesels.

Quant à mon travail, il consiste dans l'analyse des différentes données européennes relatives aux particules fines (les caractéristiques générales, les impacts sur la santé sur base d'études épidémiologiques, le cadre juridique et la comparaison avec d'autres pays hors UE).

Ce travail vise à faire un état des lieux des différents aspects de la pollution par la matière particulaire, en ayant comme préoccupation centrale la santé humaine. Les réflexions sur ces données seront donc axées sur les impacts en termes de santé publique de la population européenne, tels qu'ils sont connus à ce jour.

## Résumé

---

La pollution atmosphérique, liée à l'émission de certaines substances dans l'atmosphère, est devenue depuis une vingtaine d'années un sujet de préoccupation croissante. Des substances émises, isolément ou à la suite de réactions chimiques, peuvent porter atteinte tant à la santé humaine qu'à notre environnement. De plus, la pollution atmosphérique constitue non seulement un problème local mais aussi transfrontalier.

En matière de santé publique, on parle aujourd'hui principalement de deux polluants : les particules et l'ozone troposphérique. Les études scientifiques attribuent aux particules fines des effets néfastes sur la santé, notamment l'augmentation du risque de mortalité. De manière générale, les effets sur la santé englobent des troubles respiratoires légers, la réduction de la fonction pulmonaire, l'aggravation de l'asthme, la bronchite chronique voire la diminution de l'espérance de vie. Dans ce contexte, les enfants constituent le groupe le plus vulnérable.

Par ailleurs, le patrimoine culturel et les écosystèmes sont aussi affectés.

L'émission directe des particules dans l'atmosphère est le résultat de procédés naturels mais aussi de procédés anthropiques. Ces derniers sont issus du secteur du transport (particulièrement des suies de diesel), de l'industrie et de l'agriculture.

Les particules ont été historiquement classifiées en fonction de leur diamètre aérodynamique car ce sont leurs propriétés aérodynamiques qui gouvernent leur transport dans l'air et leur dépôt dans le système respiratoire. Ces propriétés sont également associées à leur composition chimique et à leur source. Il est aussi habituel de les caractériser par leur concentration en masse (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Cependant, les plus petites des particules fines auxquelles les plus graves effets sur la santé sont attribués, ne représentent qu'une très faible partie de la masse totale des particules. Par contre, elles contribuent de manière importante à leur nombre total.

Jusqu'à présent, il existe au niveau européen des valeurs limites pour les fractions les plus grandes ( $\text{PM}_{10}$ ) des particules inhalables. A ce jour, ces valeurs limites se révèlent insuffisantes.

En septembre 2005, dans le cadre du programme CAFE (Clean Air for Europe), un projet de directive concernant la qualité de l'air ambiant en Europe, proposait de commencer à réglementer les particules fines sur base de recommandations de l'OMS. Les débats sur l'acceptation de cette réglementation sont encore en cours car selon certains, la valeur plafond proposée pour les  $\text{PM}_{2,5}$  serait trop laxiste. Dans la même ligne, une autre mesure proposée par la Commission en janvier 2006 fut de renforcer les normes d'émissions pour les moteurs diesel des voitures et des véhicules utilitaires légers en instaurant la norme Euro 5. Ceci devra permettre la réduction non seulement des niveaux d'émission des particules nocives mais aussi d'autres polluants précurseurs de ces dernières.

Les recherches scientifiques montrent qu'il faut s'intéresser aux particules les plus petites, à savoir les particules ultrafines et les nanoparticules. Actuellement, elles ne sont pas réglementées et il n'y a pas non plus un monitoring systématique de leurs concentrations dans l'air ambiant. Serait-il temps d'envisager une révision des normes?

# Table de matières

---

<b>1. Introduction</b>	8
<b>2. La matière particulaire et ses caractéristiques</b>	11
2.1. Les particules atmosphériques	11
2.1.1 Composition et quantification	12
2.1.2 Les différentes tailles de la matière particulaire. Définitions	14
2.2. Sources et rôle de différents secteurs	18
2.2.1 Les principales sources anthropiques	19
2.2.1.1. Le transport	19
2.2.1.2. L'industrie	22
2.2.1.3. Le secteur domestique	22
2.2.1.4. L'agriculture	23
2.2.2 Les émissions sectorielles	23
2.3. Mécanismes d'élimination et risque transfrontalier	25
2.3.1 Mécanismes d'élimination des particules	28
2.3.2 Risque transfrontalier	29
2.4. Aspects relatifs à la mesure des particules	31
2.4.1 Méthodes de mesure	32
2.4.1.1. Mesure à l'immission	32
2.4.1.2. Mesure des émissions des véhicules	34
2.4.2 Réseaux de mesure	34
2.4.2.1. Réseau des stations de mesures de la Région Bruxelles-Capitale	35
2.5. Conclusion-Résumé	37
<b>3. Les effets des particules sur la santé et sur l'environnement</b>	40
3.1. Les effets sur la santé	40
3.1.1. L'inhalation des particules, leur élimination et leur dépôt dans le système respiratoire	41
3.1.1.1. Le poumon et les mécanismes d'élimination ou de clearance pulmonaire	41
3.1.1.2. Les mécanismes de dépôt des particules	44
3.1.1.3. Facteurs qui influencent le dépôt des particules	47
3.1.2. Mécanismes d'action des particules	48
3.1.3. L'exposition humaine	49
3.1.3.1. Les véhicules à moteur diesel	51
3.1.4. Etudes épidémiologiques	52
3.1.4.1. Evaluation des effets de l'exposition	53
3.1.4.2. Résultats d'études à long et à court terme	55
3.1.4.2.1. Exposition aux particules à long terme	55
3.1.4.2.2. Exposition aux particules à court terme	56
3.1.4.2.3. Un exemple d'Evaluation d'Impact Sanitaire	59
3.1.4.2.4. Considération des incertitudes	62
3.1.5. Les groupes sensibles	62
3.1.5.1. Les enfants, un groupe sensible particulièrement touché	66
3.1.5.1.1. Effets sur le fœtus, le nouveau-né et le nourrisson	67
3.1.5.1.2. Effets sur le système respiratoire de l'enfant	67
3.1.5.1.3. Le lien avec le cancer	68

3.2. Les effets sur l'environnement	69
3.2.1. La végétation et les écosystèmes	69
3.2.2. La visibilité	70
3.2.3. Les matériaux	71
3.2.4. Lien avec le réchauffement climatique	71
3.3. Conclusion - Résumé	72
<b>4. Encadrement juridique de la pollution de l'air pour la matière particulaire</b>	<b>73</b>
4.1. Normes de qualité de l'air pour 3 pays occidentaux hors UE	73
4.1.1. La Suisse	73
4.1.2. Les Etats-Unis	75
4.1.3. Le Canada	77
4.2. La législation européenne concernant les PM	79
4.2.1. La Directive-cadre 96/62/CE et ses directives-filles	81
4.2.1.1. La Directive-cadre 96/62/CE	81
4.2.1.2. La Directive 1999/30/CE	83
4.2.2. Le Sixième Programme d'Action pour l'Environnement et le Programme "Air pur pour l'Europe"	86
4.2.2.1. Le Sixième Programme d'Action pour l'Environnement	86
4.2.2.2. Le Programme "Air pur pour l'Europe"	87
4.2.3. La Stratégie Thématique sur la pollution atmosphérique	88
4.2.4. La Proposition de directive concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe: commencer à réglementer les PM <sub>2,5</sub>	92
4.2.5. Directives Sectorielles: le cas des Transports	94
4.2.5.1. Les normes Euro	94
4.3. Conclusion-Résumé	97
<b>5. Conclusions</b>	<b>100</b>
<b>6. Annexes</b>	<b>105</b>
<b>7. Bibliographie</b>	<b>114</b>

# 1. Introduction

---

La pollution atmosphérique est devenue, depuis une vingtaine d'années, un sujet de préoccupation croissante au niveau mondial. Ceci est dû à l'émission de plusieurs substances dans l'atmosphère qui révèlent de plus en plus leurs effets nocifs tant sur la santé humaine que sur notre environnement.

Le processus d'industrialisation, qui a trouvé ses origines en Europe occidentale, marque, sans doute, le point de départ de ce phénomène. L'augmentation de la pollution était alors considérée comme la conséquence nécessaire et logique du développement économique et social. Ainsi, le smog, courant dans les grandes villes en développement, était le prix à payer pour la prospérité. L'utilisation du charbon tant par le secteur industriel que domestique, était la source principale d'énergie... et des particules polluantes en suspension dans l'air.

La suite chronologique des événements conduit inévitablement à des épisodes de mortalité importante à cause de la pollution atmosphérique. Décembre 2002 marque ainsi le 50<sup>ème</sup> anniversaire du plus grand pic de smog à Londres (London Ministry of Health, 1954 cité par Brunekreef et Holgate, 2002). Dans une population exposée de 8 millions d'habitants, plus de 4.000 personnes sont décédées suite à l'augmentation de plusieurs centaines de microgrammes par m<sup>3</sup> de fumées et d'anhydride sulfureux. Plus de 80% de ces décès étaient d'origine cardio-respiratoire. A cause des conditions météorologiques, les hauts niveaux de concentration de cette pollution acido-particulaire se sont maintenus plusieurs jours pour aboutir à des conséquences néfastes. Postérieurement, d'autres pics de pollution se sont aussi produits à Londres (en 1956, 1957 et 1962) avec de nombreux décès comme conséquence...

D'ailleurs, ces événements tragiques n'ont pas été les premiers. En 1930, un événement similaire s'était déjà produit en Belgique (Nemery, 2001). Dans la Vallée de la Meuse, siège de nombreuses industries (cokeries, aciéries, centrales électriques, usines de chaux, d'acide sulfurique, etc.), trois jours de temps anticycloniques avec inversion de la température avaient entraîné l'accumulation des polluants, causant un épais brouillard. Une soixantaine de morts fut alors constatée entre Huy et Liège, et quelques milliers de personnes furent affectées par des troubles respiratoires.

Heureusement, ces catastrophes ont été à l'origine de la mise en place d'une politique de "l'air propre", qui a considérablement réduit le risque de tels événements.

Au cours des dernières décennies, la qualité de l'air a bien évolué. La politique environnementale a incontestablement agit contre la poursuite de la dégradation de notre environnement. Selon la Commission européenne, ce fait est la preuve de la possibilité réelle de dissociation entre la croissance économique et les dommages causés à l'environnement (CE, 2001<sup>1</sup>).

Actuellement, grâce à l'emploi des technologies d'abattement des émissions, les rejets de différents secteurs (industrie, transport, domestique, ...) dans l'air ont diminué. De plus, la substitution progressive du charbon par d'autres combustibles a réduit l'importance du charbon comme source principale d'énergie dans la majorité des pays industrialisés.

En ce qui concerne la pollution particulaire, depuis l'époque des épisodes de forte mortalité, on est passé progressivement d'une pollution atmosphérique issue de sources fixes (l'industrie et le secteur domestique) à une pollution marquée par les sources mobiles (transport) (Extrapol, 1997 cité par INVS, 1999).

Même si, à l'heure actuelle, la qualité de l'air s'est considérablement améliorée, il subsiste des problèmes importants qui continuent à porter atteinte à la santé de la population. Plusieurs polluants sont associés à la diminution de la qualité de l'air. Aujourd'hui, on parle principalement de cinq polluants différents nocifs pour la santé, pour les écosystèmes et même pour le patrimoine culturel (les matériaux).

---

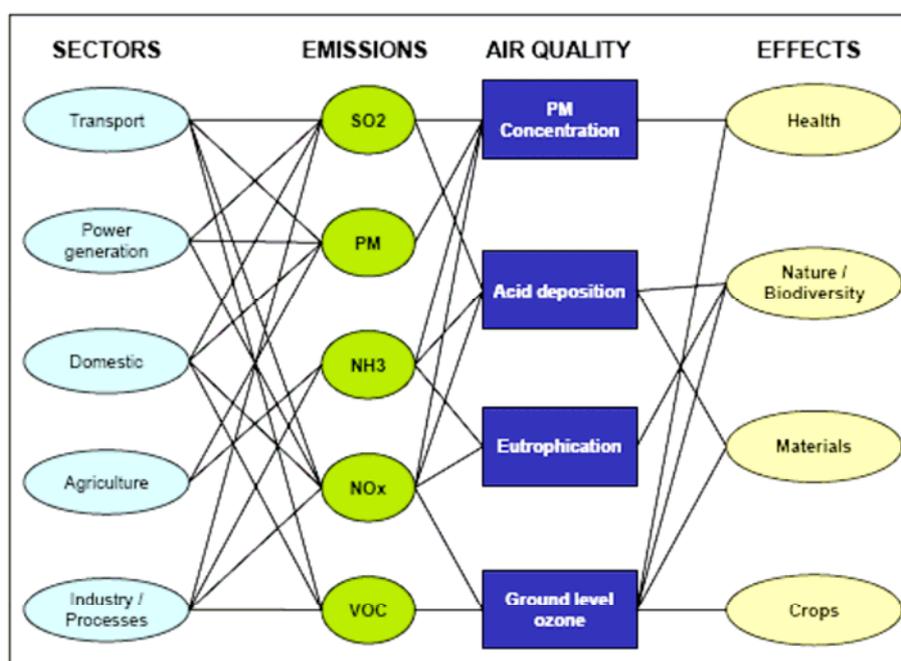
<sup>1</sup> Communication du programme CAFE : COM(2001)245 final.

La **Figure 1.1** schématise les impacts de ces polluants en termes de qualité de l'air et des effets qu'ils produisent tant sur la santé que sur l'environnement. Elle montre que plusieurs polluants contribuent au même effet et que des secteurs économiques importants sont responsables de leurs émissions.

En effet, les deux thèmes principaux de préoccupation sont, d'une part, les particules en suspension dans l'atmosphère (connues sous le nom de PM) et, d'autre part, l'ozone troposphérique. Ils présentent les effets les plus néfastes sur la santé en matière d'augmentation du risque de morbidité et mortalité. D'ailleurs, pour l'an 2000, on a estimé à 370.000 le nombre de décès prématurés à cause de ces polluants (348.000 ont été attribués aux particules uniquement) (Watkiss et al., 2005). Des problèmes aigus et chroniques sont à l'origine d'une réduction de l'espérance de vie de 8,6 mois, en moyenne, dans les 25 états membres. La réduction de ces polluants est ainsi devenue une priorité absolue pour la législation actuelle.

Les oxydes d'azote (NOx) et l'anhydride sulfureux (SO<sub>2</sub>) contribuent aussi aux impacts sur la santé et sont d'ailleurs des précurseurs des particules atmosphériques, de même que l'ammoniac (NH<sub>3</sub>). Ce dernier est émis principalement par le secteur agricole. Un quatrième précurseur correspond aux composés organiques volatils (COV). Ces derniers participent avec les NOx, sous l'effet du rayonnement solaire, à la formation de l'ozone troposphérique.

**Figure 1.1 : Polluants typiques émis par secteur, leurs interactions et leurs impacts principaux**



source : Annexe 2 COM(2005)446 final<sup>2</sup> (RAINS, CBA)

En plus des impacts directs de certains précurseurs de particules sur l'environnement, nous constaterons (dans le chapitre 3) que les particules exercent aussi des effets directs et indirects sur les écosystèmes, la visibilité et les matériaux, selon les composants qu'elles contiennent.

Il est important de noter que la pollution atmosphérique constitue non seulement un problème local mais aussi transfrontalier. Il s'agit à la fois d'un problème régional et global. En effet, les émissions produites dans un pays peuvent être transportées dans l'atmosphère sur de longues distances et exercer des effets nuisibles dans d'autres pays.

<sup>2</sup> [http://ec.europa.eu/environment/air/cafe/pdf/annex\\_sec\\_2005\\_1132\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/environment/air/cafe/pdf/annex_sec_2005_1132_en.pdf), accédé 20/7/2006.

Par ailleurs, différentes études ont démontré que les PM sont constituées par un mélange de particules solides et liquides en suspension dans l'air. Elles varient non seulement en composition, mais aussi en origine et en taille. Il est habituel de les caractériser par leur taille ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{0,1}$ ...) et par leur concentration en masse, exprimée en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pourtant, les plus petites particules comme les ultrafines ( $PM_{0,1}$ ) et les nanoparticules, ne représentent qu'une faible partie de la masse totale des particules. Par contre, elles contribuent de manière très importante au nombre total de ces dernières. Les études scientifiques attribuent aux petites particules de la fraction fine les effets les plus néfastes sur la santé.

En ce qui concerne la législation, des progrès dans différents secteurs se sont accomplis afin de réduire la pollution particulaire. Cependant, il est à souligner que les normes de qualité de l'air concernant les particules ne touchent que les  $PM_{10}$ .

Ce travail de fin d'études s'intègre dans une réflexion environnementale tout à fait actuelle : la nécessité de tenir compte de la fraction fine des PM. Ceci, afin de protéger la santé des générations futures de leurs effets pervers.

L'objectif de ce travail est principalement de faire un état des lieux des connaissances sur la pollution particulaire dans différents domaines.

## ***Structure du travail***

Ce travail est structuré autour de quatre chapitres principaux. Tout d'abord, les caractéristiques de la matière particulaire seront présentées. Nous approfondirons l'information concernant sa distribution granulométrique, sa composition, ses sources d'émission anthropiques et les risques transfrontaliers qu'implique la pollution particulaire. Nous parlerons aussi des aspects généraux relatifs à la mesure des particules, y compris l'étude des réseaux de mesure à Bruxelles. Ensuite, les répercussions de l'exposition à la matière particulaire en suspension seront traitées tant par rapport à la santé publique que par rapport à l'environnement. Nous constaterons que l'inhalation des particules peut conduire à leur dépôt dans le système respiratoire humain, action à l'origine des effets néfastes sur la santé tant au niveau de la mortalité que de la morbidité. Nous distinguerons ici l'impact des différentes tailles de particules et l'ampleur des effets produits sur le groupe sensible le plus touché : les enfants.

Dans le dernier chapitre, nous traiterons brièvement de la comparaison des normes de qualité de l'air dans des différents pays hors UE. Par après, nous aborderons chronologiquement la législation au niveau européen relative à la pollution atmosphérique par les particules. Pour ce faire, nous traiterons d'une part de la législation visant la qualité même de l'air ambiant (à travers les valeurs limites) et d'autre part, de l'émission de polluants (à travers les valeurs limites d'émission pour les véhicules à moteur diesel).

Enfin, les conclusions seront présentées.

## 2. La matière particulaire et ses caractéristiques

---

*Dans ce chapitre, nous étudierons les différents aspects de la **matière particulaire**. Nous traiterons tant des particules émises telles quelles (particules primaires) que de celles formées par des réactions chimiques des précurseurs déjà présents dans l'atmosphère (particules secondaires).*

*Nous étudierons les sources d'émission des particules en dédiant une attention spéciale au secteur des transports, car il représente une source très importante en termes d'exposition humaine en milieu urbain. Nous verrons que l'émission des particules dans l'atmosphère engendre un risque de pollution transfrontalier et finalement, nous nous arrêterons sur des aspects en relation avec la mesure des particules.*

### 2.1. Les particules atmosphériques

Les différentes formes de pollutions particulières peuvent être regroupées sous le terme "**aérosol**", qui est une suspension de particules solides ou liquides dans un gaz. L'aérosol est généralement polydispersé, ce qui indique que les particules qui le forment sont de tailles variées. Plus un aérosol est polydispersé, plus la gamme de tailles de ces particules est large. Ces diamètres varient approximativement entre 0,001  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ . Par ailleurs, "**matière particulaire**" (en anglais "*particulate matter*" - PM), "**poussières en suspension**" ou simplement "**particules**", sont, parmi d'autres, trois synonymes utilisés pour définir des polluants d'échelle microscopique (généralement de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres) en suspension dans l'air. Elles constituent des systèmes complexes, formées par un mélange de constituants solides et liquides, et varient non seulement en taille et en composition, mais aussi en morphologie et en origine. Ainsi, tous ces termes sont utilisés comme synonymes.

Lorsque les PM sont **directement émises ou rejetées dans l'environnement** en tant que telles **par diverses sources fixes** (ex. un chantier) et **mobiles** (ex. particules d'échappement d'une voiture), on parle de **particules primaires**. Ces particules peuvent être produites, par exemple, lors de la combustion incomplète des combustibles fossiles et des carburants, au cours de processus industriels, lors de l'abrasion des pneumatiques, par des processus naturels tel que l'érosion par le vent, l'évaporation du sel de mer, la dispersion des matières biologiques (ex. pollen) et minérales (ex. sable du Sahara), etc., sans oublier la fumée de cigarette!

L'émission dans l'atmosphère est suivie de manière immédiate par la dispersion et le transport des particules par le vent. Des turbulences vont être à l'origine d'une distribution différentielle selon leur taille et leur comportement aérodynamique. Ces deux paramètres vont aussi déterminer l'accumulation des particules d'une certaine taille et à certains endroits. Cette accumulation des particules est aussi influencée par les conditions climatiques et topographiques. Les interactions atmosphériques entre divers composés sont à l'origine d'événements divers, comme par exemple, le **smog photochimique** et la **brume sèche**. Le premier est engendré par l'énergie du soleil agissant sur les polluants de l'air, tels que les oxydes d'azote, les composés organiques volatils, l'ozone troposphérique et les particules. Le résultat est une réduction de la visibilité, et selon les conditions physico-chimiques et climatiques, le smog ainsi produit peut avoir des effets nocifs sur la santé. La brume sèche, quant à elle, se manifeste lorsque des polluants dans l'air (de fines poussières, des particules de sel, etc.) réduisent la visibilité. Elle a habituellement une teinte jaunâtre ou bleutée et est fréquente dans les régions désertiques où de forts vents arrachent des particules du sol et les mettent en suspension. La brume ainsi formée se transporte sur des milliers de kilomètres, provoquant une réduction de visibilité importante.

C'est ainsi que dans l'atmosphère, des réactions chimiques entre des gaz, des radiations ou d'autres particules peuvent avoir lieu pour donner naissance à des particules plus complexes. Ces interactions

avec d'autres substances et leur éventuelle transformation, participeront à la création des nouveaux polluants: les **particules secondaires**, aussi appelées aérosols secondaires. Ces particules peuvent être formées dans l'atmosphère par différents mécanismes, on distingue ainsi :

- **la nucléation**, c'est-à-dire, la condensation des gaz précurseurs dans des conditions de sursaturation. Celle-ci finira par la formation d'un "nucleus"
- **la condensation**, elle se présente lorsque des molécules de gaz se condensent sur une particule
- **la coagulation** se produit lorsque deux particules se combinent pour en former une seule

Les **précurseurs** clefs de ces processus sont avant tout le **dioxyde de soufre** (SO<sub>2</sub>), **les oxydes d'azote** (NO<sub>x</sub>), **l'ammoniac** (NH<sub>3</sub>) et **les composés organiques volatiles non-méthanés** (COVNM), tous provenant tant de sources naturelles que de sources anthropiques<sup>3</sup> (**Figure 2.2**).

Les principales sources qui leur sont associées sont la combustion de fuel au niveau des industries (pour le SO<sub>2</sub>), le secteur du transport (pour le NO<sub>x</sub>), les solvants et le transport routier (pour les COVNM) et l'agriculture (pour le NH<sub>3</sub>).

Ainsi, les particules secondaires sont (surtout en milieu urbain) majoritairement le résultat de la transformation atmosphérique des NO<sub>x</sub> principalement émis par la circulation automobile et par certains procédés industriels, et du SO<sub>2</sub> provenant des combustibles contenant du soufre.

### **2.1.1. Composition et quantification**

La nature chimique des particules peut aussi bien être minérale qu'organique. Ces composants peuvent aussi bien être d'origine naturelle qu'anthropique. Mais, en ce qui concerne les particules fines, leurs composants sont principalement d'origine anthropique.

Les différents secteurs d'activités humaines (le transport, l'industrie, l'agriculture, etc.) produisent dans leurs procédés des particules de différentes tailles qui sont éventuellement émises dans l'atmosphère. Les transports routiers équipés d'un moteur diesel sont des sources importantes de particules fines.

Lorsque les particules dans l'air sont échantillonnées, elles sont décrites en fonction de différents paramètres. De manière générale, les particules peuvent être caractérisées selon :

- **leur concentration en masse**
- **leur concentration en nombre**
- **leur surface active**

Très fréquemment, elles ne sont décrites qu'en fonction de leur concentration en masse mesurée en micro-gramme par mètre cube (µg/m<sup>3</sup>). Les valeurs limites figurant dans la législation européenne sont également exprimées dans ces unités. Néanmoins, la concentration en nombre se révèle de plus en plus importante, surtout au moment d'évaluer les effets de certaines fractions de particules sur la santé. Il s'agit du nombre de particules d'un certain diamètre par unité de volume.

La **Figure 2.1** montre les distributions en nombre, en surface active et en volume des particules atmosphériques en fonction de leur taille.

Il faut remarquer que la majorité des particules échantillonnées sont d'une taille inférieure à 100 nm. Elles sont appelées "particules ultrafines". La surface est un des paramètres les plus importants pour les petites particules, particulièrement pour celles d'une taille inférieure à 1 µm (les plus petites des "particules fines"). La surface active donne une idée de la réactivité de ces particules.

Par ailleurs, la distribution des diamètres en fonction du volume révèle que la majorité du volume des particules, et donc de la masse, correspond aux particules plus grandes (plus grandes que 100 nm): "les

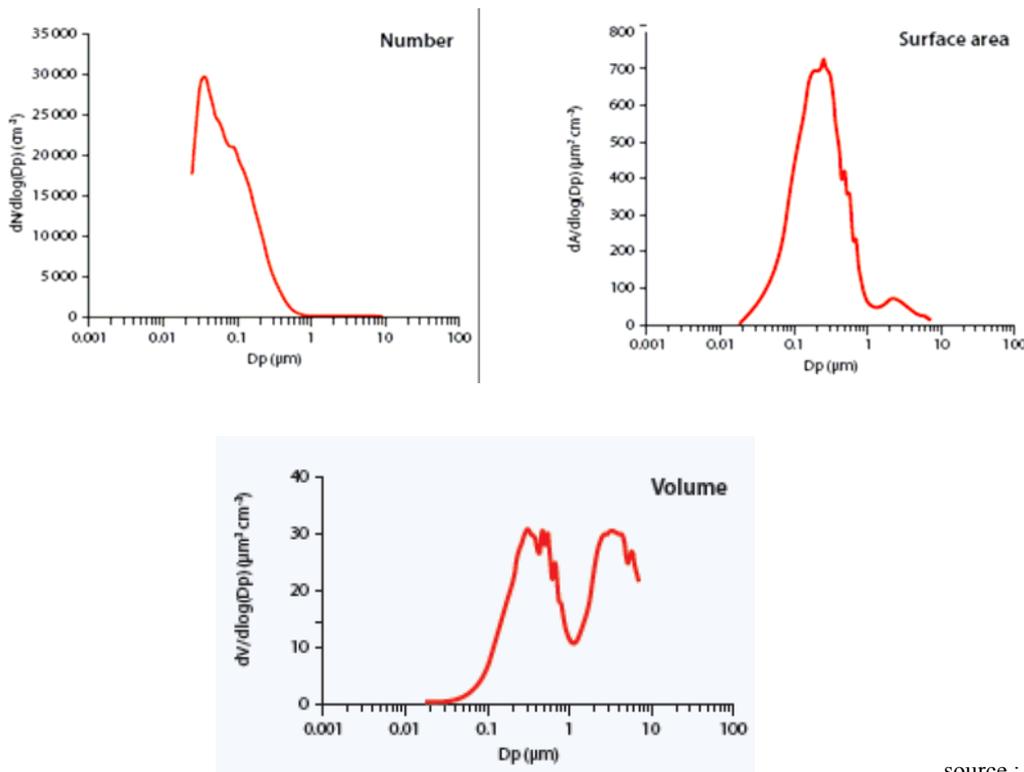
---

<sup>3</sup> Il est à noter que lorsque ces précurseurs deviennent une part intégrante des PM, ils deviennent chimiquement des sulfates, des nitrates, de l'ammonium et des composés de carbone organique.

particules fines" et "les particules grossières". Cela dit, même si les particules ultrafines (et les nanoparticules) ne représentent qu'une très faible partie de la masse des particules totales, elles sont de loin les particules les plus abondantes dans l'atmosphère. Afin de se faire une idée des grandeurs impliquées, il est opportun de mentionner qu'une particule de 10  $\mu\text{m}$  de diamètre présente la même masse que 1.000 particules de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre! (Milieu Ltd. et al., 2004).

Les particules grossières (2,5  $\mu\text{m}$  - 10  $\mu\text{m}$ ) contribuent de manière plus importante à la masse des particules, mais leur nombre, en comparaison à celui des particules ultrafines, est pourtant très faible. Les particules fines (< 2,5  $\mu\text{m}$ ), quant à elles, contribuent aussi de manière importante à la masse, mais ce sont exclusivement les plus petites des fines particules qui contribuent au nombre total des PM.

**Figure 2.1 : Distributions en nombre, surface et volume des particules atmosphériques mesurées à Birmingham**



source : OMS, 2006

Du fait de leur importante surface par rapport à leur taille, différents composés peuvent y être adsorbés et les particules peuvent inclure dans leur composition :

- des sels inorganiques, comme des nitrates, sulfates et ammoniac
- des autres ions inorganiques : potassium, sodium, magnésium, calcium et chlore
- des métaux lourds, par exemple le cadmium, le cobalt, le plomb
- des espèces carboniques : carbone élémentaire et organique

Par conséquent, les PM peuvent contenir un grand nombre de polluants chimiques différents et, de façon générale, elles peuvent être porteuses de substances acides et eutrophisantes<sup>4</sup> qui contribuent au phénomène des "pluies acides" (OMS, 2004).

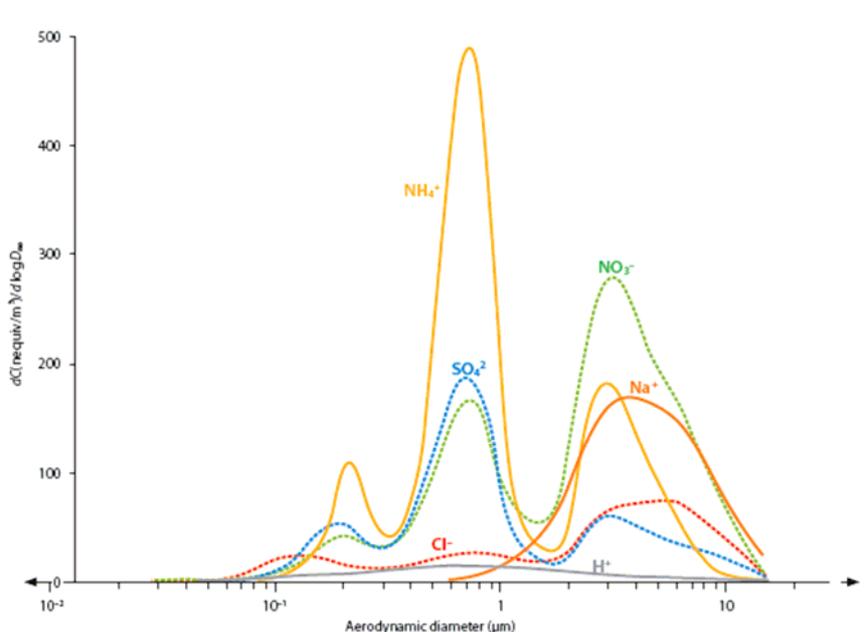
<sup>4</sup> L'eutrophisation est causée par l'excès de nutriments azotés (ammoniac et oxyde d'azote) qui perturbe les communautés végétales et s'infiltrent dans les eaux douces, causant, dans les deux cas, une perte de diversité biologique.

Un tableau en annexe (Annexe 2.I) présente les principales formes de particules en association avec leur nature et leur processus de formation.

Leur composition serait aussi responsable de leur toxicité. Néanmoins, il faut remarquer que tous les composants n'ont pas le même niveau de dangerosité. Certaines études épidémiologiques et toxicologiques suggèrent que les sources de combustion sont particulièrement importantes lorsqu'il s'agit des effets sur la santé (Laden et al., 2000; Nemmar et al., 2003b). Les particules primaires issues des processus de combustion sont fréquemment riches en métaux de transition et en composés organiques. En plus, elles présentent une surface importante, ce qui les rend plus réactives.

La **Figure 2.2** montre les composants principaux des PM inférieures à 10  $\mu\text{m}$ .

**Figure 2.2 : Les principaux composants des PM par taille de particules**



source : Wall et al., 1988

Par ailleurs, la composition des particules est en relation avec leur taille. Lorsque les différentes fractions sont analysées, on constate que la fraction fine (PM d'un diamètre inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$ ) contient la majorité de l'acidité (ions hydrogènes) et de l'activité mutagène des PM. La fraction grossière (PM d'une taille entre 2,5 et 10  $\mu\text{m}$ ), quant à elle, contient des contaminants tels que des toxines issues des bactéries.

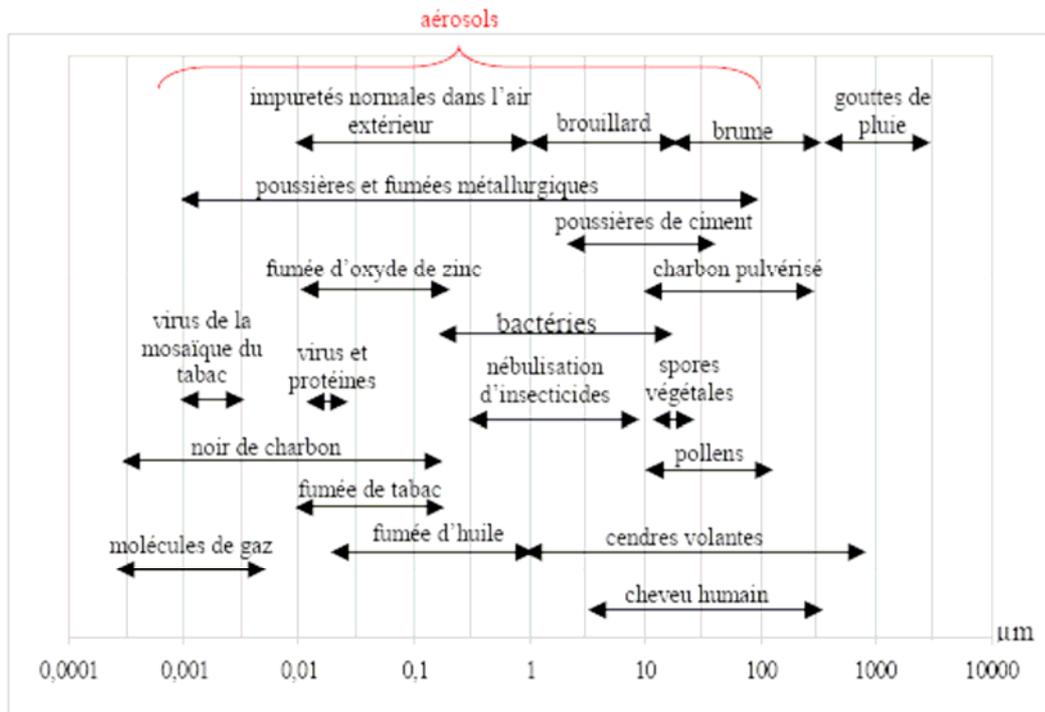
### **2.1.2. Les différentes tailles de la matière particulaire. Définitions**

Historiquement, on a classifié les particules en suspension dans l'air par leur taille. En raison de leurs formes et densités variées, il n'est pas aisé de leur attribuer un diamètre. C'est à cette fin qu'on a utilisé le concept de **diamètre aérodynamique**. Il correspond au diamètre qu'une particule sphérique d'une densité de 1  $\text{g}/\text{cm}^3$  devrait avoir pour présenter la même vitesse de chute dans l'air que la particule concernée. Ainsi, on les mesure en leur donnant le diamètre qu'aurait une sphère de comportement aérodynamique équivalente. Par ailleurs, la classification des particules par leurs propriétés aérodynamiques est satisfaisante puisque ce sont elles qui gouvernent tant le transport des particules dans l'air que leur élimination de l'atmosphère (par déposition sèche ou humide) et aussi leur déposition spécifique dans le système respiratoire une fois qu'elles sont inhalées. Le diamètre

aérodynamique des particules renseigne aussi sur leur composition chimique et sur la source dont elles proviennent.

La **Figure 2.3** montre un éventail des tailles de différentes particules, tant naturelles qu'artificielles (produites par l'activité humaine).

**Figure 2.3 : Diamètres aérodynamiques (en  $\mu\text{m}$ ) de différentes particules**



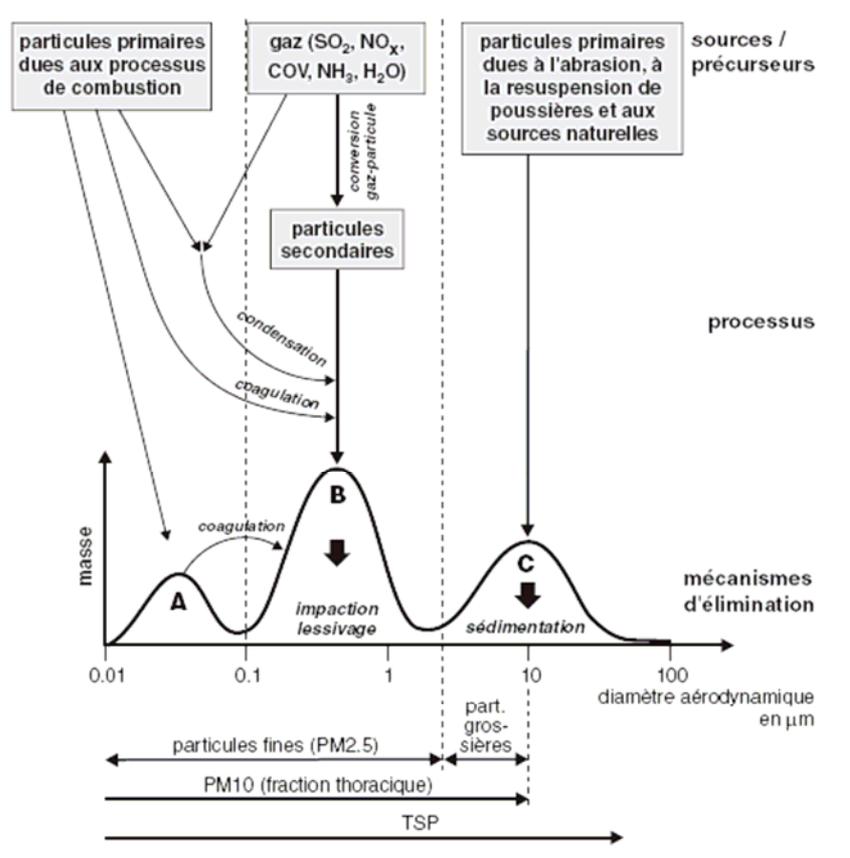
source : Lamy, 2004

La **Figure 2.4** illustre une représentation de la distribution de taille des particules atmosphérique et également les processus les plus importants de formation des particules secondaires et d'élimination des particules primaires et secondaires.

Comme le montre la représentation, parmi les *particules totales en suspension (total suspended particles-TSP)* dans l'atmosphère, on distingue 3 types de grandeur: les particules ultrafines, le mode d'accumulation et les particules grossières.

Au moment de distinguer la *fraction fine* (ou *particules fines-  $PM_{2,5}$* ) de la *fraction grossière* (ou *particules grossières*) la communauté scientifique s'est accordée sur une limite de 2,5  $\mu\text{m}$ , comme convention de mesure. Ainsi, les particules fines ont une taille inférieure à 2,5  $\mu\text{m}$  et les particules grossières une taille supérieure à cette limite.

**Figure 2.4: Représentation schématique simplifiée de la distribution de taille des particules d'un aérosol atmosphérique proche des sources et des processus les plus importants. A: particules ultrafines, B: mode d'accumulation, C: particules grossières.**



source : OFEFP, 2006

Pour décrire ces fractions, on trouve différents types de classifications dans la littérature. Un premier type de classification fait référence aux *mécanismes de formation des particules*. Dans ce premier cas, on distingue :

- les *particules ultrafines* regroupées dans le *mode d'Aitkin* ou le *mode de nucléation*. Ces particules sont principalement des particules primaires issues des processus de combustion et elles présentent un diamètre aérodynamique inférieur à 100 nm. Leur croissance se produit par condensation ou par coagulation et elles finissent par s'accumuler dans cette catégorie, cependant, elles peuvent continuer leur croissance pour intégrer le mode d'accumulation.
- le *mode d'accumulation* comprend principalement des particules secondaires issues de la conversion de certains gaz en particules, par la condensation de gaz sur des particules et par la coagulation entre des particules. Cette fraction contient des particules d'un diamètre entre 100 nm et 2,5 µm. Elle ne continue pas sa croissance pour constituer la fraction grossière. Loin des sources, c'est le mode d'accumulation qui prédomine.
- les *particules grossières* sont constituées par des particules primaires. Celles-ci sont issues tant des processus anthropiques (abrasion mécanique) que des sources naturelles (particules volcaniques, sel marin, etc.). Elles présentent un diamètre entre 2,5 µm et 10 µm.

Un autre système de classification se réfère au *niveau de pénétration dans le système respiratoire humain*. En ce qui concerne les particules respirables, on distingue, selon le degré de pénétration :

- la *fraction inhalable*, qui correspond aux particules s'accumulant dans la cavité nasale et dans la gorge. Les particules de cette fraction ont un diamètre d'entre 5 et 10  $\mu\text{m}$ .
- la *fraction thoracique*, aussi appelé *trachéo-bronchique*, qui comprend les particules déposées au niveau de la trachée, des bronches et des bronchioles. Cette fraction implique des diamètres d'environ 1 à 5  $\mu\text{m}$ .
- la *fraction alvéolaire* (ou *respirable*) est constituée par les particules plus petites, principalement celles d'entre 100 nm et 1  $\mu\text{m}$ .

On peut noter que les particules de plus de 10  $\mu\text{m}$  ne sont pas inhalées, elles sont éventuellement filtrées par le nez. Nous traiterons plus en détail des fractions en relation avec les principales régions anatomiques du système respiratoire dans le Chapitre 3.

**Dans tous les cas, le fait d'utiliser le diamètre aérodynamique pour décrire les particules est largement accepté.** Pour cette raison, nous utiliserons dans ce travail cette nomenclature plutôt que d'autres, pour nous référer aux différentes tailles des particules dans les différents contextes.

On distingue ainsi:

- ✓ les **PM<sub>10</sub>**, qui sont les particules d'un diamètre aérodynamique inférieur ou égal à 10  $\mu\text{m}$ .
- ✓ les **PM<sub>2,5-10</sub>**, qui correspondent à la *fraction grossière* (ou *coarse particles*) et ont un diamètre entre 2,5  $\mu\text{m}$  et 10  $\mu\text{m}$ .
- ✓ les **PM<sub>2,5</sub>** sont les *particules fines*, elles possèdent un diamètre aérodynamique inférieur ou égal à 2,5  $\mu\text{m}$ . Cette fraction comprend le mode d'accumulation et les **PM<sub>0,1</sub>** (particules ultrafines).
- ✓ les **PM<sub>0,1</sub>**. Cette taille, qui correspond aux particules d'un diamètre inférieur ou égal à 0,1  $\mu\text{m}$  (ou 100 nm), est présente dans la littérature sous le nom de *particules ultrafines*, mais aussi sous le nom de *nanoparticules*. Par ailleurs, les **PM<sub>0,1</sub>** sont parfois appelées *particules submicroniques*, donc d'une taille au-dessous du micromètre.

Il existe une certaine confusion dans les définitions. Parfois le terme *particules ultrafines* est aussi utilisé pour désigner des particules d'une taille inférieure à 1  $\mu\text{m}$ . De même, tant le terme "particules ultrafines" que le terme "nanoparticules" sont utilisés pour se référer aux particules de moins de 10 nm.

Cependant, il est à noter que, dans la littérature plus récente (depuis 2000), les nanoparticules sont décrites plus fréquemment comme celles ayant un diamètre inférieur à 50 nm, et les particules ultrafines comme celles d'un diamètre inférieur à 100 nm. Dans ce travail, nous adopterons ces dernières terminologies.

Les tailles décrites plus haut sont les plus fréquemment mentionnées dans les rapports scientifiques, mais on retrouve aussi d'autres tailles, comme les **PM<sub>7</sub>**, les **PM<sub>2,1</sub>**, etc.

Par ailleurs, il existe aussi un autre terme moins employé que ceux mentionnés plus haut. Il s'agit des **PM<sub>1</sub>**. Il convient ici aussi de clarifier que ces particules de diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$ , sont parfois appelées particules submicroniques, et moins fréquemment particules ultrafines.

**En tout cas, ce qui est important de garder à l'esprit est la taille des particules plutôt que le nom.** Dans le chapitre suivant, nous verrons l'importance de la taille en ce qui concerne les effets sur la santé humaine.

D'autres termes également retrouvés dans la littérature sont : les suies, le noir de carbone, les cendres volantes, les poussières et la fumée noire. Ils se définissent comme suit :

- **Suie** : elle comprend toutes les particules primaires contenant du carbone issu de combustions incomplètes. Elle est composée avant tout de carbone élémentaire et organique.
- **Noir de carbone** : il est composé de sphères et d'agrégats générés par la combustion incomplète de carburants (charbons, gaz, fiouls, etc.). Ces particules d'entre 10 et 1000 µm contiennent en général plus de 60% de carbone, hydrogène, azote, soufre. Il est aussi utilisé comme synonyme de suie.
- **Cendres volantes** : particules de cendre donc de résidus solides d'une matière consommée entraînés par les gaz de combustion.
- **Poussières** : ce terme se réfère aux particules solides inférieures à 75 µm de diamètre.
- **Fumée noire** (ou black smoke -BS) : c'est une technique de mesure de particules issues des processus de combustion. Elle mesure la réflexion optique des échantillons (en particulier du carbone élémentaire) au moyen de filtres.

## 2.2. Sources et rôles de différents secteurs

La matière particulaire a une grande diversité de sources. Les particules primaires et les particules secondaires sont toutes les deux issues tant de sources naturelles que de sources artificielles (aussi appelées anthropiques). Le **Tableau 2.a** présente les sources naturelles et anthropiques pour les PM<sub>10</sub> et pour les PM<sub>2,5</sub>.

**Tableau 2.a : Sources des PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> primaires et secondaires**

Naturelles		Anthropiques	
Primaires	Secondaires	Primaires	Secondaires
<b>PM<sub>2,5</sub></b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• feux de friches (carbone élémentaire et carbone organique)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• carbone organique provenant des COV biosynthétiques</li> <li>• nitrates provenant des NOx d'origine naturelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• combustion de combustibles fossiles (secteur industriel, résidentiel et de l'automobile) (carbone élémentaire et carbone organique)</li> <li>• combustion de bois, secteur résidentiel (carbone élémentaire et carbone organique)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• carbone organique provenant de sources anthropiques de COV (automobiles, procédés industriels, solvants)</li> <li>• sulfates et nitrates provenant de sources anthropiques de SO<sub>x</sub> et de NOx (automobiles, centrales électriques, etc.)</li> </ul>
<b>PM<sub>10</sub></b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• poussière emportée par le vent</li> <li>• embrun</li> <li>• pollen, spores</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• poussière minérale produite par les industries minières et extractives</li> <li>• sol agricole emporté par le vent</li> <li>• poussière de la route</li> <li>• usure des pneus et des freins</li> <li>• poussière provenant des chantiers de construction</li> </ul>	

source : LSIP, 2000

Les sources naturelles sont dominantes dans la production des particules grossières (surtout des particules arrachées aux sols par l'effet du vent et des particules de sel marin). Les sources dominantes de particules fines sont principalement les émissions primaires et secondaires (des gaz précurseurs) anthropiques. Il s'agit notamment des émissions provenant des processus de combustion, celles des composés organiques et de SO<sub>2</sub> (Seinfeld et Pandis, 1998).

Les *sources naturelles* comprennent :

- **les animaux et la végétation** : par exemple les feux de brousse, les fibres végétales ou animales, le pollen, les spores et les virus parmi d'autres
- **les microorganismes**, c'est-à-dire les bactéries, les acariens, les moisissures, etc.
- **l'activité volcanique** qui est à l'origine des cendres volantes et des gaz
- **la mer**, qui par évaporation accélérée par la rupture des vagues, libère des cristaux de chlorure de soude (sel) dans l'atmosphère
- **l'érosion par le vent** qui soulève des particules minérales arrachées aux sols : argile, limon et sable fin par exemple

De plus, les activités humaines sont aussi génératrices de poussières. Elles constituent les *sources artificielles ou anthropiques*. Un chantier en plein travail, l'abrasion mécanique de certaines surfaces (la chaussée, la voie ferrée, etc.), les polluants issus du pot d'échappement des voitures, l'incinération de déchets, des bougies, la fumée d'une cigarette, etc. sont toutes des activités génératrices de particules, certaines d'entre elles étant plus nocives que d'autres pour la santé. Le secteur du transport, de l'industrie, le secteur domestique (tant résidentiel que commercial) et l'agriculture constituent les principales sources anthropiques. Une description brève des contributions aux PM associées à chaque secteur mentionné précédemment sera faite par la suite.

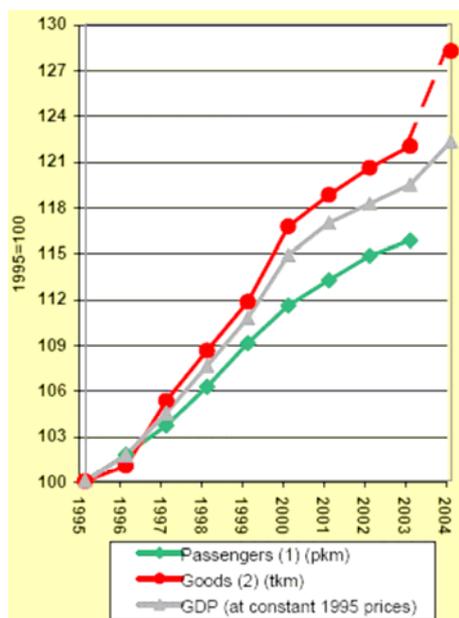
## **2.2.1. Les principales source anthropiques**

### **2.2.1.1. Le transport**

Les transports privés, publics et de marchandises constituent des outils extrêmement développés, particulièrement dans les pays européens. Ils se révèlent indispensables et ils ont un rôle clef dans le développement économique et social d'aujourd'hui. Ils visent à satisfaire les besoins "basiques" de la vie moderne : les déplacements journaliers au travail, au lieu d'étude, pour les courses et les vacances. L'expansion du nombre de véhicules individuels est toujours en augmentation pour des raisons économiques, géographiques, culturelles, etc. En effet, les voitures restent depuis 1970 le moyen de transport le plus utilisé (**Figure 2.5**).

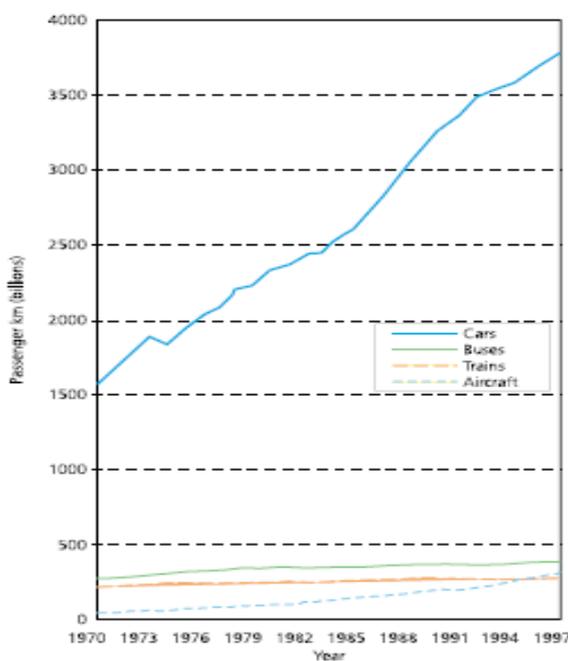
**Figure 2.5:**

**a: Croissance des Transports (de passagers et de marchandises) et du PIB entre 1995 et 2004 dans l'UE-25**



source: AEE, 1998

**b: Augmentation de l'utilisation de voitures par rapport à d'autres moyens de transport, 1998**



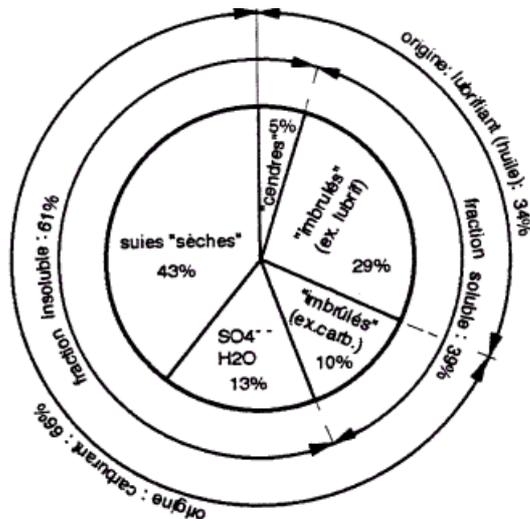
source: DG Energie et Transport, 2005

On peut remarquer l'existence d'un couplage entre la croissance économique et celle des transports. Dans ce secteur, c'est principalement le transport routier qui contribue à l'émission des particules primaires (**Figure 2.8**). La combustion de carburants fossiles génère tant des particules que des précurseurs de ces dernières. Dans le contexte de ce travail, nous approfondirons les caractéristiques du transport routier. Ce choix repose sur le fait de l'exposition humaine généralisée aux polluants émis par ce type de véhicules.

**Le transport routier, surtout du fait des moteurs diesel, contribue le plus à la production des particules fines.** En effet, un moteur diesel actuel peut rejeter plusieurs centaines de fois plus (jusqu'à 1000 fois plus) de particules qu'un moteur à essence, et aussi davantage d'oxydes d'azote (NOx). Les tailles des particules émises par les pots d'échappement correspondent à un mélange de particules fines, ultrafines (PM<sub>0,1</sub>) et des nanoparticules (Kittelson, 1998). Ces particules peuvent avoir une incidence importante sur la santé (cf. Chapitre 3). La **Figure 2.6** présente la composition typique d'une particule diesel.

L'incidence sur la santé a, sans doute, été généralisée notamment par l'augmentation accrue de l'utilisation des véhicules individuels par rapport aux autres moyens de transport. De plus, le parc automobile évolue depuis quelques années vers une augmentation très importante des véhicules équipés d'un moteur diesel. Par exemple, selon la Fédération Belge de l'Industrie Automobile et du Cycle, durant les 8 premiers mois de l'année 2005, 72% de toutes les voitures neuves immatriculées en Belgique étaient équipées d'un moteur diesel (FEBIAC, 2005). Un chiffre considérable si on tient compte que **la part du marché européen du diesel s'élevait à 49%** durant le premier semestre de la même année.

Figure 2.6 : Composition d'une particule diesel



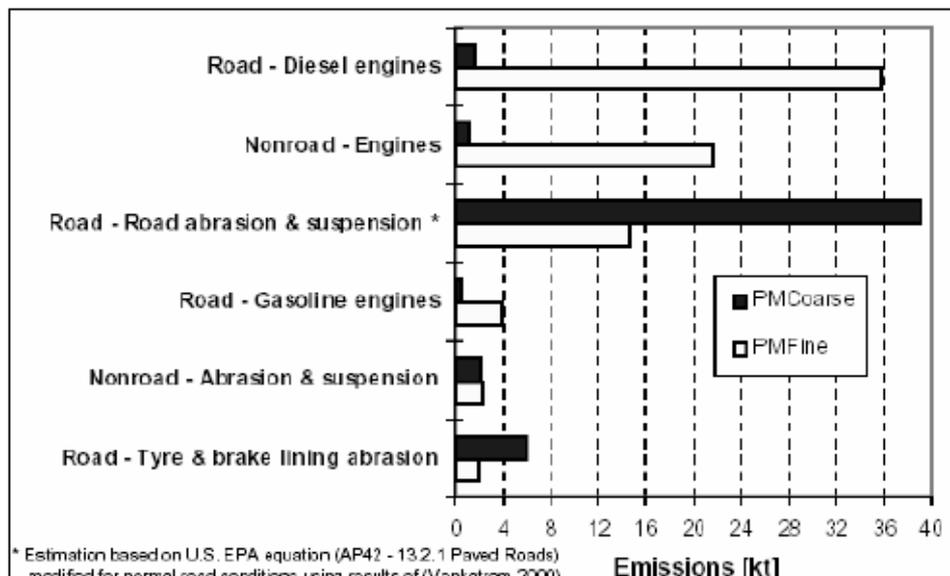
Une particule diesel comporte trois constituants principaux :

- des résidus solides sous forme de suies et de cendres
- une partie insoluble comprenant les sulfates et des dérivés soufrés
- une partie soluble formée par des HC imbrûlés qui sont issus de la combustion incomplète du gazole et de l'huile.

source : INERIS, 1993

Il est intéressant de noter qu'outre la fraction émise aux pots d'échappement, **les véhicules motorisés produisent aussi des particules plus grandes (Figure 2.7)**. Ces dernières sont issues de l'usure des pneumatiques (comme le noir de carbone, particules de calcium, de soufre, de zinc), l'usure de la chaussée (quartz, gypse, le sel et le sable utilisés en hiver arrachés par les pneumatiques des véhicules) et des garnitures de frein et d'embrayage qui contiennent aussi une certaine quantité de fibres d'amiante (Notre-planete.info, 2006).

La Figure 2.7 : Contribution du transport routier à la production des particules grossières et fines en Allemagne, 1998



source : Pregger, 2002; cité par CAFE WG on PM, 2004

Dans cette figure, nous constatons, d'une part, l'importance des particules fines produites par les véhicules équipés d'un moteur diesel, et d'autre part, l'ampleur des particules grossières produites du fait de l'abrasion mécanique de la chaussée et de la suspension de ces particules dans l'air.

### **2.2.1.2. L'industrie**

Ce secteur, du fait même des procédés industriels et de leur consommation d'énergie, contribue de façon importante à l'émission de matières particulaires. Y sont incluses les industries de production d'énergie, les centrales thermiques, hydroélectriques et nucléaires.

L'utilisation du charbon dans ce secteur a été historiquement une source très importante de matière particulaire. Grâce à l'emploi actuel des technologies d'abattement des émissions, en plus de la substitution progressive du charbon par d'autres combustibles, l'importance du charbon comme source principale de particules a été réduite dans la majorité des pays industrialisés. Les technologies mentionnées plus haut impliquent, par exemple, le traitement des effluents atmosphériques industriels moyennant des séparateurs (dépoussiéreurs).

En ce qui concerne **les procédés et la consommation d'énergie** par les industries, les activités telles que la construction (les chantiers), l'extraction minière, celles de l'industrie pétrolière, de l'industrie des matières plastiques, la fonderie, la métallurgie (en particulier la sidérurgie), les cimenteries et les machines industrielles elles-mêmes, constituent des sources importantes de particules primaires. Les cimenteries sont considérées comme un important secteur émetteur de poussières. Du fait des procédés qu'elles requièrent depuis l'extraction et l'utilisation de grandes quantités de matières premières et de combustibles, en passant par leur transport à l'usine, leur broyage, moulage et des procédés de séchage et de combustion, elles sont génératrices de grandes quantités des poussières.

Par rapport à **la production d'énergie**, les particules sont produites principalement par l'utilisation de combustibles tant solides que liquides. Il s'agit du charbon, du lignite et de la biomasse, du fuel et du gaz naturel, tous des combustibles utilisés autant pour le chauffage industriel que domestique.

Du fait de la condensation des vapeurs chaudes, les particules primaires associées à la fonderie sont en majorité des particules fines. Même si la composition chimique des PM dépend du type de fonderie, elle inclut fréquemment du nickel, du manganèse et du cuivre (Pacyna, 1998). Les autres sources industrielles contribuent principalement à l'émission des particules grossières. Les sources les plus importantes des PM<sub>10</sub> sont les industries de production d'énergie et celles de production de fer et d'acier. Une fraction importante de ces émissions est attribuée aux "émissions fugitives"<sup>5</sup>.

La distribution en taille des PM qui proviennent des processus de combustion dépend essentiellement du type de combustible utilisé et du type de combustion réalisée. Les combustibles solides produisent en général des particules grossières de taille plus grande que celles produites par l'utilisation des combustibles à base de pétrole. Par contre, la combustion de gaz produit des particules fines.

### **2.2.1.3. Le secteur domestique**

Le secteur domestique (résidentiel et commercial) est une source d'émission tant des PM<sub>2,5</sub> que des PM<sub>10</sub> (**Figure 2.9**). La combustion domestique par le chauffage (petits poêles à bois, à charbon, à biomasse) est la cause principale de cette émission.

Les chaudières et les sèche-linges sembleraient aussi contribuer à cette émission. Un rapport américain récent suggère qu'une source importante de particules ultrafines dans les foyers est le sèche-linge à gaz (Wallace, 2005), un appareil électroménager bien répandu aux Etats-Unis.

---

<sup>5</sup> Emissions fugitives : des émissions diffuses connectées au processus en question. Par exemple, celles dues à la manipulation des matériaux, à la fuite dans une canalisation, etc.

#### **2.2.1.4. L'agriculture**

Les activités agricoles sont aussi génératrices de particules anthropiques, notamment secondaires, par la production de précurseurs. Il s'agit principalement de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), mais aussi des autres composés azotés ( $\text{NO}_x$ ) qui sont produits. Des tonnes d'ammoniac sous forme gazeuse proviennent des installations ouvertes de stockage de lisier du bétail. De même, il est issu des épandages traditionnels des fertilisants avec déflecteurs. Un problème important est l'utilisation excessive des engrais azotés (organiques ou chimiques) dans les cultures.

En effet, la réduction des émissions de  $\text{NH}_3$  est la mesure la plus importante pour réduire, dans le secteur de l'agriculture, les émissions des précurseurs de PM.

En plus, ce secteur est aussi source d'émissions primaires des particules. Ces émissions proviennent des sources incluant la préparation de la terre et la suspension de poussières de terre par le vent dans les sols non couverts, l'évaporation des produits phytosanitaires, les feux accidentels et les brûlis, l'utilisation des machines et engins (équipés, dans leur majorité, de moteurs diesel) et l'élimination de déchets parmi d'autres. L'élevage de volailles et de porcs est aussi considéré comme un émetteur important de matière particulaire, notamment des particules fines (CAFE WG, 2004). Les contributions aux émissions sont en étroite relation avec les procédés spécifiques utilisés dans chaque pays.

Avant d'aborder le point suivant, il est important de signaler qu'il existe des modèles mathématiques (EMEP, RAINS et autres) qui modélisent différents aspects de la pollution particulaire. Ces modèles décrivent, par exemple, les émissions des PM, leur transport dans l'air, leur transformation chimique dans l'atmosphère et l'élimination de ces dernières. Ces estimations sont ensuite validées par comparaison avec les données provenant du suivi réalisé par les stations de mesure. Actuellement, l'évaluation des PM avec des modèles sous-estime systématiquement les concentrations totales des particules (entre 20 % à 30 %). Cette sous-estimation serait due, d'une part, au fait que dans certaines modèles les aérosols secondaires ne sont pas considérés (CE, 2005) et, d'autre part, à l'absence de données de suivi des PM dans de grandes étendues de l'Europe (notamment pour la fraction fine).

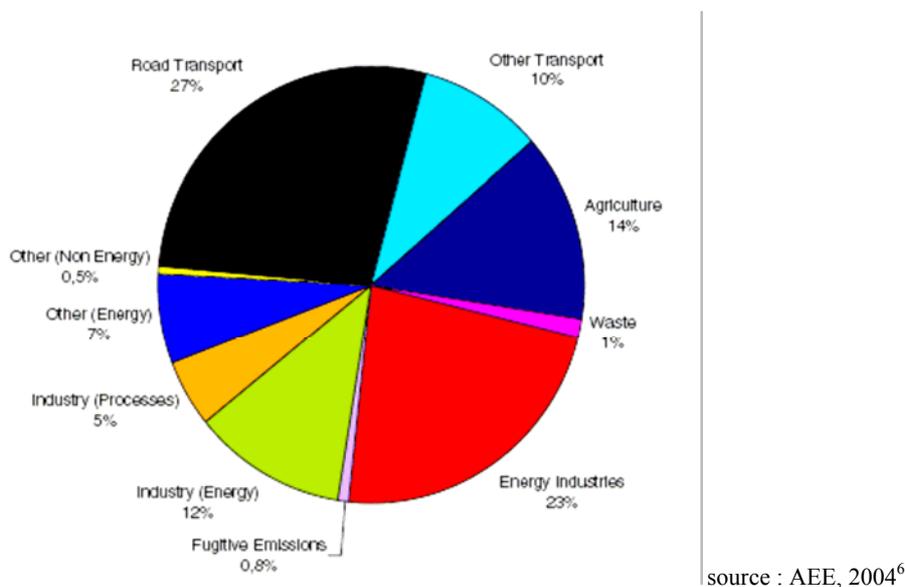
Un autre fait à signaler comprend les difficultés techniques concernant la modélisation du déplacement des particules dans l'atmosphère. Des efforts dans la mise au point des modélisations se montrent nécessaires.

#### **2.2.2. Les émissions sectorielles**

Il est important de comprendre qu'en règle générale, chaque type de source est associée à l'émission d'une certaine taille de particules. Pour cette raison, aucune corrélation statistiquement significative n'est observée entre particules fines et grossières. Les particules fines sont plus associées à des processus de combustion et les particules grossières sont davantage associées à l'abrasion mécanique. Pour des secteurs différents, les tailles des particules émises peuvent être différentes puisqu'elles comportent différents types de sources individuelles. Ainsi, les différents secteurs contribueront en général tant à la fraction fine qu'à la fraction grossière.

Les contributions sectorielles aux PM en 2001, incluant les particules secondaires, sont représentées dans la **Figure 2.8**.

**Figure 2.8 : Contributions relatives des différents secteurs à l'émission de particules primaires et secondaires dans l'UE-15, 2001**



En ce qui concerne les émissions anthropiques des  $PM_{2,5}$ , le secteur des transports, le secteur domestique et le secteur industriel (incluant la génération d'énergie et les procédés industriels) sont les principaux émetteurs. Ceci est notamment lié aux processus de combustion. Ces secteurs contribuent (en 2000) entre 25% et 34% chacun, aux émissions primaires des particules fines. Les activités agricoles contribuent surtout aux émissions de  $PM_{10}$ . Tous ces secteurs sont aussi d'importants émetteurs des autres gaz précurseurs :  $SO_2$ ,  $NO_x$ , COV et ammoniac.

Par rapport aux  $PM_{10}$ , les estimations pour l'an 2000 selon le modèle RAINS<sup>7</sup>, suggèrent qu'un peu plus d'un tiers des émissions primaires ont été produites par le secteur industriel (plus l'agriculture), ce qui représente 637 kilotonnes. Les transports et le secteur domestique ont contribué à la production de 521 kt (34%) et 360 kt (27%) respectivement.

Les émissions des PM en Europe en 2000 et des projections jusqu'en 2020, sont présentées dans la **Figure 2.9**.

Il est à noter que, dans les nouveaux pays membres, l'apport en émissions, tant de  $PM_{2,5}$  que de  $PM_{10}$ , est plus important pour le secteur domestique et pour la production d'énergie que dans les pays de l'UE-15. Par contre, les émissions du secteur des transports se révèlent inférieures.

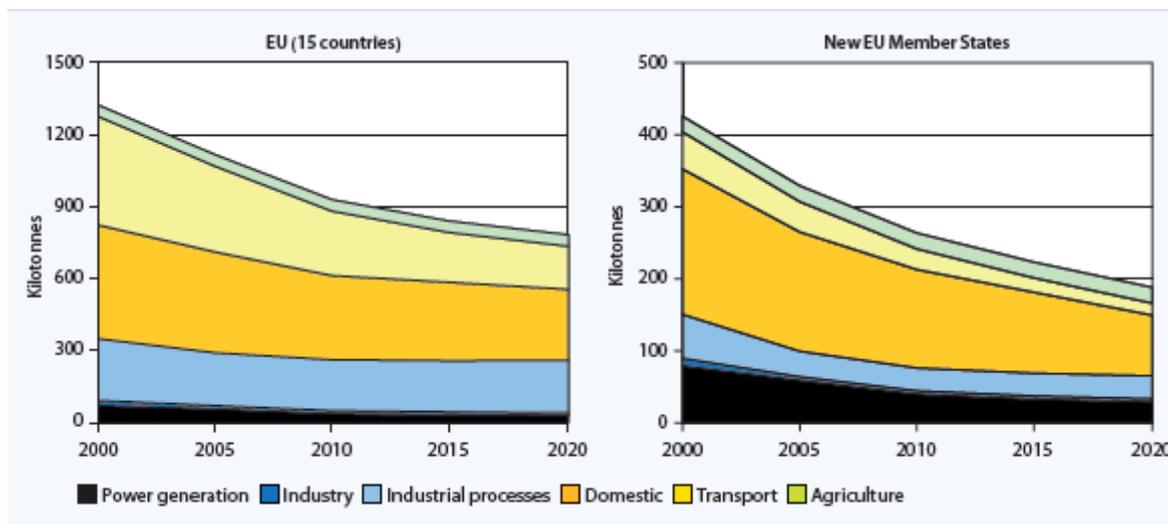
Selon des estimations, même dans le cas d'une croissance économique importante, avec le contrôle des émissions par la législation en vigueur, les émissions vont être réduites à l'horizon 2020 tant pour les particules que pour leurs précurseurs. Cela améliorera sans doute la qualité de l'air, mais ces réductions ne seront pas suffisantes pour éliminer les effets nocifs de la pollution atmosphérique. Les risques resteront importants pour la santé humaine et pour les écosystèmes. Les particules (et l'ozone aussi) restent des défis pour la législation à venir (Amann M et al., 2005).

<sup>6</sup> Cité par CAFE WG on PM, 2004.

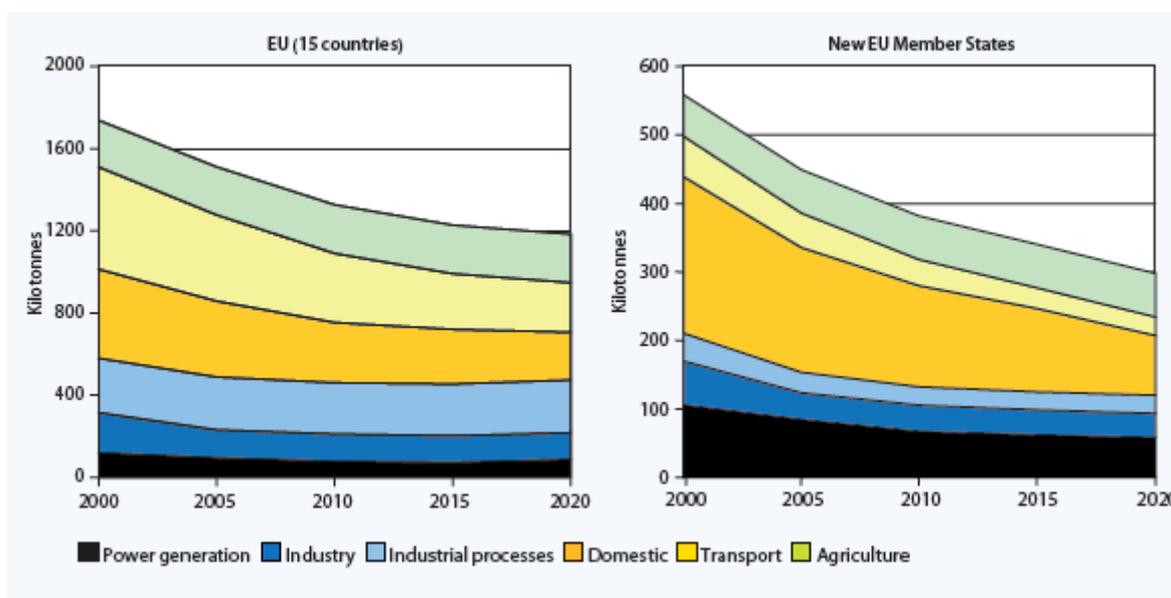
<sup>7</sup> Le modèle "Regional Air Pollution Information and Simulation" (RAINS) ([www.iiasa.ac.at/rains](http://www.iiasa.ac.at/rains)), a été développé par l'Institut International des Analyses de Systèmes Appliqués (IIASA) et est utilisé dans le cadre du programme CAFE entre autres. Dans ce contexte, il quantifie les contributions des certains polluants en ce qui concerne tant les dommages à la santé qu'à l'environnement.

Figure 2.9 : Emissions des PM par secteur en Europe

a) Emissions des PM<sub>2,5</sub>



b) Emissions des PM<sub>10</sub>



source : CAFE baseline scenario

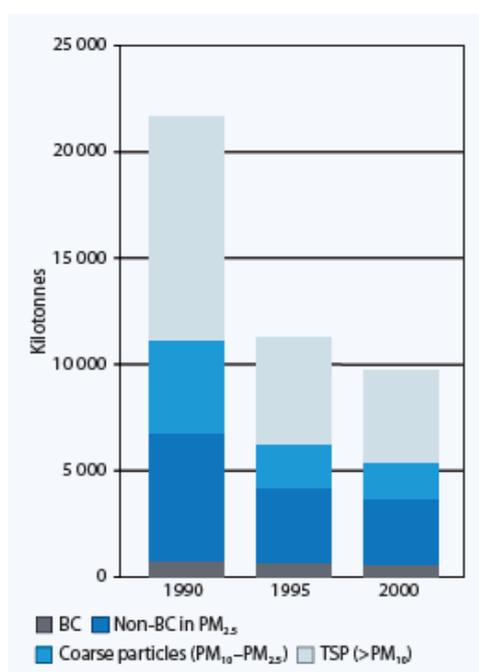
## 2.3. Mécanismes d'élimination et risque transfrontalier

Pour mieux comprendre tant l'importance des mécanismes d'élimination que l'ampleur du risque transfrontalier des particules, nous commencerons tout d'abord par essayer de répondre à deux questions importantes : "quelles sont les quantités de particules émises et quelles sont les concentrations dans les villes?" et "que deviennent ces particules une fois qu'elles sont émises ou formées dans l'atmosphère?"

- *Quelles sont les quantités de particules émises dans l'atmosphère et comment se traduisent-elles en termes de concentrations dans les villes?*

Des estimations réalisées indiquent que pour l'an 2000, les émissions totales de matières particulaires en Europe ont été de l'ordre de 10.000 kilotonnes/an (**Figure 2.10**). Selon le modèle RAINS, les volumes d'émission des PM se sont réduits de moitié par rapport aux volumes de 1990. L'OMS attribue cette baisse principalement au déclin de la consommation de combustible solide (charbon) dans le secteur domestique et dans les petites industries de l'Europe de l'Est et Centrale (ex. les industries de production de métal entre autres). Cette réduction est notable pour la fraction grossière et pour les TSP (particules totales en suspension). Par contre, la diminution des particules fines a été moins importante, à cause d'une augmentation de la contribution du secteur de transport (OMS, 2006).

**Figure 2.10 : Emissions des PM dans tous les pays européens jusqu'à la chaîne de l'Oural**



source : OMS, 2006

La réduction importante de la quantité des particules émises entre 1990 et 2000 (de 18% pour les PM<sub>10</sub>) représente certainement une amélioration de la qualité de l'air ambiant. Cependant, les effets nocifs de la pollution atmosphérique n'ont pas été éliminés. D'ailleurs, de graves effets tant sur la morbidité que sur mortalité sont attribués aux particules pour les concentrations enregistrées.

En ce qui concerne la concentration de la matière particulaire dans différentes zones, les valeurs moyennes annuelles enregistrées pour 2001 et 2002 dans l'UE ont été les suivantes :

**Tableau 2.b : Valeurs moyennes annuelles des PM<sub>2,5</sub> et des PM<sub>10</sub> pour différentes zones**

zone	PM <sub>10</sub> (*) moyenne annuelle (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2,5</sub> (**) moyenne annuelle (µg/m <sup>3</sup> )
urbaine	26	15-20
à haut trafic	32	20-30
rurale	22	11-13

(\*) PM<sub>10</sub> mesurées dans 1110 stations de mesure (dans 24 pays) en 2002; source : Airbase, AEE

(\*\*) PM<sub>2,5</sub><sup>8</sup> mesurées dans 119 stations de mesure en 2001; source: données collectées par le Groupe de travail CAFE pour l'élaboration du Second Rapport en matière particulaire.

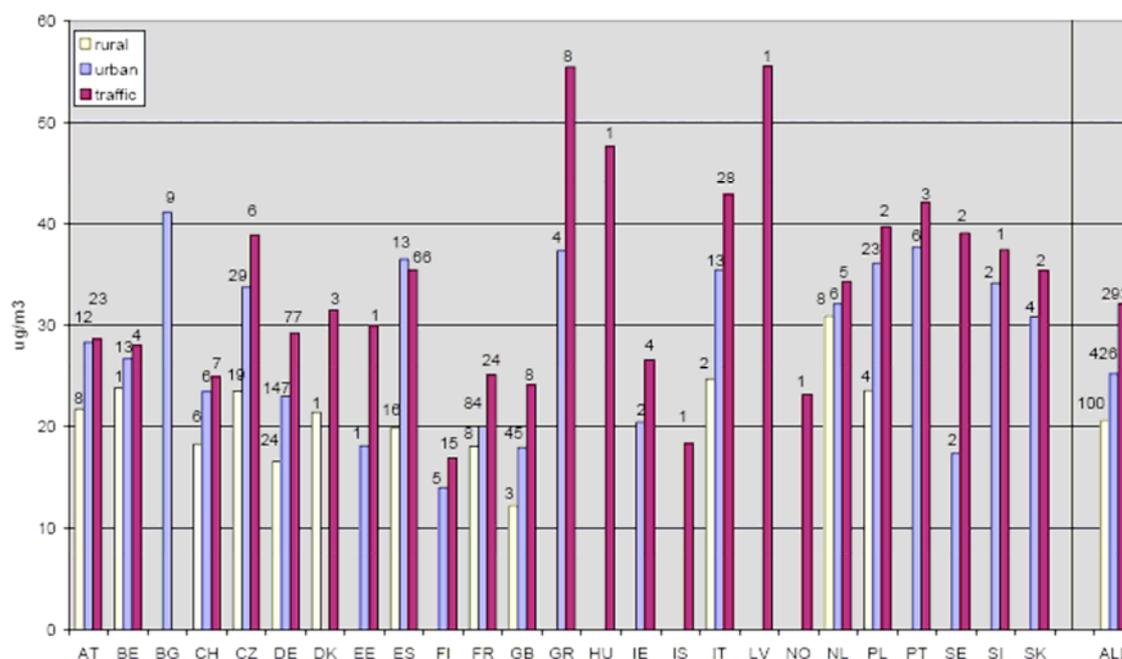
Il faut noter l'importance de la contribution du trafic : les zones à haut trafic ont des valeurs plus élevées tant pour les PM<sub>2,5</sub> que pour les PM<sub>10</sub>.

Même si ces valeurs respectent la valeur limite annuelle de 40 µg/m<sup>3</sup> établie par la Directive 1999/30/CE (cf. Chapitre 4, point 4.2.1.2) pour les PM<sub>10</sub>, il s'agit d'une moyenne pour tous les pays. Il est ainsi important de signaler qu'en 2002, **la valeur limite annuelle** (à être respecté à partir de 2005) **a été effectivement dépassée** dans 37 villes de 8 pays dans des zones urbaines et dans 48 villes de 12 pays dans des zones à haut trafic.

**De même, la valeur limite journalière** de 50 µg/m<sup>3</sup> pour la protection de la santé a été dépassée dans plus de 130 villes de 20 pays. Selon l'IBGE, la moyenne journalière qui ne peut pas être dépassée plus de 35 fois/an, a été fréquemment dépassée à Bruxelles : 154 fois en 2001 et 155 fois en 2002. Auparavant, en 2000, elle avait été dépassée 170 fois.

Dans la **Figure 2.11**, on observe les niveaux de PM<sub>10</sub> pour les zones rurales, urbaines et à haut trafic, pour l'UE-25.

**Figure 2.11 : Concentrations moyennes annuelles des PM<sub>10</sub> pour des stations rurales, urbaines et à haut trafic pour 2001. Le chiffre en haut de chaque barre désigne le nombre de zones.**



source : CAFE WG on PM, 2004

<sup>8</sup> Selon ces données, les PM<sub>2,5</sub> représentent une grande proportion des PM<sub>10</sub>.

Généralement, la concentration des PM<sub>10</sub> augmente progressivement des zones rurales aux zones à haut trafic, particulièrement dans la République Tchèque, en Allemagne, en Italie et au Royaume-Uni. Dans les autres pays, les différences sont moins marquées du fait d'un plus haut niveau de concentration des PM<sub>10</sub> dans les zones rurales. C'est le cas de la Belgique, des Pays-Bas et de certains des nouveaux pays membres. Les niveaux urbains des PM<sub>10</sub> ont tendance à être moins élevés dans les pays nordiques que dans le reste de l'Europe. Dans les zones à haut trafic, ces niveaux sont généralement plus hauts que ceux des zones urbaines.

En ce qui concerne les PM<sub>2,5</sub>, leur distribution spatiale en fonction de leurs concentrations est moins bien connue. Néanmoins, il y a une tendance à des niveaux bas dans les villes scandinaves. Dans les zones à haut trafic, les niveaux des particules fines, tout comme les niveaux des PM<sub>10</sub>, sont plus élevés (typiquement 40%) que ceux des zones urbaines. En 2001, la plupart des villes sont arrivées à une limite moyenne annuelle de 20 µg/m<sup>3</sup>.

➤ *Que deviennent ces particules une fois qu'elles sont émises ou formées dans l'atmosphère?*

A partir d'un point d'émission, les particules formant l'aérosol auront tendance à se disperser, de zones de l'atmosphère aux concentrations élevées (la source d'émission) vers des zones moins denses en particules. De plus, le *mouvement brownien* (mouvements aléatoires des particules dans un fluide) qui résulte des collisions entre particules, fera que les particules très fines se répandront dans l'atmosphère. Ainsi, le temps de séjour des particules dans l'atmosphère dépendra de plusieurs facteurs, à savoir, de la réactivité, de la solubilité et de la taille des particules en question. Cependant, les mécanismes de circulation atmosphérique vont aussi déterminer le temps que les particules y demeureront, et donc leur dispersion dans l'air.

La distance de voyage dans l'atmosphère pour les PM dépendra du temps nécessaire pour que les particules puissent être transportées dans l'atmosphère sans y être éliminées. Ce temps est appelé *temps de résidence* et chaque couche atmosphérique<sup>9</sup> est associée à un temps de résidence particulier.

Notons que dans les différentes couches qui se succèdent en altitude, la pression diminue progressivement et la température diminue rapidement jusqu'à la tropopause. Par contre, au-delà de cette surface, seule la température augmente. Ces paramètres (pression et température) vont influencer sur les temps de résidence des polluants. Ainsi, dans la *basse troposphère* (jusqu'à 3000 mètres d'altitude), le temps de résidence des particules microscopiques est d'une semaine environ et, dans la *troposphère moyenne* (6000 mètres), ce temps de résidence est d'un mois. Dans la *tropopause*, le temps de résidence est d'environ deux mois et dans la *stratosphère* le séjour des particules peut être assez long (plusieurs mois voire des années). Dans cette dernière couche, les interactions sont faibles (pas de pluie et des faibles vitesses d'échange entre les couches d'air proches), ce qui explique les longs temps de résidence des particules. En résumant, plus un polluant est émis en altitude, plus il voyagera loin de la source d'émission (pensons au transport aérien par exemple).

Dans le point 2.3.1, les temps de résidence mentionnés se réfèrent aux temps de séjour des particules dans la troposphère.

### **2.3.1. Mécanismes d'élimination des particules**

Il existe deux types de mécanismes fondamentaux d'élimination des particules de l'air. Ces "puits" sont :

---

<sup>9</sup> La troposphère ou basse atmosphère est la couche de l'atmosphère qui comprend environ les 15 premiers kilomètres à partir de la surface du sol. La tropopause est la surface de séparation entre la troposphère et la stratosphère. Cette dernière s'étend au-delà de la tropopause et jusqu'à la mésosphère. C'est dans cette couche épaisse d'une trentaine de kilomètres que se situe "la couche" d'ozone et que s'accumulent des polluants gazeux. Au-delà se trouve l'ionosphère.

- les **précipitations** qui sont à l'origine des retombées (ou dépôts) humides
- la **sédimentation** qui engendre des dépôts secs

Les particules correspondant à la **fraction grossière** (2,5 à 10  $\mu\text{m}$ ) et celles d'un diamètre supérieur à 10  $\mu\text{m}$  **sédimenteront** rapidement après avoir été émises, ceci en raison de leur taille, de leur densité et de leur morphologie. Elles possèdent ainsi un temps de résidence court, estimé de quelques minutes à quelques jours.

En ce qui concerne la **fraction fine** (diamètre inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$ ), ces particules, qui dominent la masse des aérosols loin des sources et ne continuent pas leur croissance pour intégrer la fraction grossière, ne sont pas facilement éliminées de l'air. C'est la raison pour laquelle elles (notamment les particules du mode d'accumulation) ont un temps de résidence supérieur à celui de la fraction grossière (Xiong, 2001). Il est estimé de quelques jours à quelques semaines. Elles sont principalement éliminées de l'atmosphère par l'action des **précipitations**. Néanmoins, il est important de noter que ces particules peuvent rester plusieurs jours dans l'air et ainsi être transportées sur des distances variables, voire au-delà des frontières.

Finalement, les **particules ultrafines** (diamètre inférieur à 100 nm) présentent, de même que la fraction grossière, un temps de résidence court dans l'atmosphère, mais pour des raisons différentes. Les particules ultrafines ont de **fortes vitesses de diffusion** et peuvent, de ce fait, grandir hors de leur ordre de grandeur. Leur croissance sera produite par condensation ou par coagulation, et par ces processus, elles seront "éliminées" de l'atmosphère. Du fait de leur forte vitesse de diffusion, elles peuvent aussi engendrer directement des dépôts secs sur différentes surfaces.

En règle générale, on considère que les temps de résidence pour les PM dans l'atmosphère varient entre 1 à 2 jours et 4 à 6 jours en étroite relation avec leur taille (diamètre) et leur composition chimique.

### **2.3.2. Risque transfrontalier**

Une fois dans l'atmosphère, tant les particules primaires que les particules secondaires se disperseront en suivant principalement les courants des vents. Éloignées des sources, ce sont les particules fines qui représentent le maximum de la répartition de la masse des PM dans l'atmosphère et ce sont elles aussi qui présentent le temps de résidence le plus élevé. Ainsi, c'est principalement cet ordre de grandeur qui aura un impact potentiellement plus marqué sur la qualité de l'air transfrontalier. C'est un fait important, quand on sait que l'on attribue à ces particules 348.000 décès prématurés en 2000 dans l'UE (cf. Chapitre 3).

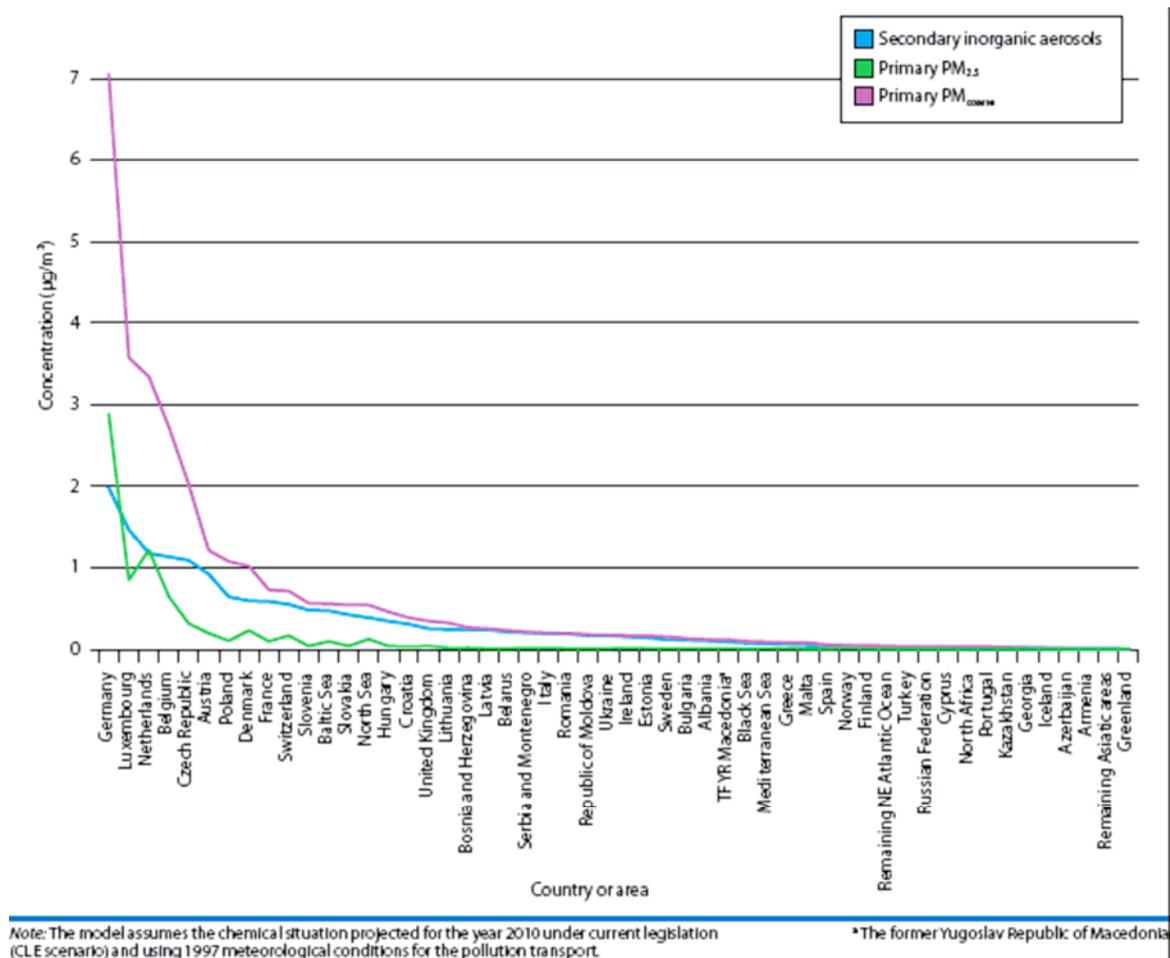
En effet, en plus des composants des particules, certains polluants présents dans le sol ou dans les sédiments peuvent être soulevés avec les particules sur lesquelles ils sont adsorbés. Les particules peuvent aussi adsorber des polluants déjà présents dans l'air, pour former des mélanges plus complexes. Lorsqu'elles se retrouvent dans l'atmosphère, ces particules peuvent voyager des centaines de kilomètres avant de se déposer (dépôts secs ou humides) et contribuer ainsi à la contamination des eaux et des sols. En effet, les phénomènes de ruissellement et d'infiltration peuvent entraîner les contaminants emportés, tant dans les eaux superficielles que dans les nappes phréatiques. La contamination de ces milieux peut se traduire par le transfert des polluants aux organismes vivants.

**Généralement, les particules grossières primaires voyagent entre 500 et 1.000 km** depuis l'endroit où elles ont été émises. Cependant, les tempêtes de poussière peuvent les transporter au-delà. **Les particules fines, quant à elles, voyagent sur des distances d'environ 2.000 à 3.000 km.**

Evidemment, le fait que les PM peuvent voyager sur ces longues distances implique que les émissions polluantes produites dans un pays peuvent affecter les concentrations de PM dans un autre pays. Les

particules qui sont emportées par les courants des vents ne reconnaissent pas les limites frontalières entre pays et contribuent au phénomène de pollution de l'air transfrontalier, pouvant selon le cas et le type de source constituer potentiellement un problème de pollution atmosphérique important. Ce fait est lié aux problèmes d'acidification<sup>10</sup>, d'eutrophisation, et d'ozone troposphérique<sup>11</sup>, selon la composition des particules en question. Un exemple est montré à la **Figure 2.12**. Elle représente l'aire d'influence de l'Allemagne concernant tant ses émissions primaires de PM (anthropiques) que des gaz précurseurs de ces dernières.

**Figure 2.12 : Concentration moyenne ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) des particules fines ( $\text{PM}_{2,5}$ ) et grossières ( $\text{PM}_{\text{coarse}}$ ) et des gaz précurseurs dans différents pays, suivant l'émission de 1 kilotonne de PM primaires et de gaz précurseurs en Allemagne.**



source : OMS, 2006

Ainsi, l'émission des PM en Allemagne peut être détectée dans différents pays européens, notamment en Belgique du fait de sa proximité. En effet, la Belgique reçoit des "apports" transfrontaliers de  $\text{PM}_{2,5}$  provenant principalement de France (21%) et d'Allemagne (15%), suivi par les Pays-Bas (9%) et par le Royaume Uni (8%) (OMS, 2006).

<sup>10</sup> Les particules sont porteuses de substances acidifiantes comme le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), le fluorure ( $\text{HF}$ ) et le chlorure ( $\text{HCl}$ ).

<sup>11</sup> Ozone dont la création excessive résulte de réactions chimiques entre les composés organiques volatils (COV) et les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) sous l'effet du rayonnement solaire et qui s'accumule à basse altitude (la basse atmosphère).

**En général, la contribution d'un pays aux aires voisines immédiates est calculée entre 3% à 15%**, mais elle est en dessous de 3% lorsqu'il s'agit de transport à longue distance. Cette contribution transfrontalière se révèle, selon le modèle EMEP<sup>12</sup>, plus grande pour la majorité des pays de l'Europe centrale. Cependant, les contributions d'un pays peuvent varier de 15 à 20% d'année en année selon les conditions météorologiques (Terrasón et al., 2005).

D'ailleurs, l'ampleur des contributions transfrontalières des PM dans un pays sera déterminée non seulement par les conditions météorologiques et les émissions des pays voisins mais aussi par sa localisation géographique. Ainsi, selon le modèle EMEP, la contribution transfrontalière des PM<sub>2,5</sub> est d'environ 60% en moyenne pour toute l'Europe, et celle des particules grossières est de 20 à 30% en Europe Centrale.

Il est à signaler qu'au niveau européen, les préoccupations pour la pollution atmosphérique transfrontalière sont apparues dans les années 1970. Des améliorations dans la qualité de l'air se sont, par conséquent, manifestées dans les dernières décades. Ces améliorations sont en relation avec plusieurs mesures, dont la *Convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance*<sup>13</sup> (CPATLD). Cette convention a été signée en 1979, dans le cadre de la Communauté économique des Nations unies pour l'Europe et est entrée en vigueur en 1983. Selon cette convention, la "*pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance*" correspond au rejet dans l'atmosphère soit de substances, soit d'énergie qui causent dans un autre pays des effets dommageables pour la santé, pour l'environnement ou pour les biens matériels, sans qu'il soit possible de distinguer les sources individuelles et collectives de ce rejet.

Les différents états s'engagent ainsi à limiter, à prévenir et à réduire progressivement leurs rejets de polluants atmosphériques et, donc à lutter contre la pollution transfrontalière susceptible de toucher plusieurs pays. La convention établit un cadre de coopération intergouvernementale qui a pour fin l'élaboration de politiques appropriées, l'échange d'informations, la réalisation d'activités de recherche, la mise en œuvre et le développement d'un mécanisme de surveillance. Un exemple de ces préoccupations est le financement à long terme du *programme concerté de surveillance continue et d'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe*<sup>14</sup> (EMEP), actuellement en plein fonctionnement.

La Communauté européenne prend également part aux huit protocoles internationaux sur les substances acidifiantes (soufre, NO<sub>x</sub>, COV, polluants organiques persistants (POP), métaux lourds) qui complètent cette convention. Le dernier protocole<sup>15</sup> a été signé en 1999 et il est entré en vigueur en 2005. Il traite spécifiquement des phénomènes d'acidification, d'eutrophisation et d'ozone troposphérique. L'objectif est de réduire les émissions de soufre, de NO<sub>x</sub>, de NH<sub>3</sub> et de COV causées par des activités humaines. Ces quatre produits sont des précurseurs des PM.

## 2.4. Aspects relatifs à la mesure des particules

D'abord, il est important de clarifier deux termes fondamentaux lorsqu'on parle de mesurer la matière particulaire. De manière générale, les particules peuvent se mesurer tant à l'immission qu'à l'émission. La différence entre "émission" et "immission" se situe dans le lieu où les mesures sont faites.

---

<sup>12</sup> Le modèle EMEP est utilisé dans le cadre de la "Convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance" pour évaluer la transmission transfrontalière des polluants de l'air en Europe. Aussi utilisé dans le cadre du programme CAFE, il modélise la concentration de polluants en Europe sur des grilles de 50 x 50 km.

<sup>13</sup> Décision 81/462/CEE du Conseil, du 11 juin 1981, concernant la conclusion de la convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance. JO L 171 du 27.06.1981.

<sup>14</sup> EMEP: <http://www.emep.int>

<sup>15</sup> Décision 2003/507/CE du Conseil, du 13 juin 2003, portant approbation de l'adhésion de la Communauté européenne au protocole à la Convention de 1979 sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance relative à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique.

Ainsi, la mesure à **l'immission** correspond à la mesure faite après l'entrée de la pollution (dans ce cas, des particules) dans l'atmosphère. Autrement dit, il s'agit de mesurer les particules là où la pollution atteint directement la population, soit dans l'atmosphère. Les mesures à l'immission sont, par exemple, les mesures faites par *les réseaux de mesure* qui contrôlent la qualité de l'air. Des mesures de ce type correspondent aussi à celles réalisées dans les lieux de travail.

Par ailleurs, mesurer les particules à **l'émission** consiste à faire la mesure avant l'entrée du polluant dans l'atmosphère, c'est-à-dire directement à la source. Ainsi, pour une voiture, la mesure se fait directement à la sortie du pot d'échappement et pour une industrie, directement à la sortie de la cheminée. Ainsi, les normes d'émission d'un polluant sont établies pour des sources définies (comme le cas des "normes Euro" pour les voitures, cf. Chapitre point 4.2.5.1) et en fonction des dommages que ces sources pourraient causer dans l'atmosphère. Les normes à l'immission d'un polluant (ou normes de qualité de l'air) sont établies directement pour l'atmosphère.

### **2.4.1. Méthodes de mesure**

Pour continuer, nous ferons une brève référence aux méthodes de mesures<sup>16</sup> utilisées pour mesurer les immissions et à celles utilisées dans la mesure des émissions des véhicules. Signalons que les méthodes principales utilisées actuellement se basent sur des mesures de concentration en masse des particules.

#### **2.4.1.1. Mesure à l'immission**

Pour mesurer les particules, les appareils utilisés correspondent à ceux qui mesurent les aérosols. **Il existe des appareils de mesure tant automatiques que non-automatiques.** Les premiers réalisent de manière conjointe le prélèvement de l'échantillon et son analyse, pour donner un résultat immédiat. Les seconds réalisent uniquement le prélèvement qui sera postérieurement suivi de l'analyse au laboratoire.

Dans le cas des aérosols, **le prélèvement est réalisé sur des filtres** spécifiques moyennant des pompes qui les aspirent. Les appareils disposent aussi d'un dispositif qui mesure le volume d'air qui est prélevé et d'un système de régulation de ce débit. Sur cette base, il existe une grande variété d'appareils de mesure avec des performances et des applications différentes. Certains d'entre eux font l'objet d'une normalisation (normes internationales ISO, normes européennes CEN). Ainsi, il y a des instruments plus adaptés pour réaliser des mesures à l'immission et d'autres plus adaptés pour mesurer à l'émission.

La grande majorité des appareils d'échantillonnage et de mesure des polluants atmosphériques disponibles aujourd'hui n'ont pas été conçus comme des appareils portables, ce qui limite les conditions d'échantillonnage. Par ailleurs, différents paramètres doivent être pris en compte pour assurer une interprétation adéquate des résultats : l'identification des sources, la direction des vents (pour la pollution extérieure) ou des flux d'air (pour la pollution intérieure), le type d'activités réalisées et les sources externes immédiates (lorsque la mesure s'effectue à l'intérieur d'un local), la durée de l'échantillonnage, etc.

Pour mesurer les immissions, les instruments de mesure sont basés tant sur des méthodes gravimétriques<sup>17</sup> manuelles qu'automatiques, qui déterminent la concentration en masse des PM.

---

<sup>16</sup> Dans une autre approche de la problématique des particules, les différents instruments de mesure seront traités dans le cadre du travail de fin d'études de Olivier Regniers.

<sup>17</sup> Ces méthodes mesurent la pesanté et donnent lieu à des analyses quantitatives.

- **Les méthodes gravimétriques manuelles**

Dans ces méthodes, après être recueillis sur un filtre, les échantillons de particules sont conditionnés à un degré d'humidité et une température prescrits pour ensuite être pesés. Les appareils de mesure utilisés ont différentes têtes d'échantillonnage pour fixer les particules selon leur grandeur (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>). Certains appareils comportent des *pompes à grand débit* (comme le *High Volume Sampler*) et ils réalisent leur prélèvement dans l'ordre du m<sup>3</sup>/heure. D'autres (comme le *Low Volume Sampler*) sont équipés des *pompes à faible débit*. Ces derniers réalisent la même opération mais en travaillant dans l'ordre du litre/minute. Il y a d'autres appareils comme les *Impacteurs en cascade*, qui permettent de recueillir des particules de tailles différentes et qui sont constitués de *plaques trouées*. Derrière ces trous qui deviennent de plus en plus petits, sont placées des plaques qui reçoivent les "impacts" et sur lesquelles les particules sont séparées par inertie selon leur taille.

Dans les méthodes manuelles, les résultats sont obtenus avec un certain retard car il s'agit de méthodes indirectes.

La Directive 1999/30/CE<sup>18</sup> qui établit la méthode de référence pour mesurer la pollution de l'air par les PM<sub>10</sub>, utilise une méthode gravimétrique manuelle. Cette méthode décrite dans la norme *CEN EN 12341* (1999), utilise une tête de prélèvement qui effectue des échantillonnages spécifiques des PM d'une taille inférieure à 10 µm. Cependant, les Etats membres peuvent utiliser toute autre méthode de mesure (comme les procédés automatiques) dont ils peuvent prouver qu'elle donne des résultats équivalents à la méthode de référence. S'agissant de la détermination de la fraction massique PM<sub>2,5</sub> de matière particulaire en suspension dans l'air ambiant, c'est la norme européenne *CEN EN 14907* (2005) qui décrit la méthode de référence. Elle est également basée sur des méthodes de référence gravimétriques manuelles. Par contre, il n'existe pas de consensus sur les méthodes de mesure pour des autres fractions, ce qui rend difficile la comparaison de résultats lorsque les mesures sont réalisées.

- **Les procédés automatiques fonctionnant en (quasi) continu**

C'est le type de procédé utilisé par les appareils des réseaux de mesure télémétriques. Les résultats des mesures sont disponibles dans un délai très court. Le principe de mesure est basé sur la génération d'un signal en (quasi) continu pour la concentration massique des particules. Lorsqu'on utilise des appareils automatiques, il faut appliquer un facteur de conversion de manière à s'assurer de l'équivalence avec le procédé de référence.

Deux méthodes très utilisées en Belgique sont *la méthode de l'absorption β* et *la méthode de la microbalance oscillante* (IBGE, 2005). Les appareils utilisés à ces fins sont les **Jauges β** et les **TEOM** ("Tapered Element Oscillating Microbalance"). Dans la première méthode, après avoir aspiré de l'air chargé de particules à travers un filtre, l'appareil mesure de manière continue l'absorption des rayons β par la matière aspirée. Dans la seconde méthode, des microbalances mesurent la fréquence de résonance d'un filtre oscillant qui est chargé de particules. Les nouveaux analyseurs sont équipés d'un système FDMS (Filter Dynamics Measurement System) qui semble bien compenser les pertes de masse (jusqu'à 30%) produites par les appareils plus anciens. Il faut signaler que les concentrations de particules mesurées sont toujours rapportées aux conditions de température et de pression atmosphérique régnant pendant la mesure. La Belgique utilise dans ses postes de mesure tant la méthode de l'absorption β (Région flamande et Région wallonne) que la méthode de la microbalance oscillante (Région flamande et Région bruxelloise).

---

<sup>18</sup> 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. JO L 163 du 29.06.1999 p. 41–60.

#### 2.4.1.2. Mesure des émissions des véhicules

La méthode utilisée pour mesurer les émissions de véhicules équipés d'un moteur diesel est préconisée par la Directive européenne 88/77/CEE, du 3 décembre 1987<sup>19</sup>.

Les exigences (renforcées par la directive 1999/96/CE) de limitation des émissions s'appliquent aux particules et aux fumées, au monoxyde de carbone, aux hydrocarbures imbrûlés et aux oxydes d'azote. En ce qui concerne les particules, la méthode utilise une méthode gravimétrique. Ainsi, pour la détermination de la masse des particules, les gaz d'échappement sont dilués (généralement d'un facteur 5 à 10) et ramenés à une température inférieure à 51,7°C. Au cours du cycle de fonctionnement du moteur, un échantillon est prélevé moyennant un filtre spécifique. L'émission de particules se détermine en poids (la différence avant et après le prélèvement) et cela est mis en rapport avec la distance parcourue (g/km).

#### 2.4.2. Réseaux de mesure

En ce qui concerne la surveillance de la qualité de l'air au niveau européen, chaque Etat membre est tenu de mettre en place des stations de mesure destinées à fournir des données sur des différents polluants. En ce qui concerne la matière particulaire, la **Directive 80/779/CE concernant des valeurs limites et des valeurs guides de qualité atmosphérique pour l'anhydride sulfureux et les particules en suspension** (cf. Chapitre 4), est la première à imposer la mise en place de stations de mesure destinées, en partie, à mesurer les particules atmosphériques.

En 1997, l'échange d'informations et de données sur la pollution de l'air ambiant provenant tant des stations individuelles que des réseaux fut établi au niveau européen. En effet, la **Décision 97/101/CE sur les échanges d'informations en matière de pollution atmosphérique** introduit une procédure d'échange réciproque dans les Etats membres. Cette décision s'applique pour les particules en suspension entre autres polluants. Par cette décision, les renseignements ainsi obtenus sont transmis à la Commission qui construit une base de données accessible au public au moyen d'un système d'informations. Ce système, mis en place par l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE), est connu sous le nom **Airbase** (the European Air quality database<sup>20</sup>). Actuellement, cette base de données contient des informations provenant des Etats membres de l'UE, des pays membres de l'AEE ainsi que des pays candidats (candidats AEE). En 2001, une nouvelle **Décision (2001/752/CE)** modifiera la liste des polluants concernés. Dans cette liste adaptée se trouvent les PM<sub>10</sub>, les PM<sub>2,5</sub> et les PM totales (ou TSP).

Le suivi et l'évaluation des PM, au niveau européen, est ainsi basé sur des données recueillies par la base de données Airbase, sur base des données rapportées pour les Etats membres à la Commission européenne et sur base de données obtenues dans le cadre du Programme de surveillance continue et d'évaluation du transport à long distance (EMEP). Couramment, **dans le cadre de ces réseaux, les PM<sub>10</sub> sont rapportées depuis plus de 1.000 sites en Europe**. Par contre, **le réseau pour les PM<sub>2,5</sub> est beaucoup moins dense**. Même si le suivi des PM<sub>2,5</sub> s'est répandu rapidement, les données ne sont toujours rapportées que de quelques stations (119 environ). De même, les stations oscillent entre 15 et 24 pour toute l'Europe en ce qui concerne les données des PM<sub>1</sub> et des particules ultrafines (PM<sub>0,1</sub>) (CAFE WG, 2004). Ainsi, un suivi systématique des particules de la fraction fine se montre nécessaire. L'Annexe 2.II présente comme exemple les niveaux de concentration annuels des PM<sub>10</sub> et des PM<sub>2,5</sub> mesurés par les réseaux de mesure des différents Etats membres en 2004.

<sup>19</sup> Directive 88/77/CEE, du 3 décembre 1987, concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux mesures à prendre contre les émissions de gaz polluants et de particules polluantes provenant des moteurs diesel destinés à la propulsion des véhicules. JO L 36 du 09.02.1988; modifiée par la directive 1999/96/CE du Parlement et du Conseil, du 13 décembre 1999. JO L 44 du 16.02.2000.

<sup>20</sup> Site internet Airbase: <http://airbase.eionet.europa.eu>, accédé le 30/12/2006.

Ci-dessus, nous présenterons à titre d'exemple le réseau des stations de mesures de la qualité de l'air de la Région Bruxelles-Capitale.

### 2.4.2.1. Réseau des stations de mesures de la Région Bruxelles-Capitale

Le laboratoire de Recherche en Environnement de l'IBGE réalise, conformément à l'Ordonnance Air<sup>21</sup>, la surveillance de la qualité de l'air dans cette région. A cette fin, la Région comporte deux systèmes de mesure qui relèvent en permanence les concentrations des polluants typiques des zones urbaines :

- un système de mesure en temps réel qui est aussi appelé *réseau téléométrique*
- un système de mesure qui réalise des analyses différées, appelé *réseau non téléométrique*

Le réseau téléométrique comporte des appareils qui enregistrent en continu (appareils automatiques) la concentration de plusieurs polluants dans l'air ambiant. Ils mesurent ainsi tant des particules (PM<sub>10</sub> que PM<sub>2,5</sub>) et certains de leurs gaz précurseurs (SO<sub>2</sub>, NOX - NO, NO<sub>2</sub>-) que d'autres polluants (ozone, oxydes de carbone, BXT<sup>22</sup>, mercure). Ce type de réseau permet ainsi d'informer de manière relativement rapide la population de l'évolution de la qualité de l'air. La diffusion de l'information est très importante dans certains cas, comme par exemple un niveau élevé d'ozone.

Dans le réseau non téléométrique, des échantillons de l'air qui sont prélevés avec une fréquence hebdomadaire sont envoyés au laboratoire pour être analysés. Ils donnent une valeur par jour pour la concentration dans l'air de chacun des polluants analysés. Des précurseurs des PM (COV, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> et HAP) sont mesurés toute comme d'autres polluants tels que des métaux lourds (plomb, cuivre, thallium, arsenic, nickel, chrome, manganèse, antimoine et cadmium) et des substances acidifiantes (fluorure et le chlorure). Les poussières sont mesurées comme fumées noires.

Remarquons que les particules ultrafines ne sont pas mesurées dans le cadre de ces réseaux. Il n'y a pas donc un suivi de leur concentration dans l'air ambiant dans la Région bruxelloise.

La localisation des stations de mesure et les différents types de mesures effectuées sont présentés dans le **Tableau 2.d**. Six stations enregistrent en continu les concentrations des PM<sub>10</sub> (Molenbeek, Haren, Parc Meudon, Berchem-Ste-Agathe, Woluwé-St-Lambert et Ixelles). Actuellement, les trois premières stations enregistrent aussi les teneurs de PM<sub>2,5</sub>. Il est à noter que même si l'emplacement des stations a été choisi en fonction de la proximité au trafic routier et de la densité de la population, les mesures des stations caractérisent en fait les différentes zones (**Tableau 2.c**) de la région.

**Tableau 2.c : Stations de mesure dans la Région Bruxelles Capitale et caractéristiques des différentes zones**

Urbain	Plus industriel	Plus résidentiel	Dégagé à trafic intense	Non dégagé à trafic intense
Molenbeek; Ste Catherine; Parlement européen	Haren (Port de Bruxelles); Parc Meudon	Uccle; Berchem-Ste-Agathe	Woluwé-St-Lambert; Eastman-Belliard	Ixelles; Arts-Loi

<sup>21</sup> Ordonnance cadre relative à l'évaluation et à l'amélioration de la qualité de l'air ambiant, Parlement de la Région de Bruxelles-Capitale du 25 mars 1999.

<sup>22</sup> BXT= benzène, toluène et xylène.

Ainsi, l'évaluation de la qualité de l'air pour la totalité du réseau, permet une caractérisation des différents polluants tant au niveau régional global (pollution de fond) que localisé (typiques de différentes zones).

Par ailleurs, sur base des données mesurées en continu provenant du réseau de stations de mesures, l'IBGE propose aussi deux indices dynamiques: *l'indice global* et *l'indice trafic*, intégrés dans *"le Pollumètre"* afin de permettre au citoyen d'avoir une idée de l'état de la qualité de l'air en Région bruxelloise. Le premier est calculé sur base des teneurs détectées des PM<sub>10</sub>, d'ozone, de NO<sub>2</sub> et de SO<sub>2</sub> et permet d'estimer l'état de la qualité de l'air dans l'ensemble de la région. Cet indice compare les données obtenues avec des normes européennes. Le second correspond à un indice de la qualité de l'air dans des environnements à forte densité de circulation. Dans ce cas, le calcul rassemble les données des stations qui se trouvent à proximité de grands axes de circulation. Il inclut ainsi des données pour les NO<sub>x</sub> et le monoxyde de carbone (CO). Ces indices sont présentés sous forme d'échelle "en temps réel", car ils sont renouvelés toutes les heures. L'échelle représente des valeurs allant d'"excellente" (valeur 1) à "exécration" (valeurs 10). Par exemple, une valeur d'indice global 7, indique la proximité des seuils limites de pollution.

**Tableau 2.d : Localisation et type de mesures effectuées**

Commune	Station de mesure	Mesure en temps réel										Mesure avec analyse différée						
		SO2	NOx	O3	CO	CO2	PM 10	B T X	Vp Hg	A	Pb	H A P	C O V	Mét Lrds	NH3	D H	FN	HCL HF
Ixelles	Av. Couronne	x	x		x	X						x	X	x				x
Bruxelles	Arts-Loi	x	x		X	(x)							X					
Woluwé	Gulledelle (IBGE)	x	x	x	x	x	X	X					X	X		x		
Uccle	IRM	x	x	x		X	X			x	x	X	x		x	x	X	X
Molenbeek	Ecluse	x	x	X	X		X			x			X					
Haren	Port Bxl	x	X	X	X		X											
Berchem	Drève des Maricolles	x	x	x			X			x							(x)	
Neder-over-Heembeek	Parc Meudon	X	X				X		X		X	X		X	X			X
Bruxelles	Police Bruxelles													X		x		X
Bruxelles	Espace Léopold (Parl. Eur)		X	X	X				(x)									
Bruxelles	R.Belliard	X	X		X						x	X						
Bruxelles	St Catherine		X	X	X													
Anderlecht	Station sud		(x)	(x)			(x)											
Forest	Electrabel (club tennis)	X	X	X	X													
Bruxelles ville x 2	Tunnel Léopold II x 2		(x)	(x)	(x)	(x)												
Laeken	Cité Modèle														(x)			
Ixelles	IHE-garden										(x)	X						
Anderlecht	Police													(x)				
Anderlecht	(AND2)										X							
Total		10	15	11	11	6	7	2	1	3	5	6	5	1	4	2	3	3

source : IBGE

Vp: vapeur; Mét Lrds: métaux lourds; DH: dépôt humide; FN: fumée noire

Les x représentent le réseau de mesures en 1996 ; les X représentent les changements dans le réseau de mesures entre 1996 et 2004; les (x) représentent les mesures supprimées.

## 2.5. Conclusion-Résumé

Les particules sont des systèmes complexes, formés par un mélange de constituants solides et liquides. Elles varient non seulement en taille et en composition, mais aussi en morphologie et en origine. Leurs précurseurs clefs sont le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et les composés organiques volatiles non-méthanés (COVNM).

Les particules tant primaires que secondaires sont issues de différents type de sources : naturelles et anthropiques, fixes et mobiles.

La distribution des tailles des aérosols révèle que la majorité de la masse correspond principalement aux particules grossières et que les particules ultrafines sont de loin les particules les plus abondantes dans l'atmosphère.

En ce qui concerne les noms attribués aux différentes tailles de particules, notons qu'il existe un manque d'harmonisation dans les définitions. Le problème est surtout évident quand on parle des particules submicroniques, ultrafines et des nanoparticules.

Les principales sources anthropiques des particules correspondent au transport routier, à l'industrie et au secteur domestique. En 2000, elles contribuaient entre 25% et 34% chacune aux PM<sub>2,5</sub>.

Tous ces secteurs sont aussi d'importants émetteurs d'autres gaz précurseurs. Le secteur de l'agriculture est la première source d'ammoniac et des composés azotés.

En ce qui concerne les PM<sub>10</sub>, plus d'un tiers des émissions primaires ont été produites par le secteur industriel (plus l'agriculture), 34% par les transports et 27% par le secteur domestique.

Dans les nouveaux pays membres, l'apport en émissions, tant des PM<sub>2,5</sub> que des PM<sub>10</sub>, est plus important pour le secteur domestique et pour la production d'énergie que dans les pays de l'UE-15. Par contre, les émissions du secteur de transport se révèlent inférieures.

De manière générale, les mesures dans des zones différentes (urbaines, à haut trafic et rurales) montrent l'importance des PM dans les zones à haut trafic. Ces dernières sont suivies par les zones urbaines.

Il est important de signaler qu'en 2002 tant la valeur limite annuelle que la valeur limite journalière pour 2005 (valeurs limites établies pour la protection de la santé) ont été dépassées dans plusieurs pays. En Belgique, la valeur journalière (qui ne doit pas être dépassée plus de 35 fois/an) a été dépassée 155 fois à Bruxelles.

Même si les mécanismes d'élimination des particules dans l'air constituent des puits, les particules peuvent devenir un problème transfrontalier. Ce fait est lié aux problèmes d'acidification et d'eutrophisation en dehors des pays dans lesquels elles ont été produites.

L'ampleur des contributions transfrontalières des PM dans un pays donné est déterminée non seulement par les conditions météorologiques et les émissions des pays voisins mais aussi par sa localisation géographique. Généralement, la contribution d'un pays aux aires voisines immédiates est comprise entre 3% à 15%.

Le **Tableau 2.e** résume les différentes caractéristiques de la fraction grossière et de la fraction fine des particules.

**Tableau 2.e : Caractéristiques des particules**

CARACTERISTIQUES	Fraction fine (< 2,5 µm)		Fraction grossière (2,5-10 µm)
	Particules Ultrafines (< 0,1 µm)	Mode d'accumulation (0,1-1 µm)	
Formation	Nucléation; condensation; coagulation	Condensation; coagulation	Perturbation mécanique (abrasion des surfaces, etc.); Suspension des poussières; évaporation des embruns
Principal Paramètre	Nombre; surface	Masse; nombre; surface	Masse
Composition	Sulfates ; carbone élémentaire; composés métalliques; composés organiques	Sulfates; nitrates; ammonium; ions hydrogène; composés organiques; métaux: Pb, Cd, Ni, Cu, Zn, Fe...	Cendres volantes (combustion charbon, bois, pétrole); nitrates; chlorures; HCl; oxydes (aluminium, titan, fer, silicium); carbonate de calcium; NaCl; sel marin; pollen; spores; fragments animaux et végétaux ; moisissure; garnitures de frein et d'embrayage; fragm. de pneumatiques
Sources	Combustion; transformation atmosphérique à partir de SO <sub>2</sub> et certains COV; processus à haute température	Combustion de charbon, pétrole, diesel, bois, essence; transformation atmosphérique de produits de NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> et carbone organique (incluant des espèces tels que terpenes); processus à haute température; fonderie; aciérie...	Agriculture, industrie minière, etc. par la suspension des poussières industrielles, des poussières de la chaussée, du sol perturbé; construction et démolition; Combustion de charbon, pétrole non-contrôlés; sources biologiques; la mer
Temps de résidence	Minutes à heures	Jours à semaines	Minutes à jours
Mécanisme d'élimination	Croissance au mode d'accumulation; diffusion aux gouttes de pluie	Déposition sèche; précipitations	Déposition sèche-retombées
Distance voyagée	< dizaines de km	Centaines à milliers de km	< centaines de km
Contrôlé par la législation actuelle	Non	Non (mais Proposition de Directive avec plafond)	Oui (à travers les PM <sub>10</sub> )
Suivi	Non ou non-systématique	Oui (à travers les PM <sub>2,5</sub> )	Oui (à travers les PM <sub>10</sub> )

source : Adaptation de EPA 2004

La mesure de la matière particulaire se réalise tant à l'immission (après l'entrée de la pollution dans l'atmosphère) qu'à l'émission (avant cette entrée, c'est-à-dire directement à la source). Pour mesurer les immissions, il existe des procédés automatiques et manuels.

La Directive 1999/30/CE établit la méthode de référence pour la mesure de la pollution de l'air par les PM<sub>10</sub>. Par contre, il n'existe pas de consensus sur les méthodes de mesure pour les autres fractions, ce qui rend difficile la comparaison de résultats.

La méthode utilisée pour mesurer les émissions de véhicules est préconisée par la Directive européenne 88/77/CEE. Il s'agit d'une méthode gravimétrique utilisée pour déterminer la masse de particules.

Retenons aussi que l'évaluation des concentrations des particules à travers l'utilisation de modèles produit une sous-estimation systématique (entre 20 % à 30 %) du fait que les aérosols secondaires ne sont pas inclus.

Finalement, selon des estimations, les émissions vont être réduites à l'horizon 2020 (avec la législation en vigueur). Cependant, ces réductions ne seront pas suffisantes pour éliminer tous les effets nocifs ni pour la santé humaine ni pour les écosystèmes. Le contrôle des particules et de l'ozone restent ainsi des défis pour la législation à venir.

## 3. Les effets des particules sur la santé et sur l'environnement

---

*Après l'aperçu des caractéristiques générales de la matière particulaire traité dans le chapitre précédent, nous aborderons ici leurs impacts sur la santé humaine et sur l'environnement. Nous accorderons une attention toute spéciale aux études épidémiologiques. Nous nous pencherons davantage sur les enfants, qui constituent une tranche de la population particulièrement sensible. Le but principal de ce chapitre est d'étudier la relation entre les différentes tailles des particules et leurs effets sur la santé.*

### 3.1. Les effets sur la santé

L'exposition à la pollution atmosphérique se révèle être un des facteurs à l'origine des dommages importants causés à la santé publique. Ces polluants sont largement liés aux activités humaines dans plusieurs secteurs, tels que le transport, l'industrie, la production d'énergie, l'agriculture et le secteur résidentiel.

Exception faite de l'ozone troposphérique, les principales préoccupations en matière de santé publique résultent des particules atmosphériques. Leur composition, leur surface, leur nombre et leur taille, sont des caractéristiques qui contribuent à déterminer leur toxicité. Ces particules sont capables également de se déplacer sur de longues distances et donc de franchir les frontières nationales. C'est pourquoi elles finissent aussi par créer des risques pour la santé loin de leurs sources d'émission.

L'impact des particules atmosphériques sur la santé humaine a fait l'objet de nombreuses études ces vingt dernières années. Plusieurs d'entre elles ont montré des effets néfastes sur la santé tant en ce qui concerne la morbidité que la mortalité. Ainsi, **aux niveaux actuels de concentration des PM en Europe, l'exposition à la pollution particulaire a pour conséquence un éventail de différents effets : depuis de simples irritations respiratoires au cancer du poumon.** L'effet le plus sévère en terme de santé consiste en une **réduction significative** (d'un an ou plus) **de l'espérance de vie** de la population. Cette dernière est liée à l'exposition aux PM à long terme.

La matière particulaire affecte surtout les systèmes respiratoire et cardio-vasculaire. C'est pourquoi, en 1999, afin de protéger la santé publique, la première directive-fille de la directive-cadre sur la qualité de l'air (cf. Chapitre 4, point 4.2.1.2), fixe entre autres, les valeurs limites pour les PM<sub>10</sub> dans l'air ambiant, sur base des recommandations de l'OMS. Depuis lors, une évidence scientifique croissante est apparue pour renforcer le lien entre l'exposition aux PM dans l'air et les effets indésirables sur la santé. Cependant, il n'a pas été possible d'établir une relation causale entre les effets sur la santé et un seul composant, même si les particules issues des sources de combustion sont pointées du doigt. Par exemple, en 1990, une étude à Dublin a démontré les bénéfices sur la santé de l'interdiction d'utilisation du charbon pour le chauffage domestique (Clancy et al., 2002). Les métaux que les particules issues de sources de combustion peuvent contenir et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) en présence se sont révélés des composants importants dans l'évaluation de leur toxicité.

Des effets nocifs sur la santé (induction de réponses inflammatoires des voies aériennes, du sang périphérique et des poumons) sont causés par l'exposition aux émissions de suies diesel (Salvi et al., 1999; Nemmar et al., 2002). D'ailleurs, ces particules sont également composées de dérivés soufrés et d'hydrocarbures imbrûlés (HC) parmi lesquels se trouvent les HAP. Ces derniers présentent non seulement des propriétés carcinogènes mais aussi des propriétés mutagènes.

Les rapports scientifiques se sont principalement penchés sur l'étude de deux tailles spécifiques de particules : les PM<sub>2,5</sub> et les PM<sub>10</sub>. Pourtant, ces dernières années, le développement des nanotechnologies dans différents domaines ont ravivé les préoccupations concernant les impacts des particules ultrafines (PM<sub>0,1</sub>) sur la santé humaine et environnementale.

A ce sujet, les études scientifiques reflètent une diversité d'approches. Elles incluent l'observation épidémiologique, les expositions humaines contrôlées aux polluants, la toxicologie animale et les études in vitro. Il est important de signaler que les études épidémiologiques sont des études de haute valeur scientifique puisque même si l'exposition humaine qu'elles analysent correspond à un mélange de particules et de gaz, elle provient de conditions de vie réelle. Ainsi, elles analysent un spectre complet des sensibilités : les enfants, les personnes âgées, les personnes avec des maladies préexistantes. En plus, l'extrapolation à l'homme des résultats obtenus sur d'autres espèces animales n'est plus nécessaire. C'est pourquoi nous nous focaliserons, dans ce travail, sur ce type d'études scientifiques plutôt que sur d'autres.

### **3.1.1. L'inhalation de particules, leur élimination et leur dépôt dans le système respiratoire**

*Pour comprendre plus en profondeur les résultats de ces études ainsi que les hypothèses en cours sur les mécanismes d'action possibles des PM, il est utile d'abord d'étudier brièvement tant les caractéristiques générales du système respiratoire humain que le chemin emprunté par les particules et leur éventuel dépôt dans ce dernier.*

#### **3.1.1.1. Le poumon et les mécanismes d'élimination ou de clearance pulmonaire**

L'efficacité du poumon comme surface respiratoire dépend non seulement du nombre d'alvéoles pulmonaires mais aussi de leur relation étroite avec le système capillaire pulmonaire. Ce dernier piège l'oxygène qui arrive aux alvéoles et permet la diffusion du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) contenu dans le sang vers l'extérieur. Dans l'organisme humain, les deux poumons contiennent environ 700 millions d'alvéoles, ce qui donnerait une surface totale de plus de 70 m<sup>2</sup> si elles étaient étalées (presque l'équivalent d'un terrain de tennis!). Par ailleurs, le réseau capillaire qui entoure les poumons correspond à une aire totale d'environ 40 m<sup>2</sup>. Nous avons donc une surface très importante destinée à l'échange des gaz, sous une forme très compacte, dans les poumons.

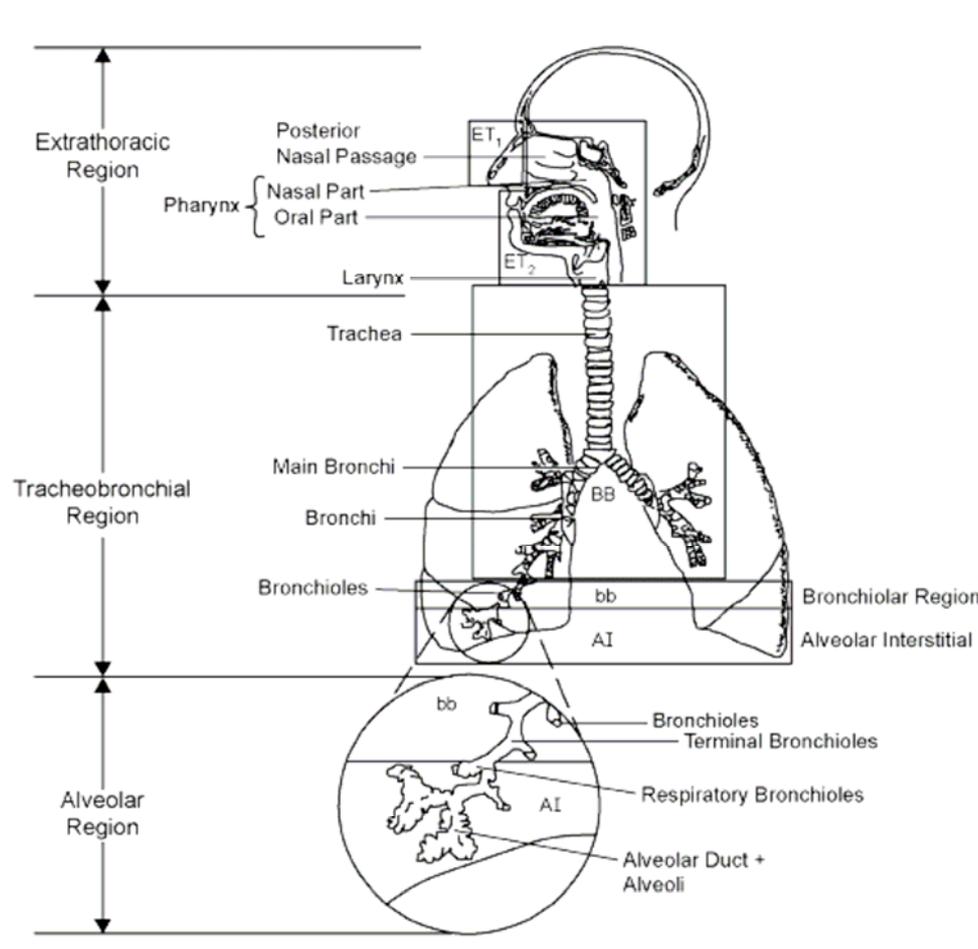
Les alvéoles sont des structures polyédriques avec des parois très fines et leur nombre est estimé entre 2.10<sup>8</sup> et 5,7.10<sup>8</sup> pour un adulte (Schneider et Raabe, 1981 cité par EPA, 2004b). Les parois alvéolaires jouent un rôle essentiel dans l'échange gazeux O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>. A cette fin, elles sont formées par une couche simple de cellules épithéliales, ce qui offre une résistance minimale à la diffusion des gaz, tant vers le sang que vers l'extérieur (Roberts, 1996). Leur surface épithéliale est couverte d'un liquide complexe de lipo-protéines connu sur le nom de *surfactant*, qui empêche l'alvéole de s'effondrer spontanément. La fine couche de surfactant contient des substances (des phospholipides, en particulier de dipalmitoyl lécithine) qui présentent une réactivité importante. Ainsi, ces substances interagissent avec les petites particules qui pourraient arriver aux alvéoles.

Trois régions anatomiques importantes sont normalement considérées dans la littérature lorsqu'on parle du système respiratoire (**Figure 3.1**). Il s'agit de :

- la **région extra-thoracique** (ou conduit respiratoire supérieur) qui comprend les voies aériennes supérieures : le nez, la bouche, le larynx et le pharynx et dans lesquelles sont retenues les plus grandes des *particules inhalables* (cf. Chapitre 2, point 2.1.2) et aussi les particules ultrafines.

- la **région trachéo-bronchique**, comprend la trachée et les bronches. Les particules qui arrivent à cette région sont en général balayées par l'action de l'épithélium cilié. Celles qui arrivent à se déposer correspondent à la *fraction thoracique* (ou *trachéo-bronchique*) des particules.
- la **région alvéolaire** (ou pulmonaire) inclut les bronchioles, les conduits alvéolaires et les alvéoles elles-mêmes. Les particules qui pénètrent profondément dans les poumons jusqu'à cette région d'échanges gazeux, correspondent à la *fraction alvéolaire* (ou *particules respirables*, c'est-à-dire les particules fines et ultrafines).

Figure 3.1 : Le système respiratoire et ses régions



ET: extrathoracic  
 BB: bronchi  
 bb: bronchioles  
 AI: alveolar interstitial

source : EPA, 2004b

Le poumon est un organe très exposé en raison de sa surface, cependant il est aussi protégé à différents niveaux. On trouve la première barrière mécanique au niveau de la bouche et du nez. Plus profondément dans le système, des *cellules muqueuses* et des *cellules ciliées* contribuent conjointement avec les *macrophages* au nettoyage et à la maintenance des différentes surfaces pulmonaires. En effet, quatre mécanismes principaux interviennent afin d'éliminer les particules inhalées (Schlesinger, 1995). Il s'agit de :

- **l'élimination mucociliaire** (ou *clearance mucociliaire*), dans laquelle interviennent les cellules muqueuses et ciliées. Elle est importante dans la région extra-thoracique et trachéo-bronchique du système respiratoire et surtout pour les particules peu solubles.
- **l'élimination alvéolaire** (ou *clearance alvéolaire*), qui est réalisée du fait de l'endocytose par les macrophages alvéolaires et les cellules épithéliales.
- **la toux et l'éternuement** sont importants pour les grandes particules. La toux est un mécanisme important qui permet surtout d'éliminer des particules de la région trachéo-bronchique. L'éternuement, quant à lui, les élimine de la région extra-thoracique.

Tant la trachée, les bronches que les bronchioles sont tapissées d'un épithélium cilié. Grâce à un mouvement ondulant, des cellules ciliées transportent un mucus (produit par les cellules muqueuses) chargé en particules en direction de la gorge. Ainsi, le mucus est continuellement soit avalé, soit expectoré. Ce processus de transport et d'élimination correspond à *l'élimination mucociliaire*. Par ce mécanisme, les particules sont évacuées en un laps de temps qui va de un à trois jours. Postérieurement elles seront métabolisées et leurs composants solubles seront éventuellement éliminés de l'organisme. Cependant, les particules ultrafines ne suivent pas ce mécanisme d'élimination et restent dans un haut pourcentage plusieurs semaines dans les bronches.

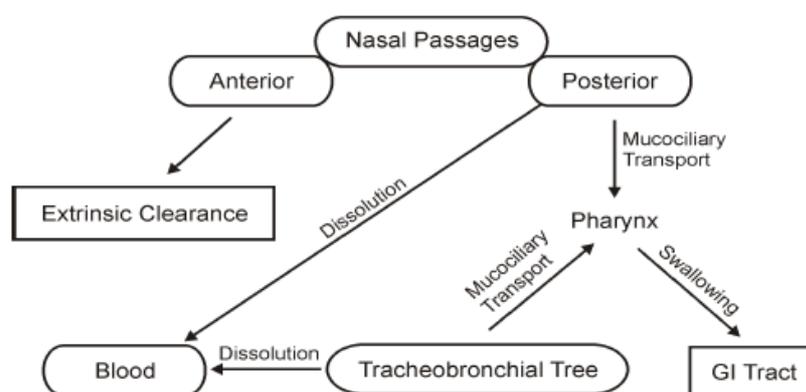
La **Figure 3.2.a** présente les mécanismes principaux d'élimination pour les régions extra-thoracique et trachéo-bronchique.

Par ailleurs, *l'élimination alvéolaire*, comme son nom l'indique, a lieu dans les alvéoles où il n'y a ni revêtement cilié ni mucus. Ici, les particules sont éliminées par les macrophages alvéolaires, des cellules du système immunitaire spécialisées qui engloberont principalement les particules grossières (PM<sub>2,5-10</sub>) et fines (PM<sub>2,5</sub>) comme elles le font avec les restes de cellules mortes et des bactéries pour les digérer (endocytose). Les produits ainsi métabolisés seront versés soit au niveau des tissus pulmonaires pour être éliminés via l'élimination mucociliaire soit dans la circulation sanguine (**Figure 3.2.b**).

Une partie de ce nettoyage est également réalisé par le système nerveux grâce au réflexe de toux et d'éternuement. Ce processus contribuera non seulement à éliminer des agents pouvant causer un dommage aux conduits pulmonaires, comme les virus et les bactéries, mais aussi à éviter que les particules de grandes tailles ne rentrent dans le système.

**Figure 3.2.**

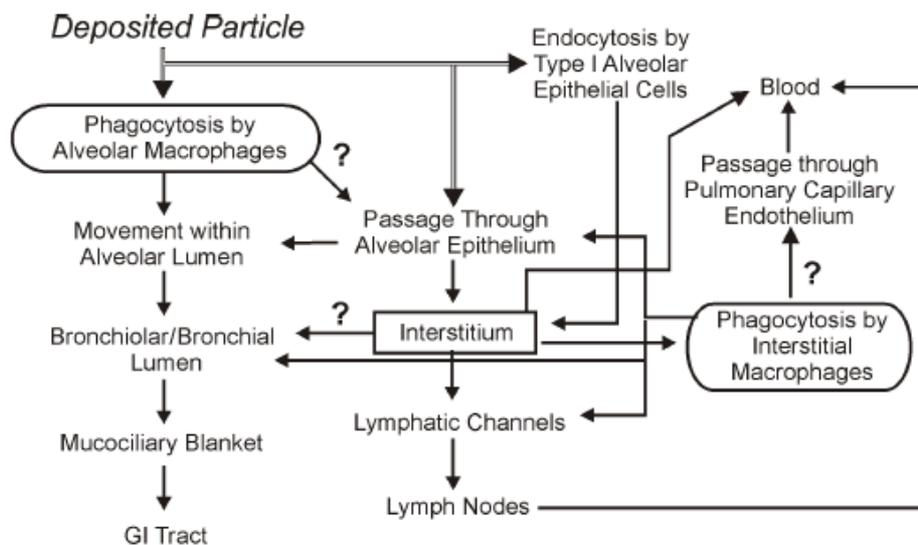
**a: Mécanismes d'élimination pour les particules déposées dans les régions extra-thoracique et trachéo-bronchique du tractus respiratoire**



GI: tract gastro-intestinal; Anterior: passages nasaux antérieurs; Posterior: passages nasaux postérieurs

L'élimination des particules dans les passages nasaux postérieurs se produit par transport mucociliaire. Le mucus se dirige alors vers la région naso-pharyngée. Lorsque le mucus se dirige vers la portion antérieure des passages nasaux, l'élimination se produit par éternuement (extrinsic clearance). Il est important de noter que les passages nasaux sont bien irrigués et les particules solubles peuvent être absorbées dans le sang par dissolution.

**b: Mécanismes d'élimination connus et pressentis (ces derniers indiqués par "?") pour des particules de basse solubilité déposées dans la région alvéolaire**



source figures a et b : EPA, 2004 b; Adaptation de Schlesinger et al., 1997

La dissolution et l'absorption dans le sang ou la lymphe est un mécanisme de translocation des particules vers la circulation, lorsque ses composés sont solubles.

**3.1.1.2. Les mécanismes de dépôt des particules**

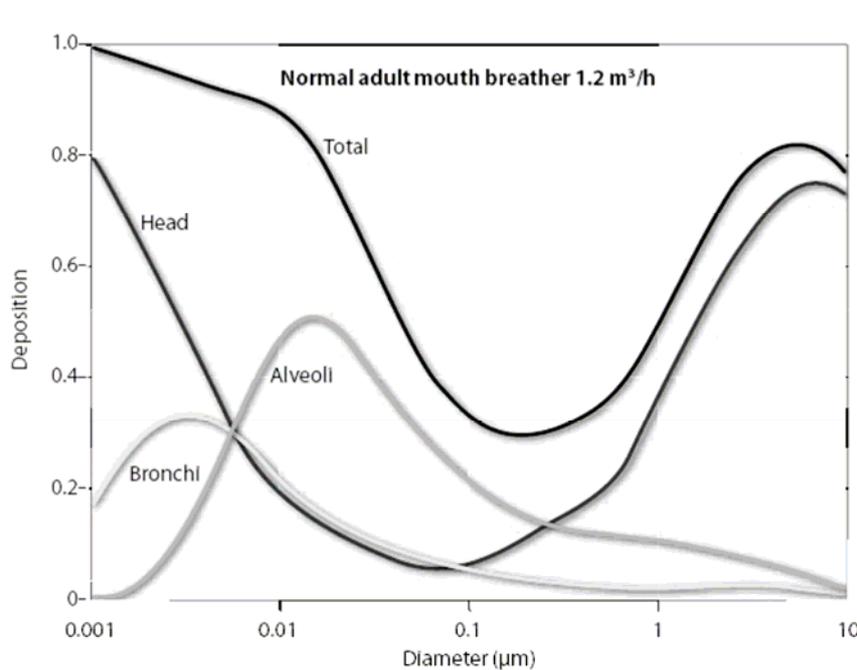
Le volume d'air lors d'une inspiration normale au repos pour un adulte est d'environ 0,5 litres ; il est appelé *volume tidal*. Le rythme respiratoire, quant à lui, se situe aux environs de 15 inspirations par minute au repos, mais il peut tripler lors des efforts. Ainsi, **un adulte inhale environ 11 m<sup>3</sup> d'air par jour...**

Chaque fois qu'on inspire, des particules microscopiques rentrent par milliers dans les voies respiratoires. Selon leur taille, elles se déposent dans un compartiment particulier : le nez, la gorge, la trachée, les bronches, les bronchioles ou les alvéoles. Elles peuvent dans le meilleur des cas être éliminées hors des poumons. Sinon, par la suite, certaines d'entre elles vont se déposer dans le système respiratoire. La **probabilité de dépôt**, c'est à dire la probabilité moyenne pour une particule d'une certaine taille de se déposer dans un compartiment précis du système respiratoire, dépendra (parmi d'autres facteurs) des composés hygroscopiques<sup>23</sup> dont elles sont constituées. C'est ainsi que l'humidité du tractus respiratoire agira en faisant grossir rapidement certaines particules, ce qui contribuera à déterminer leur lieu de dépôt. La **Figure 3.3** présente la probabilité de dépôt des PM dans le système respiratoire pour un adulte en bonne santé.

<sup>23</sup> La tendance à absorber l'humidité de l'air.

Les particules atmosphériques d'un diamètre aérodynamique de 10  $\mu\text{m}$  ne sont pas inhalées. Elles sont filtrées par le nez ou éventuellement (principalement lors d'une inspiration par la bouche) elles s'accablent dans la gorge. Cependant, les particules de tailles inférieures à 10  $\mu\text{m}$  pénètrent profondément dans le système respiratoire.

**Figure 3.3 : Probabilité de dépôt pulmonaire des particules en  $\mu\text{m}$ ; "Head": correspond aux zones du nez, du larynx et du pharynx**



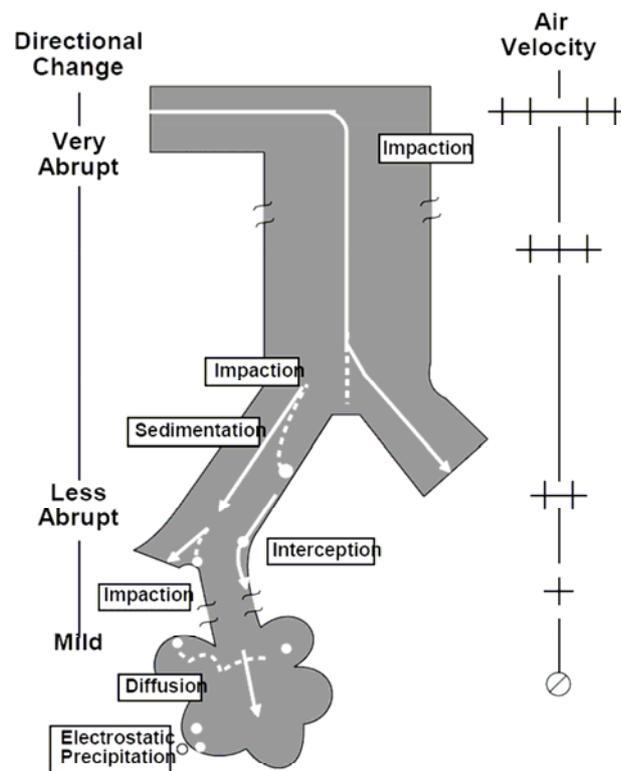
source : WG Kreyling; adaptation International Commission on Radiological Protection, 1995

On peut remarquer que le dépôt total dans les poumons est minimale pour les particules ayant un diamètre approximatif de 300 nm. Cela s'explique par l'analyse des mécanismes de dépôt. Cinq **mécanismes de dépôt** des particules inhalées sont normalement considérés (EPA, 2004, Lamy, 2004) (**Figure 3.4**) :

- les **collisions** ("impaction" en anglais) : c'est un phénomène connu aussi sous le nom de "dépôt par inertie". Il s'agit des collisions contre la paroi des voies respiratoires. Ce mécanisme peut avoir lieu chaque fois qu'il y a un changement de direction de la masse d'air du fait de l'anatomie des différentes régions du système. Lorsqu'un changement de direction se produit, les particules (surtout les plus grandes) ont tendance à continuer leur chemin en ligne droite et finissent par frapper les parois des zones d'intersection entre les branchements.
- la **sédimentation** qui aura lieu du fait des forces de gravité agissant sur les particules. Ce processus intervient dans les conduits plus petits et de préférence dans les sections horizontales. Il est important pour les matières hygroscopiques, qui augmenteront en volume rapidement au contact de l'atmosphère saturée d'eau du tractus respiratoire.
- la **diffusion** produit surtout des dépôts de petites particules ( $< 1 \mu\text{m}$ ). Ces dernières sont suffisamment petites pour que leur déplacement soit influencé par le mouvement aléatoire des molécules de gaz qui viennent à leur rencontre. Le mouvement aléatoire mentionné est connu sous le nom de "mouvements brownien" et il est plus important pour les particules de moins  $0,5 \mu\text{m}$ .

- *l'interception* : ce phénomène se produit par interaction entre la paroi interne du tractus respiratoire et les particules. Du fait de leur dimension, les particules rentrent en contact avec la paroi et y adhèrent.
- la *précipitation électrostatique* : elle se produit par attraction électrostatique entre les particules et les parois. Cette attraction est induite sur les parois uniquement par les particules fortement chargées. Ce phénomène est important au niveau alvéolaire.

**Figure 3.4 : Représentation schématique des mécanismes de dépôt des particules dans les voies respiratoires. Le flux inspiratoire est représenté par des flèches, la trajectoire des particules par des traits en pointillé.**



source : EPA, 2004b; adaptation de Casarett (1975), Raabe (1979), Lippmann and Schlesinger (1984)

Le dépôt est influencé par le fait que l'inhalation est effectuée soit par le nez, soit par la bouche. Si la respiration est réalisée par le nez, la grande majorité des particules grossières est retenue par les muqueuses nasales, en se déposant sur les cellules épithéliales du nez. Par contre, lorsque l'inspiration provient de la bouche, des particules de différentes tailles pénètrent plus librement dans le pharynx et les bronches. En ce qui concerne le risque qu'elles engendrent pour la santé, il dépendra non seulement de la section du tractus respiratoire à laquelle les particules (des différentes tailles) ont pu arriver, mais aussi de la durée pendant laquelle elles y ont été retenues.

Les collisions et la sédimentation représentent des mécanismes de dépôt importants pour les particules fines, principalement dans la région trachéo-bronchique. Avec les bifurcations successives du tractus respiratoire, la vitesse de l'air inspiré diminue. Ainsi, les forces gravitationnelles ont plus de temps pour agir. De ce fait, la sédimentation est un mécanisme de dépôt important principalement dans les bronches et dans les bronchioles.

Ainsi, si les particules grossières se déposent de préférence dans le larynx et le pharynx, les particules plus petites peuvent migrer plus profondément pour atteindre les bronchioles et les alvéoles. Pourtant, les particules d'une taille d'environ 300 nm sont trop petites pour que les mécanismes de dépôt tels que les collisions, la sédimentation et l'interception soient significatifs. Par ailleurs, elles sont aussi trop grandes pour que la diffusion puisse être importante, c'est pourquoi elles présentent un minimum de dépôt dans le système respiratoire.

**De façon générale, les particules fines, les ultrafines et les nanoparticules se déposeront tant dans les bronches et bronchioles que dans les alvéoles pulmonaires.**

Un risque plus important pour la santé apparaîtrait dans les cas d'inhalation de particules encore plus petites et jusqu'à 20 nm (nanoparticules) qui ne sont pas éliminées par le mouvement brownien. Plus leur taille diminue, plus la proportion de particules qui se déposeront à la périphérie des poumons augmente, avant que le flux d'air ne puisse les retransporter hors des poumons. Autrement dit, plus les particules sont petites, plus les membranes alvéolaires seront affectées.

### **3.1.1.3. Facteurs qui influencent le dépôt des particules**

Le dépôt de particules inhalées dans chaque région du système respiratoire est influencé par différents facteurs : l'exposition de l'individu, ses caractéristiques personnelles (le sexe, l'âge, l'état physique, ses habitudes sportives ou au contraire son manque d'exercice physique, son état de santé en général), les caractéristiques anatomiques (taille du tractus respiratoire, forme de l'arbre bronchique, etc.) et physiologiques (comme le rythme respiratoire et les mécanismes de élimination), mais aussi les propriétés physico-chimiques de l'aérosol en question (la taille des particules, leur hygroscopicité, leur solubilité, ...). Parmi ces facteurs, nous soulignerons brièvement les caractéristiques personnelles des individus exposés :

- le **sexe** : il s'agit de petites différences mais statistiquement significatives entre femmes et hommes du fait de la taille du corps, de la taille du système respiratoire et des paramètres de ventilation<sup>24</sup>. Aux mêmes conditions respiratoires (sous le même volume tidal et à la même fréquence), les femmes ont une déposition plus élevée dans les régions extra-thoracique et trachéo-bronchique et une déposition diminuée dans la région alvéolaire par rapport aux hommes (Pritchard et al., 1986 cité par EPA 2004b). Cependant, ce constat semble dépendre de la taille des particules : la déposition chez les femmes serait plus élevée pour les plus petites particules ultrafines ainsi que pour les plus grandes particules de la fraction grossière (Jaques et Kim, 2000; Kim et Jaques, 2000).
- l'**âge** : quoiqu'encore peu nombreuses, les études réalisées suggèrent que, chez les enfants, la déposition est augmentée dans les régions extra-thoracique et trachéo-bronchique par rapport aux adultes (Phalen et Oldham, 2001). En annexe, un tableau présente les résultats de différentes études traitant de l'effet de l'âge sur la déposition des particules dans le système respiratoire (Annexe 3.I).
- l'**exercice** : il augmenterait les risques potentiels dus aux particules inhalées du fait que l'exercice physique augmente la consommation d'oxygène et change les paramètres de ventilation. Un taux plus élevé de respiration et un plus grand volume tidal conduisent à une plus haute déposition. Daigle et al. (2003) a étudié l'évolution de la fraction de dépôt pulmonaire de particules ultrafines de carbone chez des sujets effectuant un effort modéré. Son étude a montré que le nombre total de particules déposées était 4,5 fois plus élevé pendant l'exercice qu'au repos.

---

<sup>24</sup> Paramètres de ventilation : le taux de flux d'air, le volume tidal, le rythme (ou la fréquence) respiratoire.

*En résumé, le mécanisme mucociliaire dans la trachée, les bronches et les bronchioles ainsi que l'action des macrophages élimineront ou détruiront, conjointement avec la toux et l'éternuement, les petites particules qui arrivent dans ces régions. Cependant, les particules fines, notamment les particules plus petites de cette fraction (les particules ultrafines et les nanoparticules) sont en règle général mal neutralisées par ces mécanismes et peuvent sans trop de difficultés pénétrer dans le sang par translocation à travers le réseau capillaire. Elles sont ainsi associées à des impacts sur la santé et entraînent plus de risques que la fraction grossière. Différents facteurs peuvent influencer sur la déposition des particules. Parmi ceux-ci, nous retiendrons particulièrement l'âge et l'état physique de l'individu exposé.*

### **3.1.2. Les mécanismes d'action des particules**

Malgré toutes les recherches scientifiques réalisées jusqu'à présent, **les mécanismes exacts d'action physiologique des particules dans l'organisme restent encore mal élucidés**. Néanmoins, des études toxicologiques se sont penchées sur la définition des différents chemins que suivent les particules une fois qu'elles ont réussi à pénétrer dans le sang. Quelques études témoignent de ce passage à la circulation systémique à travers les parois alvéolaires (Nemmar et al., 2001 et 2002; Takenaka et al., 2001; Kreyling et al. 2002).

Ainsi, différentes hypothèses continuent à être discutées. **Certains travaux suggèrent qu'une fois que les particules ultrafines sont arrivées à traverser les membranes alvéolaires, elles seraient transportées** grâce à la circulation sanguine **aux différents organes vitaux** : au foie (Oberörster et al., 2002), au cœur (Oberörster et al., 2005), au cerveau, aux reins, en altérant de cette manière leur fonctionnement normal. Elles induiraient aussi l'activation des plaquettes dans le sang (Nemmar et al., 2003b), augmentant le risque de thrombose et donc la probabilité d'infarctus, ainsi que d'artériosclérose<sup>25</sup>.

Il semble qu'en plus de la composition des particules, leur solubilité aurait aussi des implications. En effet, quelques études ont indiqué que les très petites particules respirables insolubles (particules ultrafines) peuvent être beaucoup plus toxiques que les particules respirables plus grandes ayant une composition similaire (Oberdöster *et al.*, 1995; Oberdöster, 2000, Tran *et al.*, 2000).

D'autres études ont aussi montré que l'exposition à la pollution particulaire est cause de dommages à l'**ADN** cellulaire par stress oxydatif (Risom et al., 2005). Colvin a évalué les effets biologiques des nanomatériaux. Il montre que, sous certaines conditions, les nanoparticules peuvent pénétrer à l'intérieur des cellules. Apparemment, ces particules peuvent, dans certains cas, franchir la **barrière hémato-méningée**. Ainsi, ces particules se rendraient jusqu'aux parties du corps dans lesquelles aucune autre matière inorganique n'avait réussi à pénétrer jusque là. Cette voie est étudiée avec intérêt dans le développement de nouveaux médicaments (Colvin et al., 2004 cité par Lamy, 2004) pour traiter les maladies dégénératives du cerveau telles que les maladies de Parkinson et d'Alzheimer. Pourtant, les effets de l'accumulation des nanoparticules dans le cerveau ou dans d'autres parties de l'organisme ne sont pas encore connus.

D'autres postulent que les particules agiraient sur le **système nerveux autonome** et pourraient affecter ainsi des fonctions qu'il contrôle. Puisque ces fonctions incluent notamment le rythme cardiaque et la respiration, l'altération de ces fonctions serait probable (Godleski et al., 2000). Les implications de l'action des particules sur le système nerveux autonome incluraient ainsi l'altération de la capacité de réaction appropriée du cœur face au stress et à l'effort physique.

Certaines études ont aussi montré le transport de particules le long des **axones neuronaux**. Oberdörster a montré, par exemple, le transport des particules ultrafines le long du nerf olfactif du rat (Oberdörster et al., 2004).

---

<sup>25</sup> Artériosclérose : maladie de la paroi des artères, aboutissant à leur durcissement.

Un fait reconnu est que les particules induisent des **réactions inflammatoires** dans les poumons. Des travaux soutiennent qu'elles provoqueraient une augmentation de la vitesse de coagulation et donc du risque d'infarctus. Ceci serait provoqué par la libération de cytokines<sup>26</sup> produites dans les poumons dans la circulation (Van Eeden et al., 2001; Dagher et al., 2005). Nemmar et al. (2004) ont évalué, par exemple, la **translocation des particules diesel** (particules ultrafines) sur le hamster, et ces auteurs ont mis en évidence des effets tant inflammatoires que pro-thrombotiques.

Finalement, **l'irritation constante des voies aériennes** augmenterait aussi la sensibilité aux infections en affaiblissant la capacité respiratoire et en provoquant une hypoxie<sup>27</sup>. Même si d'autres voies de pénétration dans le corps sont possibles pour les particules ultrafines (à travers la peau (Howard, 2004, cité par Lamy, 2004) ou par ingestion) elles ne sembleraient pas être des voies prédominantes.

*Il faut s'attendre au fait que plusieurs mécanismes d'action des particules coexistent étant donné le grand nombre d'effets observés.*

### **3.1.3. L'exposition humaine**

Lorsqu'on considère le corps humain séparé de l'environnement externe par des "barrières extérieures" (la peau, les ouvertures de la bouche et du nez, des plaies), **l'exposition à un agent** (PM par exemple) se réfère au contact de celui-ci avec ces barrières (EPA, 2002a).

Par ailleurs, l'exposition personnelle de chaque individu aux PM résulte des expositions individuelles dans différents types de micro-environnements: à l'intérieur (la maison, le lieu de travail, l'école, le restaurant, etc.) et à l'extérieur (une promenade dans la campagne, dans une zone à haut trafic, dans un parc, etc.). **L'exposition totale journalière pour un individu** peut être exprimée comme la somme des expositions dans les différents micro-environnements qu'il a rencontrés au cours de la journée.

Il faut noter que, dans un certain environnement, les sources des particules peuvent être très variées. A l'intérieur, il peut s'agir de la fumée de cigarette, du nettoyage, du fait de cuisiner. Un exemple des concentrations maximales de PM<sub>2,5</sub> issues de sources intérieures est présenté dans l'Annexe 3.II.

A l'extérieur, on trouve le trafic automobile, une industrie polluante, etc. De plus, des interactions entre ces deux types de sources peuvent avoir lieu. Ainsi, le niveau d'exposition (la concentration et le nombre de particules) et le type d'exposition (la taille de particules et les sources auxquelles l'individu est exposé) ne sont évidemment pas les mêmes pour chaque individu faisant partie d'une population.

**L'exposition personnelle** aux PM correspond à la concentration des PM dans l'air inhalé. Dans une grande population, il y aura des distributions moyennes de ces expositions totales, du fait des variations de l'exposition pour chaque individu. Il existe des méthodes de mesure directe des concentrations des PM dans les micro-environnements et des modèles utilisent ces résultats pour estimer l'exposition personnelle à la matière particulaire. Des dispositifs peuvent être portés par des individus afin d'échantillonner l'air près de la zone d'inhalation (nez, bouche). Ces *Moniteurs d'Exposition Personnels* (PEMs) utilisent des techniques de mesure similaires aux instruments utilisés pour mesurer les particules de l'air ambiant (mesure de la masse des PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> moyennant des filtres).

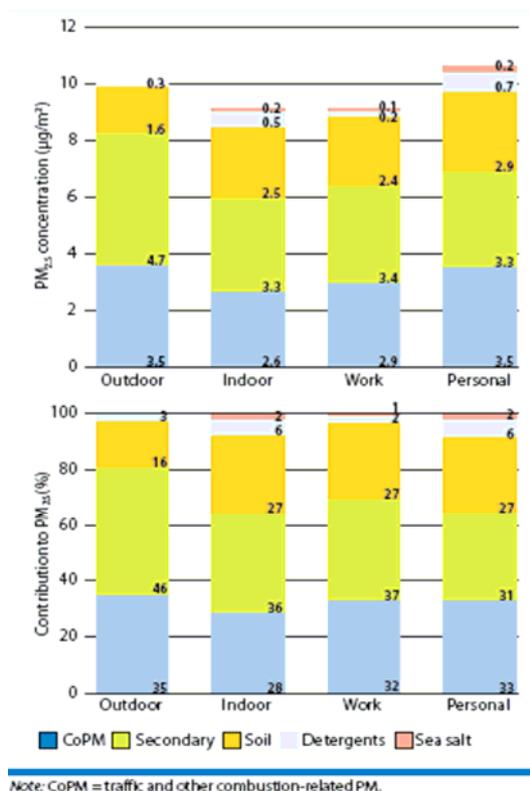
Un étude réalisée en Finlande (Koistien et al, 2004) a identifié cinq sources principales d'exposition personnelle aux PM<sub>2,5</sub> (**Figure 3.5**). Il s'agit du trafic et d'autres sources de combustions (33%), des PM secondaires d'origine transfrontalière (31%), des particules du sol (27%), des détergents (6%) et du sel marin (2%).

---

<sup>26</sup> Ces molécules sont des médiateurs cellulaires qui interviennent dans différents processus comme dans l'inflammation et l'immunité.

<sup>27</sup> Hypoxie : diminution de l'oxygène dans les tissus.

**Figure 3.5 : Contributions absolue et en pourcentage aux PM<sub>2,5</sub> dans des micro-environnements extérieur, intérieur (résidence), au lieu de travail et à l'exposition personnelle (sur 48 h). Les participants ne sont pas exposés à la fumée du tabac.**



source : Koistien et al, 2004

**Souvent, l'exposition personnelle totale (dans les micro-environnements) est considérée comme équivalente à l'exposition aux PM de l'air ambiant extérieur** et on utilise les données des réseaux de mesures pour la calculer. Cependant, il faut noter qu'un individu moyen passe entre 80 à 90 % du temps à l'intérieur des habitations et que les sources de particules peuvent y varier selon les saisons (par exemple, par l'utilisation du chauffage en hiver) et selon les activités des individus. Dans les fumeurs, la concentration des PM<sub>2,5</sub> peut même augmenter de 70 % et celle de PM<sub>10</sub> de 50 % par rapport aux locaux non-fumeurs (Gemenetzis et al., 2006). La concentration des PM<sub>2,5</sub> serait même proportionnelle au nombre de cigarettes fumées.

Les concentrations des PM dans l'air ambiant sont également influencées par les conditions météorologiques. Par contre, ce n'est pas le cas pour les particules générées à l'intérieur (Wilson et al., 2000). Certaines études ont montré que l'exposition aux PM à l'intérieur peut être considérée comme relativement constante (Ott et al., 2000; Dominici et al. 2000).

Pour toutes ces raisons, la corrélation entre l'exposition personnelle et l'exposition aux PM dans l'air ambiant peut montrer de grandes variations selon les cas analysés. Ainsi, des erreurs peuvent être introduites dans le calcul des coefficients de risque si on admet délibérément que l'exposition personnelle est égale à celle dans l'air ambiant (EPA, 2004). Notons, cependant, que les données provenant de réseaux de mesure sont beaucoup plus faciles à obtenir et beaucoup moins chères que celles de l'exposition personnelle. De plus, il n'existe pas une donnée qui inclut tous les différents types d'exposition dans tous les micro-environnements possibles. Ceci explique le choix d'estimer l'exposition personnelle totale à travers l'exposition aux PM de l'air ambiant.

### 3.1.3.1. Les véhicules à moteur diesel

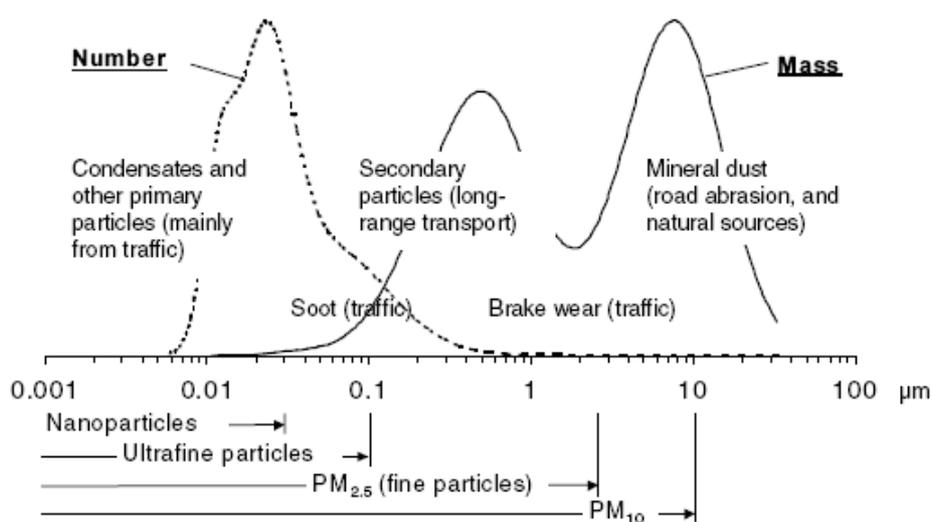
Lorsqu'on parle d'exposition aux particules, il est important de tenir compte de la proximité des voies de circulation routière par rapport aux lieux habités (milieux fermés). Il est à remarquer que même si les gens passent la plupart du temps à l'intérieur des habitations (maison, travail, etc.), **la pollution de l'air extérieur est le principal déterminant de la pollution intérieure** (sauf dans le cas des fumeurs) (OMS, 2000a).

De manière générale, le secteur du transport, particulièrement le transport routier, est la principale source urbaine de matière particulaire fine. En effet, l'étude trinationale Suisse-Autriche-France<sup>28</sup>, réalisée en collaboration avec l'OMS en vue de la 3<sup>e</sup> Conférence ministérielle sur l'environnement et la santé, attribue **entre un tiers et 50 % (en ville) des particules fines aux transports**.

Même si, à l'heure d'évaluer les dommages sur la santé causés par le transport, on considère par simplification que toutes les particules fines ont un effet identique en termes de santé, **les particules de gaz d'échappement semblent bien plus nocives que les particules naturelles**. Il s'agit notamment des suies diesel, des aérosols de combustion très fins, toxiques et capables d'atteindre les alvéoles pulmonaires. Elles sont constituées de particules de carbone et imprégnées de diverses substances, en particulier d'hydrocarbures. Leur diamètre aérodynamique moyen est d'environ 0,1  $\mu\text{m}$  à la sortie du pot d'échappement, tant et si bien que les particules dégagées par un moteur diesel correspondent à un mélange de particules fines ( $\text{PM}_{2,5}$ ), ultrafines ( $\text{PM}_{0,1}$ ) et des nanoparticules. C'est pourquoi, même si les différentes législations ont introduit des normes d'émission de plus en plus sévères, l'inquiétude concernant les rejets de fines particules de suie est toujours présente.

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, la circulation routière est aussi une source non négligeable de particules grossières produites par l'usure des pneumatiques, de la chaussée, etc. (cf. Chapitre 2, point 2.2.1.1) et d'autres polluants. La **Figure 3.6** renseigne sur la distribution des particules dans une rue à haut trafic.

**Figure 3.6 : Distribution en nombre et en masse des PM dans une rue à haut trafic (Berlin)**



source : Palmgren et Walhin, 2004, citée par Milieu Ltd. et al., 2004

<sup>28</sup> Coûts externes de la santé imputables à la pollution de l'air par les transports - étude trilatérale de l'Autriche, de la France et de la Suisse, Londres 1999. Résultats téléchargeables : <http://www.admin.ch/cp/f/37776641.4013DBFC@mbox.gsuek.admin.ch.html>, accédé le 10/10/2006.

Si d'une part, un moteur diesel actuel produit moins de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures imbrûlés (HC) qu'un moteur à essence, d'une autre part, il peut rejeter davantage d'oxydes d'azote (NOx) et plusieurs centaines de fois plus de particules. Un détail important à souligner est le fait que même si les moteurs diesel produisent moins de HC que les voitures à essence, ils produisent plus d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), un type de HC reconnu comme étant mutagène et cancérigène. Ces HAP peuvent en plus, être adsorbés sur les particules émises, ce qui augmente manifestement la dangerosité de ces dernières. Les propriétés mutagènes et génotoxiques des particules de suie du diesel ont été confirmées par différentes études (Don Porto et al., 2001; OFEFP, 2005).

On a aussi mis en évidence que les gens habitant près des voies de circulation routière à haut trafic sont exposés à un risque plus élevé de conséquences nocives sur la santé (Hoek et al., 2002; Garshick et al., 2003; Nicolai et al., 2003). En effet, la concentration des particules (PM<sub>2,5</sub>) augmente de façon exponentielle lorsqu'on se rapproche d'une route (Zhu et al., 2002). Plus de 100.000 particules par cm<sup>3</sup> peuvent ainsi être détectées près des voies de circulation à haut trafic (Shi et al., 2000). Notons que le niveau de concentration et la composition des polluants dans l'air dépendent non seulement du nombre de véhicules, mais aussi de leur âge, du type de moteur et de leur état de fonctionnement. Les conditions météorologiques et le type d'environnement urbain jouent aussi un rôle.

Ainsi, **une proportion substantielle de l'exposition humaine à la pollution générée par le trafic se passe dans des zones urbaines**, là où la circulation automobile est particulièrement dense et où habite la plupart (75 %) de la population européenne (AEE, 2006). Du fait que le trafic est une source généralisée dans les milieux urbains, une partie significative de la population européenne peut être affectée. En 2001 à Amsterdam, il a été estimé qu'environ 10 % de la population habite au bord de routes à haut trafic (plus de 10.000 véhicules par jour)... Le trafic contribue ainsi, de façon disproportionnée, à l'exposition aux particules (et aux autres polluants) car elles sont émises non seulement à proximité des personnes mais aussi près de la hauteur du nez. Un danger encore plus alarmant lorsqu'on pense aux enfants dans des poussettes et aux personnes handicapées qui se déplacent en fauteuil roulant!

Avec l'apparition successive des normes (cf. Chapitre 4, point 4.2.5.1), **les moteurs diesel modernes** ont diminué leur niveau d'émission de particules fines (PM<sub>2,5</sub>), ainsi que d'autres polluants. **Par contre**, sous certaines conditions, **ils produisent un plus grand nombre de particules ultrafines** (et donc de nanoparticules) que les moteurs anciens. En d'autres mots, cela montre que les nouveaux moteurs diesels sont plus dangereux pour la santé humaine que les anciens (OMS, 2000a) car on attribue aux particules les plus petites les effets sur la santé les plus graves.

### **3.1.4. Etudes épidémiologiques**

Même si la qualité de l'air ambiant dans la majorité des pays en Europe a connu des améliorations importantes dans les dernières décades, des évidences basées sur des études épidémiologiques ont démontré qu'elle n'est toujours pas inoffensive en termes de santé publique.

En effet, l'intérêt pour la santé publique est devenu de plus en plus intense depuis que deux études de cohortes<sup>29</sup> américaines ont été publiées au début des années 1990 (Dockery et al., 1993; Pope et al., 1995). Ces deux études ont suggéré que l'exposition aux particules fines dans l'air ambiant était liée à la diminution de la durée de vie. Selon Brunekreef et al., 2002, l'impact de ces études réside dans le fait que les données utilisées dataient des années 1980, et dans ces années, les concentrations de polluants de l'air étaient, en comparaison, assez basses par rapport aux années précédentes. Depuis

---

<sup>29</sup> L'étude de cohortes définit les groupes d'individus exposés et non exposés dans la cohorte étudiée pour ensuite analyser la survenue d'une maladie ou de la mort. Dans ces études, des populations sont suivies sur de longues périodes (plusieurs années) afin de analyser l'existence d'un lien entre l'exposition à un certain facteur et la morbidité (ou la mortalité).

lors, plusieurs études sur l'exposition aux particules à court et à long terme ont suivi pour réaffirmer ce lien (Abbey et al., 1999; Katsouyanni et al., 2001; Pope, 2002; Brunekreef, 2005).

A partir de 2001, un accord fut conclu entre la Commission européenne (la DG Environnement) et l'OMS pour que cette dernière fournisse des revues rassemblant des données sur la santé en relation avec la qualité de l'air. Ceci a été accordé dans le cadre du programme "Air pur pour l'Europe" (CAFE)<sup>30</sup> (cf. Chapitre 4, point 4.2.2.2). L'OMS a ainsi établi son projet "*Systematic review of health aspects of air pollution in Europe*". Depuis lors, beaucoup de nouveaux travaux (études épidémiologiques et toxicologiques) sur les particules et leurs effets sur la santé ont vu le jour, tant en dehors que dans le cadre de ce projet. Nous examinerons les principaux résultats rassemblés par l'OMS au point 3.1.4.2.

### **3.1.4.1. Evaluation des effets de l'exposition**

Avant d'aborder les résultats des études qui ont été réalisées à court et à long terme, il est utile de fournir des éléments de base sur l'évaluation des effets de l'exposition à la pollution atmosphérique.

De manière générale, dans les études épidémiologiques, divers *indicateurs sanitaires* sont utilisés pour évaluer ces effets. Ils comprennent notamment :

- la **mortalité totale** (hors accidents et morts violentes)
- la **mortalité pour des causes cardiovasculaires**, comme, par exemple, l'infarctus du myocarde
- la **mortalité par affections des voies respiratoires**, comme le cancer du poumon
- les **admissions hospitalières pour des pathologies cardiaques** comme la dysrithmie, la décompensation cardiaque, etc.
- les **admissions hospitalières pour des pathologies respiratoires** (bronchite, asthme, etc.). Par exemple, afin de mesurer les effets sur les personnes asthmatiques, deux indicateurs couramment utilisés sont la toux chronique et l'utilisation de médication (broncho-dilatateurs,  $\beta$  agonistes)

On préfère l'utilisation de la "mortalité" comme indicateur des effets du fait que l'accès aux données est relativement facile par rapport à celles sur la morbidité. De plus, l'information sur les admissions hospitalières peut comprendre des critères différents selon les pays, ce qui rend plus difficile la comparaison des données.

Ces indicateurs (la mortalité ou la morbidité) sont utilisés pour calculer le **Risque Relatif**<sup>31</sup> (RR), un paramètre couramment employé dans les études épidémiologiques. Le RR estime le risque de mortalité ou de morbidité des sujets exposés à un certain facteur (PM par exemple). Il est un coefficient intéressant car on peut comparer les différents RR des populations de pays distincts. De plus, une estimation globale de plusieurs RR peut être obtenue par des méta-analyses ou par d'études multicentriques<sup>32</sup>. Il existe une forme particulière de noter un RR, c'est l'*Excès de Risque Relatif*<sup>33</sup>, qui

<sup>30</sup> Programme CAFE : <http://europa.eu.int/comm/environment/air/cape/index.htm>, accédé 1/1/2007.

<sup>31</sup> Le RR est le rapport entre le taux de malades (ou morts) dans le groupe des personnes exposées et le taux de malades (ou morts) dans le groupe des personnes non exposées. Autrement dit, le RR est un rapport entre le risque d'être malade (ou mort) chez les exposés avec le risque d'être malade (ou mort) chez les non-exposés.

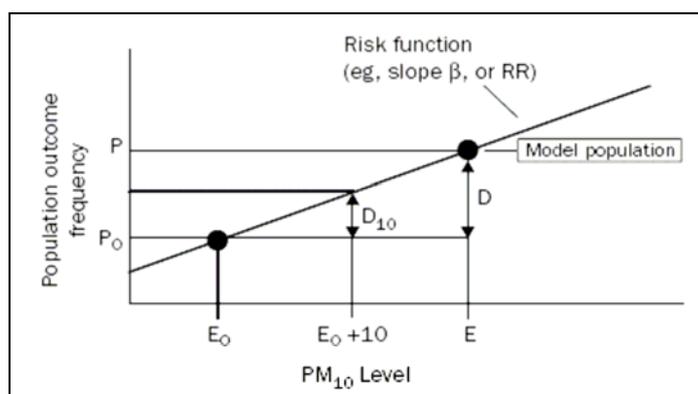
<sup>32</sup> Les études multicentriques utilisent dans ces analyses des données de plusieurs villes, de plusieurs pays.

<sup>33</sup> L'excès de risque relatif est égal au [RR-1].

donne un renseignement tout à fait similaire. Il indique l'augmentation du risque de mortalité ou de morbidité face à l'exposition à un certain facteur.

Par ailleurs, sous l'hypothèse d'une relation causale, des fonctions mathématiques relient l'exposition (à la pollution atmosphérique) au risque sanitaire. Autrement dit, elles expriment l'augmentation relative des effets nocifs sur la santé pour une augmentation relative de la pollution de l'air. Ces **fonctions exposition-risque** qui sont quantifiées par le RR obtenu par des études épidémiologiques, sont généralement log-linéaires. Cependant, pour des risques très petits, les fonctions linéaires produisent des résultats très similaires (**Figure 3.7**).

**Figure 3.7 : Fonction exposition-risque**



sur  $X$  : Exposition au polluant ( $E_0$ : exposition à un niveau de concentration de référence;  $E_{10}$ : exposition à une hausse en 10 unités par rapport à  $E_0$ )

sur  $Y$  : Fréquence de cas (mortalité, incidence, prévalence,...):  $P_0$  : fréquence des cas attendus au niveau de référence d'exposition  $E_0$ ;  $D_{10}$ : fréquence des cas (nombre de cas attribuables à une hausse de 10 unités de polluant, dans l'exemple  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{10}$ )

source : Künzli et al., 2000

Ces fonctions sont utilisées afin de réaliser *l'Évaluation de l'Impact Sanitaire* (EIS), impact causé par l'exposition à la pollution atmosphérique. Ainsi, un jour donné, **le nombre de cas attribuables** à la pollution de l'air ( $D_{10}$  dans la figure) par rapport à un niveau de référence ( $E_0$ ) choisi est calculé (selon Künzli et al., 2002 et Apheis, 2004) comme suit :

$$D_{10} = [RR-1] * P_0$$

où :

- $D_{10}$  est le nombre de cas attribuables pour une augmentation de l'exposition de 10 unités ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{10}$  par exemple<sup>34</sup>)
- $RR$  est le risque relatif (établi par la relation exposition-risque et pour le différentiel de pollution entre le niveau observé et le niveau de référence)
- $P_0$  est le nombre de cas attendus au niveau de référence d'exposition  $E_0$

Une présentation des principaux résultats des études épidémiologiques et d'un exemple d'EIS sera faites par la suite.

<sup>34</sup> Le nombre de cas attribuables, à l'égal du RR, est calculé pour  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM avec des propos comparatifs.

### 3.1.4.2. Résultats d'études à long et à court terme

Dans différents rapports, l'OMS s'interroge sur les effets que les particules causent sur la santé (OMS, 2003; OMS, 2004; OMS, 2006) à travers **l'analyse d'études épidémiologiques**. Tant les études de cohortes évaluées que la méta-analyse réalisée ont **permis de confirmer les liens entre différents indicateurs sanitaires et la concentration de particules dans l'air ambiant**.

#### 3.1.4.2.1. Exposition aux particules à long terme

La plupart des études qui avaient pour but d'évaluer les effets chroniques de l'exposition aux PM ont été réalisées aux Etats-Unis. Il y a donc peu d'études de cohorte européennes à long terme.

Les études de cohorte disponibles mettent fondamentalement en évidence le lien entre la mortalité et l'exposition à la matière particulaire, notamment à la fraction fine (PM<sub>2,5</sub>). En effet, **des études indiquent que l'exposition aux PM<sub>2,5</sub> à long terme est associée à une augmentation significative du risque de mortalité** (Abbey et al., 1999). D'ailleurs, Pope et al. (2002) ont publié l'étude de cohorte la plus vaste jamais menée à ce jour (plus d'un demi-million de personnes ont été suivies pendant plus de 15 ans) pour confirmer non seulement le lien entre la concentration moyenne de particules à long terme et la réduction de l'espérance de vie, mais aussi une augmentation des cas de cancers pulmonaires dans le groupe étudié. Ainsi, ils ont calculé qu'une hausse de 10 µg/m<sup>3</sup> des PM<sub>2,5</sub> à long terme, est liée à une augmentation de près de 6 % des risques de mortalité générale. Celle-ci est **attribuable surtout à des causes cardio-vasculaires** (des maladies ischémiques du cœur, des défaillances cardiaques, des dysrythmies, des arrêts cardiaques) **et au cancer du poumon** (Pope et al., 2004). Pour les causes de mort cardiovasculaires, une hausse de 10 µg/m<sup>3</sup> des PM<sub>2,5</sub> est associée à un accroissement de 12 % des risques de décès. L'excès de risque relatif de mortalité dû au cancer du poumon, quant à lui, a été estimé à 14 %. Par contre, ni les particules totales en suspension (TSP) ni la fraction grossière (PM<sub>2,5-10</sub>) n'ont été associées significativement à la mortalité.

De même, la relation entre la pollution atmosphérique par les particules et le cancer du poumon a aussi été mis en évidence dans plusieurs études "cas-témoins"<sup>35</sup>. Par exemple, une étude réalisée en Suède a trouvé une relation entre le cancer du poumon et les émissions des véhicules à moteur (Nyberg et al., 2000). Par ailleurs, la première étude de cohorte européenne (une étude parue en 2002 et réalisée aux Pays-Bas) suggère que l'exposition à la pollution de l'air causée par le trafic est associée à une augmentation de la mortalité cardio-pulmonaire des gens habitant près des routes (Hoek et al., 2002). Dans ce rapport, la pollution issue du trafic est mesurée par les niveaux des fumées noires (selon l'OMS, un indicateur raisonnable des PM<sub>2,5</sub>) et de NO<sub>2</sub>. Cette étude est basée sur des données de suivi de 4.500 personnes âgées entre 55 et 59 ans, pendant plus de 8 ans. Elle met en évidence que **les personnes habitant à moins de 100 m d'une autoroute ou à moins de 50 m d'une route très fréquentée, ont un risque deux fois plus élevé de mourir** tant de maladies cardiaques que pulmonaires : RR=1,95 (IC 95: 1,09-3,52).

Ces études suggèrent ainsi que les sources de combustion, en particulier le trafic, sont capables de causer des effets très nocifs sur la santé.

Des effets sur la morbidité ont été aussi évalués. Des études sur les enfants aux Etats-Unis ont démontré des associations significatives entre l'exposition aux particules fines et des effets nocifs sur la fonction pulmonaire (Dockery et al., 1996; Raizenne et al., 1996). Une étude américaine a montré que, chez les enfants, le développement pulmonaire est réduit lorsqu'ils habitent dans des zones où la concentration des PM est élevée (Gauderman, 2000). Par contre, une autre étude a constaté que ce fait

---

<sup>35</sup> L'étude "cas-témoins" est une méthode pour mesurer l'association entre la présence d'un facteur de risque et la survenue de la maladie. Il recherche des cas (malades) et des témoins (non-malades) pour examiner ensuite l'exposition au facteur de risque étudié. Ainsi, si la survenue de la maladie est liée à l'exposition, on observe un pourcentage d'exposition plus élevé chez les cas que chez les témoins.

peut changer lorsque les sujets déménagent dans des régions caractérisées par des concentrations en particules plus basses, donc dans des régions où la qualité de l'air est meilleure (Avol, 2001).

### 3.1.4.2.2. Exposition aux particules à court terme

Les études à court terme disponibles actuellement sur les effets de la pollution particulaire sont nombreuses. Celles-ci sont, pour une grande part, des études américaines.

Depuis les années 1990, la plupart des études épidémiologiques qui évaluent les effets d'une exposition aux particules à court terme correspondent à des séries temporelles<sup>36</sup> et à des études de panels<sup>37</sup>. Les résultats qu'elles ont obtenus indiquent des associations entre des effets aigus et une exposition à court terme à la pollution atmosphérique par les PM. Ces effets comprennent tant la mortalité que la morbidité.

En 2004, dans le cadre de son projet "*Systematic review of health aspects of air pollution in Europe*", l'OMS a réalisé une méta-analyse sur base des d'études à court terme (OMS, 2004).

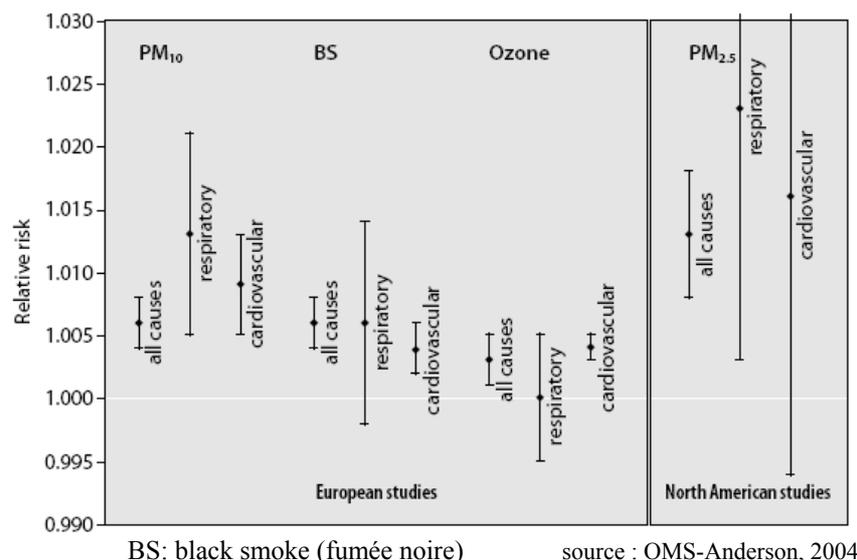
La méta-analyse<sup>38</sup> utilise des données de 33 villes européennes afin d'obtenir des estimations des effets sur la santé par l'exposition tant aux PM qu'à l'ozone.

Dans cette analyse, le groupe de patients considéré comprenait des individus avec des maladies respiratoires chroniques. Pour les enfants, ceci impliquait des individus asthmatiques et ceux avec des symptômes respiratoires chroniques. Pour les adultes, les mêmes catégories ont été incluses en plus de panels avec maladie chronique pulmonaire obstructive et avec hypersensibilité bronchial.

Des indicateurs tels que la mortalité, les admissions hospitalières, la toux chronique et l'utilisation de médication tant pour les adultes que pour les enfants, ont été employés pour évaluer les effets de la matière particulaire (PM<sub>10</sub>, fumées noires et PM<sub>2,5</sub>) sur la santé.

En ce qui concerne la mortalité, le RR méta-analytique de mortalité (total, pour causes respiratoires et cardio-vasculaires) a été calculé pour une hausse de 10 µg/m<sup>3</sup> de polluant (**Figure 3.8**).

**Figure 3.8 : Estimation des RR méta-analytiques de mortalité pour différents polluants**



<sup>36</sup> Les études de séries temporelles analysent l'association entre les variations journalière des concentrations ambiantes des PM et les changements journaliers dans le statut de santé de la population (mortalité/morbidité).

<sup>37</sup> Dans les études de panels, chaque individu d'un groupe restreint est suivi au jour le jour, avec ou sans décalage de temps. Les sujets analysés doivent se soumettre à des analyses réalisées à des intervalles de temps réguliers afin d'évaluer les effets de l'exposition au polluant.

<sup>38</sup> <http://www.euro.who.int/document/E82792.pdf>, accédé le 19/3/2006.

En ce qui concerne les  $PM_{10}$ , les coefficients de risque relatif présentent des valeurs significatives pour toutes les causes de mortalité analysées. Ainsi, **un accroissement de la charge en  $PM_{10}$  (moyenne sur 24 h) augmente le risque de mortalité totale à 0,6 % (IC 95: 0,4 %-0,8 %)**. Pour les causes respiratoires, le risque de mortalité est augmenté de 1,3 % (IC 95: 0,5 %-2 %) et pour les causes cardio-vasculaires l'augmentation du risque de décès s'élève à 0,9 % (IC 95: 0,5 %-1,3 %).

Selon l'OMS, très peu d'études européennes sur les effets des  $PM_{2,5}$  de mortalité ont été rapportées, ceci ne permet donc pas de réaliser la méta-analyse. Par contre, il y a des rapports suffisants concernant les fumées noires (BS). La mesure des fumées noires est considérée comme un indicateur "raisonnable" de particules fines primaires issues de sources de combustion, puisque le noircissement mesuré est produit par des particules de diamètre inférieur à 4.5  $\mu m$ .

Selon les résultats de la méta-analyse, **un accroissement de 10  $\mu g/m^3$  de la charge de BS est fortement associé à l'augmentation du risque de mortalité**, notamment à la mort **pour des maladies cardio-vasculaires**. Ainsi, pour toutes les causes confondues (respiratoires et cardio-vasculaires), l'augmentation du risque de mortalité est de 0,6 % (0,4 %-0,8 %). Pour les causes de mortalité par des maladies cardio-vasculaires, il est augmenté de 0,4 % (0,2 %-0,7%). Par contre, en ce qui concerne la mortalité par des affections des voies respiratoires, le RR estimé n'est pas statistiquement significatif (NS)<sup>39</sup>.

La méta-analyse sur les effets des  $PM_{2,5}$  a néanmoins été réalisée par l'OMS sur base des études non-européennes à titre d'information (**Figure 3.8**). Elle indique que **les  $PM_{2,5}$  ont un effet beaucoup plus important sur la mortalité que les  $PM_{10}$** . Celle-ci concerne tant la mortalité totale (sans les accidents) que celle due aux maladies cardio-vasculaires et respiratoires. Par exemple, le RR de mortalité totale calculé pour un accroissement à courte durée de la charge en  $PM_{2,5}$  (moyenne sur 24 h) est de 1,013 (IC 95: 1,008-1,018). Ce résultat montre que le lendemain d'une journée à forte charge de particules fines, le risque de mortalité (totale) augmente de 1,3 %. Une étude européenne récente signale également que l'augmentation de la mortalité serait principalement en rapport avec une augmentation des particules fines (Brunekreef et Forsberg, 2005).

Par ailleurs, on constate que même si la fraction grossière ne pénètre pas dans les alvéoles pulmonaires, elle n'est pas non plus inoffensive. Comme on l'a étudié au point 3.1.2., une exposition à court terme à cette fraction produit des effets inflammatoires là où les particules se déposent, ce qui cause de l'irritation. Cela peut éventuellement produire des crises d'insuffisance respiratoire. En effet, cette fraction est plus associée aux crises asthmatiques (effets aigus provoqués chez les personnes asthmatiques) et aux admissions hospitalières pour l'aggravation de problèmes respiratoires déjà existants. Les effets des particules sur la morbidité ont été également abordés dans le méta-analyse. Ses résultats sont présentés par le **Tableau 3.a**.

Tout d'abord, il faut remarquer que les études européennes concernant les effets des  $PM_{2,5}$  sur la morbidité sont pratiquement inexistantes. Il est ainsi évident que de nouvelles recherches scientifiques s'avèrent nécessaires.

En ce qui concerne les admissions hospitalières d'**individus de plus de 65 ans**, seules les études sur les admissions pour causes respiratoires étaient suffisantes en nombre pour procéder à la méta-analyse. Le RR calculé **pour une augmentation de 10  $\mu g/m^3$  de  $PM_{10}$**  est statistiquement significatif, indiquant **une forte association** entre le polluant en question et les **admissions pour des affections respiratoires**. Par contre, celui calculé pour les fumées noires (BS) n'a pas de signification statistique.

---

<sup>39</sup> Il faut remarquer qu'un résultat "non-significatif" (NS) statistiquement parlant, n'indique pas l'absence d'effet, mais que le résultat n'est pas conclusif sur le plan statistique.

**Tableau 3.a : Augmentation du risque de morbidité calculée pour une hausse 10 µg/m<sup>3</sup> de polluant**

Effets sur la santé		Tranche d'âge	Augmentation du risque par 10 µg/m <sup>3</sup> PM <sub>10</sub> (IC 95 %)	Augmentation du risque par 10 µg/m <sup>3</sup> BS (IC 95 %)
<b>Jours d'hospitalisation</b> (séries temporelles)	pour affections des voies respiratoires	0-14 ans	NEI	NEI
		15-64 ans	NEI	0,6 % (0,1%-1%) S; <b>5</b>
		65 ans et +	0,7 % (0,2%-1,3%) S; <b>8</b>	0,1 % (-0,7%-1%) NS; <b>6</b>
	pour affections cardio-vasculaires	65 ans et +	NEI	NEI
<b>Toux chronique</b> (études panels)		5-15 ans	0,01 % (-1,3%-1,1%) NS; <b>34</b>	0,1 % (-1,8%-2,1%) NS; <b>33</b>
		16-70 ans	NEI	NEI
<b>Consommation de médication (*)</b> (études panels)		5-15 ans	0,5 % (-1,9%-2,9%) NS; <b>31</b>	0,8 % (-3%-4,9%) NS; <b>31</b>
		16 ans et +	NEI	NEI

(\*) chez des personnes présentant problèmes chroniques des voies respiratoires

NEI: nombre d'études insuffisantes pour le méta-analyse (<4)

S: statistiquement significatif

NS: statistiquement non-significatif

Les nombres (en gras) correspondent au nombre d'études évaluées dans la méta-analyse

source : OMS-Anderson, 2004

Pour les individus de **15 à 64 ans**, le RR n'a pu être calculé que pour les BS. La valeur obtenue est significative et montre que **l'augmentation du risque d'une admission hospitalière pour des troubles respiratoires s'élève à 0,6 % lorsque la charge en BS s'accroît de 10 µg/m<sup>3</sup>**.

Ces résultats indiquent qu'il existe une relation causale entre les admissions hospitalières pour des maladies respiratoires et la pollution particulaire.

Il est important de noter qu'il n'y a pas suffisamment d'études européennes concernant les admissions hospitalières pour cause de maladies cardiovasculaires. Ceci est un indice qui montre que de nouvelles études concernant les particules dans ce domaine sont nécessaires.

En ce qui concerne les affections des voies respiratoires, on peut remarquer que certaines tranches d'âges sont plus fréquemment étudiées que d'autres, notamment celle des plus de 65 ans.

En effet, les études qui portent sur les enfants (< 15 ans) sont plus fréquentes pour ce qui touche aux maladies respiratoires plus spécifiques comme l'asthme. Par exemple, certains de ces rapports indiquent des relations causales entre l'exposition aux particules et l'asthme, tant chez les enfants que chez les adultes. Ces effets ont été estimés par les admissions hospitalières pour des problèmes respiratoires et par l'utilisation de médication. Une étude a démontré que l'augmentation à court terme de 100% de la concentration (moyenne) des PM<sub>10</sub> se traduit par un accroissement de 10% de crises asthmatiques chez les enfants (Thompson et al., 2001). Une autre étude indique qu'une augmentation des PM<sub>2,5</sub> peut également provoquer ces crises (Lin et al., 2002). De même, lorsque la charge des PM<sub>2,5</sub> augmente, les personnes asthmatiques (adultes) utiliseraient plus de médicaments contre ces symptômes.

Finalement, si on revient à la méta-analyse de l'OMS, il est important de signaler que même si le nombre d'études européennes concernant tant la toux que l'utilisation de médication chez les enfants semble important, elles n'ont pas montré des résultats significatifs. Ceci ne permet pas d'être conclusif

(au niveau de cette méta-analyse) en ce qui concerne le risque d'exacerbation des symptômes asthmatiques engendré par l'exposition aux particules.

### **3.1.4.2.3. Un exemple d'Evaluation de l'Impact Sanitaire**

Dans ce point, nous présenterons à titre d'exemple des résultats correspondant à l'Evaluation de l'Impact Sanitaire (EIS) réalisée en 2005 par la Commission européenne (Watkiss, 2005). Cette évaluation fait partie d'une analyse de coût-bénéfice<sup>40</sup> qui a été réalisée dans le cadre de l'élaboration de la "*Stratégie thématique sur la pollution de l'air*" (cf. Chapitre 4, point 4.2.3). La quantification des impacts sur la santé a été réalisée sur base de la pris en compte tant des effets chroniques qu'aigus. Les résultats estiment les impacts sanitaires dans l'UE-25 en 2000 et en 2020 sous la législation actuelle. Ils sont exprimés en terme de mortalité et de morbidité.

En ce qui concerne l'évaluation de l'impact (à long terme) des PM sur la mortalité, il a été exprimé tant en termes de "nombre de morts prématurées" que des "années de vie perdues"<sup>41</sup>. L'analyse des effets des PM tient compte de l'exposition à des aérosols tant primaires que secondaires (sauf l'exposition à des PM issues des sources naturelles et aérosols secondaires organiques).

Ainsi, en ce qui concerne la mortalité, cette analyse estimait **pour l'an 2000** un total de près de 3,7 millions d'années de vie perdues. Ce résultat peut aussi être exprimé comme **348.000 cas de décès prématurés attribuables à l'exposition aux particules (Tableau 3.b)**. L'analyse estimait également à près de 700 le nombre de morts par an parmi les enfants âgés entre 1 mois et 1 an. Ceci à cause de l'exposition aux particules atmosphériques.

Cette estimation équivaut à une **réduction de l'espérance de vie moyenne de 8,6 mois dans les pays de l'UE-25**, la Belgique étant la borne supérieure avec une réduction moyenne de l'espérance de vie de 13,6 mois et la Finlande la borne inférieure, avec une réduction de 3,1 mois (Annexe 3.III).

En ce qui concerne la morbidité, un impact des PM qu'il est important à mentionner est le nombre d'admissions hospitalières. Pour l'an 2000, il a été calculé qu'elles ont causé **environ 100.000 admissions hospitalières** pour des causes respiratoires et cardiaques (Watkiss et al., 2005).

Néanmoins, il faut signaler que l'OMS s'attend à une réduction des impacts (d'environ un tiers) grâce à l'application de la législation actuelle en ce qui concerne l'émission de substances polluantes. Ceci représente toujours une réduction de l'espérance de vie de la population européenne de plus de 6 mois... ce qui n'est pas négligeable! (Annexe 3.III).

A ce point, il est important d'ajouter que, selon l'OMS, la majorité des études épidémiologiques effectuées jusqu'à présent n'a pas permis d'identifier un seuil de particules en dessous duquel aucun effet sur la morbidité ou la mortalité n'est détecté. Dans une grande population, ce fait peut être attribué à l'existence d'une ample gamme de sensibilités. Ainsi, pour certaines personnes, le risque en termes de santé est élevé même à de faibles concentrations de particules dans l'air ambiant (OMS, 2006). En ce qui concerne spécifiquement les PM<sub>2,5</sub>, la plus importante des études mentionnée plus haut (Pope et al., 2002) n'a pas non plus trouvé d'indications d'une concentration sans risque pour la mortalité dans la gamme observée (entre 8 et 30 µg/m<sup>3</sup>).

---

<sup>40</sup> Téléchargeable sur : [http://ec.europa.eu/environment/air/cape/activities/pdf/cba\\_baseline\\_results2000\\_2020.pdf](http://ec.europa.eu/environment/air/cape/activities/pdf/cba_baseline_results2000_2020.pdf), accédé le 22/10/2006.

<sup>41</sup> Les détails précis sur la méthodologie de calcul (les fonctions exposition-risque utilisées, les logiciels employés, etc.) sont décrits dans "Methodology for the Cost-Benefit analysis for CAFE". Volume 2: Health Impact Assessment, 2005 ([http://ec.europa.eu/environment/air/cape/pdf/cba\\_methodology\\_vol2.pdf](http://ec.europa.eu/environment/air/cape/pdf/cba_methodology_vol2.pdf), accédé le 26/10/2006).

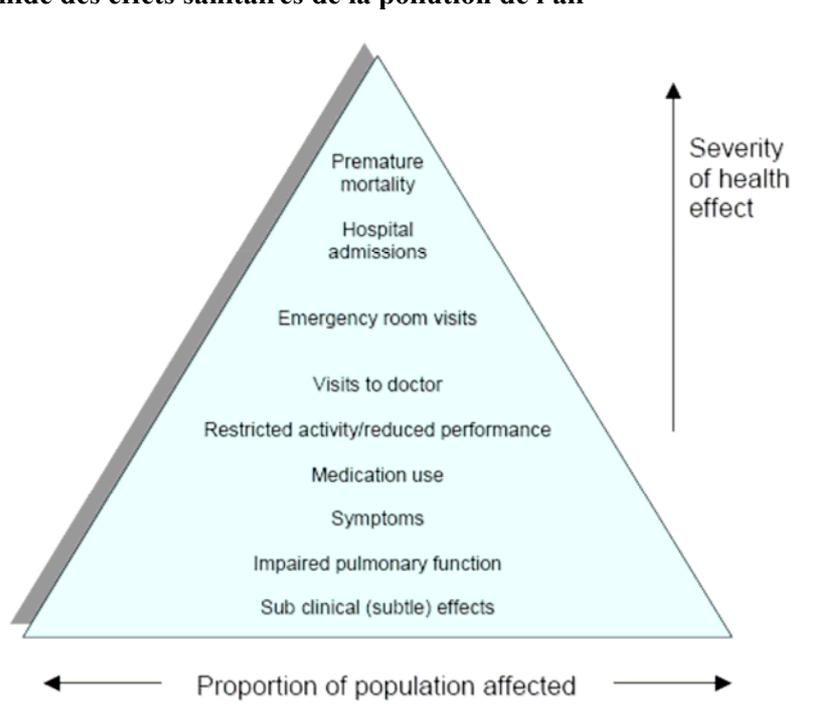
**Tableau 3.b : Estimation d'impacts annuels dus à la pollution particulaire en 2000 et en 2020 sous la législation actuelle dans l'UE-25.**

End point	End point output	Baseline in 2000	Current legislation in 2020 (including Climate Policy)	Difference from 2000 to 2020
Chronic Mortality *	Life years lost	3,618,700	2,467,300	1,151,400
Chronic Mortality *	Premature deaths	347,900	271,600	76,300
Infant Mortality (0-1yr)	Premature deaths	677	352	325
Chronic Bronchitis (27yr +)	Cases	163,800	128,100	35,700
Respiratory Hospital Admissions (All ages)	Cases	62,000	42,300	19,700
Cardiac Hospital Admissions (All ages)	Cases	38,300	26,100	12,200
Restricted Activity Days (RADs 15-64yr)	Days	347,687,000	221,999,100	125,687,900
Respiratory medication use (children 5-14yr)	Days	4,218,500	1,987,700	2,230,800
Respiratory medication use (adults 20yr +)	Days	27,741,700	20,879,800	6,861,900
LRS symptom days (children 5-14yr)	Days	192,756,400	88,852,300	103,904,100
LRS in adults (15yr +) with chronic symptoms	Days	285,345,000	207,562,100	77,782,900

source : Watkiss, 2005

*En résumé, il ressort des différentes études que les RR associés à la pollution particulaire sont petits (par exemple, pour un adulte moyen, le risque de mourir peut se voir augmenter de moins de 1% lorsque la concentration des  $PM_{10}$  augmente de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne sur 24 h). Cependant, on a pu constater, par les résultats des études présentées, que les conséquences en termes de santé publique sont considérables, étant donné que toute la population peut être considérée comme exposée à ce type de pollution. L'exposition à la pollution particulaire est associée à une ample gamme d'impacts sanitaires, tant aigus que chroniques. Ces impacts comprennent, au minimum, de simples effets irritants au niveau respiratoire, au pire, des décès prématurés. De manière générale, la fréquence de ces impacts est inversement proportionnelle à leur sévérité (Figure 3.9).*

**Figure 3.9 : Pyramide des effets sanitaires de la pollution de l'air**



source : OMS, 2000b; adapté de ATS, 2000

Sur la base de ces considérations, un rapport de l'OMS présente un résumé de l'état actuel des connaissances épidémiologiques des effets de la matière particulaire sur la santé (OMS, 2006). Les principaux effets tant aigus que chroniques rapportés dans les différentes études considérées sont résumés dans le **Tableau 3.c**.

**Tableau 3.c : Effets sur la santé associés à l'exposition aux PM à court et à long terme**

Effets liés à une exposition à court terme	Effets liés à une exposition à long terme
<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Réactions inflammatoires des poumons</li> <li>❖ Symptômes respiratoires (toux, expectoration, essoufflement)</li> <li>❖ Impacts sur le système cardio-vasculaire</li> <li>❖ Augmentation de l'utilisation de la médication</li> <li>❖ Augmentation des admissions hospitalières (dus à des pneumonies, crises d'asthme, infarctus de myocarde et autres pathologies respiratoires et cardio-vasculaires)</li> <li>❖ Augmentation de la mortalité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Augmentation des symptômes respiratoires (bronchite chronique, etc.)</li> <li>❖ Réduction des fonctions pulmonaires chez les enfants</li> <li>❖ Augmentation des maladies pulmonaires chroniques obstructives</li> <li>❖ Réduction des fonctions pulmonaires chez les adultes</li> <li>❖ Réduction de l'espérance de vie, principalement par mortalité cardio-pulmonaire et probablement par cancer pulmonaire</li> </ul>

source : OMS, 2006; OFEFP, 2003

#### 3.1.4.3.4. *Considération des incertitudes*

Les résultats des études épidémiologiques soulèvent, cependant, quelques incertitudes importantes à signaler (OMS, 2004; OMS, 2006; Australian Government, 2004).

→ En ce qui concerne l'exposition aux PM de l'air ambiant extérieur, elle est souvent considérée comme une **approximation des niveaux d'exposition personnelle** et, en conséquence, on utilise les données des réseaux de mesures pour la calculer. Pourtant, les individus passent la plupart de leur temps dans des milieux intérieurs. Pour cette raison, ils ne sont pas exposés en permanence aux concentrations ambiantes. Typiquement, les niveaux d'exposition personnelle se trouvent en dessous des concentrations ambiantes et sont influencées différemment par les activités, les saisons, etc. (cf. point 3.1.3). De plus, les données des PM de l'air ambiant extérieur sont issues de stations de mesure localisées dans des points fixes. Ces faits indiquent qu'il n'y a pas de certitude que les associations observées (concentrations PM - impacts sur la santé) soient dues uniquement aux concentrations mesurées dans l'air ambiant.

→ **Peu d'études épidémiologiques ont évalué des impacts** sur la santé **sur base des sources spécifiques** de particules. Même si ces études suggèrent que les sources de combustion (le trafic notamment) sont particulièrement importantes, à l'heure actuelle, il n'est pas possible de quantifier précisément les contributions des différents types de sources aux impacts sur la santé. Il n'est pas non plus possible d'attribuer les effets observés à un certain composant des PM car les études réalisées ne différencient pas les effets directs des particules et les effets potentiels de leur composant.

→ Les **études de panel** considérées **ont connu quelques pertes de données** au cours de leur réalisation, ce qui engendre des incertitudes en ce qui concerne le caractère aléatoire de ces pertes. D'ailleurs, il existerait la possibilité d'un biais systématique qui peut affecter les résultats obtenus.

Un autre biais qui peut également se présenter est un biais de sélection des individus de l'étude. Par exemple, le recrutement à travers des cliniques peut se traduire par la sur-représentation des individus qui ont des problèmes cliniques importants. Le recrutement à travers des enquêtes peut résulter dans la participation de personnes en meilleure santé, étant donné que les personnes ayant un état de santé médiocre seraient moins motivées à participer.

Finalement, un biais intéressant à mentionner est "le biais de publication". Il survient du fait que la publication de résultats statistiquement significatifs reçoit plus de reconnaissance et du fait que les journaux scientifiques sont aussi biaisés vers des "découvertes intéressantes" plutôt que vers des résultats non significatifs. Ainsi, des résultats non significatifs pourraient éventuellement être publiés avec moins de fréquence. (En parlant de biais, il est important de remarquer que différents facteurs tels que l'âge et le tabagisme sont des facteurs confondants au moment d'évaluer les effets de la pollution particulaire. Ces facteurs doivent être identifiés et neutralisés, par exemple, à l'aide d'une analyse multivariée).

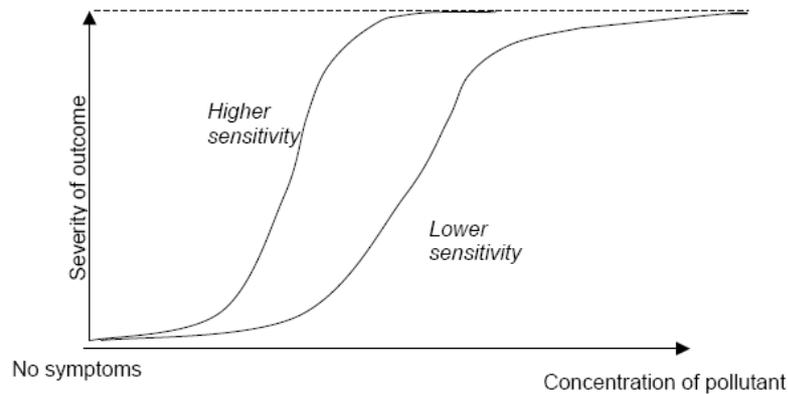
→ **Les mesures de concentration employées dans les études** qui évaluent l'exposition à court terme correspondent à des moyennes sur des périodes de 24 heures. Elles **ne tiennent pas compte des "pics"** de concentration des polluants qui peuvent se produire dans ces périodes. De ce fait, les résultats obtenus ne permettent pas d'affirmer si les associations observées sont dues à l'exposition moyenne, aux pics éventuels d'exposition ou à une combinaison des deux.

#### 3.1.5. *Groupes sensibles*

Certains groupes de la population (pour différentes raisons) sont physiquement plus vulnérables que d'autres face aux effets qu'engendre la pollution atmosphérique par la matière particulaire. Au fur et à mesure que la sensibilité de l'individu à un certain polluant augmente, la sévérité des impacts sur la

santé augmente aussi (mesurée par les indicateurs de santé énumérés au point 3.1.4.1). Autrement dit, des effets nocifs sur la santé se produiront à des concentrations inférieures chez les individus plus sensibles par rapport aux individus moins sensibles (**Figure 3.10**).

**Figure 3.10 : Sévérité des impacts sanitaires de la pollution atmosphérique en fonction de la sensibilité des individus exposés**



source : OMS, 2000b

Ainsi, les effets de l'exposition à une certaine concentration de polluants sur la santé peuvent différer entre populations distinctes. Ceci est dû à la distribution des sensibilités individuelles dans la population. L'OMS (2006) distingue trois groupes principaux sur base de leur sensibilité :

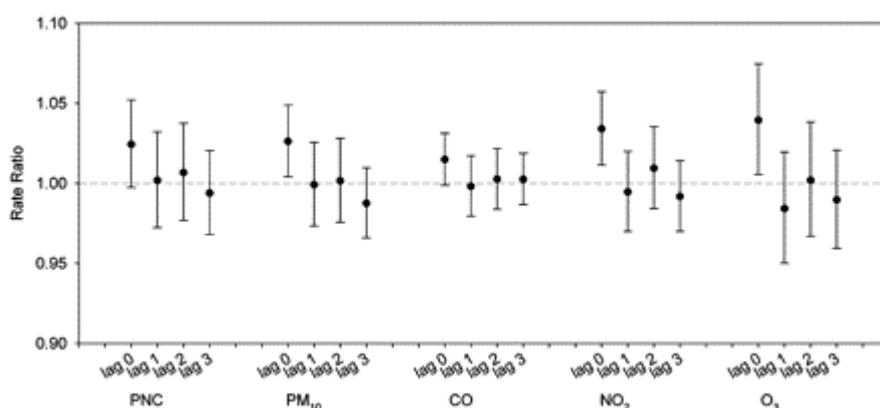
- **les personnes qui ont une sensibilité innée**: dans ce groupe sont incluses les personnes qui présentent une prédisposition génétique et les jeunes enfants. Les enfants très petits et les fœtus sont particulièrement sensibles à la pollution particulaire. En effet, elle est associée à des effets néfastes sur le développement pulmonaire (notamment, la réduction du développement du poumon et de son fonctionnement normal), une aggravation de l'asthme<sup>42</sup>, des bronchites et aussi la mort liée à des causes respiratoires dans la période néonatale. Nous traiterons des effets des PM sur la santé des enfants dans le point 3.1.5.1.
- **les personnes qui deviennent plus sensibles**, du fait de l'influence de facteurs sociaux, environnementaux ou du fait de leur comportement personnel. Un groupe important à signaler ici, par son ampleur dans la population européenne, est le groupe des personnes âgées. Avec l'âge avancé, les maladies cardio-vasculaires et respiratoires augmentent. De ce fait, les personnes âgées sont plus sensibles aux effets de la pollution de l'air. Un autre groupe est constitué par les gens socialement et économiquement marginalisés. Du fait de leur situation, ils sont plus sensibles aux effets de la pollution particulaire. Cette sensibilité est issue tant de leur état de santé que du fait qu'ils se voient exposés à des niveaux plus hauts de pollution, sur le lieu de résidence (en général, les habitations moins chères se trouvent près des industries, près des grandes voies de circulation). Des études à long terme suggèrent que la mortalité est augmentée dans ce dernier groupe (Hoek et al., 2002; Pope et al., 2002). D'autres groupes incluent les sujets diabétiques ou atteints de maladies cardio-pulmonaires. Quelques études signalent en particulier que ceux qui souffrent du diabète (Zanobetti et al.,

<sup>42</sup> L'asthme est une maladie chronique du système respiratoire caractérisée par l'inflammation des voies respiratoires et par une obstruction variable du flux d'air. Ses symptômes peuvent être déclenchés par l'exposition aux allergènes, à l'air froid, aux irritants, aux émotions fortes, à l'exercice et aussi aux polluants.

2001), des maladies cardiovasculaires et des maladies respiratoires (Goldberg et al., 2001), sont plus sensibles aux effets des PM, tant sur le plan de la morbidité que sur le plan de la mortalité.

Un exemple est donné par une étude de cohorte récente réalisée sur 22.000 survivants d'infarctus de myocarde dans cinq villes européennes (von Klot et al., 2005). L'objectif de cette étude était d'évaluer l'association entre la pollution atmosphérique et les réadmissions hospitalières pour des troubles cardiaques. Dans la même période des réadmissions hospitalières considérées, les concentrations de différents polluants associés aux processus de combustion parmi lesquels les PM<sub>10</sub> ont été mesurées. La concentration en nombre de particules (PNC) a été estimée comme approximation indirecte pour les particules ultrafines. La **Figure 3.11** présente l'estimation de l'association (toutes villes confondues) entre la pollution de l'air et le taux de réadmissions hospitalières pour des troubles cardiaques (Rate Ratio<sup>43</sup>). Les associations ont été estimées pour le jour d'un pic de polluants (lag 0) et pour les 3 jours qui le précèdent (lag 1, 2 et 3), chaque polluant pris séparément. Les RR ont été calculés en fonction d'une augmentation de 10 µg/m<sup>3</sup> en PM<sub>10</sub> et de 10.000/cm<sup>3</sup> en PCN.

**Figure 3.11 : Estimation de l'association entre la pollution de l'air et les réadmissions cardiaques toutes villes confondues (Augsburg, Barcelone, Helsinki, Rome et Stockholm) 1992-2001**



source : von Klot et al., 2005

Durant l'étude, 6.655 réadmissions ont été enregistrées. Les réadmissions hospitalières pour des causes cardiaques étaient associées de manière significative aux concentrations de polluants du jour même de la réadmission (lag 0)<sup>44</sup>. Ainsi, ces résultats suggèrent que la pollution de l'air ambiant est associée à l'augmentation du risque d'admission hospitalière pour des causes cardiaques chez des survivants d'infarctus de myocarde dans les cinq villes européennes étudiées. Cette étude révèle aussi les impacts potentiels des polluants issus du trafic sur ce groupe sensible.

- **les personnes qui sont exposées à des concentrations exceptionnellement élevées** de polluants incluant les PM. Ce dernier groupe est considéré comme vulnérable uniquement du fait de son exposition aux PM et non du fait de sensibilités individuelles. L'exposition peut être liée au fait d'habiter près des routes à forte circulation, mais aussi au fait de passer de longues périodes à l'extérieur. Un policier réglant la circulation par exemple, est exposé à une concentration supérieure de polluants issus des véhicules à moteur, par rapport à une personne travaillant à l'intérieur d'un bâtiment.

<sup>43</sup> Les Rate Ratios ont été calculés pour une augmentation de 10 µg/m<sup>3</sup> en PM<sub>10</sub> et de 10.000/cm<sup>3</sup> en PNC.

<sup>44</sup> Pour les PM<sub>10</sub>, le RR était de 1,021 (IC 95%: 1,004 -1,039) et pour la PNC il était de 1,026 (IC 95%: 1,005 - 1,048).

Un cas similaire se présente pour les personnes sportives et pour celles qui, par le type de travail qu'elles exercent, réalisent des activités physiques importantes à l'extérieur (les ouvriers de bâtiment par exemple).

Un cas particulier qui rentre également dans cette classification est celle de l'exposition accidentelle de la population.

L'attaque terroriste du World Trade Center (WTC) qui a eu lieu le 11 septembre 2001 à New York illustre un cas historique récent de ce type d'exposition. L'effondrement des tours a été à l'origine de l'inhalation de concentrations exceptionnellement élevées de polluants toxiques (PM, asbestos, fibres de verre, COV, HAP, plomb et d'autres métaux lourds, etc.) provenant de l'écrasement des matériaux de construction, d'équipements électroniques, du mobilier et des produits de combustion de ces derniers. Depuis cet épisode, des rapports signalant des impacts sur le système respiratoire des gens exposés (travailleurs du secteur paramédical, pompiers, agents de police et autres) ont été réalisés (Herbert, 2006; Prezant et al. 2002). Par exemple, une étude de cohorte (transversale rétrospective) datée de 2005 suggère que les résidents habitant dans le rayon d'un mille autour du site de l'attaque présentent, après un an, un taux plus élevé d'effets nocifs sur le système respiratoire (**Tableau 3.d**) que ceux vivant à plus de 4,8 milles au nord. Les symptômes respiratoires persistants les plus importants qui ont été constatés sont la toux, la dyspnée et la respiration sifflante (Reibman et al., 2005).

**Tableau 3.d: Symptômes respiratoires\* persistants (en %) chez des résidents n'ayant pas fait l'objet d'un diagnostic d'asthme, de maladie pulmonaire chronique obstructive ni d'emphysème avant le 11/9/2001**

Symptom	Exposed (n=2,103)	Control (n=254)	Crude IR (95% CI)
Cough without cold	16.0	4.0	3.99 (2.15–7.38)*
Nighttime cough	12.9	3.7	3.51 (1.83–6.72)*
Wheeze	10.5	1.6	6.50 (2.44–17.33)
Daytime SOB	10.6	3.6	2.94 (1.53–5.66)*
Morning chest tightness	8.4	1.6	5.21 (1.95–13.91)*
SOB after exercise	7.4	1.7	4.45 (1.66–11.91)*
Nighttime SOB	6.2	0.8	7.64 (1.90–30.70)*
Any of the above symptoms	26.4	7.5	3.53 (2.28–5.47)*

\*Symptom frequency  $\geq 2$  days per week in the past 4 weeks. \*Effect still statistically significant after adjusting for age, sex, education, smoking, and race.

source : Reibman et al., 2005

Des études toxicologiques sur les particules fines échantillonnées entre le 12 et le 13 septembre 2001 confirment la plausibilité biologique de ces constats. L'exposition à des doses élevées de ces particules cause une hypersensibilité<sup>45</sup> du système respiratoire des souris (EPA, 2002b; Gavett et al., 2003) indiquant que certains de leurs composants promeuvent des mécanismes obstructifs des voies aériennes.

Par ailleurs, l'hypothèse d'effets néfastes causés par l'exposition de femmes enceintes aux polluants issus de l'effondrement des tours sur le développement fœtal est en cours d'étude.

Un programme d'étude de grossesses (World Trade Center Pregnancy Study<sup>46</sup>) de l'École de Santé Publique de Mailman, Université de Columbia, a été initié en décembre 2001. Des études ont évalué les effets de l'exposition prénatale aux polluants. Elles ont analysé la taille du bébé à la naissance, les effets sur le système respiratoire des enfants et leur développement neurocognitif en se basant sur un échantillon de 300 femmes. Une étude a montré, par exemple, qu'après l'attaque, les nouveau-nés des femmes habitant jusqu'à 2 milles du site du

<sup>45</sup> Hypersensibilité : une sensibilité augmentée aux agents qui compriment les passages respiratoires.

<sup>46</sup> [http://cpmnet.columbia.edu/dept/sph/ccceh/research/wtc\\_pregnancy.html](http://cpmnet.columbia.edu/dept/sph/ccceh/research/wtc_pregnancy.html), accédé le 27/12/2006.

WTC sont nés plus légers et plus petits que les nouveau-nés des femmes habitant plus loin (Lederman et al., 2004). Ainsi, les effets néfastes observés suggèrent l'implication des polluants inhalés dans le développement des enfants.

*Notons ainsi que protéger la santé de la population implique la protection de toutes les personnes exposées aux facteurs environnementaux, ceci indépendamment de leur sensibilité. Ainsi, l'étude des différents groupes sensibles est fondamentale au moment de l'élaboration des réglementations concernant la qualité de l'air, car ces dernières sont établies afin de protéger la santé publique en général.*

### **3.1.5.1. Les enfants, un groupe sensible particulièrement touché**

Beaucoup d'études épidémiologiques se sont penchées sur les effets de la pollution de l'air sur la santé des enfants. Ceci est en partie rendu possible par les données médicales disponibles dans les écoles. De même, la sensibilité des enfants à la pollution de l'air est une cause de préoccupations et donc d'études concernant ce groupe sensible. En effet, leur sensibilité plus élevée peut se traduire par des dommages pulmonaires plus ou moins sévères. Ceci est préoccupant principalement du fait des implications de ces effets à long terme, c'est-à-dire durant la vie adulte. Ces dommages peuvent être causés par exemple lorsque l'enfant devient un fumeur passif (situation familiale par exemple) ou actif (Samet, 1996). Les enfants fréquemment exposés à la fumée de cigarette peuvent avoir un risque plus élevé que ceux non exposés d'être affectés par les polluants atmosphériques à l'extérieur des habitations. Le **Tableau 3.e** présente les facteurs qui déterminent la sensibilité des enfants aux polluants atmosphériques.

**Tableau 3.e : Facteurs déterminant la sensibilité des enfants aux polluants de l'air**

<b>Facteurs en rapport avec la croissance et le développement pulmonaire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vulnérabilité des voies respiratoires et des alvéoles en croissance et développement</li> <li>• Mécanismes de défense immunitaire immature</li> </ul>
<b>Facteurs en rapport avec le temps des activités</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps passé dehors</li> <li>• Augmentation de la fréquence de ventilation avec le jeu et l'exercice</li> </ul>
<b>Facteurs en rapport avec les maladies chroniques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haute prévalence<sup>47</sup> d'asthme</li> <li>• Prévalence en croissance de fibrose kystique</li> </ul>
<b>Facteurs en rapport avec les maladies aiguës</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauts taux d'infections aiguës respiratoires</li> </ul>

source : OMS, 2005a

Parmi tous ces facteurs, l'asthme est une maladie chronique pulmonaire hétérogène. Le degré d'intensité des troubles asthmatiques varie selon les enfants. Cela produira une réponse elle aussi variable aux polluants atmosphériques. De même, l'exposition aux polluants à l'intérieur des habitations varie parmi les enfants. Ainsi, les facteurs qui déterminent leur sensibilité ont une influence différente selon le cas. Il en résulte que certains enfants sont plus sensibles que d'autres.

<sup>47</sup> La prévalence comptabilise le nombre total de cas d'une certaine maladie à un moment donné. Elle prend donc en compte tant les cas récents que les cas anciens. C'est un indicateur statistique de morbidité. Ex. Nombre de cas d'asthme début décembre 2006.

En 2005, un rapport de l'OMS concernant la santé et le développement des enfants a été publié (OMS, 2005a). Nous traiterons ci-dessous de ses conclusions (en ce qui concerne la pollution par les particules) car elles rassemblent les résultats de différentes études, notamment sur les effets de la pollution de l'air sur la mortalité, sur le développement pulmonaire, sur l'asthme et les allergies et aussi son lien avec le cancer durant l'enfance. Les conclusions générales de l'OMS sur l'association des différents effets avec la pollution atmosphérique sont exprimées selon trois critères : "évidence suffisante pour inférer causalité", "évidence suggestive de causalité", "évidence insuffisante pour inférer causalité" ou "évidence qui montre la non-association".

### ***3.1.5.1.1. Effets sur le fœtus, le nouveau-né et le nourrisson***

Pendant les périodes intra-utérines, périnatales et les premières années de l'enfance, les êtres humains sommes particulièrement vulnérables du fait de la maturation et du développement des différents organes. Ainsi, l'action des polluants durant ces périodes de la vie peut causer des effets néfastes sur la santé des enfants. En effet, il y a des preuves qui indiquent que la **mortalité** est un des effets causés sur les nourrissons. Selon une étude réalisée en République Tchèque, la mortalité est **due fondamentalement aux problèmes respiratoires dans la période néonatale** et elle est attribuée principalement à la pollution particulaire (Bobak et Leon, 1999). L'étude a montré une association significative entre les particules totales en suspension (TSP) et la mortalité mais aussi entre le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et la mortalité.

**Des polluants comme le NO<sub>2</sub> et le SO<sub>2</sub> (précurseurs des PM) ont aussi été associés à la mortalité intra-utérine** (Pereira et al., 1998). Dans une autre étude réalisée à Mexico City entre 1993 et 1995, l'exposition aux divers polluants a été étudiée. Elle suggère qu'une hausse de 10 µg/m<sup>3</sup> des PM<sub>2,5</sub> est associée à une augmentation de 6,9 % de la mortalité des nourrissons (Loomis et al., 1999).

Des études sur le retard de croissance intra-utérine, sur le poids à la naissance et sur la naissance prématurée, ont aussi été réalisées. Même si les études considérées suggèrent l'existence d'un lien avec la pollution de l'air, elles montrent des inconsistances importantes dans les résultats obtenus. Selon l'OMS, ces inconsistances seraient dues à des différences de planification des études et des mesures de l'exposition. Pourtant, leurs conclusions indiquent que l'évidence est suffisante pour suggérer une **causalité entre la pollution de l'air et la réduction du poids à la naissance**. Ainsi, une étude réalisée sur des données de 1946 en Angleterre a mis en évidence une association significative entre la pollution de l'air et le poids à la naissance. Les bébés nés dans les zones les plus polluées, étaient, en moyenne, plus légers de 82 grammes que ceux nés dans les zones avec l'air le plus propre. Cette pollution était estimée par la consommation de charbon (Bobak et al., 2001). Par ailleurs, les résultats d'une étude réalisée au Nevada entre 1991 et 1999 indiquent qu'une hausse de 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub> pendant le troisième trimestre de grossesse produit une réduction de 11 grammes du poids du bébé à la naissance (Chen et al., 2002).

En ce qui concerne les malformations congénitales, il existe également certaines études mais jusqu'à présent, il y a trop peu de données pour tirer des conclusions.

Il est à signaler que les données disponibles ne permettent pas toujours d'identifier des polluants spécifiques ni des périodes d'exposition à l'origine de ces effets. De nouvelles études devront se poursuivre pour résoudre ces questions.

### ***3.1.5.1.2. Effets sur le système respiratoire de l'enfant***

Comme on l'a mentionné plus haut, le poumon en développement tant chez le fœtus que chez le bébé est plus vulnérable aux lésions issues de l'action des substances toxiques. Ces substances incluent les polluants atmosphériques, même aux doses inférieures au niveau "sans effet" pour les adultes. Ceci serait apparemment en rapport avec la différenciation des populations cellulaires et des systèmes

enzymatiques (Bunn et al., 2001). En effet, des études toxicologiques indiquent que **l'exposition tant intra-utérine que postnatale aux polluants peut causer une croissance détériorée/affaiblie du poumon**. Un exemple connu est le fait de fumer pendant la grossesse. C'est un des facteurs les plus importants de risques environnementaux dans le développement de l'asthme. Il affecte non seulement la morphogénèse du poumon (Sekhon et al., 1999), mais altère également la production des cytokines prédisposant les nourrissons aux allergies.

Par ailleurs, certains polluants peuvent augmenter la sensibilisation allergique. L'exposition aux **particules issues des moteurs diesel induit une augmentation de la production des anticorps Ig E** (associés aux processus allergiques) et aussi une sensibilisation aux allergènes pour les animaux comme pour les humains (Heo et al., 2001). Cette sensibilisation pourrait, chez les enfants avec des prédispositions génétiques, conduire à des dommages qui seraient à l'origine de maladies respiratoires telles que l'asthme. De plus, l'effet conjoint de l'exposition aux polluants, aux allergènes et aux virus qui engendrent des infections respiratoires peut aussi déclencher un phénotype asthmatique.

Selon l'OMS, il y a une **évidence suffisante pour inférer ainsi une relation causale entre la pollution de l'air et des effets néfastes sur le développement de la fonction pulmonaire**. La réduction de la croissance pulmonaire et de la fonction pulmonaire est associée à la pollution particulaire, surtout à celle engendrée par le trafic.

L'évidence est **aussi** suffisante pour assumer une **relation causale entre l'exposition aux PM et l'aggravation de l'asthme** (liée aussi à l'exposition à l'ozone), et entre cette exposition et l'accroissement (tant de la prévalence que de l'incidence<sup>48</sup>) de **la toux chronique et de la bronchite**.

Finalement, les analyses de l'OMS confirment l'explication affirmant que les **infections respiratoires** (très fréquentes parmi les enfants) seraient en rapport avec les effets de l'exposition à la pollution de l'air tant en ce qui concerne la mortalité que la morbidité. Ainsi, une relation de causalité entre l'exposition aux polluants de l'air (incluant les PM<sub>10</sub>, les PM<sub>2,5</sub>, le NO<sub>2</sub>, le SO<sub>2</sub> et aussi l'ozone) et la hausse de l'incidence de symptômes respiratoires est suggérée. Ces symptômes seraient, dans la majorité des cas, des symptômes d'infections. Pourtant, de futures études seront nécessaires pour clarifier les mécanismes physiologiques de ces interactions.

### **3.1.5.1.3. Le lien avec le cancer**

L'hypothèse que la pollution de l'air ambiant est cause de cancers chez les enfants a été étudiée entièrement en relation avec les polluants issus du trafic. Cette hypothèse, issue de deux études réalisées aux Etats-Unis indiquant des cas de cancers chez les enfants vivants près des routes à haute densité de trafic (Wertheimer et Leeper, 1979; Savitz, 1989), n'a été corroborée que par deux des treize études additionnelles.

L'évidence épidémiologique est, aujourd'hui, insuffisante pour inférer une relation causale entre le cancer dans l'enfance et les niveaux de pollution de l'air mesurés typiquement en Europe. L'OMS signale ici que de nouvelles études devraient être réalisées en considérant l'exposition aux polluants durant différentes périodes de la grossesse, afin d'élargir la connaissance scientifique et pouvoir ainsi élaborer des conclusions plus claires.

*En résumé, l'exposition à la pollution particulaire cause différents dommages sur la santé des enfants. En effet, elle accroît le risque de mortalité chez les nourrissons. Celle-ci est principalement due aux maladies respiratoires.*

*Par ailleurs, la matière particulaire a un effet néfaste sur le développement des fonctions pulmonaires et est également impliquée dans la réduction du poids à la naissance. Finalement, les preuves sont*

---

<sup>48</sup> L'incidence est le taux de nouveaux cas (d'une maladie) sur une durée de temps déterminée. C'est un indicateur dynamique de morbidité. Ainsi, elle prend en compte la vitesse de survenue de la maladie dans une population. Ex. Nombre de gens asthmatiques en un an.

suffisantes pour affirmer qu'elle est aussi impliquée dans l'aggravation de l'asthme et dans la production de symptômes tels que la toux et la bronchite.

En annexe, un tableau présente les principaux effets des différents polluants sur la santé. Parmi eux, on remarque les particules, certains de leurs précurseurs et certains de leurs possibles composants (Annexe 3.IV).

## 3.2. Effets sur l'environnement

D'après notre recherche dans le cadre de ce travail, très peu de données traitant des effets de la matière particulaire sur l'environnement semblent être disponibles au niveau européen. Par contre, l'Agence de Protection de l'Environnement (EPA) américaine a rassemblé des éléments intéressantes concernant ces effets (EPA, 2004a). L'analyse des différentes études a conduit à des conclusions sur les effets des particules atmosphériques sur la végétation et les écosystèmes, sur la visibilité, sur les matériaux et aussi sur le processus de réchauffement global. Nous présentons ci-dessous les résultats principaux de ces études, qui, d'un point de vue général, sont aussi applicables dans un contexte européen.

### 3.2.1. La végétation et les écosystèmes

Le dépôt des particules tant sur la végétation que sur le sol peut produire des réponses directes et indirectes dans un écosystème. Cela dépendra fondamentalement de la composition chimique des particules, c'est-à-dire de leurs caractéristiques acides ou basiques, de leur contenu en métaux ou en nutriments, tels que des nitrates ou des sulfates.

Il faut rappeler que le sol est un écosystème dynamique dans lequel des communautés de bactéries, des champignons et d'actinomycètes cohabitent. Les bactéries sont des participants essentiels tant dans les cycles de l'azote que celui du soufre. Elles mettent ces éléments à la disposition des végétaux pour qu'ils soient consommés par ceux-ci. Par ailleurs, les champignons associés aux racines des plantes forment des mycorhizes. Cette association symbiotique permet à la plante de capter les minéraux du sol. Ainsi, il devient évident que le changement des conditions chimiques des sols influence tant l'activité bactérienne que celle des champignons, ce qui, à son tour, affecte les végétaux.

D'ailleurs, les effets sur la croissance des plantes, résultat du dépôt des nitrates, des sulfates et de l'effet acidifiant des ions hydrogènes ( $H^+$ ), sont les plus importants du point de vue environnemental. Ainsi, l'acidification<sup>49</sup> produite par des dépôts acides (due principalement aux sulfates contenus dans les particules, aux  $H^+$  et au  $SO_2$ ) endommage non seulement les forêts et d'autres écosystèmes, mais aussi les cours d'eau et les lacs. En effet, l'acidité du sol peut déclencher, moyennant d'autres processus, l'insuffisance des nutriments dans la plante. Par ailleurs, l'eutrophisation, qui résulte d'un apport excessif de nutriments azotés (nitrates contenus dans les particules, oxydes d'azote et ammoniac), perturbe la structure et le fonctionnement des écosystèmes tant terrestres qu'aquatiques et a aussi comme conséquence, la perte de la biodiversité.

Un exemple de l'importance de l'apport excessif d'azote par la matière particulaire est présenté dans le **Tableau 3.f**, qui compare des données d'études réalisées tant aux Etats-Unis qu'en Europe.

L'augmentation des niveaux d'azote dans le sol peut conduire au remplacement des plantes adaptées à vivre dans des conditions de basse disponibilité d'azote, par des plantes plus nitrophiles. Ceci est à la base d'une succession de changements qui a comme résultat une perte de biodiversité, en plus de la lixiviation des nitrates dans les cours d'eau.

---

<sup>49</sup> Acidification : correspond à l'excès d'acidité issue du dépôt de  $SO_2$ ,  $NH_3$  et  $NO_x$ . Elle engendre des dommages tant aux écosystèmes terrestres qu'aquatiques en causant une perte de biodiversité. L'ammoniac contribue à l'acidification par le processus de nitrification dans des sols qui libèrent de l'acidité.

**Tableau 3.f : Ecosystèmes forestiers : comparaison entre le dépôt moyen annuel d'azote (équivalents/ha/an) issu des PM (fractions fine et grossière) et le dépôt total d'azote (toutes sources confondues).**

Region/Forest Type	Location	Dry Particle Deposition				Total	Annual Total Nitrogen <sup>a</sup>	References <sup>b</sup>
		Fine		Coarse				
		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup>			
<b>North America</b>								
Douglas fir	Washington	2	9	58	27	96	345	1,2
Loblolly pine	Georgia	2	27	36	37	102	647	1,2
Loblolly pine	North Carolina	3	35	89	66	193	997	1,2
Loblolly pine	Tennessee	0.8	18	27	7	53	699	1,2
Loblolly pine	Tennessee	0.2	14	8	1	23	410 <sup>c</sup>	3
Slash pine	Florida	6	16	105	4	131	431	1,2
White pine	North Carolina	1	22	23	23	69	510	1,2
Red spruce	Maine	2	14	64	102	182	545	1,2
Red spruce	North Carolina	3	74	133	43	253	1,939	1,2
Red spruce	New York	1	9	5	2	17	1,136	1,2
Alder	Washington	1	5	58	27	91	339	1,2
Maple/Beech	New York	0.3	5	37	13	55	567	1,2
Oak	Tennessee					307	857	4
Oak	Tennessee	1	36	83	8	128	720	5
<b>Europe</b>								
Norway spruce	Norway	8	21	52	29	110	775	1,2
Norway spruce	Germany	21	62	56	4	143	1,250 <sup>c</sup>	3

<sup>a</sup>Includes deposition from precipitation, gases, and particles.

<sup>b</sup>1 = Johnson and Lindberg (1992a), 2 = Lovett (1992) and Lovett and Lindberg (1993), 3 = Lindberg et al. (1990), 4 = Kelly and Meagher (1986),

5 = Lindberg et al. (1986).

<sup>c</sup>Includes only the growing season from April to October 1987.

source : EPA, 2004a

La végétation est aussi altérée directement par le dépôt direct des particules sur les feuilles. Ce dépôt réduit l'apport en lumière et diminue l'efficacité de la photosynthèse. Par sa composition, la matière particulaire peut aussi attaquer directement la structure des feuilles par nécrose. L'affaiblissement qui en résulte peut rendre la plante plus vulnérable aux maladies et aux parasites.

En ce qui concerne les cours d'eau, l'excès de substances nutritives peut stimuler la floraison des algues et conduire, par conséquent, à une diminution dramatique de la concentration d'oxygène dissous. Ce phénomène peut être à l'origine de la mort d'un nombre considérable de poissons.

Finalement, notons que la pollution des sols, des plantes et des eaux par les particules sédimentaires peut, par son contenu (par exemple des métaux lourds, les dioxines et les furanes, toutes trois des substances bioaccumulables), porter atteinte à la santé des personnes via la chaîne alimentaire.

### 3.2.2. La visibilité

La visibilité est considérée comme le degré auquel l'atmosphère est transparent à la lumière visible. Ceci concerne la clarté et la fidélité des couleurs.

L'altération de la visibilité dépend tant de l'humidité relative ambiante que des propriétés des particules atmosphériques, à savoir leur taille et leur composition chimique. L'augmentation de l'humidité

ambiante permet l'absorption de vapeurs d'eau par les particules, ce qui cause leur augmentation tant en volume qu'en masse. Par conséquent, leur capacité potentielle de disperser la lumière et aussi de l'absorber augmente. Ces propriétés optiques sont fréquemment caractérisées en termes de *coefficient d'extinction de la lumière*, représentant l'atténuation de la lumière par unité de distance.

Un coefficient d'extinction, calculé pour une taille et une composition spécifique des PM, est strictement proportionnel à la concentration en masse des particules considérées.

En absorbant ou en diffusant la lumière, les particules (notamment la fraction fine plutôt que la fraction grossière) forment un genre de brume dans l'air, ce qui diminue la visibilité. C'est donc la fraction fine qui "contrôle" le coefficient d'extinction dans l'air pollué.

Cette réduction de la visibilité est un problème important, même dans différents parcs nationaux aux Etats-Unis.

### **3.2.3. Les matériaux**

Les effets de la pollution particulaire incluent aussi la dégradation de différents matériaux. Les bâtiments, y compris les sites historiques, sont endommagés tant par l'acidification que par le noircissement générés par les particules.

Du fait de l'exposition à différentes conditions environnementales (notamment face à l'humidité ambiante), les métaux forment un film protecteur de métal oxydé (rouille) qui ralentit la corrosion. La pollution de l'air, notamment par le SO<sub>2</sub>, accélère le processus naturel de corrosion, ce qui rend le film protecteur moins efficace. Le SO<sub>2</sub> aggrave aussi les effets produits par les éléments environnementaux (vent, fluctuations de température, pluies, etc.) sur les pierres calcaires, par la conversion du carbonate de calcium en sulfate calcique dihydrate (gypse). De même, il augmente la détérioration des peintures à l'extérieur des bâtiments.

### **3.2.4. Lien avec le réchauffement climatique**

Dans l'atmosphère, les particules peuvent, selon leurs propriétés, soit capter le rayonnement solaire, soit le réfléchir et le disperser. Dans le premier cas, cela provoquerait un réchauffement, dans le second, un refroidissement. Ainsi, tant l'absorption que la dispersion causées par les particules sont responsables des effets sur la transmission de lumière visible et des UV, comme de la dégradation de la visibilité.

Dans ce point, il est important de noter que les particules de suie émises par les moteurs diesel provoquent de toute évidence un réchauffement de l'atmosphère.

*Ainsi, les effets sur l'environnement sont variés. Ils impliquent tant les organismes vivants que le milieu abiotique naturel et le patrimoine architectural. En ce qui concerne les écosystèmes terrestres et aquatiques, ce sont les sulfates et les nitrates qui causent le plus de dommages par les phénomènes d'acidification et d'eutrophisation.*

*La visibilité est aussi affectée par les PM, notamment par les PM<sub>2,5</sub>.*

*Par ailleurs, les matériaux, sont surtout affectés par l'acidification et le noircissement. Le SO<sub>2</sub> joue le rôle principal dans leur dégradation.*

*Finalement, certaines particules qui ont la capacité d'absorber la lumière, comme celles issues des moteurs diesel, contribueraient au réchauffement global.*

En annexe, des tableaux présentent un résumé des principaux effets des différents polluants (tels que les particules et leurs précurseurs) sur l'environnement et sur la santé (Annexe 3.V).

### **3.3. Conclusion - Résumé**

Les effets de la pollution particulaire sur la santé et sur l'environnement ne sont pas négligeables.

En ce qui concerne la santé, on a pu constater que les coefficients de risque relatif (RR) associés à la pollution particulaire sont faibles. Cependant, les conséquences en terme de santé publique sont considérables, étant donné que toute la population peut être considérée comme exposée à ce type de pollution.

Des études scientifiques ont démontré que les particules fines pénètrent profondément dans les poumons et peuvent s'y déposer. Elles peuvent ainsi exercer leurs effets néfastes tant sur le système respiratoire que sur le système cardio-vasculaire.

Même s'il existe des mécanismes d'élimination pulmonaire comme le transport mucociliaire et l'endocytose par les macrophages, les particules ultrafines et les nanoparticules sont en règle générale mal neutralisées par ces mécanismes. De ce fait, elles peuvent pénétrer dans le sang par translocation à travers le réseau capillaire et se diriger vers divers organes.

Ainsi, la matière particulaire représente un facteur de risque tant de mortalité (associée surtout à l'exposition à long terme à la fraction fine) que de morbidité (associée surtout à l'exposition à court terme à la fraction grossière).

Les liens de causalité entre la pollution par les PM et la mort provoquée par des problèmes cardio-vasculaires et respiratoires sont confirmées.

La matière particulaire affecte aussi le taux de développement des fonctions pulmonaires chez les enfants; elle produit l'aggravation des symptômes de l'asthme et est aussi à l'origine des symptômes tels que la toux et la bronchite.

Au niveau européen, on observe, néanmoins, que les études concernant les effets des particules (tant à court qu'à long terme) sont peu nombreuses, surtout celles concernant la fraction fine. Il est évident ainsi, que des nouvelles recherches scientifiques s'avèrent impératives.

Les mécanismes d'action des particules dans l'organisme ne sont pas élucidés dans tous les détails, mais étant donné le grand nombre d'effets observés, il faut s'attendre au fait que plusieurs mécanismes d'action coexistent.

Dans ce contexte et en vue de protéger la santé publique, l'étude des groupes sensibles est fondamentale afin d'élaborer des réglementations concernant la qualité de l'air. Il s'agit notamment des jeunes enfants, des personnes âgées, des personnes socialement et économiquement marginalisées, des sujets diabétiques ou atteints de maladies cardio-pulmonaires, des personnes sportives et de celles qui, par le type de travail qu'elles exercent, réalisent des activités physiques importantes à l'extérieur.

En ce qui concerne l'environnement, la pollution par les PM affecte les végétaux et les écosystèmes, la visibilité, les matériaux et, qui plus est, elle contribue au réchauffement global.

Les PM sont impliquées dans des phénomènes tels que l'acidification et l'eutrophisation. Les  $PM_{2,5}$ , qui ont la taille particulaire la plus dangereuse pour la santé, sont aussi à l'origine de la réduction de la visibilité. Les bâtiments et le patrimoine architectural souffrent également d'une dégradation et d'un noircissement qui résultent de la pollution par les PM.

Notons cependant que les études européennes concernant les effets des différentes tailles de particules sur l'environnement, notamment sur les organismes vivants, semblent être inexistantes.

Ainsi, approfondir nos connaissances sur base des études écotoxicologiques s'avère nécessaire afin de pouvoir évaluer l'ampleur réelle des effets de la matière particulaire.

## 4. Encadrement juridique de la pollution de l'air pour la matière particulaire

---

*Dans ce chapitre, en ce qui concerne les normes de la qualité de l'air, nous ferons une analyse comparative entre trois pays occidentaux hors UE, l'ensemble des pays de l'UE et les valeurs indicatives proposées par l'OMS.*

*Nous nous focaliserons principalement sur les valeurs limites fixées pour les PM et sur la prise en compte éventuelle des différentes fractions de ces dernières. L'objectif sera de comparer le degré de sévérité des normes en vigueur, afin d'inférer le degré de protection estimé nécessaire dans les pays considérés.*

*Ensuite, nous approfondirons la situation dans l'UE. Nous aborderons chronologiquement la législation en ce qui concerne la pollution atmosphérique par la matière particulaire. L'objectif final sera d'apprécier l'évolution des considérations relatives à la protection de la santé humaine et de l'environnement, en Europe.*

Les normes de qualité de l'air sont un instrument fondamental de la politique environnementale. En cas de dépassement des valeurs limites qu'elles établissent, les autorités nationales sont incitées à envisager des mesures de gestion du risque.

Afin de prévenir les effets néfastes tant sur la santé de la population que sur différents aspects de l'environnement (biodiversité, visibilité, matériaux), cette gestion peut comprendre l'établissement de plans et programmes de prévention de la pollution, de règlements, de codes de bonnes pratiques, etc.

Par ailleurs, l'OMS, dans le but d'assurer un niveau optimal de protection de la santé de la population au niveau mondial, **recommande aux gouvernements des lignes directrices** en ce qui concerne l'établissement des valeurs limites pour différents polluants (PM, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre, ozone) (OMS, 2005b).

Dans le cas des particules atmosphériques, ces valeurs sont les suivantes :

- $PM_{10}$ :  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la moyenne annuelle et  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la moyenne sur 24 heures
- $PM_{2.5}$ :  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la moyenne annuelle et  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la moyenne sur 24 heures

Ces valeurs sont toutefois indicatives et l'OMS remarque que chaque gouvernement doit prendre en considération ses propres circonstances locales avant de les implémenter.

### 4.1. Normes de qualité de l'air pour 3 pays occidentaux hors UE

#### 4.1.1. La Suisse

En Suisse, c'est depuis le 1<sup>er</sup> mars 1998 que les valeurs limites pour les particules sont en vigueur. Afin d'assurer la protection de la population, le Conseil fédéral a établi dans ***l'Ordonnance sur la protection de l'air*** du 16 décembre 1985 (OPair, 1985) des valeurs limites d'immission pour différents polluants. Parmi ces dernières se trouvent les  $PM_{10}$ . Les valeurs fixées pour ces particules sont les suivantes :

- $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la moyenne annuelle. Cette limite ne doit pas être dépassée.
- $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la moyenne journalière. Cette valeur ne peut être dépassée qu'une fois par an.

Les critères selon lesquels les valeurs limites de la qualité de l'air pour les PM<sub>10</sub> ont été établies sont fixés sur base de la *Loi fédérale sur la protection de l'environnement* du 7 octobre 1983 (LPE, 1983). Plus spécifiquement, ce sont les articles premier, treizième et quatorzième qui fournissent ces critères.

En ce qui concerne les PM<sub>2,5</sub>, elles ne font pas l'objet d'une réglementation. Par contre, du fait que les études menées au niveau national et international n'ont pas identifié un seuil en dessous duquel elles seraient inoffensives, on considère que les émissions de ces particules doivent être réduites autant que possible. Cela s'applique notamment aux suies de diesel.

Depuis 1998 les suies de diesel sont mentionnées dans l'OPair parmi les substances cancérogènes. En l'absence de seuil de tolérance pour ce type de substances, la LPE impose que les émissions soient limitées en fonction des meilleures techniques disponibles.

Il est à noter que même s'il existe des technologies de dépollution pour les voitures diesel (des filtres à particules), le Conseil fédéral remarque que la Suisse ne peut pas durcir seule la législation pour rendre le filtre obligatoire. Cela pourrait être à l'origine d'une entrave au commerce, ce qui est incompatible avec les engagements internationaux.

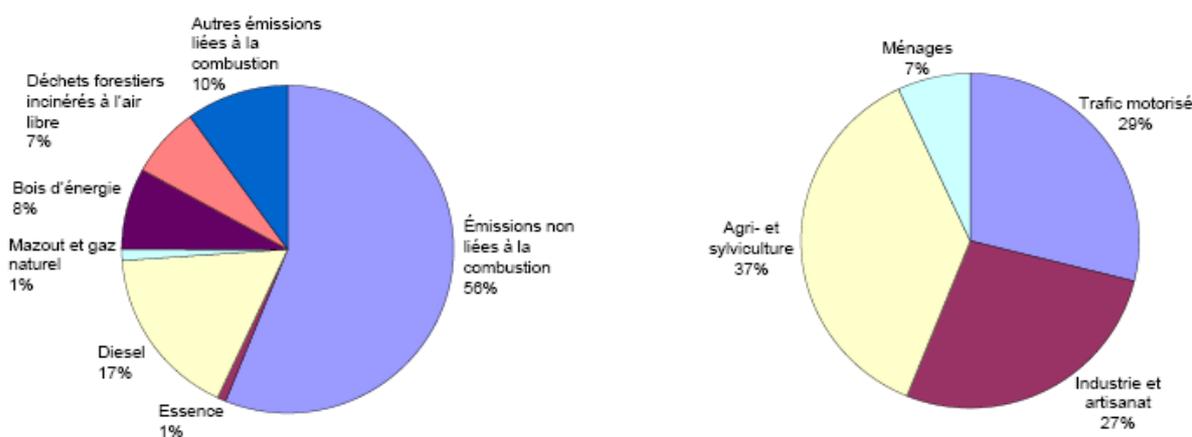
La pollution atmosphérique par les particules en suspension dépasse, selon le réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL), les normes en vigueur. A certains endroits, la valeur moyenne annuelle des PM<sub>10</sub> double presque les niveaux admis. Selon les mesures réalisées en 2003 dans les villes et les agglomérations, une moyenne de 60 dépassements a été enregistrée par rapport à la limite fixée par l'OPair. En ce qui concerne les zones rurales, les teneurs ont été dépassées pendant 20 à 25 jours. Même si grâce aux efforts de réduction des rejets (tant dans le secteur industriel que du transport ainsi qu'au niveau résidentiel), les émissions de particules sont en recul depuis 1990, elles s'élèvent encore à 21 ktonnes (OFEFP, 2005a).

L'agriculture et la sylviculture contribuent à la plus grande part des émissions totales (37 %). Selon l'OFEFP, il s'agit notamment des émissions issues tant de l'élevage d'animaux que des machines et engins (**Figure 4.1b**). Le secteur du transport, ainsi que celui de l'industrie constituent des sources importantes d'émissions puisqu'ils sont responsables respectivement de 29 % et de 27 % des émissions totales des PM en 2000 (OFEFP, 2006).

**Figure 4.1**

**a. Provenance des émissions des PM<sub>10</sub> en 2000**

**b. Sources des émissions des PM<sub>10</sub> en 2000**



source : OFEFP, 2005b

Il faut noter que la combustion incomplète des carburants et des combustibles représente 42 % de ces émissions et que près de 17 % sont issues des moteurs diesel (tracteurs et machines de chantier,

camions et voitures). Les 58 % des émissions qui ne sont pas liées aux processus de combustion proviennent tant de processus industriels que de l'abrasion mécanique produite par le trafic routier et ferroviaire, ainsi que du soulèvement de poussières sur les routes, sur les terres agricoles et sur les chantiers.

*Les valeurs limites d'immission établies en Suisse correspondent aux valeurs indicatives recommandées par l'OMS.*

#### **4.1.2. Les Etats-Unis**

A travers le "*Clean Air Act*"<sup>50</sup> (CAA), amendé pour la dernière fois en 1990, l'Agence de Protection de l'Environnement aux Etats-Unis (EPA) est tenue de fixer des **Normes Nationales de Qualité de l'Air Ambiant** (en anglais NAAQS) pour les polluants considérés comme nocifs pour la santé publique et pour l'environnement. Ces polluants comprennent les particules et leurs précurseurs (le NO<sub>2</sub> et les oxydes de soufre), le plomb, l'ozone et le monoxyde de carbone.

Le CAA a établi l'existence de deux types de normes :

- Les normes **primaires** : elles fixent des valeurs limites en vue de protéger la santé de la population, en incluant les groupes sensibles (les enfants, les personnes âgées, les asthmatiques...)
- Les normes **secondaires** : ces normes fixent des valeurs limites afin de protéger la végétation et les cultures, la visibilité, les animaux et les bâtiments.

Ainsi, sur base de ces types de normes, les efforts de réduction des particules atmosphériques ont commencé à se développer. En 1971 sont apparues les premières normes NAAQS faisant référence aux particules totales en suspension (TSP). L'EPA fixait les valeurs limites pour les TSP à 75 µg/m<sup>3</sup> pour la moyenne annuelle et à 260 µg/m<sup>3</sup> pour la moyenne journalière. Cette dernière à ne pas dépasser qu'une seule fois par an.

En 1987, des révisions importantes ont été réalisées et un nouvel indicateur (les PM<sub>10</sub>) a été adopté. Des normes primaires et secondaires de valeur identique pour les PM<sub>10</sub>, fixaient à 50 µg/m<sup>3</sup> la moyenne annuelle et à 150 µg/m<sup>3</sup> la moyenne sur 24 heures.

Depuis l'établissement des premières normes, des études épidémiologiques sur les effets nocifs des particules ont été de plus en plus publiées. De ce fait, l'EPA a réalisé une nouvelle révision des valeurs établies pour la matière particulaire et a proposé des nouveaux standards en 1997 (EPA, 1997).

Dans cette révision, des valeurs limites pour les particules fines (PM<sub>2,5</sub>) ont aussi été introduites. Les valeurs ainsi fixées étaient les suivantes :

- PM<sub>10</sub>: 50 µg/m<sup>3</sup> (\*) pour la moyenne annuelle et 150 µg/m<sup>3</sup> pour la moyenne sur 24 heures
- PM<sub>2,5</sub>: 15 µg/m<sup>3</sup> pour la moyenne annuelle et 65 µg/m<sup>3</sup> (\*) pour la moyenne sur 24 heures

A partir du 17 décembre 2006, ces valeurs (\*) ont été modifiées<sup>51</sup>. La dernière révision de ces valeurs, réalisée par l'EPA, a apporté les modifications suivantes :

- La valeur de la moyenne annuelle pour les PM<sub>10</sub> précédemment fixée à 50 µg/m<sup>3</sup> a été révoquée. Selon l'EPA, ce fait est justifié par la connaissance insuffisante des problèmes que ces particules produisent à long terme
- La valeur journalière pour les PM<sub>2,5</sub> a été réduite de 65 à 35 µg/m<sup>3</sup>

Par contre, il est intéressant de signaler que la Californie a choisi comme valeurs limites des PM<sub>10</sub> celles suggérées par l'OMS (20 µg/m<sup>3</sup> pour la moyenne annuelle et 50 µg/m<sup>3</sup> pour la moyenne

<sup>50</sup> Clean Air Act, document téléchargeable sur : <http://www.epa.gov/oar/caa/>, accédé le 18/12/2006.

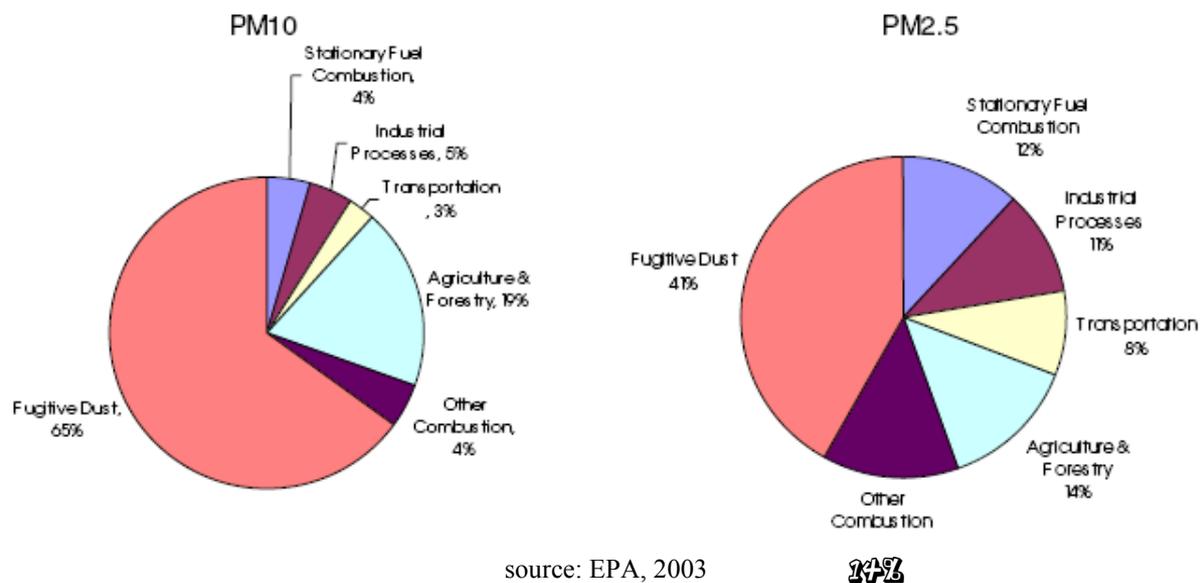
<sup>51</sup> Révision des NAAQS : <http://www.epa.gov/air/criteria.html#2>, accédé le 18/12/2006.

journalière). Pour les  $PM_{2,5}$ , elle a aussi établi une moyenne annuelle inférieure ( $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) à celle fixée au niveau national.

En ce qui concerne les émissions, la **Figure 4.2** présente la contribution des différents secteurs à l'émission des PM.

Il est important de remarquer que les émissions sont examinées dans deux groupes séparés. Le premier groupe comprend les sources inventoriées plus traditionnellement (les sources stationnaires de combustion, les processus industriels et le transport). Le deuxième groupe inclut les sources naturelles (l'agriculture et la sylviculture, les feux de forêts et les brûlis et, les sources fugitives de poussières ("fugitive dust").

**Figure 4.2 : Emissions moyennes nationales des  $PM_{10}$  et des  $PM_{2,5}$  en 1990**



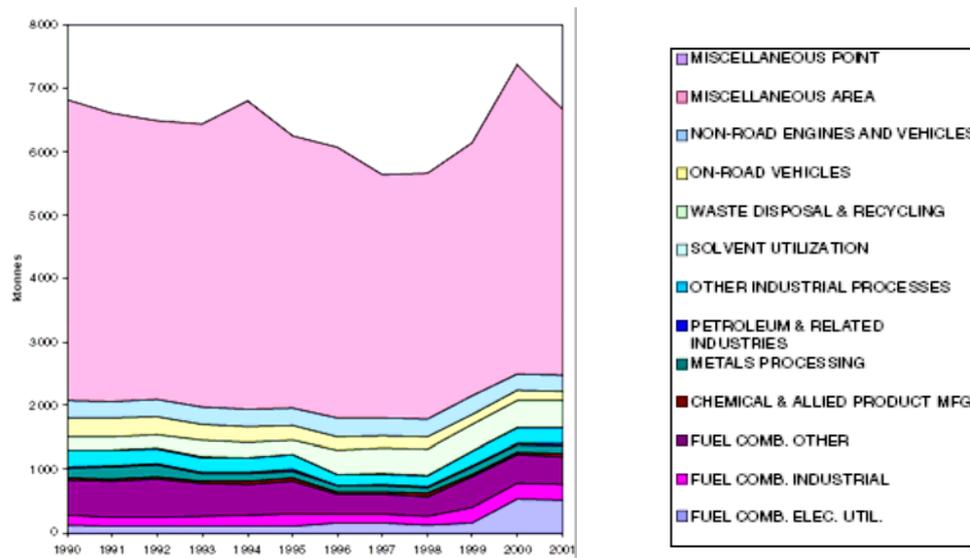
Sur base de ces représentations, notons que les routes revêtues et non revêtues (émettrices de "poussières fugitives") se présentent comme les sources principales de poussières.

L'agriculture et la sylviculture se révèlent des sources importantes d'émission des deux types de particules ( $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$ ). Les processus industriels et de combustion constituent aussi des sources non négligeables des  $PM_{2,5}$ , contribuant respectivement à 11 % et 14 % respectivement de leur émission.

Il est important de signaler qu'entre 1990 et 2001, tant les émissions des  $PM_{10}$  que celles des  $PM_{2,5}$  ont été réduites. Pour les  $PM_{10}$  cette réduction a été de 13 % (de 25.000 kt à un peu moins de 22.000 kt) et pour les  $PM_{2,5}$  d'environ 2 % (de 6.859 kt à 6.695 kt) (Milieu Ltd et al., 2004) (**Figure 4.3**).

Des efforts de réduction des émissions de particules dans les activités agricoles et forestières sont principalement à l'origine des réductions. A l'exception des sources de combustion pour la production d'énergie, qui ont augmenté (368 % entre 1990 et 2001) leurs émissions de  $PM_{2,5}$ , la contribution des autres secteurs est de manière générale similaire.

**Figure 4.3 : Sources d'émissions de PM<sub>2,5</sub> entre 1990 et 2001**



source : Milieu Ltd et al., 2004

*En ce qui concerne les PM<sub>10</sub>, les valeurs limites fixées aux Etats-Unis sont moins strictes que celles suggérées par l'OMS, à l'exception des valeurs choisies en Californie.*

*Bien que la moyenne annuelle fixée précédemment à 50 µg/m<sup>3</sup> ait été révoquée récemment en raison de connaissances insuffisantes sur les impacts de ces particules à long terme, la valeur journalière (150 µg/m<sup>3</sup>) se situe encore bien au-dessus de la valeur indicative (50 µg/m<sup>3</sup>).*

*Par rapport aux PM<sub>2,5</sub>, les valeurs aux Etats-Unis se rapprochent des valeurs suggérées par l'OMS.*

*Etonnement, la Californie a des normes semblables à celles proposées par l'OMS. Il s'agit donc bien une question de choix politique tant au niveau fédéral qu'au niveau des différents Etats.*

### 4.1.3. Le Canada

Au Canada, chaque niveau de gouvernement (le fédéral, les provinciaux, les territoriaux et les autochtones) a des pouvoirs de protection de l'environnement. Du fait que cette compétence est partagée, ils travaillent en étroite collaboration afin que les décisions soient cohérentes.

La **Loi canadienne sur la Protection de l'Environnement** (LCPE, 1999) est entrée en vigueur le 31 mars 2000. Elle vise "la prévention de la pollution et la protection de l'environnement et de la santé humaine en vue de contribuer au développement durable". Cette loi fait de la prévention de la pollution l'objectif principal des efforts nationaux. Elle vise ainsi à réduire les substances toxiques et nocives dans l'environnement. En effet, elle s'occupe, parmi d'autres thèmes, des émissions des véhicules, des moteurs, des équipements et des combustibles.

En termes de pollution transfrontalière de l'environnement, elle prévoit la collaboration avec des gouvernements à l'échelle internationale, afin d'atteindre les objectifs de politique environnementale du pays.

Dans ce cadre, ce sont les ministres fédéraux de l'Environnement et de la Santé qui évaluent conjointement et gèrent les risques associés aux substances toxiques.

La Loi canadienne exige que les ministres fédéraux préparent une *liste des substances d'intérêt prioritaire*. Cette liste se réfère aux substances qui nécessitent une évaluation tant prioritaire qu'approfondie afin de déterminer si elles sont effectivement ou potentiellement "toxiques" au sens de l'article 64.

Cet article établit que toute substance est considérée comme toxique lorsqu'elle pénètre (ou peut pénétrer) dans l'environnement avec les caractéristiques suivantes :

- avoir (immédiatement ou à long terme) un effet nocif sur l'environnement ou sur la biodiversité
- mettre en danger l'environnement essentiel pour la vie
- constituer un danger, au Canada, pour la vie ou la santé humaine

Sur base de ces critères, les substances, dont l'évaluation révèle leur toxicité, sont inscrites dans l'annexe 1 de la Loi. De ce fait, il est possible d'envisager des mesures éventuelles de gestion du risque.

En mai 2000, un *Rapport d'évaluation* de cette liste a été réalisé. Ce rapport propose de considérer les PM<sub>10</sub> et les PM<sub>2,5</sub> comme toxiques au sens de l'article 64 de la LCPE (LSIP, 2000).

Cette proposition a été réalisée sur base des résultats des analyses épidémiologiques et toxicologiques. Ces résultats sont considérés comme des preuves suffisantes (tant de morbidité que de mortalité chez la population exposée aux concentrations ambiantes des PM<sub>10</sub> et des PM<sub>2,5</sub>) pour affirmer leur toxicité.

En 2003, le gouvernement fédéral a en outre ajouté certains des précurseurs des particules (SO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> et NH<sub>3</sub>) à l'annexe 1 de la LCPE. Cela autorise le gouvernement fédéral à mettre en œuvre des initiatives pour l'amélioration de la qualité de l'air.

Notons qu'au niveau fédéral, même s'il existe depuis 1976 des standards de qualité de l'air pour les TSP (FPCAP, 1976), il n'existe pas des valeurs limites pour les PM<sub>10</sub>. Cependant, du fait que les différents niveaux de gouvernement ont des compétences sur le sujet, certaines provinces (Terre-Neuve et Colombie-Britannique) ont fixé des normes pour cette taille de particules.

Par ailleurs, le 5 juin 2000, en vertu de l'*Accord pancanadien sur l'harmonisation environnementale*<sup>52</sup> et de son *Entente auxiliaire pancanadienne sur les standards environnementaux*<sup>53</sup>, le Conseil canadien des ministres de l'environnement a adopté des standards visant les particules fines (PM<sub>2,5</sub>) et l'ozone (*Normes Pancanadiennes*, 2000). Le standard correspondant à la fraction fine a été choisi afin de protéger la santé publique des effets les plus nocifs des particules (mortalité).

La valeur moyenne, sur une période de 24 heures pour les PM<sub>2,5</sub>, a été fixée à 30 µg/m<sup>3</sup>. L'atteinte de la norme sera déterminée par la moyenne, calculée sur trois années consécutives, des valeurs annuelles du 98e centile, d'ici 2010.

En ce qui concerne les effets sur la morbidité des PM<sub>10</sub>, le texte des Normes Pancanadiennes assure que leur réduction se produira auxiliairement lors de la réduction des PM<sub>2,5</sub>.

Les concentrations permises pour les TSP, les PM<sub>10</sub> et les PM<sub>2,5</sub> sont présentées dans le **Tableau 4.a**.

**Tableau 4.a : Normes et objectifs de qualité de l'air ambiant relatifs aux particules au Canada**

Polluant	Période de calcul de la moyenne	Objectifs canadiens (niveau acceptable) (µg/m <sup>3</sup> )	Terre-Neuve (µg/m <sup>3</sup> )	Colombie-Britannique (µg/m <sup>3</sup> )
TSP	24 heures	120	120	120
	Année	70	---	70
PM <sub>10</sub>	24 heures	---	50	50
	Année	---	---	---
PM <sub>2,5</sub>	24 heures	30	30	30
	Année	---	---	---

source : adaptation Environnement Canada, 2002

<sup>52</sup> Téléchargeable sur : [http://www.ccme.ca/assets/pdf/accord\\_harmonization\\_f.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/accord_harmonization_f.pdf), accédé le 17/12/2006.

<sup>53</sup> Téléchargeable sur : [http://www.ccme.ca/assets/pdf/cws\\_envstandards\\_subagreement\\_fr.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/cws_envstandards_subagreement_fr.pdf), accédé le 17/12/2006.

Comme on l'observe dans ce tableau, tant les valeurs des  $PM_{2,5}$  que celles existantes pour les  $PM_{10}$ , sont axées sur les moyennes journalières.

Il ne nous a pas été possible de trouver des données sur les émissions particulières par secteurs au Canada.

*Le niveau de protection choisi au Canada concernant les  $PM_{10}$  est le même que celui choisi par la Suisse et la Californie. De plus, il correspond à la valeur indicative donnée par l'OMS.*

*En ce qui concerne la valeur limite pour les  $PM_{2,5}$ , la moyenne journalière fixée au Canada (au niveau fédéral) se rapproche bien de la valeur suggérée par l'OMS.*

## 4.2. La législation européenne concernant les PM

La politique de l'environnement en Europe est assez récente ; elle est née au début des années 1970. Le droit de l'environnement ne s'est pas développé de manière systématique ou intégrée, mais il s'est constitué par un processus de législations sectorielles touchant de plus en plus l'environnement. La systématisation a été tardive.

Une des premières préoccupations concernant l'atmosphère a été la pollution engendrée par les émissions des véhicules à moteur. C'est ainsi que le 20 mars 1970, la **Directive 70/220/CEE du Conseil concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux mesures à prendre contre la pollution de l'air par les émissions des véhicules à moteur**, est établie. Elle fixe des normes d'émission tant pour les moteurs à essence que pour les moteurs diesel des voitures particulières et des utilitaires légers. Une quinzaine de directives qui la modifieront vont suivre afin d'introduire des valeurs limites plus sévères à ces émissions. Certaines d'entre elles seront très importantes car elles serviront de base aux **normes Euro**. Ces normes seront traitées au point 4.2.5.1. Des directives concernant les émissions de particules provenant des véhicules lourds<sup>54</sup> équipés d'un moteur diesel vont apparaître plus tard. En décembre 1987, la **Directive 88/77/CEE** limite l'émission des polluants pour les véhicules. Elle sera postérieurement modifiée pour renforcer les exigences de limitation en matière d'émission de particules, de fumées et d'autres polluants. Différentes directives concernant la qualité de l'air vont aussi suivre ces textes sur les effets de la pollution de l'air ambiant.

Le **Programme d'action des Communautés européennes en matière d'environnement** de 1973<sup>55</sup> et la résolution de 1977<sup>56</sup> parlaient déjà de l'importance d'accorder une action prioritaire contre l'anhydride sulfureux ( $SO_2$ ) et les particules en suspension en raison de leur toxicité. Ainsi, l'état des connaissances qu'on avait à ce moment-là de leurs effets sur la santé humaine et sur l'environnement a permis d'aboutir à la création de la première directive sur qualité de l'air : La **Directive 80/779/CE du Conseil du 15 juillet**<sup>57</sup>, **concernant des valeurs limites et des valeurs guides de qualité atmosphérique pour l'anhydride sulfureux et les particules en suspension**. Celle-ci fixera des valeurs limites à ne pas dépasser sur le territoire des États membres, fondées sur les résultats des études de l'OMS.

Elle sera plus tard modifiée par la directive de 1989<sup>58</sup>, puis sera amendée par les directives concernant une valeur limite pour le plomb contenu dans l'atmosphère<sup>59</sup> (1982), les normes de qualité de l'air pour le dioxyde d'azote ( $NO_2$ )<sup>60</sup> (1985) et la pollution de l'air par l'ozone<sup>61</sup> (1992).

<sup>54</sup> L'ensemble des véhicules lourds (autobus, poids lourds, ...) sauf rail, machines agricoles et engins de travaux publics.

<sup>55</sup> JO n° C 112 du 20.12.1973, p. 3.

<sup>56</sup> Résolution du Conseil des CE concernant la poursuite et la réalisation d'une politique et d'un programme d'action des Communautés européennes en matière d'environnement. JO n° C 139 du 13.6.1977.

<sup>57</sup> JO L 229 du 30.8.1980, p. 30–48.

<sup>58</sup> Directive 89/427/CEE du Conseil du 21 juin 1989. JO L 201 du 14.7.1989, p. 53–55.

<sup>59</sup> Directive 82/884/CEE du Conseil, du 3 décembre 1982. JO L 378 du 31.12.1982, p. 15–18.

A l'époque, les particules sont mesurées par le noircissement des filtres spécifiques imposés par une méthode standardisée et largement utilisée, connue sous le nom de *fumées noires*<sup>62</sup>, un nom qui a été aussi utilisé comme synonyme de "particules".

La directive imposait, pour les particules mesurées par cette méthode, les valeurs limites (à l'immission) et les valeurs guides indiquées dans le **Tableau 4.b**.

**Tableau 4.b : Valeurs limites et guides pour les particules en suspension ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

Période considérée	Valeur limite	Valeur guide
24 heures		100 à 150 (a)
Année	80 (c)	40 à 60 (b)
Année (composée d'unités de périodes de mesures de 24 heures)	250 (d) Les Etats membres doivent prendre toutes mesures appropriées afin d'éviter le dépassement de cette valeur pendant plus de 3 jours consécutifs.	
Hiver (1er octobre au 31 mars)	130 (e)	

(a) valeur moyenne quotidienne

(b) moyenne arithmétique des valeurs moyennes quotidiennes relevées pendant l'année

(c) médiane des valeurs moyennes quotidiennes relevées pendant l'année

(d) percentile 98 de toutes les valeurs moyennes quotidiennes relevées pendant l'année

(e) médiane des valeurs moyennes quotidiennes relevées pendant l'hiver

source : directive 1980/779/CE

On peut remarquer qu'à l'époque, on ne distingue pas encore les particules par leur taille. En effet, la normalisation par taille spécifique de particules ne commencera qu'à la fin des années 1990. Par ailleurs, les valeurs guides sont ici destinées à servir tant à la prévention à long terme en matière de santé et de protection de l'environnement que de référence pour l'établissement de "régimes spécifiques à l'intérieur de zones que déterminent les États membres". **La directive imposait** aux États membres de **mettre en place des stations de mesure** destinées à fournir les données nécessaires à son application et prévoyait également une coopération entre les États membres et la Commission pour l'adaptation des procédures liées aux progrès tant techniques que scientifiques.

De même, les préoccupations pour la pollution atmosphérique transfrontalière commencent à se matérialiser à cette époque. Pour rappel, en 1983 la **Convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance**<sup>63</sup> (CPATLD) entre en vigueur. Les différents Etats s'engagent dans cette convention à lutter contre la pollution transfrontalière issue de certains précurseurs des PM (cf. Chapitre 2, point 2.3.2).

En ce qui concerne les normes de qualité de l'air, la **Directive-cadre de 1996 (96/62/CE) sur la qualité de l'air** est l'une des plus importantes. Elle établit les principes d'évaluation et de gestion de la qualité de l'air dans toute l'Europe en fixant des valeurs limites pour plusieurs substances à travers ses directives filles. Parmi elles, la **première directive fille** (1999/30/CE) qui traite des particules dans l'air ambiant.

<sup>60</sup> Directive 85/203/CEE du Conseil, du 7 mars 1985. JO L 87 du 27.3.1985, p. 1–7.

<sup>61</sup> Directive 92/72/CEE du Conseil, du 21 septembre 1992. JO L 297 du 13.10.1992, p. 1–7

<sup>62</sup> Pour la détermination des fumées noires et leur conversion en unités gravimétriques, la méthode de référence est la méthode standardisée par le groupe de travail de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) sur les méthodes de mesure de la pollution de l'air et les techniques d'enquête -1964 (annexe III).

<sup>63</sup> Décision 81/462/CEE du Conseil, du 11 juin 1981, concernant la conclusion de la convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance. JO L 171 du 27.06.1981

En 1997 par la *Décision 97/101/CE sur les échanges d'informations en matière de pollution atmosphérique*<sup>64</sup>, l'Union européenne introduit une procédure d'échange réciproque d'informations et de données provenant des réseaux et des stations individuelles. Cette décision comprend les polluants figurant dans l'Annexe I de la directive 96/62/CE : le SO<sub>2</sub> et les particules en suspension, le plomb, le NO<sub>2</sub> et l'ozone, et d'autres polluants (le benzène, le CO, les HAP, le cadmium, l'arsenic, le nickel et le mercure).

En 2001, des stratégies de lutte contre l'acidification, l'ozone et l'eutrophisation sont aussi élaborées. La *Directive sur les Plafonds d'Emissions Nationales (PEN)*<sup>65</sup> joue un rôle central dans ces stratégies en agissant sur quatre polluants : le SO<sub>2</sub>, les oxydes d'azote (NOx), l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et les composés organiques volatils (COV). Notons que ces polluants sont aussi précurseurs des particules atmosphériques. La directive laisse le choix aux Etats membres des mesures à prendre afin de limiter la quantité de pollution atmosphérique émise pour atteindre des objectifs intermédiaires fixés pour 2010. A cette fin, elle fixe des plafonds d'émission pays par pays.

Pour rappel, dans la même année, la *Décision 2001/752/CE* établit un échange réciproque d'informations et de données provenant des réseaux et des stations individuelles mesurant la pollution de l'air ambiant dans les États membres. Par cette décision, une autre taille de particules est prise en compte : les PM<sub>1</sub>. Elles sont mentionnées comme un des polluants dangereux pour lesquels il faut obtenir des renseignements (moyenne arithmétique, médiane, valeur maximale, etc.).

Fin 2005, les efforts réalisés pour atteindre une amélioration de la qualité de l'air dans la communauté se poursuivent. La Commission européenne adopte la première des sept stratégies environnementales à venir : la *"Stratégie Thématique sur la Pollution Atmosphérique"*. Elle est accompagnée par une *proposition de directive* qui prévoit la simplification de la législation existante et qui introduit de nouvelles dispositions sur les particules fines. La proposition, qui n'a pas encore été adoptée, définit des objectifs de qualité de l'air et propose des mesures pour les atteindre à l'horizon 2020. Nous les aborderons plus en détail dans ce chapitre.

*Ainsi, dans son parcours environnemental et en vue de lutter contre la pollution de l'air, l'UE a réussi à établir une législation visant, d'une part, la qualité même de l'air ambiant (à travers les valeurs limites d'immission) et, d'autre part, l'émission de polluants (à travers les valeurs limites d'émission par les véhicules à moteur). Le but final de la législation dans son ensemble était et est, à nos jours, toujours le même : garantir que l'air qui se respire ne porte pas atteinte ni à la santé humaine ni à l'environnement. Le concept "environnement" est pris en compte dans ses différents aspects : la vie animale, la vie végétale et le patrimoine architectural. Ci-dessus, nous approfondirons les aspects législatifs les plus importants en relation avec la régulation de la matière particulaire.*

## **4.2.1. La Directive-cadre 96/62/CE et ses directives-filles**

### **4.2.1.1. La Directive-cadre de 1996**

Les préoccupations pour la qualité de l'air et en particulier pour les effets dangereux de certains polluants atmosphériques (comme c'est le cas des particules) se sont renforcées ces dernières années. En conséquence, les institutions européennes se sont montrées très actives dans ce domaine.

---

<sup>64</sup> Décision 97/101/CE du Conseil du 27 janvier 1997. JO L 035 du 05/02/1997, p. 14 - 22. Modifiée par la Décision 2001/752/CE de la Commission du 17 octobre 2001 modifiant les annexes (JO L 282 du 26.10.2001, p. 69–76).

<sup>65</sup> Directive 2001/81/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2001 fixant des plafonds d'émission nationaux pour certains polluants atmosphériques. JO L 309 du 27.11.2001, p. 22–30. Directive modifiée par l'acte d'adhésion de 2003.

La *Directive-cadre 96/62/CE<sup>66</sup> du Conseil, du 27 septembre 1996, concernant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant*, est entrée en vigueur le 21 novembre 1996. Elle sera postérieurement modifiée en 2003. En Région Bruxelles-Capitale, cette directive est transposée par l'Ordonnance du 25 mars 1999. La directive se base sur les recommandations du *Cinquième Programme d'Action pour l'environnement* (5<sup>e</sup> PAE) de 1992 en vue d'établir des objectifs à long terme en matière de qualité de l'air. **Elle établit les principes de base d'une stratégie commune qui vise à définir et à fixer des objectifs concernant la qualité de l'air ambiant** dans toute l'Europe. Cette directive est émise dans un cadre global qui révisé la législation existante et introduit des nouveaux standards pour des polluants, qui jusqu'alors n'étaient pas réglementés.

Le principe établi par la directive est d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs pour la santé humaine et pour l'environnement. Ce principe permet non seulement de décider et de fixer des objectifs de qualité de l'air mais aussi d'établir des méthodes et des critères communs d'évaluation, ainsi que d'informer les citoyens et les autorités sur la qualité de l'air ambiant. **Elle traite en priorité des substances déjà couvertes par la Directive 80/779/CEE sur le SO<sub>2</sub> et les particules en suspension**, par la Directive 82/884/CEE sur le **plomb**, par la Directive 85/203/CEE sur le **NO<sub>2</sub>** et par la Directive 92/72/CEE sur l'**ozone**. La directive impose ainsi le contrôle de la qualité de l'air ambiant sur tout le territoire des États membres, obligatoire pour les agglomérations de plus de 250.000 habitants ou dans les zones où les concentrations sont proches des valeurs limites. Ce contrôle peut être effectué par différentes méthodes : par estimation, par mesurage, par modélisation mathématique ou bien par une combinaison de mesurage et de modélisation.

**Ce n'est pas cette directive qui fixe directement des valeurs limites** ou des seuils d'alerte. Par contre, elle fixe les délais qu'elle considère comme appropriés pour chaque groupe de polluants et les facteurs à prendre en compte lors de leur fixation. Son texte spécifie que, pour les zones où ces niveaux ne sont pas dépassés, les États membres doivent s'efforcer d'y préserver la meilleure qualité de l'air ambiant de manière compatible avec le développement durable. Mais une liste des zones et des agglomérations où les niveaux de pollution sont supérieurs aux valeurs limites fixées par la directive doit être établie obligatoirement. Ainsi, en cas de dépassement, la directive établit que les États doivent mettre en oeuvre *un programme local, régional ou national*, qui permette de revenir à une situation où ces valeurs limites sont respectées, et cela dans un délai fixé.

Par rapport aux dépassements des seuils d'alerte, les États membres doivent informer la population et la Commission. L'article 11 de cette directive est exclusivement consacré à la transmission sous une forme normalisée des informations et des rapports pour permettre la comparaison des données recueillies. Cette directive insiste sur l'accessibilité à l'information pour la population sur base de renseignements adéquats portant sur les programmes à exécuter notamment lors des situations de dépassement. **Elle insiste aussi sur l'échange d'informations** entre les États membres et l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE). Cet échange doit se réaliser notamment par un rapport sur la qualité de l'air ambiant dans la Communauté, publié par la Commission (tous les trois ans) avec l'aide de l'AEE.

Cette directive a donné lieu postérieurement à quatre *directives-filles<sup>67</sup>*, qui **fixent les valeurs limites et les seuils d'alerte pour 13 polluants** différents. La liste de polluants atmosphériques à considérer inclut des polluants qui étaient déjà sous régulation (particules, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, plomb et ozone) et d'autres polluants non régulés (benzène, HAP, CO et les métaux lourds : cadmium, arsenic, mercure et nickel).

<sup>66</sup> JO L 296 du 21.11.1996, p. 55. Directive modifiée par le règlement (CE) n° 1882/2003 du Parlement européen et du Conseil (JO L 284 du 31.10.2003, p. 1).

<sup>67</sup> **Première directive fille** : Directive 1999/30/CE 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, JO L 163 du 29.06.1999 p. 41-60. Directive modifiée par la décision 2001/744/CE de la Commission (JO L 278 du 23.10.2001, p. 35).

**Deuxième directive fille** : Directive 2000/69/CE concernant les valeurs limites pour le benzène et le monoxyde de carbone dans l'air ambiant, JO L 313 du 13.12.2000 p. 12-21.

**Troisième directive fille** : Directive 2002/3/CE relative à l'ozone dans l'air ambiant, JO L 67 du 09.03.2002 p. 14-30.

**Quatrième directive fille** : Directive 2004/107/CE concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant, JO L 23 du 26.01.2005 p. 3-16.

Les objectifs de ces directives comprennent l'harmonisation de stratégies de monitoring, de méthodes de mesure, de calibrage et d'évaluation de la qualité de l'air pour pouvoir réaliser des comparaisons et servir de base d'information fiable pour les citoyens. Le développement de ces directives filles est soutenu par des *groupes de travail d'experts*<sup>68</sup> qui élaborent des *rapports* (ou "positions papers") utilisés par la Commission comme base pour la législation. Un groupe appelé *groupe de direction* ("steering groupe") composé par des représentants de ces groupes guide le travail.

#### **4.2.1.2. La Directive 1999/30/CE**

En ce qui concerne les particules atmosphériques, on s'y réfère dans la *Première Directive fille* de la Directive-cadre du 1996, la *Directive 1999/30/CE<sup>69</sup> du Conseil, du 22 avril 1999, relative à la fixation de valeurs limites pour l'anhydride sulfureux (SO<sub>2</sub>), le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), les particules (PM<sub>10</sub>) et le plomb (Pb) dans l'air ambiant*. Elle abroge trois directives précédentes :

- la directive 80/779/CEE<sup>70</sup> (concernant des valeurs limites et des valeurs guides de qualité atmosphérique pour le SO<sub>2</sub> et les particules en suspension)
- la directive 82/884/CEE<sup>71</sup> (concernant une valeur limite pour le plomb contenu dans l'atmosphère)
- la directive 85/203/CEE<sup>72</sup> (concernant les normes de qualité de l'air pour le NO<sub>2</sub>)

Dans son article premier, la directive de 1999 présente ses **objectifs**. Ils comprennent, tout d'abord, l'établissement de valeurs limites (d'immission) et de seuils d'alerte pour tous les polluants qu'elle vise. Suivent l'évaluation des concentrations des polluants sur base de méthodes et de critères communs, l'information au public concerné sur l'état de la qualité de l'air ambiant et finalement l'amélioration de cette qualité ou sa maintenance lorsqu'elle est bonne.

Il faut noter que la directive-cadre reconnaît déjà bien l'importance de réglementer les particules en les incluant dans sa "Liste des polluants atmosphériques à prendre en considération dans le cadre de l'évaluation et de la gestion de la qualité de l'air ambiant" (annexe I de la directive). En effet, elle se réfère aux particules comme "*Particules fines, telles que les suies (y compris PM<sub>10</sub>)*" et "*Particules en suspension*", mais ce n'est qu'en 1999 que les préoccupations pour les particules fines se manifestent plus explicitement. La première directive fille décrit les PM<sub>10</sub> et les PM<sub>2,5</sub> en les définissant comme les particules passant dans un orifice d'entrée calibré avec un rendement de séparation de 50 % pour un diamètre aérodynamique de 10 µm et de 2,5 µm respectivement. Bien qu'**elle ne fixe pas des valeurs limites pour les particules fines (PM<sub>2,5</sub>)**, cette directive reconnaît que les différentes fractions des particules peuvent avoir des effets néfastes sur la santé. **Elle recommande ainsi d'initier leur mesure** dans l'air ambiant. La directive admet aussi que les particules d'origine anthropique génèrent plus de risques pour la santé humaine que les particules naturelles.

Par ailleurs, dans son annexe III, **la directive de 1999 fixe les valeurs limites pour les PM<sub>10</sub> (Tableau 4.c)** sur base des recommandations de l'OMS. Pour la première fois, des objectifs

---

<sup>68</sup> Les groupes d'experts consistent en des experts techniques de la Commission, de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), l'AEE, des Etats membres de la Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe (NU/CEE) et des consultants impliqués dans les analyses coûts-bénéfices (ACB) entre autres.

<sup>69</sup> 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 JO L 163 du 29.06.1999 p. 41-60.

<sup>70</sup> Sauf l'article 1er, l'article 2 § 1, l'article 3 § 1, l'article 9, l'article 15 et l'article 16 ainsi que l'annexe I, l'annexe III, point B et l'annexe IV qui sont abrogés avec effet au 1er janvier 2005.

<sup>71</sup> Sauf les articles 1er et 2, l'article 3 § 1, les articles 7, 12 et 13 qui sont abrogés avec effet au 1er janvier 2005.

<sup>72</sup> Sauf l'article 1er § 1, premier tiret et § 2, l'article 2, premier tiret, l'article 3 § 1, l'article 5, les articles 9, 15 et 16 et l'annexe I qui sont abrogés avec effet au 1er janvier 2010.

intermédiaires sont établis. Deux phases différentes d'application sont considérées. La première phase indique les valeurs limites qui ont dû être respectées au 1<sup>er</sup> janvier 2005. Ensuite, la deuxième phase fixe celles qui devront être respectées au 1<sup>er</sup> janvier 2010.

**Tableau 4.c : Valeurs limites pour les PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)**

Période considérée	Valeur limite	Nombre de dépassements autorisés par année civile	Marge initiale de dépassement au 01/01/2001	Date à laquelle la valeur limite doit être respectée
<b>Phase 1</b>				
24 heures	50	35	50% (a)	01/01/2005
Année civile	40	-	20% (a)	01/01/2005
<b>Phase 2</b>				
24 heures	50	7	à déterminer (b)	01/01/2010
Année civile	20	-	50% (c)	01/01/2010

(a) lors de l'entrée en vigueur de la présente directive, diminuant le 1<sup>er</sup> janvier 2001 et ensuite tous les 12 mois, par tranches annuelles égales pour atteindre 0% au 1<sup>er</sup> janvier 2005

(b) à calculer d'après les données, doit correspondre à la valeur limite de la Phase 1

(c) le 1<sup>er</sup> janvier 2005 diminuant ensuite tous les 12 mois, par tranches annuelles égales pour atteindre 0% au 1<sup>er</sup> janvier 2010

source : directive 1999/30/CE

On observe que les valeurs de PM<sub>10</sub> à ne pas dépasser dans une année civile diminuent de moitié dans la deuxième phase, à respecter début 2010. Même si la limite journalière reste la même (50µg/m<sup>3</sup> en moyenne sur 24h), le fait que cette valeur ne doit pas être dépassée<sup>73</sup> plus de 7 fois dans l'année (au lieu de 35) s'avère important. Pour chaque valeur limite considérée, la directive prévoit une **marge de dépassement** qui devra diminuer progressivement jusqu'à zéro pour les dates auxquelles les valeurs limites doivent être respectées. Les valeurs limites indiquées pour cette dernière période sont toutefois indicatives et à revoir à la lumière d'informations additionnelles. Il s'agit des informations qui doivent résumer et fournir des données concernant les impacts sur la santé et sur l'environnement, concernant l'expérience par rapport à leur application lors de la première phase et les possibilités techniques du moment.

Pour rappel, soulignons que bien que les PM<sub>10</sub> incluent par définition les particules fines et ultrafines, ces dernières ne représentant qu'une proportion faible (notamment les particules ultrafines) de la masse totale des PM<sub>10</sub>. Or, c'est à la fraction fine que sont attribués des effets nocifs sur la santé (cf. Chapitre 3).

Pour la mesure des PM<sub>10</sub>, la directive établit une **méthode de référence**<sup>74</sup>. Elle est basée sur la **collecte des particules ambiantes sur un filtre et la détermination de leur masse par gravimétrie**. Grâce à cette méthode, toutes les fractions ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 10 µg/m<sup>3</sup> sont échantillonnées de façon spécifique. Les États membres peuvent néanmoins utiliser toute autre méthode dont ils peuvent prouver qu'elle donne soit des résultats équivalents soit un rapport constant avec la méthode de référence. Par exemple, la Belgique utilise dans ses postes de mesure tant la méthode de *l'absorption β* (Région flamande et Région wallonne) que la méthode de la *microbalance*

<sup>73</sup> Le nombre de dépassements des valeurs limites permet de tenir compte des conditions météorologiques inhabituelles et défavorables.

<sup>74</sup> Définie au point IV de l'annexe IX: "Qualité de l'air - Procédure d'essai en grandeur réelle visant à démontrer que les méthodes d'échantillonnage de la fraction PM<sub>10</sub> des particules ont valeur de méthode de référence". Cette méthode est décrite dans la norme EN 12341.

*oscillante* (Région flamande et Région Bruxelles-Capitale). Ces deux dernières méthodes sont les plus couramment employées dans les pays européens.

**Dans le cas de dépassement des valeurs fixées pour ces particules par cause naturelle, les Etats membres ne sont pas tenus de mettre en œuvre des plans d'action** comme le prévoyait la directive-cadre. Cependant, ils doivent informer la Commission en fournissant les justifications nécessaires pour prouver qu'il s'agit bien d'une source naturelle qui est à l'origine des particules. Dans le même ordre d'idées, les Etats membres peuvent désigner des *zones* ou des *agglomérations*<sup>75</sup> dans lesquelles le dépassement des valeurs limites fixées pour les PM<sub>10</sub> est provoqué par la resuspension de particules par le sablage hivernal des routes. Dans ce cas-ci, ils ne sont pas tenus non plus de mettre en œuvre des plans d'action pour se conformer aux valeurs limites. Les États doivent néanmoins informer la Commission en fournissant les justifications nécessaires.

En ce qui concerne les PM<sub>2,5</sub>, la directive oblige les Etats membres à **installer des stations de mesures qui fournissent des données sur leurs concentrations**. Ils sont libres dans le choix du nombre d'emplacements des stations tout en s'assurant qu'elles seront représentatives des concentrations réelles. Les données ainsi obtenues doivent se présenter sous une forme précise<sup>76</sup> et être communiquées annuellement à la Commission.

Un volet toujours important est constitué par **l'information du public et de différents organismes**, notamment des organismes de protection de l'environnement, des associations de consommateurs, des organismes représentant les intérêts des populations sensibles et les autres organismes de santé concernés. Des informations non seulement claires et compréhensibles mais aussi accessibles sur les concentrations ambiantes du SO<sub>2</sub>, du NO<sub>2</sub> et des NO<sub>x</sub>, des particules et du plomb doivent être transmises de manière systématique et mises à jour quotidiennement ou éventuellement toutes les heures, exception faite du plomb dans l'air ambiant dont les données doivent être mises à jour tous les trois mois.

L'application de cette directive a conduit en janvier 2005 à la réalisation d'un *rapport*<sup>77</sup> accompagné d'un document du groupe de travail de la Commission<sup>78</sup>. Il concerne, comme prévu, les résultats des recherches scientifiques concernant les effets sur la santé humaine et les écosystèmes de l'exposition aux polluants que la directive traite, parmi lesquels se trouvent les différentes fractions de particules. Il concerne aussi les progrès technologiques développés tels que les méthodes de mesure et d'autres techniques d'évaluation des concentrations de particules dans l'air ambiant et du dépôt de particules sur les surfaces. Enfin, il aborde également les difficultés rencontrées lors de l'application même de la directive. Toutes ces données sont fondées sur l'expérience acquise au cours des trois premières années de mise en œuvre de la directive. Le rapport confirme le besoin et l'importance de fixer des valeurs limites plus strictes pour les polluants affectant la qualité de l'air. Ceci en gardant les marges de dépassement qui s'avèrent utiles selon les Etats membres. Ce rapport spécifie que plus de précisions et d'orientations concernant l'application des valeurs limites sont nécessaires et qu'elles seront traitées dans la Stratégie Thématique sur la Pollution Atmosphérique (STPA) à élaborer en 2005. Il signale aussi que les mesures en faveur de la qualité de l'air doivent se concentrer sur les PM<sub>10</sub> et le NO<sub>2</sub>, et qu'il est également nécessaire de poursuivre l'harmonisation et la recherche concernant la mesure des particules. Selon ce rapport, des améliorations techniques seront adoptées particulièrement en vue

---

<sup>75</sup> Une zone caractérisée par une concentration de population supérieure à 250.000 habitants. Ou, lorsque la concentration de population est inférieure ou égale à ce chiffre, une densité d'habitants au kilomètre carré qui justifie pour les États membres l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant. La classification de chaque zone ou agglomération est revue tous les cinq ans, mais peut faire l'objet d'une révision anticipée, en cas de modification importante des activités ayant des incidences sur les concentrations des particules.

<sup>76</sup> la moyenne arithmétique, la médiane, le percentile 98 et la concentration maximale calculée à partir des mesures des PM<sub>2,5</sub> relevées sur 24 heures durant l'année considérée.

<sup>77</sup> Review of Council Directive 1999/30/EC relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air, with consideration of Council Directive 96/62/EC on ambient air quality assessment and management. [http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/1999\\_30\\_ec\\_review\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/1999_30_ec_review_report.pdf)

<sup>78</sup> [http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/staff\\_working\\_paper.pdf](http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/staff_working_paper.pdf)

d'assurer un nombre suffisant de stations de mesure dans les zones rurales ainsi qu'une proportion adéquate des différents types de stations.

Finalement, notons que des valeurs limites pour la protection de la santé tant pour les PM<sub>10</sub> que pour le SO<sub>2</sub> ont dû être atteintes en 2005 (les valeurs limites des NOx, pour la protection de la végétation déjà en 2001 et les valeurs limites du NO<sub>2</sub> et de plomb pour la protection de la santé pour 2010). Pour fin 2003, les Etats membres devaient préparer des plans ou programmes concernant l'application des valeurs limites pour la date d'échéance qui devaient non seulement être transmis à la Commission mais qui devaient aussi être disponibles pour le public. Cependant, il faut remarquer qu'en règle générale, **c'est bien après la date d'échéance (mi-juillet 2004) que seulement trois états** (la Belgique, le Royaume-Uni et le Suède) **ont présenté des plans ou programmes en vue de l'application des valeurs limites établies** par la première directive fille. Le rapport atteste d'une expérience positive, surtout au niveau de la sensibilisation de l'opinion publique et des milieux politiques. Pourtant, il évoque le besoin d'approfondir la communication des données par les États membres en ce qui concerne l'harmonisation et la rationalisation de cette communication.

## **4.2.2. Le Sixième Programme d'Action pour l'Environnement et le Programme "Air pur pour l'Europe"**

### **4.2.2.1. Le Sixième Programme d'Action pour l'Environnement**

La communication *COM(2001)31 finale du 24 janvier 2001* présente le *Sixième Programme Communautaire d'Action pour l'Environnement*<sup>79</sup> (6<sup>e</sup> PAE) intitulé "*Environnement 2010 : Notre avenir, notre choix*" pour la période 2001-2010. Ce programme est inspiré du Cinquième programme d'action pour l'environnement et de la décision relative à son réexamen.

Le 6<sup>e</sup> PAE établit les objectifs, les priorités et les échéances ainsi que les axes d'approche stratégique pour l'utilisation de différents types de mesures et d'instruments. Le but est d'influencer de manière adéquate tant la prise de décisions dans la politique et par les entreprises que celle des citoyens afin que les parties concernées et le grand public soient davantage engagés dans la sauvegarde de l'environnement. **Il définit quatre domaines d'action prioritaires** pour l'environnement :

- les changements climatiques
- la nature et la diversité biologique
- l'environnement, la santé et la qualité de vie
- les ressources naturelles et les déchets

Par rapport au programme qui le précède, il se base davantage sur des données qui proviennent d'analyses scientifiques, économiques ainsi que sur des indicateurs environnementaux, tout en encourageant la Commission européenne à travailler en étroite collaboration avec l'AEE.

En ce qui concerne les objectifs (article 7 du dit programme) en matière d'environnement, de santé et de qualité de la vie, **son but primordial est d'atteindre une qualité de l'environnement qui ne porte pas atteinte à la santé humaine**, en tenant compte des orientations de l'OMS. Son but est **aussi d'assurer l'application des normes sur la qualité de l'air et de définir une stratégie pour lutter contre la pollution atmosphérique**. Selon le même article l'élaboration et la mise en oeuvre des mesures prévues pour les secteurs des transports, de l'industrie et de l'énergie doivent être non seulement compatibles avec l'amélioration de la qualité de l'air mais aussi contribuer à celle-ci.

---

<sup>79</sup> Décision 1600/2002/CE du Parlement européen et du Conseil, du 22 juillet 2002, établissant le sixième programme d'action communautaire pour l'environnement. JO L 242 du 10.09.2002 p. 1-15.

Le 6<sup>e</sup> PAE prévoit l'adoption de sept stratégies thématiques portant sur différents sujets<sup>80</sup>, parmi lesquelles se trouve une stratégie dédiée à la pollution atmosphérique (STPA). De façon générale, elles seront basées sur une approche globale par thème, plutôt que sur des polluants ou sur des types d'activité économique comme par le passé. Elles viseront à simplifier la législation existante et fixeront des objectifs à long terme, fondés sur l'évaluation des problèmes environnementaux, des objectifs de croissance et d'emplois.

#### **4.2.2.2. Le programme "Air pur pour l'Europe"**

Trois mois après la présentation du 6<sup>e</sup> PAE, *le 4 mai 2001*, le programme "**Air pur pour l'Europe : Vers une stratégie thématique de la qualité de l'air**" (programme CAFE en anglais) a été lancé (*COM(2001)245 finale*) et c'est lui qui a posé les bases de la Stratégie Thématique sur la Pollution Atmosphérique (STPA) annoncée dans le Sixième Programme. **CAFE est un programme de soutien de la STPA dans le développement des plans d'action et d'analyse technique.** Fondé sur le *principe de précaution*<sup>81</sup>, il vise à la protection de la santé humaine et de l'environnement face aux effets de la pollution atmosphérique. Le programme tient compte tant des données scientifiques et techniques qui sont disponibles, que des bénéfices et des charges qui résultent d'une action ou de son absence.

Il se présente avec cinq **objectifs** fondamentaux, comme suit :

- √ **Produire, recueillir et valider des informations scientifiques** relatives aux effets de la pollution de l'air (y compris la validation d'inventaires d'émissions, d'évaluations de la qualité de l'air, des projections concernant les émissions et la qualité de l'air, des études coût-efficacité et des modèles d'évaluation intégrée). Ces informations visent à la définition et à l'actualisation des objectifs et des indicateurs en matière de qualité de l'air et en matière de retombées et à la détermination des mesures nécessaires pour réduire les émissions polluantes
- √ **Contribuer à l'application et au contrôle de l'efficacité de la législation actuelle** (notamment les directives filles sur la qualité de l'air, la décision sur l'échange d'informations et les PEN fixés). La finalité de ces contrôles est de contribuer au réexamen des protocoles internationaux et d'élaborer de nouvelles propositions si nécessaire
- √ Faire en sorte que **les mesures nécessaires soient prises au niveau approprié** et établir des liens avec les stratégies sectorielles spécifiques à chaque source
- √ **Définir une stratégie intégrée** (au plus tard en 2004) qui définisse des objectifs concrets et des mesures rentables pour les atteindre. Les objectifs de la première phase du programme sont : les particules, l'ozone troposphérique (deux problèmes mis en évidence et à traiter comme prioritaires, selon les résultats du programme Auto-Oil II<sup>82</sup>), l'acidification, l'eutrophisation et les dégâts du patrimoine culturel
- √ **Diffuser** au grand public **les informations** (techniques et politiques) **découlant du programme**

D'autres aspects importants qui constituent le programme CAFE visent à établir des stratégies de coopération par rapport à tout ce qui est déjà en place. Ces stratégies de coopération portent sur quatre thèmes principaux:

---

<sup>80</sup> Les stratégies portent sur : la pollution atmosphérique, le milieu marin, l'utilisation durable des ressources, la prévention des déchets et le recyclage, l'utilisation durable des pesticides, la protection des sols et l'environnement urbain.

<sup>81</sup> Selon la Commission, le principe de précaution est d'application dans les cas où les données scientifiques sont insuffisantes, peu concluantes ou incertaines et dans les cas où une évaluation scientifique préliminaire montre qu'on peut raisonnablement craindre des effets potentiellement dangereux pour l'environnement et la santé humaine, animale ou végétale.

<sup>82</sup> Communication de la Commission "Bilan du programme Auto-Oil II" COM(2000)626 du 5 octobre 2000.

- **Établir des liens étroits avec les programmes d'intégration sectorielle** (stratégies sectorielles) **et promouvoir l'intégration de la science à la politique** (à travers des liens avec les programmes-cadre de recherche et développement technologique de l'Union européenne). La contribution scientifique est essentielle pour la réalisation du programme. C'est pourquoi le projet de création de l'Espace européen de la recherche (EER)<sup>83</sup> est considéré comme l'événement majeur auquel CAFE doit être associé, par l'aide à la prise de décision et les références scientifiques qu'il peut offrir.
- La diffusion régulière d'informations sur le site de la Commission concernant les politiques communautaires. Elle est considérée comme essentielle pour mieux les faire accepter par le grand public. **Les parties intéressées peuvent ainsi fournir des informations et formuler des commentaires tout au long du programme.**
- **Une coopération étroite avec les organisations internationales.** Elle est instaurée avec la Convention sur la Pollution Atmosphérique Transfrontalière à Longue Distance de la Commission Économique pour l'Europe des Nations-unies (CEENU), ainsi qu'avec l'OMS.
- **Les pays candidats sont invités à participer** au programme.

La structure organisationnelle du programme est dirigée par le *Groupe CAFE* de la Direction Générale Environnement. Il est assisté par un *groupe inter-service* composé par tous les services relevant de la Commission européenne. Un *groupe de direction* ("steering group") composé par des représentants des Etats membres du Parlement européen, des *parties concernées* ("stakeholders") et des organisations internationales, se réunit deux à trois fois par an afin de conseiller la Commission sur la direction stratégique que devrait adopter le programme. Des *groupes de travail*<sup>84</sup> sur un sujet spécifique sont aussi établis pour une durée limitée. Cette structure assure que les politiques sont développées sur une base scientifique et que les parties concernées sont impliquées à tous les niveaux de l'élaboration de celle-ci.

Il est important de mentionner l'existence d'un groupe précédent en matière de PM, qui a été créé suite aux préoccupations pour les implications sur la santé et sur l'environnement spécifique de ce polluant. En 2004, le groupe a élaboré un *deuxième rapport*<sup>85</sup> **sur les PM**. A travers lui, le *groupe de travail en PM* a assisté la Commission européenne dans la révision<sup>86</sup> de la première directive fille (1999/30/CE). En considérant tant les contributions dues au transport transfrontalier des PM que les sources locales, le groupe a collecté de l'information sur des études prédictives et sur la possibilité d'atteindre les valeurs limites fixées pour les PM<sub>10</sub>. Il a ainsi fait la révision du rapport sur les PM publié en 1997<sup>87</sup> qui avait permis d'élaborer cette directive. Il a contribué au développement de la STPA en considérant le travail de l'OMS concernant les effets des particules atmosphériques sur la santé, ce qui a permis de formuler des recommandations sur des objectifs pour une évaluation intégrale des PM.

#### **4.2.3. La Stratégie Thématique sur la Pollution Atmosphérique**

A travers la communication *COM(2005)446 finale de la Commission du 21 septembre 2005*, l'Union européenne présente sa *Stratégie thématique sur la pollution atmosphérique* après un long processus de consultation qui a impliqué le Parlement européen, des organisations non gouvernementales, l'industrie et les citoyens. Elle est la première des sept stratégies thématiques prévues par le 6<sup>e</sup> PAE et constitue le résultat des recherches réalisées dans le cadre du Programme CAFE et des programmes-

<sup>83</sup> COM(2000)6 finale, 18.01.2000.

<sup>84</sup> A l'heure actuelle, trois groupes sont constitués : le groupe de travail sur les plafonds d'émissions nationaux (PEN) et les instruments législatifs, le groupe de travail d'exécution et le groupe d'échange de données.

<sup>85</sup> Second Position Paper on Particulate Matter, 20.12.2004.

<sup>86</sup> COM(2004)845 finale, 4.1.2005.

<sup>87</sup> [http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/pp\\_pm.pdf](http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/pp_pm.pdf)

cadres de recherche. Elle vise la simplification de la législation sur la qualité de l'air. Cette amélioration s'est concrétisée dans une **proposition de directive** qui l'accompagne (cf. point 4.2.4).

La STPA propose une amélioration de la législation communautaire actuelle et **l'intégration des préoccupations pour la qualité de l'air dans les autres politiques et les secteurs liés** à celle-ci, notamment le transport, l'agriculture et l'industrie.

- En ce qui concerne le **domaine des transports**, elle prévoit de nouvelles propositions qui visent à la réduction des émissions provenant des moteurs à essence et des moteurs diesel des voitures et des camionnettes neuves (*norme Euro 5*, actuellement en cours de discussion et qui requiert l'utilisation d'un filtre à particules) ainsi que des poids lourds. Elle envisage aussi des mesures concernant l'amélioration des *procédures de réception des véhicules*<sup>88</sup>, concernant la possibilité d'introduire des mesures de tarification différenciée dans les zones écologiquement sensibles et, finalement, d'autres mesures relatives aux véhicules anciens. La Commission s'engage à étudier la meilleure manière d'aider ses Etats membres à établir et mettre en oeuvre des plans de transport urbain durable. Elle envisage aussi la réduction de l'impact sur les changements climatiques du transport aérien par l'utilisation de certains instruments économiques et des mesures en vue de renforcer les normes sur les émissions en matière maritime.
- Par rapport au **secteur agricole**, la stratégie invite principalement à promouvoir les mesures portant sur la réduction de l'utilisation de l'azote tant dans l'alimentation du bétail que dans les cultures (engrais azoté).
- Dans le **domaine de l'industrie**, la principale nouveauté est l'inclusion des petites installations de combustion (capacité inférieure à 50 MWh) dans les plans de réduction de la pollution atmosphérique. Certains programmes visent aussi à harmoniser les normes d'appareils à combustion domestique (les petites installations de chauffage). La stratégie prévoit également d'examiner comment réduire les émissions de COV dans les stations-services.

*Il est à noter l'importance de la considération conjointe de ces trois secteurs dans la réduction des émissions polluantes, notamment par rapport aux particules atmosphériques. Pour rappel, ces poussières peuvent être émises par certaines activités humaines (particules primaires), mais elles se forment aussi dans l'atmosphère (particules secondaires) à partir de divers gaz, tels que le SO<sub>2</sub>, les NOx, les COV et le NH<sub>3</sub>. Ainsi, la STPA planifie son action en agissant sur ses différents précurseurs.*

La STPA met ainsi l'accent sur les polluants les plus nocifs car ils représentent un problème tant local que transfrontalier. De la même manière et en renforçant le cadre législatif de lutte contre la pollution de l'air, elle fixe des objectifs de réduction des émissions de ces polluants à l'horizon 2020, qui seront réalisés en plusieurs étapes et permettront de protéger la population européenne et les écosystèmes.

Dans le processus d'élaboration de la STPA, plusieurs analyses ont été réalisées. En vue d'établir ses **objectifs en matière de santé et d'environnement**, divers scénarii (A, B, C et des combinaisons) ont été étudiés dans le cadre de l'*évaluation d'impacts*<sup>89</sup>, en allant de l'absence d'action supplémentaire à l'application de toutes les mesures techniquement faisables. Cette analyse contient une *évaluation d'impacts sanitaires* de l'exposition aux particules atmosphériques et à l'ozone. Celle-ci est calculée pour l'an 2000 et 2020 sous la législation actuelle. Pour rappel, pour l'an 2000, elle révèle l'occurrence de 370.000 décès prématurés causés par l'ozone et par les particules chaque année dans les pays de l'UE-25. De ce total, 348.000 décès sont attribués à l'exposition aux particules (Watkiss et al., 2005).

---

<sup>88</sup> La réception implique la procédure par laquelle les constructeurs doivent délivrer un certificat de conformité pour chaque véhicule construit assurant qu'il est conforme au type réceptionné.

<sup>89</sup> SEC(2005)1133, 21.09.2005 Commission Staff Working Paper, Impact Assessment of the Thematic Strategy on Air Pollution and the Directive on "Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe".

Par ailleurs, selon les analyses effectuées dans le cadre du programme CAFE, même si toutes les mesures techniques étaient mises en oeuvre, il ne serait toujours pas possible de parvenir aux objectifs ambitieux du 6<sup>e</sup> PAE, à savoir: "atteindre des niveaux de qualité de l'air exempts d'incidences négatives et de risques notables en termes de santé humaine et d'environnement". En effet, il n'a pas été possible jusqu'à aujourd'hui de déterminer un niveau d'exposition aux particules et à l'ozone qui ne présente aucun danger pour la santé. Ainsi, un choix politique<sup>90</sup> a dû être négocié par rapport au niveau de protection en tenant compte des avantages et des coûts associés.

Des objectifs en matière de santé publique et d'environnement, ainsi que de réduction des émissions pour les principaux polluants, ont été fixés. Pour la santé, ces polluants sont les particules (surtout les PM<sub>2,5</sub>) et l'ozone troposphérique, qui peuvent causer au minimum des troubles respiratoires, au pire des décès prématurés. La dégradation des écosystèmes est fortement conditionnée par le SO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub>, le NH<sub>3</sub>, les COV et l'ozone troposphérique<sup>91</sup> qui interviennent dans des processus tels que les pluies acides et l'eutrophisation. **Ces objectifs seront réalisés par étapes jusqu'en 2020 et permettront de protéger la population contre l'exposition aux particules et à l'ozone troposphérique, et de mieux protéger les écosystèmes contre l'excès d'azote et d'ozone et contre les pluies acides (Tableau 4.d)**

**Tableau 4.d : Objectifs de la Stratégie**

Ambition level	Cost of reduction (€bn)	Human health			Natural environment				
		Life Years Lost due to PM <sub>2,5</sub> (million)	Premature deaths due to PM <sub>2,5</sub> and ozone (thousands)	Range in monetised health benefits <sup>10</sup> (€bn)	Ecosystem area exceeded acidification (000 km <sup>2</sup> )			Ecosystem area exceeded eutrophication (000 km <sup>2</sup> )	Forest area exceeded ozone (000 km <sup>2</sup> )
					Forests	Semi-natural	Fresh-water		
2000		3.62	370	-	243	24	31	733	827
<b>Strategy</b>	<b>7.1</b>	<b>1.91</b>	<b>230</b>	<b>42 – 135</b>	<b>63</b>	<b>3</b>	<b>19</b>	<b>416</b>	<b>699</b>

source : CE, SEC(2005)1133

La réalisation des objectifs choisis permettra de parvenir à une réduction de :

- ✓ 47% de la perte d'espérance de vie par l'exposition aux particules
- ✓ 10% des cas de mortalité dus à l'ozone
- ✓ 43% des zones où les écosystèmes sont soumis à l'eutrophisation
- ✓ 74% des excès de dépositions acides dans les zones forestières et 39% dans les surfaces d'eau douce

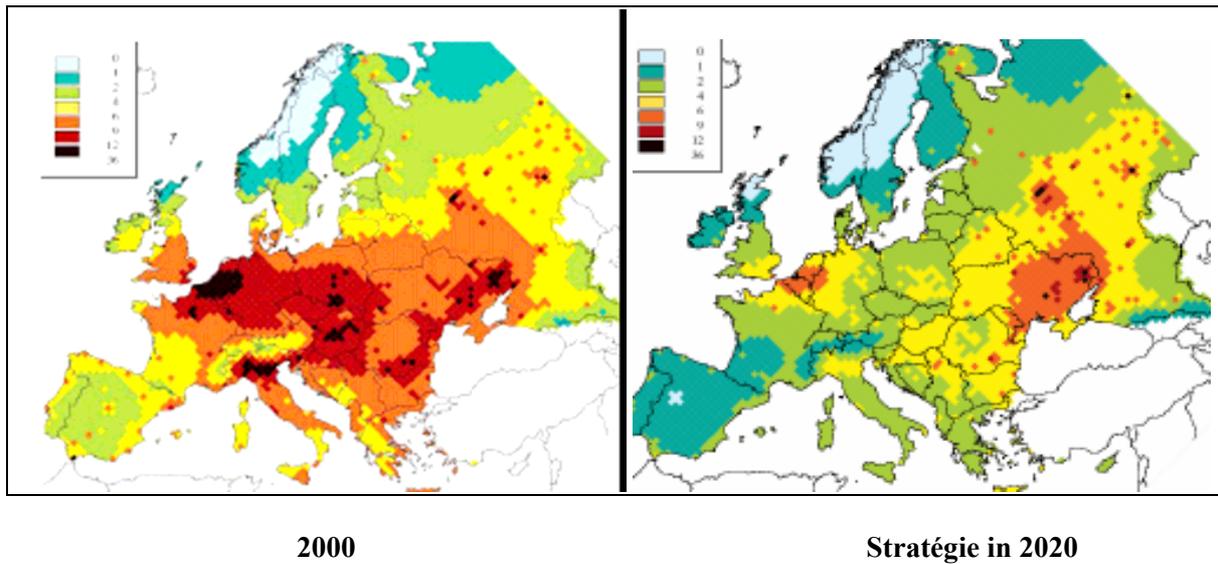
Ainsi, la réalisation des objectifs suppose une réduction de 59% des émissions pour les PM<sub>2,5</sub> primaires ainsi qu'une réduction de ses différents précurseurs par rapport aux niveaux de 2000 (de 82% pour le SO<sub>2</sub>, de 60% pour le NO<sub>x</sub>, de 51% pour les COV et de 27% pour le NH<sub>3</sub>).

En termes de réduction de l'espérance de vie attribuable aux PM<sub>2,5</sub>, on peut observer les bénéfices projetés par la Stratégie en 2020 dans la **Figure 4.4**.

<sup>90</sup> Le choix opéré a été un niveau intermédiaire entre les scénarii A (absence d'action supplémentaire) et B. Il convient de noter que tous les scénarii étudiés produisent des bénéfices qui sont de loin supérieurs aux coûts!!!

<sup>91</sup> La formation de certaines espèces chimiques qui dans une autre couche atmosphérique sont bénéfiques, peut, dans cette couche, être à l'origine des effets nocifs sur la santé. C'est le cas de l'ozone.

**Figure 4.4 : Modification de la réduction de l'espérance de vie (en mois) en 2020 dans l'UE**

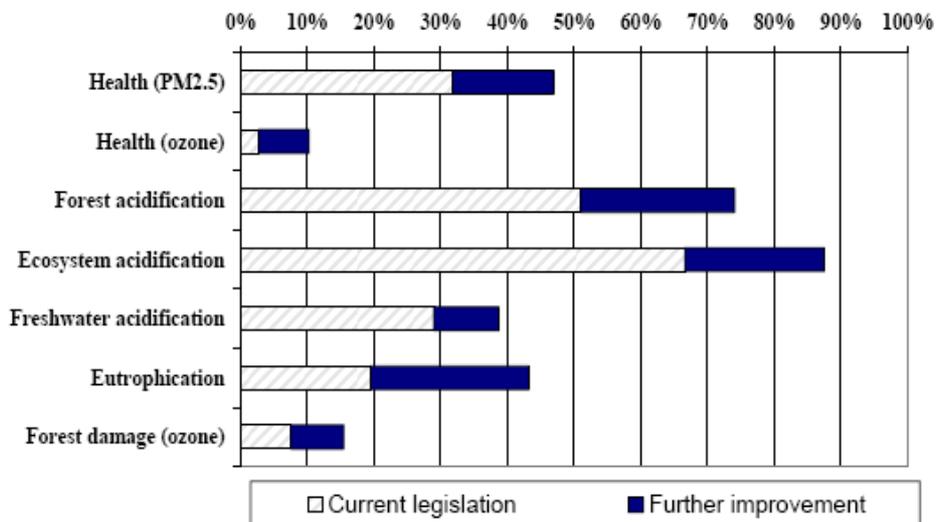


source : IIASA- RAINS, 2005 (les calculs ont été faits sur base des conditions météorologiques de 1997)

Selon les estimations effectuées, **dans le seul secteur de la santé, les économies réalisées** sont évaluées à 42 milliards d'euros par an. Elles **se traduiront** entre autres **par la réduction du nombre de décès prématurés** (qui devrait diminuer de 370.000 en 2000 à 230.000 en 2020, contre 293.000 en l'absence de cette stratégie), **la réduction du nombre d'hospitalisations et la diminution des maladies**. Les décès prématurés imputables aux particules seraient ainsi réduits de 63.000 par an par rapport à un scénario de statu quo. Selon la stratégie, les groupes à revenus modestes devraient davantage en bénéficier car ils sont généralement plus exposés à des niveaux de pollution atmosphérique plus élevés (proximité des grands axes, type d'habitat). Les coûts totaux de la stratégie ont été estimés à 7,1 milliards d'euros par an (soit environ 0,05% du PIB de l'UE-25 en 2020).

La **Figure 4.5** montre les améliorations qui seraient apportées par la Stratégie tant en termes de santé que d'environnement par rapport à l'année 2000.

**Figure 4.5 : Amélioration des indicateurs de santé et d'environnement (par rapport à 2000) en suivant la STPA**



source : CE, SEC(2005)1132

En ce qui concerne l'environnement, bien qu'il n'existe pas de méthodologie reconnue pour évaluer la dégradation des écosystèmes en termes monétaires, on estime que la réduction de la pollution atmosphérique aura des répercussions positives quant à la diminution de cette dégradation par l'acidification, l'eutrophisation et l'ozone, ce qui permettra aux écosystèmes de se rétablir plus rapidement. Par ailleurs, les dommages causés aux cultures seront, selon les calculs, réduits de 0,3 milliards d'euros. Cette réduction de la pollution devrait aussi réduire la détérioration tant des bâtiments que des matériaux exposés.

#### **4.2.4. La Proposition de directive concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe : commencer à réglementer les PM<sub>2,5</sub>**

La *proposition de directive* présentée par la Commission le **21 septembre 2005 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe** est énoncée par la communication **COM(2005)447**. Cette directive, toujours en cours de discussion, est une des mesures clé de la Stratégie thématique sur la pollution atmosphérique. Dans son chapitre III, elle établit des objectifs pour améliorer la santé et la qualité de l'environnement jusqu'en 2020. **Elle a pour but de simplifier, de clarifier et de réduire le volume de la législation existante en matière de qualité de l'air** en fusionnant dans un seul acte plusieurs instruments : la Directive-cadre de 1996, les première, deuxième et troisième Directives-filles ainsi que la Décision sur l'échange d'informations sur le contrôle de la qualité de l'air.

La proposition **prévoit l'introduction de nouvelles normes de qualité pour les particules fines** et une révision de la Directive concernant les plafonds d'émission nationaux. De manière générale, l'approche présentée vise à la réduction de la pollution urbaine de fond<sup>92</sup>, ce qui représenterait un bénéfice pour une bonne partie de la population.

Moyennant la révision des dispositions en vigueur actuellement, en vue d'assimiler les derniers progrès en matière de science et de santé ainsi que l'expérience acquise par les Etats membres, la proposition renforce les exigences de planification en vigueur. Comme le fait la directive du 1999, la proposition oblige les Etats membres à réaliser des plans et des programmes pour les zones ou agglomérations dans lesquelles les concentrations de polluants dans l'air ambiant dépassent les normes de qualité de l'air. La nature transfrontalière des particules et de l'ozone peut demander une coordination entre Etats voisins pour la conception et la mise en oeuvre de ces plans et programmes ainsi que pour l'information du public. Par contre, **la proposition simplifie les exigences relatives à la présentation des rapports** par les Etats membres pour la mise en place d'une base électronique de données dans le cadre de l'infrastructure INSPIRE<sup>93</sup>. Ce système de partage d'informations facilitera d'ailleurs l'accès à l'information par le public en général.

Mis à part l'introduction du système d'information et de communication électronique, un autre changement à souligner dans la proposition est la nouvelle approche envisagée dans le domaine des particules atmosphériques. Elle prévoit des mesures relatives aux PM<sub>2,5</sub> dans l'air ambiant par l'établissement d'un **plafond de concentration**<sup>94</sup> **absolu** destiné à "prévenir les risques exagérément élevés pour la population" et à "assurer un degré minimum de protection de la santé en tous lieux". Pourtant, ce plafond proposé à **25 µg/m<sup>3</sup> (à atteindre au plus tard en 2015**<sup>95</sup>) ne représenterait, en

---

<sup>92</sup> Fond urbain : correspond à des lieux situés dans des régions urbaines où les niveaux sont représentatifs de l'exposition de la population urbaine en général.

<sup>93</sup> COM(2004) 516 final. Proposition de Directive du Parlement européen et du Conseil établissant une infrastructure d'information spatiale dans la Communauté (INSPIRE).

<sup>94</sup> Plafond de concentration : un niveau fixé sur la base des connaissances scientifiques, dans le but de prévenir les risques exagérément élevés pour la santé humaine, à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser une fois atteint.

<sup>95</sup> Un nouveau communiqué de presse annonce que la date à respecter sera 2015 en lieu de 2010 comme cela était prévu à l'origine. Référence IP/06/1447. 23.10.2006.

principe, une charge que dans les régions les plus polluées. D'ailleurs, ce plafond est beaucoup plus élevé que celui proposé par le Groupe de Travail du programme CAFE (12-20 µg/m<sup>3</sup>) (CAFE Working Group on PM, 2004). Pour cette raison, diverses organisations ont réagi en demandant la réduction du plafond<sup>96</sup>.

Parallèlement, la proposition prévoit d'introduire un **objectif non contraignant de réduction de l'exposition**<sup>97</sup> aux PM<sub>2,5</sub> de **20% à atteindre d'ici 2020** pour chaque Etat membre, sauf si leurs concentrations sont en moyenne inférieures à 7 µg/m<sup>3</sup>. Cela sur base des données des réseaux de mesure, tout en laissant aux autorités compétentes des Etats membres le soin de décider les moyens de s'y conformer (**Tableau 4.e**). Même si cet objectif de réduction refléterait de manière adéquate l'évidence scientifique disponible sur les PM<sub>2,5</sub>, le terme "non contraignant" a suscité des polémiques.

La préoccupation principale concernant les mesures proposées repose sur la possibilité que les Etats membres ne soient pas incités à prendre des mesures de réduction de l'exposition aux PM<sub>2,5</sub>. Ceci, du fait que les niveaux de concentration dans les Etats sont en majorité au-dessous de 25 µg/m<sup>3</sup>.

**Tableau 4.e : Plafond de concentration**

Période de calcul de la moyenne	Plafond de concentration	Marge de dépassement	Date à laquelle le plafond de concentration doit être respecté
Année civile	25 µg/m <sup>3</sup>	20% à l'entrée en vigueur de la présente directive, réduction le 1 <sup>er</sup> janvier suivant puis tous les 12 mois d'un pourcentage annuel identique de manière à atteindre 0% pour le 1 <sup>er</sup> janvier 2010	1 <sup>er</sup> janvier 2010 (*)

(\*) a été modifiée à 2015

source : CE, COM(2005) 447 final

Il faut noter qu'en matière de gestion de la qualité de l'air, **il n'est pas proposé de modifier les valeurs limites existantes considérées par les directives-filles** de la directive-cadre de 1996 (pour les PM<sub>10</sub> et pour les autres polluants), ni de mesurer les émissions des polluants atmosphériques produits par les sources naturelles car il est difficile de les contrôler (elles seront déduites lors de l'évaluation du respect des valeurs limites).

Par ailleurs, pour les zones dans lesquelles le respect des valeurs limites n'a pas été possible, si les Etats membres démontrent qu'ils avaient pris toutes les mesures raisonnables, ils pourront être autorisés à reporter la date fixée pour accomplir ces objectifs.

La proposition prévoit aussi que des **plans d'action à court terme** doivent être mis en œuvre dans le cas de risque de dépassement des valeurs limites, des valeurs plafond, des valeurs cibles et des seuils d'alerte, pour différents polluants parmi lesquels se trouvent tant les PM<sub>10</sub> que les PM<sub>2,5</sub>. Ainsi, si nécessaire, la suspension temporaire des activités, y compris la circulation de véhicules, est envisageable.

Selon la Commission, la proposition n'a pas d'incidence sur le budget communautaire à part des besoins de recherche qui lui sont liés. Ceux-ci seront pris en charge par les États membres, avec une

<sup>96</sup> "Le Bureau Européen de l'Environnement", "The Swedish NGO Secretariat on Acide Rain", "La Fédération Européenne pour le Transport et l'Environnement" et "The Institute for Risk Assessment Sciences" de l'Université d'Utrecht - Pays Bas, entre autres.

<sup>97</sup> "L'objectif de réduction de l'exposition" est un pourcentage de réduction de l'indicateur d'exposition moyenne (un indicateur représentatif de l'exposition de la population), fixé dans le but de réduire les effets nocifs sur la santé humaine, à atteindre dans la mesure du possible sur une période donnée. Cette réduction de l'exposition est de zéro lorsque l'indicateur de l'exposition moyenne est inférieur ou égal à 7 µg/m<sup>3</sup>.

contribution de l'UE. Cette contribution serait couverte par le budget déjà attribué dans le 7<sup>e</sup> Programme-cadre de recherche (2007-2013).

Finalement, il est important de remarquer que **la Commission examinera dans les cinq ans suivant l'adoption de la présente directive, les dispositions prévues pour les PM<sub>2,5</sub>**. Notamment, elle proposera une approche détaillée afin d'établir des obligations juridiquement contraignantes de réduction de l'exposition. Ces obligations prendront compte des conditions potentielles de réduction des PM<sub>2,5</sub> dans chacun des Etats membres.

#### **4.2.5. Directives sectorielles : le cas des transports**

*Lutter contre la pollution atmosphérique suppose la combinaison de mesures nationales et internationales recouvrant les différents secteurs qui produisent des émissions polluantes (le transport, l'industrie, l'agriculture et le secteur domestique). L'objectif est clair : pouvoir parvenir à une réduction effective de ces émissions.*

*Nous traiterons, dans cette section, des régulations qui visent à la réduction des émissions du secteur de transports routiers et, en particulier, celles destinées à réduire la pollution par les PM issues des voitures. Le choix de ce secteur, et plus spécifiquement des voitures particulières et de véhicules utilitaires légers plutôt que des véhicules lourds, repose sur la contribution importante que ce secteur représente aux émissions primaires de PM<sub>2,5</sub> (la fraction la plus nocive des PM) mais surtout, il repose sur la généralisation de l'exposition humaine aux polluants de ce type de véhicules.*

##### **4.2.5.1. Les normes Euro**

Etant donné que **l'augmentation du volume de transport constitue une menace pour une qualité de l'air adéquat**, la législation européenne s'est centrée, depuis fin 1970, sur le contrôle des émissions de sources mobiles. Les normes d'émissions (gaz d'échappement) tant pour les moteurs à essence que pour les moteurs diesel des voitures particulières et des véhicules utilitaires légers (max. 3,5 tonnes), sont toujours réglementées par la **Directive 70/220/CEE**<sup>98</sup>.

Les voitures particulières conçues pour transporter plus de six personnes ou dont la masse maximale est supérieure à 2.500 kilogrammes et les véhicules tout-terrain, ont été soumis postérieurement par la Directive 93/59/CEE<sup>99</sup> et par la Directive 96/69/CE<sup>100</sup> à des normes aussi sévères que celles applicables aux voitures particulières, compte tenu des conditions spécifiques de ces véhicules.

Par ailleurs, les poids lourds et les autobus sont soumis à la **Directive 88/77/CEE** qui fixe leurs valeurs limites d'émission des différents polluants, entre autres des particules.

La Directive de 1970 prévoit la mesure des émissions des particules moyennant des filtres. Ces derniers sont pesés afin de déterminer la masse de particules émise en termes de kilomètres parcourus. Cette directive a bien évidemment été adaptée à de nombreuses reprises depuis lors en vue d'actualiser tant les méthodes de mesure que les valeurs limites. Certaines directives qui l'ont modifiée sont importantes à citer car elles ont servi de base aux **normes européennes Euro**. La norme **Euro 1** a été basée sur la **Directive 91/441/CEE**<sup>101</sup>, la norme **Euro 2** sur la **Directive 94/12/CE**<sup>102</sup>, et les normes **Euro 3 et Euro**

<sup>98</sup> JO L 81 du 11.4.1970, p. 15–15.

<sup>99</sup> Directive 93/59/CEE du Conseil du 28 juin 1993 modifiant la directive 70/220/CEE concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux mesures à prendre contre la pollution de l'air par les émissions des véhicules à moteur. JO L 284 19.11.1993 p. 25.

<sup>100</sup> Directive 96/69/CE du parlement européen et du Conseil du 8 octobre 1996 modifiant la directive 70/220/CEE concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux mesures à prendre contre la pollution de l'air par les émissions des véhicules à moteur. JO L 282 01.11.1996 p. 64.

<sup>101</sup> Directive 91/441/CEE du Conseil, du 26 juin 1991, modifiant la directive 70/220/CEE concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux mesures à prendre contre la pollution de l'air par les émissions des véhicules à moteur. JO L 242 du 30.8.1991, p. 1.

<sup>102</sup> Directive 94/12/CE du Parlement européen et du Conseil, du 23 mars 1994, relative aux mesures à prendre contre la pollution de l'air par les émissions des véhicules à moteur et modifiant la directive 70/220/CEE. JO L 100 19.04.1994 p. 42.

4, sur la **Directive 98/69/CE**<sup>103</sup>. Ces directives précisent tant les valeurs limites d'émissions des différents composants que les méthodes d'essais.

Dès 1993, ces normes ont contribué à réduire considérablement la pollution de l'air par les voitures, en obligeant par exemple les constructeurs automobiles à équiper les pots d'échappement de filtres catalytiques. **Par rapport aux émissions des moteurs diesel, ces normes ont pour objectif la réduction des matières particulaires (PM), des oxydes d'azote (NOx) et du monoxyde de carbone (CO).** Les valeurs limites d'émission pour les voitures à moteur diesel sont présentées dans le **Tableau 4.f**.

**Tableau 4.f : Normes en place depuis 1996 pour les véhicules équipés d'un moteur diesel**

		Valeurs limites d'émission (mg/km)			
		Euro 2 (1996)	Euro 3 (2000)	Euro 4 (2004)	Euro 5 (*) (2010)
Polluants	PM	80-100	50	25	5
	NOx	-	500	250	200
	CO	700-900	560	300	-

\* Les valeurs mentionnées ci-dessus correspondent à la proposition de la Commission du 21 décembre 2005

**Le niveau d'émission dit Euro 4 est depuis 2004 d'application de manière obligatoire.** Les émissions ainsi réglementées s'élèvent à moins d'un dixième de celles des voitures datant du début des années 1990. Ces dernières correspondent aux voitures dites "Euro 0", c'est-à-dire les voitures en vente sur le marché avant l'apparition dans l'UE de la norme Euro 1.

Il est à noter que, tout comme les valeurs limites des normes de qualité de l'air, les valeurs limites d'émission sont également établies en termes de concentration en masse des particules en non en termes de concentration en nombre. Pour rappel, les particules ultrafines et les nanoparticules, ne représentent qu'une proportion très faible de la masse totale des particules (cf. Chapitre 2, point 2.1.1). En conséquence, elles sont mal prises en compte dans la législation en vigueur.

Dans le cadre du programme CAFE, une des mesures proposées par la Commission a été de renforcer les normes d'émissions pour les voitures et les véhicules utilitaires légers moyennant la révision de la norme actuellement d'application. Cela se concrétisera par l'instauration d'une nouvelle norme. La **norme Euro 5** (en cours de discussion) permettra de diminuer les niveaux des particules émises (notamment des PM<sub>2,5</sub>) et des NOx pour les véhicules à moteur diesel. Ainsi, la limite maximum d'émissions sera abaissée de 80% pour la matière particulaire et de 20% pour le NOx, dans les deux cas par rapport à la norme Euro 4. Pour ce faire, les exigences technologiques impliquent que **toutes les voitures diesel soient équipées d'un filtre à particules**. Les **Figures 4.6 a et 4.6 b** montrent respectivement l'efficacité d'un filtre à particules pour les voitures diesel et l'évolution des normes d'émission pour les PM et les NO<sub>x</sub> depuis 1996 en incluant la norme Euro 5.

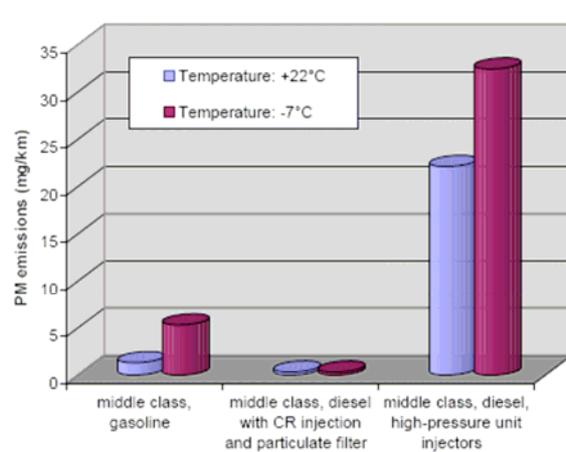
Par ailleurs, parce que la qualité du carburant et surtout la teneur en soufre déterminent en partie les rejets des particules, la **Directive européenne 2003/17/CE**<sup>104</sup> prescrit qu'à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2005, du diesel sans soufre doit être offert dans suffisamment de stations dans tous les Etats membres.

<sup>103</sup> Directive 98/69/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 1998 relative aux mesures à prendre contre la pollution de l'air par les émissions des véhicules à moteur et modifiant la directive 70/220/CEE. JO L 350 du 28.12.1998, p.1

<sup>104</sup> Directive 2003/17/CE du Parlement européen et du Conseil du 3 mars 2003 modifiant la directive 98/70/CE concernant la qualité de l'essence et des carburants diesel, JO L 76 du 22.03.2003, p. 10–19.

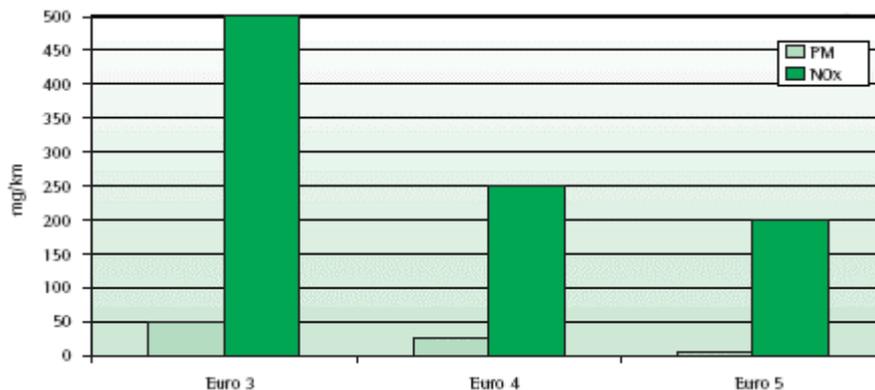
Figure 4.6

a: Emissions de PM d'une voiture à essence et d'une voiture équipée de moteur diesel avec et sans filtre à particules



source : Swedish National Road Administration, 2002

b: Evolution des normes d'émission pour les moteurs diesel



source : Febiac, 2006

Il est à noter que la plupart des marques équipent de manière optionnelle certains de leurs modèles d'un filtre à particules. Mais, les filtres étant une solution onéreuse, certains pays (l'Allemagne, la France, l'Autriche, la Suède et les Pays-Bas) prévoient des mesures fiscales de soutien en faveur de véhicules équipés de ces filtres. **En Belgique, une proposition de déduction fiscale équivalant au coût de l'installation d'un filtre à particules**, que celui-ci soit fourni avec une voiture neuve ou installé par la suite, a été présentée à la Chambre de Représentants en février 2006<sup>105</sup>. Cette proposition, toujours en discussion, encourage aussi l'utilisation du **carburant LPG**, étant donné qu'il ne produit pas de particules fines, ceci en prévoyant une **déduction fiscale pour son équipement**. Ces avantages fiscaux concernent tant les voitures que les camions.

<sup>105</sup> Proposition de Loi modifiant le Code des impôts sur les revenus 1992 en vue de combattre la pollution par les particules fines. Chambre de Représentants de Belgique, 14/02/2006.

Une autre directive importante est la *Directive 88/77/CE*<sup>106</sup>, qui vise les **véhicules lourds équipés d'un moteur diesel**. En 1999, cette directive a été modifiée par la *Directive 1999/96/CE* pour renforcer les exigences d'émission.

Ces directives se chargent de fixer des exigences de limitation en matière d'émission de particules et de fumées, de CO, des NOx et des HC imbrûlés. Les présentes directives s'insèrent dans le contexte de la procédure de réception des véhicules à moteur et de leurs remorques, qui a fait l'objet de la Directive-cadre 70/156/CEE. Ces valeurs limites sont définies pour les trois cycles d'essai du moteur (essai ESC, ELR et ETC) en termes de grammes par kilowatt-heure. Ces cycles reflètent le fonctionnement du moteur dans des conditions spécifiques, comme la conduite sur route.

A partir du gaz d'échappement, les particules sont collectées et mesurées. Les valeurs limites d'émission des PM pour les véhicules lourds équipés d'un moteur diesel sont présentées dans l'Annexe 4. I, ainsi qu'un résumé des valeurs limites d'émission pour tous les véhicules dans l'UE et leurs liens avec les normes Euro.

### **4.3. Conclusion - Résumé**

En ce qui concerne les PM<sub>10</sub>, le niveau de protection adopté par l'UE est tout à fait comparable à celui choisi par la Suisse, le Canada et la Californie. L'UE prévoit cependant une mise en œuvre par étapes. De même, ces valeurs limites orientées sur les effets, correspondent aux valeurs indicatives recommandées par l'OMS.

Par ailleurs, celles établies au niveau national aux Etats-Unis sont moins strictes que celles établies par l'UE. La moyenne annuelle fixée précédemment à 50 µg/m<sup>3</sup> a été révoquée récemment en raison de "connaissances insuffisantes" sur les impacts de ces particules à long terme. La valeur journalière que l'UE fixe à 50 µg/m<sup>3</sup> est beaucoup plus stricte que celle prise en compte aux Etats-Unis (150 µg/m<sup>3</sup>). Le **Tableau 4.g** résume les normes de qualité de l'air pour les PM<sub>10</sub> dans les différents pays étudiés.

En ce qui concerne la fraction fine (PM<sub>2,5</sub>), il n'y a pas de valeur limite établie en Europe. Pourtant, une révision des normes en vigueur propose un plafond annuel situé à 25 µg/m<sup>3</sup> (cf. point 4.2.4).

La valeur annuelle aux Etats-Unis, quant à elle, se situe actuellement à 15 µg/m<sup>3</sup> et celle fixée en Californie se situe à 12 µg/m<sup>3</sup>. Ces valeurs se rapprochent des recommandations faites par l'OMS.

La moyenne journalière fixée au Canada (au niveau fédéral) de même que celle établie aux Etats-Unis, se rapprochent bien de la valeur suggérée par l'OMS. Cette comparaison est présentée dans le **Tableau 4.h**.

---

<sup>106</sup> Directive 88/77/CE du Conseil, du 3 décembre 1987, concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux mesures à prendre contre les émissions de gaz polluants et de particules polluantes provenant des moteurs Diesel destinés à la propulsion des véhicules. JO L 36 du 09.02.1988; modifiée par la directive 1999/96/CE du Parlement et du Conseil, du 13 décembre 1999. JO L 44 du 16.02.2000.

**Tableau 4.g: Valeurs limites d'immission des PM<sub>10</sub> pour l'Europe et l'Amérique du Nord, et celles recommandées par l'OMS**

Pays	Valeurs Limites PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		Dépassements autorisés de la MJ
	MA (moyenne annuelle)	MJ (moyenne journalière)	
<b>Suisse</b>	20	50	La MJ ne peut être dépassée qu' 1 fois
<b>Etats-Unis</b>	(**)	150	---
<b>Californie</b> (NAAQS)	20	50	---
<b>Canada:</b> Terre-Neuve et Colombie-Britannique	---	50	---
<b>Etats membres de l'UE et Norvège</b> (Dir.1990/30/CE)	- Phase 1 : 40 (à partir du 1/1/2005) - Phase 2 (valeur indicative) : 20 (à partir du 1/1/2010)	- Phase 1 : 50 (à partir du 1/1/2005) - Phase 2 (valeur indicative): 50 (à partir du 1/1/2010)	- Phase 1 : max. 35 - Phase 2 : max. 7
<b>OMS (*)</b>	Valeur indicative 20	Valeur indicative 50	La MJ ne peut être dépassée que 3 jours/an

(\*) OMS-Lignes directrices, 2005

(\*\*) établie précédemment à 50 µg/m<sup>3</sup> mais révoqué à partir du 17/12/2006

**Tableau 4.h : Valeurs limites d'immission des PM<sub>2,5</sub> pour l'Amérique du Nord, et celles recommandées par l'OMS**

Pays	Valeurs Limites PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		Dépassements autorisés
	MA (moyenne annuelle)	MJ (moyenne journalière)	
<b>Etats-Unis</b> (NAAQS)	15	35	---
<b>Californie</b>	12	---	---
<b>Canada (NPC)</b> sauf Québec	---	30	---
<b>OMS (*)</b>	Valeur indicative 10	Valeur indicative 25	La MJ ne peut pas être dépassé que 3 jours/an

(\*) OMS-Lignes directrices, 2005

Par l'étude simplifiée de la législation européenne que nous avons faite jusqu'ici, nous pouvons constater l'évolution croissante des préoccupations concernant les effets de la matière particulaire sur la santé publique. Depuis les années 1980, en ce qui concerne les normes de la qualité de l'air, on est passé progressivement du fait de mesurer les fumées noires (par le noircissement des filtres) à la mesure d'une taille spécifique des PM atmosphériques, à savoir les PM<sub>10</sub> (fin des années 1990). On a établi des valeurs limites plus sévères pour ces poussières qui se révélaient dangereuses pour la santé humaine.

Cependant, c'est depuis la fin de l'année 2005 que l'abondance de preuves scientifiques sur les conséquences en terme de santé (mortalité et morbidité) a poussé les autorités européennes à prendre en compte les particules fines (PM<sub>2,5</sub>). Cela se traduit par une proposition de directive visant la qualité de l'air ambiant. On peut remarquer que, même si cette Proposition prévoit l'établissement d'un plafond de concentration absolu pour les PM<sub>2,5</sub>, ceci ne représentera une charge que pour les régions les plus polluées. Par contre, un aspect intéressant à souligner concernant cette proposition est celui des plans d'action à court terme prévus en cas de risque de dépassement des valeurs établies (niveaux limites, plafond, etc.) pour différents polluants parmi lesquels se trouvent tant les PM<sub>10</sub> que les PM<sub>2,5</sub>. Ainsi, si nécessaire, la suspension temporaire des activités, y compris la circulation de véhicules, est envisagée.

Dans le même ordre d'idées, on peut constater une tendance plus stricte par rapport aux normes d'émission des véhicules équipés d'un moteur diesel. Depuis 1970, les émissions les plus nocives sont régulées. Parmi ces polluants se trouve la matière particulaire. Plusieurs directives européennes contrôlent les émissions des véhicules ainsi que la qualité du combustible. En ce qui concerne les voitures particulières et les utilitaires légères, c'est la Directive 98/69/EC qui impose un contrôle sur les émissions. En ce qui concerne les véhicules lourds, il s'agit de la Directive 1999/96/EC. La qualité du combustible, quant à elle, est réglementée par la Directive 98/70/EC (modifiée en 2003). Les différentes normes Euro ont successivement introduit des réductions importantes de ces valeurs limites. La norme Euro 5, qui entrera en vigueur d'ici 2010, permettra, moyennant l'utilisation d'un filtre à particules, de réduire les émissions (en masse et en nombre) des PM<sub>2,5</sub>.

Même si les normes de qualité de l'air et les normes d'émission de matière particulaire se sont montrées de plus en plus sévères, les particules fines et ultrafines sont toujours mal prises en compte par la législation européenne actuellement en vigueur. Les normes fixent les valeurs limites des PM en termes de concentration en masse ; or, ces petites particules (fines et ultrafines) ne représentent qu'une proportion très faible de la masse totale des PM.

Les travaux scientifiques associent de plus en plus ces particules à des effets très nocifs sur la santé (mortalité et morbidité). De plus, elles constituent les principales émissions particulaires des moteurs diesel...

... Serait-il temps d'envisager une révision des normes pour pouvoir tenir compte des particules les plus petites?

## 5. Conclusions

---

Pour rappel, l'objectif principal de ce travail était de faire un état des lieux des connaissances sur la pollution particulaire dans différents domaines.

Les particules totales en suspension (TSP) dans l'atmosphère sont composées de 3 types de grandeurs: les particules ultrafines, le mode d'accumulation et la fraction grossière ( $PM_{2,5-10}$ ). Les particules ultrafines et le mode d'accumulation intègrent la fraction fine ( $PM_{2,5}$ ). Il semble y avoir un consensus scientifique quant à la dénomination de ces deux fractions.

En ce qui concerne les noms attribués aux différentes tailles de particules, notamment celles de la fraction fine, nous constatons qu'il existe dans la littérature un **manque d'harmonisation dans les définitions utilisées**. Le problème est particulièrement marqué quand on parle des particules submicroniques, des particules ultrafines et des nanoparticules. Et, même s'il paraît plus important de s'attarder aux tailles et aux caractéristiques des différentes particules, trouver un consensus qui touche à la dénomination utilisée semble nécessaire afin d'éviter toute confusion.

Par ailleurs, en ce qui concerne les sources de la matière particulaire, même si les particules primaires et secondaires sont toutes les deux issues tant de sources naturelles que de sources anthropiques, nous nous sommes penchés principalement sur ces dernières. Ceci, du fait que les sources anthropiques, par opposition aux sources naturelles, peuvent faire l'objet d'un contrôle humain. Dans cette analyse, nous avons constaté que **les principales sources des particules fines sont notamment les sources anthropiques** (transport, industrie, domestique, agriculture), qui contribuent chacune entre 25 % et 39 % aux émissions particulaires ( $PM_{2,5} + PM_{10}$ ). **Le transport automobile, surtout du fait des moteurs diesel, contribue le plus à la production des particules correspondant à la fraction fine**. A la sortie du pot d'échappement, les particules dégagées par ce type de moteurs correspondent à un mélange de particules fines ( $PM_{2,5}$ ), ultrafines ( $PM_{0,1}$ ) et de nanoparticules.

Par ailleurs, du fait que le trafic **est une source généralisée dans les milieux urbains, une partie significative de la population est exposée** (environ 75 % de la population européenne habite dans des zones urbaines). De plus, selon l'OMS (2000a), les nouveaux moteurs diesels produisent un plus grand nombre de particules ultrafines que les anciens. Dans ce contexte, et si on considère que la part du marché européen du diesel s'élevait à 49 % durant le premier semestre 2005, il s'agit d'un fait d'importance puisqu'on attribue à la fraction fine les effets les plus nocifs sur la santé.

Même s'il existe des mécanismes d'élimination des particules de l'air (par les actions de la précipitation et de la sédimentation), les PM peuvent devenir un **problème transfrontalier**. Ici aussi, **c'est la fraction fine qui est à l'origine des problèmes**. En effet, c'est dans cette fraction que l'on retrouve les particules qui ont un temps de résidence dans l'atmosphère particulièrement long, c'est-à-dire de quelques jours à quelques semaines. Ce temps de résidence élevé est à l'origine de leurs déplacements sur des longues distances.

Cela est lié aux problèmes d'acidification et d'eutrophisation en dehors des pays dans lesquels elles ont été produites. Mis à part les émissions des pays voisins, l'ampleur des contributions transfrontalières des PM dans un pays est déterminée non seulement par les conditions météorologiques mais aussi par la localisation géographique du pays en question. Généralement, la contribution d'un pays en "apport" de particules aux aires voisines immédiates est comprise entre 3% à 15%. Par exemple, la Belgique reçoit des apports transfrontaliers de  $PM_{2,5}$  principalement de la France (21%) et de l'Allemagne (15%), suivis par les Pays-Bas (9%) et par le Royaume Uni (8%).

Il faut ici rappeler qu'une difficulté importante réside dans la manière de modéliser le déplacement des particules dans l'air. Une modélisation adéquate serait importante afin d'établir la relation entre les émissions et les concentrations dans l'air ambiant (immissions). Ainsi, un travail important paraît nécessaire dans la mise au point des méthodes de modélisation.

Les effets que la pollution particulaire cause sur la santé et sur l'environnement ne sont pas négligeables. En ce qui concerne la santé, on a pu constater que les risques de mortalité et de morbidité (RRs) associés à la pollution particulaire sont faibles. Les conséquences en terme de santé publique sont néanmoins considérables. Ceci, étant donné que toute la population peut être considérée comme exposée à ce type de pollution.

Des études scientifiques ont démontré que les particules fines (et notamment les particules ultrafines) pénètrent profondément dans les poumons et peuvent s'y déposer. Elles peuvent ainsi exercer leurs effets néfastes tant sur le système respiratoire que sur le système cardio-vasculaire. Des études toxicologiques ont également montré que ces particules peuvent pénétrer dans le sang par translocation à travers le réseau capillaire et se diriger vers des organes vitaux. Mais, en tenant compte des compositions différentes des PM, on peut se demander quels sont les types d'effets causés par les particules dans ces organes et quel est le devenir des composés insolubles dans l'organisme... **Nos connaissances toxicologiques sur les particules, notamment sur celles de la fraction fine, doivent encore être approfondies.** De plus, étant donné le grand nombre d'effets observés, il faut envisager la possibilité de la coexistence de plusieurs mécanismes d'action.

Les principaux impacts sur la santé (résumés par l'OMS) indiquent des effets variant entre de simple irritations du système respiratoire et le cancer du poumon. Ainsi, la matière particulaire représente sans doute un facteur de risque tant de mortalité (risque particulièrement associé à une exposition à long terme à la fraction fine) que de morbidité (risque surtout associé à une exposition à court terme à la fraction grossière).

Sur ce point, d'autres questions peuvent aussi être soulevées : Est-ce qu'on connaît tous les groupes à risque? Quel est l'importance de ces groupes dans la population européenne?

On a déjà identifié les jeunes enfants, les personnes âgées, les personnes fragilisées du point de vue socioéconomique, les personnes avec des maladies préexistantes (cardio-pulmonaires, diabète), les personnes sportives ainsi que celles qui réalisent des activités physiques importantes à l'extérieur. Le groupe qui semble particulièrement touché semble être celui des enfants. Des impacts très importants sur leur santé ont été rapportés: la réduction du développement pulmonaire et du poids à la naissance, et la mortalité des nourrissons due principalement aux problèmes respiratoires. Dans ce contexte et afin de protéger la santé publique, **l'étude des groupes sensibles se révèle fondamentale au moment de l'élaboration des réglementations** adéquates concernant la qualité de l'air.

En ce qui concerne **les études épidémiologiques** sur les effets sur la santé d'une exposition à long terme aux particules, on observe qu'elles **sont peu nombreuses au niveau européen**. Il en est de même pour celles qui concernent l'exposition à court terme à la fraction fine. Enfin, il y a peu d'études épidémiologiques qui ont envisagé les impacts sur la santé selon les sources spécifiques de particules. Même si le trafic (et donc les sources de combustion) semble jouer un rôle particulièrement important, à l'heure actuelle, il n'est pas possible de quantifier précisément les contributions des différents types de sources aux impacts sur la santé.

Mais... quels sont les composants des particules responsables des effets observés? Malgré les différences en terme de toxicité qui ont été détectées dans des conditions de laboratoire, les études réalisées jusqu'à présent ne différencient pas non plus les effets potentiels de leurs composants et les effets directs des particules. Etant donné que cette fraction est la plus dangereuse pour la santé, il est évident que **des nouvelles recherches scientifiques s'avèrent impératives.**

En ce qui concerne l'environnement, **la pollution particulaire affecte les végétaux et les écosystèmes, la visibilité, les matériaux et plus encore, elle contribue au réchauffement global.** Comme on l'a déjà évoqué, les PM sont impliquées dans des phénomènes tels que l'acidification et l'eutrophisation, ceci dans des milieux tant terrestres qu'aquatiques. Ces effets sont principalement attribués à certains de leurs composants, notamment aux sulfates et aux nitrates, qui affectent ainsi les écosystèmes.

Par ailleurs, la visibilité peut être réduite du fait d'une forte charge de particules (notamment des PM<sub>2,5</sub>) dans l'air ambiant. L'humidité joue ici un rôle important car l'absorption des vapeurs d'eau par

les particules est à l'origine de leur augmentation tant en volume qu'en masse. Ce qui modifie les propriétés optiques des PM, et qui a comme résultat la formation d'une brume et la réduction de la visibilité.

Ces propriétés optiques (qui dépendent de la composition des particules) sont déterminées par la capacité de captation et de dispersion des rayonnements solaires. Cette capacité engendre soit un réchauffement, soit un refroidissement. Il est particulièrement important de retenir que **les particules de suie issues des moteurs diesel ont tendance à capter les rayonnements solaires et provoquent ainsi un réchauffement de l'atmosphère.**

Les bâtiments, y compris les sites historiques, sont également endommagés, surtout à cause de l'acidification et du noircissement que les particules entraînent dans l'air ambiant. La détérioration des matériaux est causée notamment par le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), un des gaz précurseurs des PM qui accélère le processus naturel de corrosion. Il accélère également la détérioration des pierres calcaires et des peintures à l'extérieur des bâtiments.

Notons, cependant, que les études européennes concernant les effets des différentes tailles de particules sur l'environnement, et notamment sur les organismes vivants, semblent être inexistantes. Ainsi, approfondir nos connaissances sur base **des études écotoxicologiques s'avère nécessaire afin de pouvoir évaluer l'ampleur réelle des effets de la matière particulaire.**

D'une manière générale, les résultats des recherches scientifiques dans différents domaines montrent donc qu'il faut s'intéresser de plus en plus aux particules de la fraction fine, à savoir les particules ultrafines et les nanoparticules. A l'heure actuelle, aucun **suivi des concentrations des particules ultrafines (PM<sub>0,1</sub>) dans l'air ambiant n'est réalisé systématiquement. Ceci apporterait des données importantes pour étudier leurs effets sur la santé.**

En parlant des normes de qualité de l'air pour les particules atmosphériques (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>), nous constatons que **l'UE dispose bien de normes concernant les PM<sub>10</sub> et ceci depuis 1999. Cependant, les PM<sub>2,5</sub> (les particules les plus préoccupantes en matière de santé) ne sont pas encore réglementées.**

En ce qui concerne les PM<sub>10</sub>, **les valeurs limites** (orientées sur les effets) **correspondent aux valeurs indicatives recommandées par l'OMS** et sont tout à fait comparables à celles choisies par la Suisse, le Canada (Terre-Neuve et Colombie-Britannique) et par la Californie. L'UE prévoit cependant une mise en œuvre par étapes. Les Etats-Unis, quant à eux, disposent de normes moins strictes au niveau des PM<sub>10</sub> (à l'exception de la Californie), mais par contre, elles établissent des valeurs limites pour les PM<sub>2,5</sub>. Des normes pour cette fraction existent également au Canada.

Il est important de remarquer que le Canada compte depuis l'an 2000 des normes pour les particules fines, cependant, à l'inverse que les autres pays étudiés, il n'a pas mis en place de normes pour les PM<sub>10</sub> au niveau national. Elles sont, néanmoins, prises en compte dans deux de ses provinces (celles mentionnées plus haut).

En Europe, c'est depuis la fin de l'année 2005 que l'abondance de preuves scientifiques sur les conséquences en terme de santé a poussé les autorités européennes à prendre en compte les **PM<sub>2,5</sub>** dans les réglementations. **Une proposition de directive** propose, à travers une révision des normes en vigueur, **un plafond annuel situé à 25 µg/m<sup>3</sup> à atteindre en 2015.** Parallèlement, elle introduit un objectif non-contraignant de 20% de réduction de l'exposition aux PM<sub>2,5</sub> à atteindre d'ici 2020.

Pourtant, ce plafond **ne représentera une charge que pour les régions les plus polluées**, car la majorité des régions ont déjà des niveaux de concentration dans l'air ambiant en dessous de 25 µg/m<sup>3</sup>. D'ailleurs, ce plafond est plus élevé que celui proposé par le *groupe de travail en PM* du programme CAFE (12-20 µg/m<sup>3</sup>). Et, même si l'OMS fait des recommandation sur des valeurs moyennes (annuelles et journalières) et non sur des valeurs plafonds, il est pertinent de mentionner que ses *Lignes directrices* indiquent, pour les PM<sub>2,5</sub>, une moyenne annuelle de 10 µg/m<sup>3</sup>.

Mis à part la valeur élevée fixée pour le plafond, la préoccupation principale de diverses organisations concernant les mesures proposées, repose sur la possibilité de que les Etats membres ne soient pas incités à prendre des mesures de réduction de l'exposition.

Par ailleurs, un aspect intéressant à remarquer sont les *plans d'action à court terme* prévus en cas de risque de dépassement des valeurs établies. Si nécessaire, la suspension temporaire des activités, y compris la circulation de véhicules, peut être envisagée. Ceci s'applique tant aux PM<sub>10</sub> et aux PM<sub>2,5</sub> qu'aux autres polluants indiqués dans les annexes VII, XI, XII et XIV de la proposition.

Par ailleurs, en ce qui concerne les **normes d'émission**, notamment celles relatives aux véhicules équipés d'un moteur diesel, on constate une tendance plus stricte. Les émissions les plus nocives, parmi lesquelles les particules, sont régulées depuis 1970. Actuellement, plusieurs directives européennes contrôlent tant les émissions des véhicules que la qualité du combustible.

Depuis 1996, les différentes normes Euro ont introduit des valeurs limites d'émission des PM, de NOx et de CO de plus en plus strictes. **La norme Euro 5 qui entrera en vigueur d'ici 2010 permettra de réduire les émissions des PM<sub>2,5</sub>. Ceci, grâce à l'utilisation d'un filtre à particules** qui permettra l'abaissement de 80% des émissions de particules par rapport à la norme Euro 4, cette dernière étant actuellement en vigueur. Ce qui reste à voir est la traduction de cette norme à la réalité du parc automobile, car on estime qu'à l'heure actuelle, un quart de ce dernier ne se conforme qu'aux normes Euro 0 et Euro 1.

**En résumé**, notons que les préoccupations scientifiques concernant le possible rôle des particules fines dans la diminution de la durée de vie ont commencé vers moitié des années 1990 (aux Etats-Unis). Ceci montre que, malgré les avancées incontestables qui visent à la réduction des émissions particulaires, il semble y avoir, au niveau européen, un certain décalage entre les évidences scientifiques (qui signalent la dangerosité de la fraction fine) d'une part, et la réponse du législateur, d'autre part. Ceci est compréhensible, et même prévisible, parce qu'il s'agit d'initier de nouvelles recherches spécifiques et de recueillir des résultats représentatifs de la population européenne en matière de santé, pour enfin essayer de comprendre la problématique en Europe et d'initier le processus d'élaboration de normes (de qualité de l'air, d'émissions).

Jusqu'à présent, la fraction fine et la fraction grossière ont été régulées conjointement par la législation à travers les valeurs limites des PM<sub>10</sub>. Cependant, ces fractions sont différentes en composition et proviennent de différentes sources. De plus, les fractions fine et grossière n'ont pas une corrélation significative dans l'air, et les effets sur la santé des deux types de grandeur sont aussi différents... Même s'il semble ne pas exister un seuil au-dessous duquel aucun effet n'est observé, l'OMS recommande de réduire l'exposition aux PM (en particulier celle à la fraction fine) afin d'améliorer les conditions de santé des populations. Ainsi, **à ce jour, on constate que les normes, notamment celles existantes en qualité de l'air, se révèlent insuffisantes et qu'il est donc temps d'envisager une révision de ces normes. L'adoption de valeurs moyennes journalières et annuelles adéquates pour les PM<sub>2,5</sub> se montre indispensable à court terme.**

Il semble aussi clair que, comme l'affirme l'OFEFP depuis 1998, **les mesures de réduction de la charge de particules dans l'air ambiant devraient porter sur l'ensemble des tailles** (aussi bien sur les particules grossières que sur les particules fines et les ultrafines) (OFEFP, 1998 cité par OFEFP, 2006). Il est ici opportun de rappeler que tant les normes de qualité de l'air que les normes d'émission fixent les valeurs limites des PM en terme de concentration en masse. Ceci implique que **les particules ultrafines et les nanoparticules sont mal prises en compte par la législation actuellement en vigueur**, car elles ne constituent qu'une proportion très faible de la masse totale des PM. Par contre, elles représentent une proportion très élevée en ce qui concerne le nombre total de particules. Tenir compte de la concentration en nombre des particules serait possible, bien entendu, avec le développement parallèle ou la mise au point (selon le cas) des technologies de mesure adéquates (tant à l'immission qu'à l'émission). Pour ce faire, des recherches technologiques devront se poursuivre.

**Il faudrait donc non seulement réaliser un important travail technique et de recherche** (en incluant la mise au point des méthodes de modélisation et de mesure, l'étude des mécanismes d'action des particules, des analyses sur une meilleure caractérisation de l'exposition et l'initiation de nouvelles

études épidémiologiques), **mais aussi initier une réglementation des particules fines, afin de pouvoir garantir un minimum de santé publique en ce qui concerne l'exposition à la fraction fine.**

## 6. Annexes

---

### *Annexe 2.I*

Principales formes de particules

### *Annexe 2.II*

Niveaux de concentration annuels mesurés (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) des  $\text{PM}_{10}$  et des  $\text{PM}_{2,5}$  en Europe en 2004

### *Annexe 3.I*

Effet de l'âge sur le dépôt de particules dans le tractus respiratoire

### *Annexe 3.II*

Concentrations maximales de  $\text{PM}_{2,5}$  provenant de sources intérieures (dans une maison)

### *Annexe 3.III*

Estimation de la réduction de l'espérance de vie (en mois) attribué aux  $\text{PM}_{2,5}$  anthropiques pour les émissions en 2000 et projections pour 2010 et 2020 sous la législation actuelle

### *Annexe 3.IV*

Effets sur la santé liés à l'exposition de différents polluants, parmi lesquels les particules

### *Annexe 3.V*

Principaux effets des polluants atmosphériques sur la santé et sur l'environnement

### *Annexe 4.I*

A: Normes en place depuis 2000 pour les véhicules lourds équipés d'un moteur diesel

B: Valeurs limites d'émission des véhicules dans l'UE

## Annexe 2.1

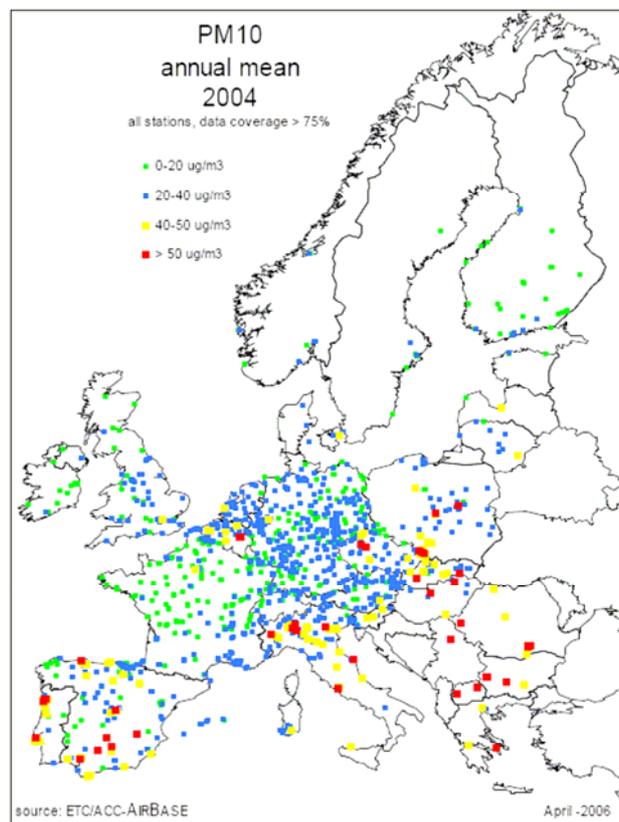
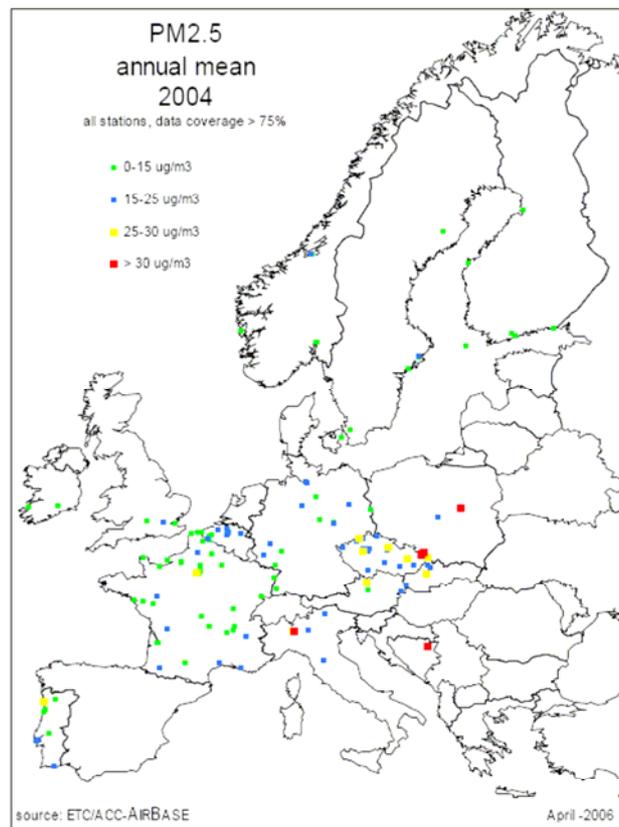
### Principales formes de particules

Forme	Apparence	Nature	Formation
sphérique		fumées pollens cendres	condensation dispersion combustion
irrégulière cubique		minéraux	désintégration mécanique
en plaques		minéraux épiderme	désintégration mécanique
fibreuse		fibres végétales et minérales	dispersion désintégration mécanique
en agrégats		noirs de charbon fumées	évaporation et condensation

source : Lamy, 2004

## Annexe 2.II

Niveaux de concentration annuels mesurés (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) des  $\text{PM}_{10}$  et des  $\text{PM}_{2.5}$  en Europe en 2004 (différentes méthodes de mesure ont été utilisées : gravimétriques, TEOM et absorption  $\beta$ )



## Annexe 3.1

Effet de l'âge sur le dépôt de particules dans le tractus respiratoire; source: EPA, 2004b

Type study	Particles (MMAD)	Summary	Author
Inhalation	2 µm	Measured deposition of particles in children, adolescents, and adults. No differences in deposition among three groups. Breath-to-breath fractional deposition in children increased with increasing tidal volume. Rate of deposition normalized to lung surface area tended to be 35% greater in children compared to adolescents and adults.	Bennett and Zeman (1998)
Inhalation	4.5 µm	Particles inhaled via mouthpiece by children and adults with mild CF, but normal airway anatomy. Extrathoracic deposition of particles 50% greater in children and tended to be higher for younger ages. No significant difference in lung or total respiratory tract deposition.	Bennett et al. (1997a)
Inhalation	2 µm	Examined deposition of particles in subjects aged 18-80 yrs. Fractional deposition not found to be age-related but more dependant on airway resistance and breathing patterns.	Bennett et al. (1996)
Inhalation	1, 2.05, 2.8 µm	For same flow rate, children had higher nasal resistance than adults. Nasal deposition increased with particle size, ventilation flow rate, and nasal resistance. Average nasal deposition percentages lower in children than in adults; differences increased with exercise. Average nasal deposition percentages best correlated with airflow rate	Beckquinn et al. (1991)
Airway models	1, 5, 10, 15 µm	Airway models of trachea and first few generations of bronchial airways of children and adult; total deposition in child model greater than in adult.	Oldham et al. (1997)
Nasal casts	0.0046-0.2 µm	Nasal casts of children's airways; deposition efficiency for particles decreased with increasing age.	Cheng et al. (1995)
Model	0.1-10 µm	Total fractional lung deposition comparable between children and adults for all sizes. TB-deposition fraction greater in children. A deposition fraction reduced in children.	Phalen and Oldham (2001)
Model	1.95 µm	Mass-based deposition of ROFA decreased with age from 7 mo to adulthood; mass deposition per unit surface area greater in children.	Musante and Martonen (2000a)
Model	0.25-5 µm	A fractional deposition highest in children for all particle sizes; TB fractional deposition decreased as function of age for all sizes; total fractional lung deposition higher in children than adults.	Musante and Martonen (1999)
Model		ET deposition in children higher; TB and A may be lower or higher depending on particle size; enhanced deposition for particles < 5 µm in children.	Xu and Yu (1986)

CF = Cystic fibrosis.

## Annexe 3.II

### Concentrations maximales de PM<sub>2,5</sub><sup>a,b</sup> provenant de sources intérieures (dans une maison)

VMD : volume mean diametre

Particle Source	n	Size Statistics		PM <sub>2,5</sub>	
		Indoor Activity Mean VMD (µm)	Background <sup>a,e</sup> Mean VMD (µm)	Maximum Concentration <sup>c,d</sup> Mean (µg/m <sup>3</sup> )	SD (µg/m <sup>3</sup> )
<b>Cooking</b>					
Baking (Electric)	8	0.189 <sup>f</sup>	0.221 <sup>f</sup>	14.8	7.4
Baking (Gas)	24	0.107 <sup>f</sup>	0.224 <sup>f</sup>	101.2	184.9
Toasting	23	0.138 <sup>f</sup>	0.222 <sup>f</sup>	54.9	119.7
Broiling	4	0.114 <sup>f</sup>	0.236 <sup>f</sup>	29.3	43.4
Sautéing	13	0.184 <sup>f</sup> , 3.48 <sup>g</sup>	0.223 <sup>f</sup> , 2.93 <sup>g</sup>	65.6	95.4
Stir-Frying	3	0.135 <sup>f</sup>	0.277 <sup>f</sup>	37.2	31.4
Frying	20	0.173 <sup>f</sup>	0.223 <sup>f</sup>	40.5	43.2
Barbecuing	2	0.159 <sup>f</sup>	0.205 <sup>f</sup>	14.8	5.2
<b>Cleaning</b>					
Dusting	11	5.38 <sup>g</sup>	3.53 <sup>g</sup>	22.6	22.6
Vacuuming	10	3.86 <sup>g</sup>	2.79 <sup>g</sup>	6.5	3.9
Cleaning with Pine Sol	5	0.097 <sup>f</sup>	0.238 <sup>f</sup>	11	10.2
<b>General Activities</b>					
Walking Vigorously (w/Carpet)	15	3.96 <sup>g</sup>	3.18 <sup>g</sup>	12	9.1
Sampling w/Carpet	52	4.25 <sup>g</sup>	2.63 <sup>g</sup>	8	6.6
Sampling w/o Carpet	26	4.28 <sup>g</sup>	2.93 <sup>g</sup>	4.8	3
Burning Candles	7	0.311 <sup>f</sup>	0.224 <sup>f</sup>	28	18

Notes:

<sup>a</sup> All concentration data corrected for background particle levels.

<sup>b</sup> Includes only individual particle events that were unique for a given time period and could be detected above background particle levels.

<sup>c</sup> PM concentrations in µg/m<sup>3</sup>.

<sup>d</sup> Maximum concentrations computed from 5-min data for each activity.

<sup>e</sup> Background data are for time periods immediately prior to the indoor event.

<sup>f</sup> Size statistics calculated for PV<sub>0.02-0.5</sub> using SMPS data.

<sup>g</sup> Size statistics calculated for PV<sub>0.7-10</sub> using APS data.

Source: Long et al. (2000).

### Annexe 3.III

Estimation de la réduction de l'espérance de vie (en mois) attribuée aux PM<sub>2,5</sub> anthropiques pour les émissions en 2000 et projections pour 2010 et 2020 sous la législation actuelle

Etats membres	2000			2010			2020		
	Central estimate	Range		Central estimate	Range		Central estimate	Range	
Austria	8.0	7.4	9.0	5.9	5.5	6.8	4.8	4.5	5.5
Belgium	13.6	11.7	15.4	9.9	8.5	11.3	8.8	7.6	10.0
Denmark	7.3	6.6	8.7	5.8	5.2	7.0	5.3	4.8	6.4
Finland	3.1	2.6	3.7	2.7	2.2	3.2	2.4	2.0	2.9
France	8.2	7.0	9.3	5.9	4.9	6.7	5.1	4.3	5.8
Germany	10.2	8.9	11.6	7.5	6.5	8.6	6.4	5.6	7.3
Greece	7.1	7.0	7.3	5.8	5.7	5.9	5.2	5.1	5.3
Ireland	3.9	2.9	5.1	3.0	2.2	4.0	2.7	2.0	3.6
Italy	9.0	8.5	9.6	6.6	6.2	7.1	5.6	5.3	6.0
Luxembourg	9.7	8.0	11.2	7.1	5.6	8.2	6.0	4.8	7.1
Netherlands	12.7	10.9	14.6	9.7	8.2	11.2	9.0	7.6	10.2
Portugal	5.2	4.9	5.4	3.4	3.2	3.6	3.2	3.0	3.4
Spain	5.1	5.0	5.4	3.5	3.4	3.7	3.2	3.1	3.3
Sweden	4.3	3.9	5.2	3.4	3.1	4.2	3.2	2.9	3.8
United Kingdom	6.9	5.5	8.7	4.9	3.8	6.4	4.5	3.5	5.7
Total, 15 Member States	8.2	7.4	9.3	6.0	5.4	6.8	5.3	4.7	5.9
Cyprus	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Czech Republic	10.1	9.2	11.2	7.2	6.5	8.1	5.7	5.1	6.4
Estonia	4.4	3.7	5.2	3.8	3.2	4.6	3.4	2.9	4.2
Hungary	12.4	11.6	13.6	8.9	8.3	9.8	7.1	6.6	7.9
Latvia	5.1	4.4	6.1	4.4	3.7	5.3	3.9	3.3	4.7
Lithuania	6.9	6.2	8.1	5.9	5.3	7.0	5.2	4.6	6.0
Malta	7.7	7.4	8.0	6.8	6.5	7.1	7.4	7.0	7.8
Poland	10.7	9.9	11.8	8.1	7.4	9.0	6.4	5.9	7.2
Slovakia	10.4	9.6	11.4	7.7	7.1	8.6	6.2	5.7	6.9
Slovenia	9.3	8.7	10.3	6.9	6.4	7.7	5.7	5.3	6.3
Total, new Member States	10.3	9.5	11.4	7.7	7.1	8.6	6.2	5.7	6.9
Grand total	8.6	7.7	9.6	6.3	5.6	7.1	5.4	4.9	6.1

Note: The central estimates present the average of four calculations for four meteorological years (1997, 1999, 2000, 2003), while the range indicates the variation across individual meteorological conditions.

source : OMS, 2006

## Annexe 3.IV

### Effets sur la santé liés à l'exposition de différents polluants

Health impact	Associations with some environmental exposures
Infectious diseases	<ul style="list-style-type: none"> <li>• water, air and food contamination</li> <li>• climate-change-related changes in pathogen life cycle</li> </ul>
Cancer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• air pollution (PM), mainly PM<sub>2.5</sub> or less</li> <li>• smoking and environmental tobacco smoke (ETS)</li> <li>• some pesticides</li> <li>• asbestos</li> <li>• natural toxins (aflatoxin)</li> <li>• polycyclic aromatic hydrocarbons, e.g. in diesel fumes</li> <li>• some metals, e.g. arsenic, cadmium, chromium</li> <li>• radiation (including sunlight)</li> <li>• radon</li> <li>• dioxins</li> </ul>
Cardiovascular diseases	<ul style="list-style-type: none"> <li>• air pollution (carbon monoxide, ozone, PM)</li> <li>• smoking and ETS</li> <li>• carbon monoxide</li> <li>• lead</li> <li>• noise</li> <li>• inhalable particles</li> <li>• food, e.g. high cholesterol</li> <li>• stress</li> </ul>
Respiratory diseases, including asthma	<ul style="list-style-type: none"> <li>• smoking and ETS</li> <li>• sulphur dioxide</li> <li>• nitrogen dioxide</li> <li>• inhalable particles (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>)</li> <li>• ground-level ozone</li> <li>• fungal spores</li> <li>• dust mites</li> <li>• pollen</li> <li>• pet hair, skin and excreta</li> <li>• damp</li> </ul>
Skin diseases	<ul style="list-style-type: none"> <li>• UV radiation</li> <li>• Some metals, e.g. nickel</li> <li>• pentachlorophenol</li> <li>• dioxins</li> </ul>
Diabetes, obesity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• food, e.g. high fat</li> <li>• poor exercise</li> </ul>
Reproductive dysfunctions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• polychlorinated biphenyls (PCBs)</li> <li>• DDT</li> <li>• cadmium</li> <li>• phthalates</li> <li>• endocrine disruptors</li> <li>• pharmaceuticals</li> </ul>
Developmental (foetal and childhood) disorders	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lead</li> <li>• mercury</li> <li>• smoking and ETS</li> <li>• cadmium</li> <li>• some pesticides</li> <li>• endocrine disruptors</li> </ul>
Nervous system disorders	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lead</li> <li>• PCBs</li> <li>• methyl mercury</li> <li>• manganese</li> <li>• some solvents</li> <li>• organophosphates</li> </ul>
Immune response	<ul style="list-style-type: none"> <li>• UVB radiation</li> <li>• some pesticides</li> </ul>
Increased chemical sensitivity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• multiple chemical exposures at low doses</li> </ul>

source : Rapport AEE, 2005 (Environmental assessment report No 10.)

## Annexe 3.V

### Principaux effets des polluants atmosphériques sur la santé et l'environnement



Polluants	Origine	Effets sur la santé	Effets sur l'environnement
<b>Ozone troposphérique (O<sub>3</sub>)</b>	L'ozone est une forme particulière de l'oxygène. Contrairement aux autres polluants, l'ozone n'est pas émis par une source particulière mais résulte de la transformation photo-chimique de certains polluants de l'atmosphère, issus principalement du transport routier, (NO <sub>x</sub> et COV) en présence des rayonnements ultra-violetes solaires. Les concentrations élevées d'ozone s'observent principalement l'été, durant les heures chaudes et ensoleillées de la journée.	C'est un gaz agressif qui provoque (à partir de concentration de 150 à 200 µg/m <sup>3</sup> ) des migraines, des irritations des yeux et de la gorge, de la toux et une altération pulmonaire, surtout chez les personnes sensibles.	En quantité très élevée, l'ozone peut avoir des conséquences dommageables pour l'environnement. Il contribue à l'acidification de l'environnement qui perturbe la composition de l'air, des eaux de surface et du sol. Ainsi, l'ozone porte préjudice aux écosystèmes (dépeuplement forestier, acidification des lacs d'eau douce, atteinte à la chaîne alimentaire,...) et dégrade les bâtiments et les cultures.
<b>Oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)</b>	Les NO <sub>x</sub> proviennent surtout des véhicules et des installations de combustion. Ces émissions ont lieu principalement sous la forme de NO (90%) et dans une moindre mesure sous la forme de NO <sub>2</sub> .	Le NO n'est pas toxique pour l'homme au contraire du NO <sub>2</sub> qui peut entraîner une altération de la fonction respiratoire et une hyper activité bronchique. Chez les enfants et les asthmatiques, il peut augmenter la sensibilité des bronches aux infections microbiennes.	Les NO <sub>x</sub> interviennent dans la formation d'ozone troposphérique et contribuent au phénomène des pluies acides qui attaquent les végétaux et les bâtiments.
<b>Composés organiques volatils (COV)</b>	Les COV hors méthane (NMVOC) sont gazeux et proviennent du transport routier (véhicules à essence) ou de l'utilisation de solvants dans les procédés industriels (imprimeries, nettoyage à sec,...) ou dans les colles, vernis, peintures,... Les plus connus sont les BTX (benzène, toluène, xylène).	Les effets sont divers selon les polluants et l'exposition. Ils vont de la simple gêne olfactive et une irritation, à une diminution de la capacité respiratoire. Le benzène est un composé cancérigène reconnu.	Les COV interviennent dans la formation d'ozone troposphérique et contribuent au phénomène des pluies acides qui attaquent les végétaux et les bâtiments.
<b>Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)</b>	Il provient essentiellement de la combustion de carburant fossile pour le transport, le chauffage et les activités industrielles.	Il n'a pas d'effet connu sur la santé.	L'augmentation de la concentration en CO <sub>2</sub> accroît sensiblement l'effet de serre et contribue à une modification du climat planétaire.

### Principaux effets des polluants atmosphériques sur la santé et l'environnement



Polluants	Origine	Effets sur la santé	Effets sur l'environnement
<b>Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)</b>	Il provient essentiellement de la combustion des matières fossiles contenant du soufre (comme le fuel ou le charbon) et s'observe en concentrations légèrement plus élevées dans un environnement à forte circulation.	C'est un gaz irritant. Des expositions courtes à des valeurs élevées (250µg/m <sup>3</sup> ) peuvent provoquer des affections respiratoires (bronchites,...) surtout chez les personnes sensibles.	En présence d'eau, le dioxyde de soufre forme de l'acide sulfurique (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) qui contribue, comme l'ozone, à l'acidification de l'environnement.
<b>Ammoniac (NH<sub>3</sub>)</b>	L'ammoniac est un polluant surtout lié aux activités agricoles. En milieu urbain, sa production semble être fonction de la densité de l'habitat. Sa présence est liée à l'utilisation de produits de nettoyage, aux processus de décomposition de la matière organique et à l'usage de voitures équipées d'un catalyseur.	Le NH <sub>3</sub> présent dans l'air n'a pas d'effet toxique sur la santé. Mais attention, sous forme liquide (NH <sub>4</sub> OH), l'ammoniac se révèle très corrosif ! Mélangé avec de l'eau de Javel (chlore actif), il peut alors provoquer des dégagements gazeux toxiques (chloramines).	Comme l'ozone, le NH <sub>3</sub> contribue à l'acidification de l'environnement.
<b>Poussières ou Particules en suspension</b>  Incluant les Particules fines (PM <sub>10</sub> ) et très fines (PM <sub>2,5</sub> )	Elles constituent un complexe de substances organiques ou minérales. Les grosses particules (supérieures à 10µm) sont formées par des processus mécaniques tels que l'érosion, les éruptions. Les PM <sub>10</sub> (inférieures à 10µm) et PM <sub>2,5</sub> (inférieures à 2,5µm) résultent de processus de combustion (industries, chauffage, transport,...).	Leur degré de toxicité dépend de leur nature, dimension et association à d'autres polluants. Les particules fines peuvent irriter les voies respiratoires, à basse concentration, surtout chez les personnes sensibles. Les très fines pénètrent plus profondément dans les voies respiratoires. Certaines particules peuvent avoir des propriétés mutagène ou cancérigène.	Les poussières absorbent et diffusent la lumière, limitant ainsi la visibilité. Elles suscitent la formation de salissure par dépôt et peuvent avoir une odeur désagréable.
<b>Polluants organiques persistants (POP)</b>  Incluant les dioxines, les HAP, les pesticides,...	La production de dioxines est principalement due aux activités humaines et sont rejetées dans l'environnement essentiellement comme sous-produits de procédés industriels (industrie chimique des organochlorés, combustion de matériaux organiques ou fossiles,...). Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) sont rejetés dans l'atmosphère comme sous-produits de la combustion incomplète de matériaux organiques.	De fortes concentrations de POPs ont des effets carcinogènes reconnus sur la santé. Depuis peu, on constate que les POPs peuvent aussi avoir des effets à très faible concentration. Perturbateurs endocriniens, ils interviennent dans les processus hormonaux et les perturbent : malformations congénitales, capacité reproductive limitée, développement physique et intellectuel affecté, système immunitaire détérioré.	Les POPs résistent à la dégradation biologique, chimique et photolytique et persistent donc dans l'environnement. Par ailleurs, ils sont caractérisés par une faible solubilité dans l'eau et une grande solubilité dans les lipides ce qui cause une bio-accumulation dans les graisses des organismes vivants et une bioconcentration dans les chaînes trophiques.

source : IBGE

## Annexe 4.1

### A: Normes en place depuis 2000 pour les véhicules lourds équipés d'un moteur diesel

		Valeurs limites d'essai			
		A (2000)	B1 (2005)	B2 (2008)	C (EEV)
<b>Essais ESC et ELR</b>	<b>PM (g/kW/h)</b>	0,1	0,02	0,02	0,02
	<b>Fumées (m<sup>3</sup>)</b>	0,8	0,5	0,5	0,15
<b>Essai ETC</b>	<b>PM (g/kW/h)</b>	0,16	0,03	0,03	0,02

La norme européenne EEV est une norme qui s'applique aux véhicules dits "propres".

### B: Valeurs limites d'émission des véhicules dans l'UE

	EU standards	PM emission standard
Diesel-passenger cars and Light Duty Vehicles (LDV)  GVW < 1305 kg	Euro I - 1992 / 94	0.14 g/km
	Euro II - 1996	0.08 g/km
	Euro III - 2000	0.05 g/km
	Euro IV - 2005	0.025 g/km
Diesel LDV  GVW 1305 to 1760 kg	Class II - 1994	0.16 g/km
	Class II- 2001	0.07 g/km
	Class II - 2006	0.04 g/km
Diesel LDV  GVW > 1760 kg	Class III - 1994	0.25 g/km
	Class III - 2001	0.10 g/km
	Class III - 2006	0.06 g/km
Diesel Heavy Duty Vehicles (HDV) and buses	Euro I - 1992, <85 kW	0.61 g/kWh
	Euro I - 1992, >85 kW	0.36 g/kWh
	Euro II - 1996	0.25 g/kWh
	Euro II - 1998	0.15 g/kWh
	Euro III - 2000	0.10 g/kWh
	Euro IV and V - 2005 & 2008	0.02 g/kWh

source : CAFE WG on PM, 2004

## 7. Bibliographie

---

Abbey DE et al. Long-term inhalable particles and other pollutants related to mortality of nonsmokers. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 1999; 159: 373–382.

AEE (Agence Européenne pour l'Environnement). AEE-Briefing 4/2006: Urban sprawl in Europe.

Amann M et al. CAFE baseline scenario for Clean Air for Europe (CAFE) programme. Laxenburg, International Institute for Applied Systems Analysis, 2005. Document téléchargeable sur : [http://ec.europa.eu/environment/air/cafe/activities/pdf/cafe\\_scenario\\_report\\_1.pdf](http://ec.europa.eu/environment/air/cafe/activities/pdf/cafe_scenario_report_1.pdf), accédé le 26/10/2006

APHEIS (Air Pollution and Health: A European Information System). Evaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique en Europe. Rapport de la troisième phase 2002-2003. 2004.

Australian Government. Department of the Environment and Heritage. Health impacts of ultrafines particles : Desktop literature review and analysis, 2004. Commonwealth Australia, 311 pp.

Avol EL et al. Respiratory effects of relocating to areas of differing air pollution levels. *American Journal of Respiratory & Critical Care Medicine*, 2001; 164: 2067–2072.

Bobak M, Leon DA. The effect of air pollution on infant mortality appears specific for respiratory causes in the post-neonatal period. *Epidemiology*, 1999; 10: 666–670.

Bobak M, Richards M, Wadsworth M. Air pollution and birth weight in Britain in 1946. *Epidemiology*, 2001; 12: 358–359.

Brunekreef B, Holgate ST. Air Pollution and health. *Lancet*, 2002; 360: 1233–1242.

Brunekreef B, Forsberg B. Epidemiological evidence of effects of coarse particles on health. *European Respiratory Journal*, 2005; 26: 309–318.

Bunn HJ et al. Ultrafine particles in alveolar macrophages from normal children. *Thorax*, 2001; 56: 932–934.

CAFE Working Group on Particulate Matter. Second Position Paper on Particulate Matter, 2004. European Commission, Brussels.

Chen L et al. Air pollution and birth weight in northern Nevada, 1991–1999. *Inhalation Toxicology*, 2002; 14: 141–157.

Clancy L et al. Effect of air-pollution control on death rates in Dublin, Ireland: an intervention study. *Lancet*, 2002; 360: 1210–1214.

Coûts externes de la santé imputables à la pollution de l'air par les transports : Etude trilatérale de l'Autriche, de la France et de la Suisse, 1999. Résultats téléchargeables : <http://www.admin.ch/cp/f/37776641.4013DBFC@mbox.gsuek.admin.ch.html>, accédé le 10/10/2006.

Dagher Z et al. Pro-inflammatory effects of Dunkerque city air pollution particulate matter 2.5 in human epithelial lung cells (L132) in culture. *Journal of Applied Toxicology*, 2005; 25 (2): 166–175.

DG Energie et Transport: Statistical pocketbook, 2005. Commission européenne. European Union in Figures: Energy and Transport, Part 3. Document téléchargeable sur : [http://ec.europa.eu/dgs/energy\\_transport/figures/pocketbook/doc/2005/etif\\_2005\\_transport\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/figures/pocketbook/doc/2005/etif_2005_transport_en.pdf), accédé le 2/12/2006

Daigle CC et al. Ultrafine particle deposition in humans during rest and exercise. *Inhal. Toxicol.*, 2003; 15 (6): 539–552.

Dominici F, Zeger SL, Samet J. A measurement error model for time-series studies of air pollution and mortality. *Biostatistics*, 2000; 1: 157–175.

Dockery DW et al. An association between air pollution and mortality in six US cities. *N. Engl. J. Med.*, 1993; 329: 1753–1759.

Don Porto CA et al. Genotoxic effects of carbon black particles, diesel exhaust particles, and urban air particulates and their extracts on human alveolar epithelial cell line (A549) and human monocytic cell line (THP-1). *Environ. Mol. Mutagen*, 2001; 37:155–163.

AEE (Agence Européenne de l'Environnement), Europe's environment: the second assessment. Luxemburg, Office for Official Publications of the European Communities. 1998.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). Guidelines for exposure assessment. Washington, DC: Risk Assessment Forum, USEPA 600Z-92/001. 2002a.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). Exposure and Human Health Evaluation of Airborne Pollution from the World Trade Center Disaster (External Review Draft), Washington DC, EPA/600/R-02/002A. 2002b.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2004a. Air quality criteria for particulate matter. Vol. I. Washington, DC. 900 pp.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2004b. Air quality criteria for particulate matter. Vol. II. Washington, DC. 1148 pp.

Les effets sanitaires des pics de pollution hivernaux. Pollution Atmosphérique. *Extrapol* n°XII, 1997; octobre-décembre (156): 1–111.

FEBIAC (Fédération Belge de l'Industrie Automobile et du Cycle). Le moteur diesel, une technologie d'avenir, 2005. <http://www.febiac.be>, accédé le 2/06/2006

FEBIAC (Fédération Belge de l'Industrie Automobile et du Cycle). Euro 5, 2006. <http://www.febiac.be>, accédé le 2/06/2006

FRS (Fédération routière suisse). FRS, 2005. Document téléchargeable sur : [http://www.strasseschweiz.ch/dcs/users/2/FRS\\_JB\\_2005\\_f.pdf](http://www.strasseschweiz.ch/dcs/users/2/FRS_JB_2005_f.pdf), accédé le 23/12/2006

FPCAP (Federal-Provincial Committee on Air Pollution). Criteria for National Air Quality Objectives: Sulfur Dioxide, Suspended Particulates, Carbon Monoxide, Oxidants (Ozone) and Nitrogen Dioxide. Subcommittee on Air Quality Objectives, Fisheries and Environment Canada, November 1976.

Garshick E et al. Residence near a major road and respiratory symptoms in U.S. Veterans. *Epidemiology*, 2003; 14:728–736.

- Gauderman WJ et al. Association between air pollution and lung function growth in southern California children. *American Journal of Respiratory & Critical Care Medicine*, 2000; 162: 1383–1390.
- Gavett. World Trade Center fine particulate matter - chemistry and toxic respiratory effects: an overview. *Environmental Health Perspectives*, 2003; 111(7):981-991.
- Gemenetzi et al. Mass concentration and elemental composition of indoor PM<sub>2,5</sub> and PM<sub>10</sub> in university rooms in Thessaloniki, northern Greece. *Atmospheric Environment*, 2006; 40 (17): 3195–3206.
- Goldberg MS et al. Identification of persons with cardiorespiratory conditions who are at risk of dying from the acute effects of ambient air particles. *Environmental Health Perspectives*, 2001; 109: 487–494.
- Herbert R et al. The World Trade Center Disaster and the Health of Workers: Five-Year Assessment of a Unique Medical Screening Program. *Environmental Health Perspectives*, 2006; 114: 1853–1858. Document téléchargeable sur : <http://www.ehponline.org/members/2006/9592/9592.pdf>, accédé le 28/12/2006
- Hoek G et al. The association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in a Dutch cohort study. *Lancet*, 2002; 360: 1203–1209.
- Heo Y, Saxon A, Hankinson O. Effect of diesel exhaust particles and their components on the allergen-specific IgE and IgG1 response in mice. *Toxicology*, 2001; 159: 143–158.
- IBGE (Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement), Laboratoire de Recherche en Environnement. La qualité de l'air en Région Bruxelles-Capital: mesures à l'immission 2003-2005, 2005.
- International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection, 1995. ICRP, annales of ICRP n. 24. 300 pp.
- InVS (Institut de veille sanitaire), France. Pics de pollution atmosphérique et santé publique : La place de l'épidémiologie, 1999. [http://www.invs.sante.fr/publications/Pics\\_Pollu/dossier.html](http://www.invs.sante.fr/publications/Pics_Pollu/dossier.html), accédé le 14/12/2006
- Jaques PA, Kim CS. Measurement of total lung deposition of inhaled ultrafine particles in healthy men and women. *Inhalation Toxicol.*, 2000; 12: 715–731.
- Katsouyanni K et al. Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: Results from 29 European cities within the APHEA 2 project. *Epidemiology*, 2001; 12: 521–531.
- Kim CS, Jaques PA. Respiratory dose of inhaled ultrafine particles in healthy adults. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A*, 2000; 358: 2693–2705.
- Kittelson DB. Engines and nanoparticles: a review. *Journal of Aerosol Science*, 1998; 29 (5/6): 575–588.
- Koistinen KJ et al. Sources of fine particulate matter in personal exposures and residential indoor, residential outdoor and workplace microenvironments in the Helsinki phase of the EXPOLIS study. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 2004; 30(2): 32–46.

Kreyling WG et al. Translocation of ultrafine insoluble iridium particles from lung epithelium to extrapulmonary organs is size dependent but very low. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 2002; 65: 1513–1530.

Laden F et al. Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six U.S. cities. *Environmental Health Perspectives*, 2000, 108: 941–947.

Lamy P. Rapport d'étude. Nanomatériaux : Risques pour la santé et l'environnement, 2004. Centre de Recherche sur la Matière Divisée, France. Document téléchargeable sur : <http://crmd.cnrs-orleans.fr/publications/stagelamy/rapportlamy.pdf>, accédé le 31/07/2006

LCPE (Loi Canadienne sur la Protection de l'Environnement), 1999. Canada. Document téléchargeable sur : [http://www.ec.gc.ca/RegistreLCPE/the\\_act/](http://www.ec.gc.ca/RegistreLCPE/the_act/), accédé le 16/12/2006

Lederman et al. The Effects of the World Trade Center Event on Birth Outcomes among Term Deliveries at Three Lower Manhattan Hospitals. *Environmental Health Perspectives*, 2004; 112 (17):1772-1778. Document téléchargeable sur : <http://cpmcnet.columbia.edu/dept/sph/ccceh/research/LedermanWTCdec2004EHP.pdf>, accédé le 27/12/2006

Lin M et al. The influence of ambient coarse particulate matter on asthma hospitalization in children. *Environ Health Perspect*, 2002; 110 (6): 575-581.

London Ministry of Health. Mortality and morbidity during the London fog of December 1952. Reports on Public Health and Medical Subjects No. 95. London: HMSO, 1954.

Loomis D et al. Air pollution and infant mortality in Mexico City. *Epidemiology*, 1999; 10: 118–123.

LPE (Loi fédérale sur la protection de l'environnement), 1983. Suisse. Document téléchargeable sur : <http://www.admin.ch/ch/f/rs/8/814.01.fr.pdf>, accédé le 18/12/2006

LSIP (Liste de substances d'intérêt prioritaire): Rapport d'évaluation. Particules inhalables de 10 microns ou moins, 2000. Canada.

Milieu Ltd, The Danish National Environmental Research Institute and The Center for Clean Air Policy. Assessment of the Effectiveness of European Air Quality Policies and Measures: case study 4, Comparison of the EU and US approaches towards control of particulate matter, 2004. 47 pp.

Modèle EMEP: Co-operative program for monitoring and evaluation of the long-range transmissions of air pollutants in Europe. <http://www.emep.int>, accédé le 17/11/2006

Nemery B, Hoet PH, Nemmar A. The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *Lancet*, 2001; 305: 704–708.

Nemmar A et al. Passage from intratracheally instilled ultrafine particles from the lung into the systemic circulation in hamster. *Am. J. Respir Crit. Care Med.*, 2001; 164: 1665–1668.

Nemmar A et al. Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans. *Circulation*, 2002; 105: 411–414

Nemmar A et al. (2003a). Pulmonary Inflammation and Thrombogenicity Caused by Diesel Particles in Hamsters. Role of Histamine. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2003; 168: 1366–1372.

Nemmar A et al. (2003 b). Diesel Exhaust Particles in Lung Acutely Enhance Experimental Peripheral Thrombosis. *Circulation*, 2003; 107: 1202–1208.

Nemmar A et al. Possible mechanisms of the cardiovascular effects of inhaled particles: systemic translocation and prothrombic effects. *Toxicology Letters*, 2004; 149: 243–253.

Nicolai T et al. Urban traffic and pollutant exposure related to respiratory outcomes and atopy in a large sample of children. *European Respiratory Journal*, 2003; 21: 956–963.

Normes pancanadiennes relatives aux particules et à l'ozone, 2000. Conseil canadien des ministres de l'environnement. Document téléchargeable sur :  
[http://www.ccme.ca/assets/pdf/pmozone\\_standard\\_e.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/pmozone_standard_e.pdf), accédé le 18/12/2006

NNQAA (Normes nationales de qualité de l'air ambiant) : [http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/air/out-ext/reg\\_e.html#3](http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/air/out-ext/reg_e.html#3), accédé le 17/12/2006

Notre-planete.info. Les particules atmosphériques, 2006.  
<http://www.notre-planete.info>, accédé le 11/11/2006

Nyberg F et al. Urban air pollution and lung cancer in Stockholm. *Epidemiology*, 2000; 11:487–495.

Oberdörster G et al. Extrapulmonary translocations of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 2002; 65: 1531–1545.

Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J. Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of Ultrafine Particles. *Environmental Health Perspectives*, 2005; 113: 823–839.

OFEFP (Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage). Position de l'OFEFP au sujet des poussières fines, des PM10 et des nanoparticules. Berne, 1998.

OFEFP (Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage). Particules fines (Particulate matter PM), Documentation pour les médias, 2003. 12 pp.

OFEFP (Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage). Poussières fines : un fléau, 2005a. 16 pp.

OFEFP (Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage). Particules fines (PM<sub>10</sub>) : situation actuelle, stratégie et mesures, 2005b. 5 pp.

OFEFP (Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage). Poussières fines PM<sub>10</sub>. Questions et réponses concernant les propriétés, les émissions, les immissions, les effets sur la santé et les mesures. État au 1<sup>er</sup> décembre 2006. Suisse, 47 pp.

OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Transport, environment and health. WHO Regional Office for Europe. Regional publications, European series, No.89. Copenhagen, 2000a. 86 pp.

OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Quantification of the Health Effects of Exposure to Air Pollution. Report on a WHO working group. WHO Regional Office for Europe. Copenhagen, 2000b. 34 pp.

OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Report on a WHO working group. WHO Regional Office for Europe. Copenhagen, 2003. 98 pp.

Document téléchargeable sur : <http://www.euro.who.int/document/e79097.pdf>, accédé le 4/12/2006

OMS (Organisation Mondiale de la Santé) - Anderson et al. Meta-analysis of time-series studies and panel studies of particulate matter (PM) and ozone (O<sub>3</sub>). WHO Regional Office for Europe. Copenhagen, 2004. 80 pp. Document téléchargeable sur : <http://www.euro.who.int/document/E82792.pdf>, accédé le 19/3/2006

OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Effects of air pollution on children's health and development: a review of the evidence. WHO Regional Office for Europe. Copenhagen, 2005a. 191 pp. Document téléchargeable sur : <http://www.euro.who.int/document/E86575.pdf>, accédé le 4/7/2006

OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Air quality guidelines: global update, 2005. Reporting on a Working Group meeting, Bonn Germany, 18-20 October 2005b. Document téléchargeable sur : <http://www.euro.who.int/Document/E87950.pdf>, accédé le 20/3/2006

OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution. WHO Regional Office for Europe. Copenhagen, 2006. 113 pp.

OPair (Ordonnance sur la protection de l'air), 1985. Suisse. Document téléchargeable sur : <http://www.admin.ch/ch/f/rs/8/814.318.142.1.fr.pdf>, accédé le 19/12/2006

Ott W, Wallace L, Mage D. Predicting particulate (PM<sub>10</sub>) personal exposure distributions using a random component superposition (RCS) statistical model. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 2000; 50: 1390-1406.

Pacyna JM. Source inventories for atmospheric trace metals. In *Atmospheric Particles*. Harrison RM, Van Grieken RE (Eds). *IUPAC Series on Analytical and Physical Chemistry of Environmental Systems*, 1998; 5: 387-423.

Pereira LA et al. Association between air pollution and intrauterine mortality in Sao Paulo, Brazil. *Environmental Health Perspectives*, 1998; 106:325-329.

Phalen RF, Oldham MJ. Methods for modeling particle deposition as a function of age. *Respir. Physiol.*, 2001; 128: 119-130.

Pope CA 3rd et al. Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 1995; 151: 669-674.

Pope AC et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, 2002; 287:1132-1141.

Pope CA et al. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution. *Circulation*, 2004; 109: 71-77.

Pritchard JN, Jefferies SJ, Black A. Sex differences in the regional deposition of inhaled particles in the 2.5-7.5 µm size range. *J. Aerosol Sci.*, 1986; 17: 385-389.

Prezant et al. Cough and bronchial responsiveness in firefighters at the World Trade Center site. *N Engl J Med*, 2002; 12, 347(11): 806-815.

Proposition de Loi modifiant le Code des impôts sur les revenus 1992 en vue de combattre la pollution par les particules fines. Chambre de Représentants de Belgique, 14/02/2006. Document Parlementaire 51K2287. Document téléchargeable sur : <http://www.lachambre.be/FLWB/PDF/51/2287/51K2287001.pdf>, accédé le 1/8/2006

- Reibman et al. The World Trade Center Residents Respiratory Health Study: New-Onset Respiratory Symptoms and Pulmonary Function. *Environmental Health Perspectives*, 2005; 113(4): 406-411.
- Risom et al. Oxidative stress-induced DNA damage by particulate air pollution. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2005; 592 (1-2): 119-137.
- Roberts. *Biology, a functional approach*, 4th edition- Maison d'édition Nelson, 1996. 693 pp.
- Roemer WH, van Wijnen JH. Daily mortality and air pollution along busy streets in Amsterdam, 1987-1998. *Epidemiology*, 2001; 12: 649-653.
- Salvi 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 Méd.*, 1999; 159: 702-709.
- Samet JM, Lange P. Longitudinal studies of active and passive smoking. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 1996; 154(6, part 2): S257-S265.
- Savitz DA, Feingold L. Association of childhood cancer with residential traffic density. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 1989; 15: 360-363.
- Seinfeld JH, Pandis SN. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, 1998. New York: Wiley.
- Schreider JP, Culbertson MR, Raabe OG. Comparative pulmonary fibrogenic potential of selected particles. *Environ. Res.*, 1985; 38: 256-274.
- Sekhon HS et al. Prenatal nicotine increases pulmonary alpha7 nicotinic receptor expression and alters fetal lung development in monkeys. *Journal of Clinical Investigation*, 1999; 103: 637-647.
- Shi JP, Mark D, Harrison RM. Characterization of particles from a current technology heavy-duty diesel engine. *Environ. Sci. Technol.*, 2000; 34: 748-755.
- Takenaka S, Karg E, Roth C et al. Pulmonary and systemic distribution of inhaled ultrafine silver particles in rats. *Environ. Health Perspect.*, 2001; 109: 547-551.
- Terrasón et al. Meteorological years available for use under the review of the National Emission Ceilings Directive (NECD) and the Gothenburg Protocol. In: *Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe in 2003*. Kjeller, Norwegian Institute for Air Research. EMEP Report 1, 2005. [http://www.emep.int/publ/common\\_publications.html](http://www.emep.int/publ/common_publications.html), accédé le 15/12/2006
- Thompson AJ et al. Acute asthma exacerbations and air pollutants in children living in Belfast. *Arch Environ Health*, 2001; 56 (3): 234-241.
- Van Eeden SF et al. Cytokines involved in the systemic inflammatory response induced by exposure to particulate matter air pollutants (PM10). *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 2001; 164: 826-830.
- Von Klot et al. Ambient Air Pollution Is Associated With Increased Risk of Hospital Cardiac Readmissions of Myocardial Infarction Survivors in Five European Cities. *Circulation*, 2005; 112: 3073-3079.

Wallace L. Ue particules from a vented gas clothes dryer. *Experimental and Toxicology Pathology*, 2005; 57(1): 19–29.

Watkiss et al. CAFE CBA: Baseline Analyses 2000 to 2020, 2005. Baseline Scenarios for Service Contract for carrying out cost-benefit analysis of air quality related issues, in particular in the clean air for Europe (CAFE) programme. Document téléchargeable sur : [http://ec.europa.eu/environment/air/cafecba/activities/pdf/cba\\_baseline\\_results2000\\_2020.pdf](http://ec.europa.eu/environment/air/cafecba/activities/pdf/cba_baseline_results2000_2020.pdf), accédé le 2/11/2006

Wertheimer N, Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology*, 1979; 109: 273–284.

Xiong C, Friendlander SK. Morphological properties of atmospherical aerosol aggregats. *Proc. Natl. Acad. Sci USA*, 2001; 98: 11851–11856.

Zanobetti A, Schwartz J. Are diabetics more susceptible to the health effects of airborne particles? *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2001; 164: 831–833.

Zhu Y et al. Concentration and size distribution of ultrafine particles near a major highway. *Journal of the Air and the Waste Management Association*, 2002; 52: 1032–1042.