

# L'aérosol atmosphérique. Caractéristiques physico-chimiques

P. Masclet<sup>1</sup> et H. Cachier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire TEPE (Transferts et Effets des Polluants dans l'Environnement), Équipe LESAM (Études des Systèmes Atmosphériques Multiphasiques), ESIGEC – Université de Savoie, 73376 Le Bourget du Lac, France

<sup>2</sup>Centre des Faibles Radioactivités CEA, Av. de la Terrasse, 91190 Gif-sur-Yvette, France

**Due to the lack of adequate analytical and sampling tools, atmospheric particles are still insufficiently well known in terms of physicochemical properties. After a brief review of their effects on climate and human health, their sources, nature, transport and removal are described.**

Les aérosols sont des constituants majeurs de l'atmosphère au même titre que les gaz. La diversité de leur composition est plus vaste que celle des gaz, et le nombre et la variété des sources sont importants. L'étude des aérosols est beaucoup moins avancée que celle des gaz en raison principalement du manque d'outils analytiques véritablement appropriés.

Les aérosols atmosphériques jouent un rôle important dans la modification des conditions de vie sur la terre. D'une part, ils contribuent à l'évolution du climat en intervenant sur le bilan radiatif terrestre. D'autre part ils peuvent être nocifs pour la santé humaine. Ces deux notions sont directement liées aux caractéristiques physico-chimiques de l'aérosol.

Avant de détailler ces caractéristiques physico-chimiques, il est donc nécessaire de rappeler brièvement les effets des aérosols sur le climat et sur la santé humaine.

## Effets sur le climat

Trois paramètres sont à prendre en compte pour comprendre l'influence de l'aérosol sur le climat [1] :

### *l'effet radiatif direct*

L'effet direct de l'aérosol concerne le bilan radiatif planétaire [2]. La lumière solaire est diffusée par les particules atmosphériques. Cette lumière, principalement constituée des longueurs d'onde visibles et proche ultraviolettes, est déviée par les aérosols, en arrivant dans les différentes couches de l'atmosphère, avant d'atteindre le sol. Il y a une perte de lumière de la lumière incidente. On peut considérer les aérosols comme des boules solides, inertes chimiquement, dont seule la taille intervient dans l'effet radiatif direct. La taille moyenne des aérosols est voisine du micron et du même ordre de grandeur que les longueurs d'onde des radiations lumineuses. L'influence du paramètre « taille » est

primordiale et longtemps on n'a considéré que ce paramètre pour estimer l'impact climatique des aérosols.

### *l'effet radiatif secondaire*

L'effet indirect climatique peut être décomposé en trois sous-effets :

- l'effet indirect radiatif lié à la profondeur optique de l'aérosol. Cet effet est de même nature que l'effet direct, mais il prend en compte la nature chimique de l'aérosol. La profondeur optique dépend principalement des espèces chimiques adsorbées à la surface de l'aérosol. La lumière solaire est différemment réfractée et absorbée suivant la nature et la concentration de ces composés chimiques. La quantité de lumière disponible pour les réactions photochimiques est modifiée par la présence de ces composés chimiques.
- l'effet indirect radiatif lié à l'albédo et à la présence des nuages. Ce paramètre est lié à la taille de l'aérosol et à sa composition chimique. Les substances chimiques peuvent favoriser ou défavoriser la formation des nuages et modifier l'albédo de l'aérosol. Les particules submicroniques (0,05 à 1 µm) se comportent comme des noyaux de condensation de nuages (appelés souvent CCN : cloud condensation nuclei). Si les composés présents en surface sont hydrophiles, la formation de gouttes d'eau autour de la particule atmosphérique est favorisée. S'ils sont hydrophobes la formation de gouttes d'eau est défavorisée. La couleur des composés intervient aussi sur l'albédo. Les composés noirs (souvent d'origine anthropique) absorbent la lumière, tandis que les composés clairs (les argiles par exemple) la reflètent.
- l'effet indirect impliquant l'ozone. Les substances organiques – surtout si elles sont présentes à la surface – peuvent interagir avec les oxydants de l'atmosphère par réactions hétérogènes chimiques ou photochimiques, modifiant ainsi le bilan des photooxydants dont l'ozone. On sait que les réactions photochimiques, avec les radicaux OH<sup>•</sup>, sont fréquentes avec les composés organiques particuliers [3]. Au même titre que les gaz, l'aérosol peut donc être un puits ou une source d'ozone. Ce dernier aspect, non contesté, est pourtant particulièrement mal connu.

Ces trois sous-effets indirects – tous liés à la présence de composés chimiques dans ou sur l'aérosol – ne sont pris en compte que depuis peu et leur connaissance reste encore très limitée.

Sous cet aspect l'aérosol doit être considéré comme une entité réactive et non inerte. Il en résulte un besoin accru de

connaissances sur la composition chimique précise de l'aérosol et sur la place des substances chimiques dans la particule.

Actuellement, on considère que l'effet de l'aérosol sur le climat est « négatif ». Il tend à compenser partiellement l'effet de serre dû au CO<sub>2</sub> notamment, et donc à abaisser la température de l'atmosphère. Son effet serait de 10 à 30 % (et de signe opposé) de celui du CO<sub>2</sub>. Mais les calculs sont sans cesse revus, car on inclut de nouvelles données dans les modèles. Pour comprendre et quantifier l'effet climatique de l'aérosol au niveau global (*Global change*), il est nécessaire de prendre en compte tous les types d'aérosol : aérosol marin, aérosol terrigène et aérosol de pollution [4]. Ceux-ci sont présentés brièvement dans le Tableau I.

### Effets sur la santé

Pour connaître les effets des aérosols sur la santé humaine, on peut se limiter à l'aérosol urbain appelé aussi aérosol de pollution [5].

Ces effets sont liés à la composition chimique et à la taille de l'aérosol. L'aérosol de pollution est principalement un aérosol fin. Sa courbe de distribution granulométrique est centrée sur 0,3 µm (Fig. 1). Cet aérosol est dit « respirable », car seules les particules inférieures à 2,5 µm peuvent pénétrer profondément dans le système respiratoire humain et se déposer dans les alvéoles pulmonaires. Souvent la prise en compte des effets sur la santé des aérosols est limitée à la connaissance de la concentration d'aérosols (en masse ou en nombre), pour les particules de taille inférieures à 2,5 µm (PM 2,5). La pénétration dans l'organisme de l'aérosol est liée aussi à la forme des particules. Ainsi, les effets sont fort différents suivant que la particule est sphérique, en forme de bâtonnet ou en forme d'aiguille.

Les effets toxiques ou cancérogènes des aérosols sont dus aussi aux composés chimiques présents dans cet aérosol. Les substances néfastes sont les métaux lourds et certains composés organiques comme les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) et les PCB (polychlorobiphényles). Par exemple, les effets des substances organiques, souvent appelées semi-persistantes en raison de leur hydrophobicité et leur faible réactivité, sont peu connus, même si on sait que des HAP comme le benzo [a] pyrène (BaP) ont des effets cancérogènes importants (cancer du poumon, de la peau, de la vessie, etc.). Le plus souvent ces effets n'ont été réellement démontrés que par des tests *in vitro*, qui ne sont sans doute pas totalement représentatifs des effets réels sur l'homme.

### Sources d'aérosol

De façon schématique, on peut distinguer deux types d'aérosols : l'aérosol naturel et l'aérosol de pollution.

La part de chacun des deux types dépend de l'éloignement des centres d'activité humaine et industrielle et de la proximité des zones non habitées, désertiques et marines, très peu polluées mais qui sont souvent des zones de fortes émissions d'aérosols naturels [6].

**Tableau I. Distribution en masse et nombre de particules atmosphériques.**

Aérosol	Concentration en masse µg/m <sup>3</sup>	Concentration en nombre cm <sup>-3</sup>	Taille moyenne µm
urbain	100	30 000	0,10
terrestre	40	5 000	1,20
maritime	10	500	0,56
fond (polaire)	1	25	0,57

En zones marine, polaire et désertique, l'aérosol est essentiellement naturel, mais les apports anthropiques, s'ils restent encore faibles à ce jour, ne sont pas négligeables. En revanche, en zone urbaine l'aérosol de pollution est toujours mélangé avec l'aérosol naturel.

### Les aérosols naturels

Les aérosols naturels ont quatre sources principales :

- *la source terrigène*

L'aérosol terrigène (ou crustal) est généré par l'érosion éolienne des sols. Lorsque le vent dépasse trois mètres par seconde, les composés crustaux sont arrachés du sol. La quantité d'aérosol injectée dans l'atmosphère est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Cet aérosol est principalement constitué d'oxydes métalliques (fer, manganèse) et d'aluminosilicates (oxydes d'aluminium et de silicium). On trouve aussi des composés organiques provenant des débris de plantes et de l'humus.

- *la source marine*

L'aérosol marin est produit par le spray océanique. Sous l'action des vagues déferlantes, des gouttelettes d'eau de grosse taille sont projetées dans l'atmosphère (phénomène de *bubbling*). Après évaporation de l'eau de mer, les sels marins solides se retrouvent dans l'atmosphère et constituent des aérosols. Au niveau global ce type d'aérosol domine largement. Il est à l'origine de la formation des pluies sur les océans. La composition chimique de cet aérosol est proche de celle de l'eau de mer. On retrouve donc essentiellement du chlore et du sodium, mais aussi de grandes quantités de nitrates et de sulfates. Ce sulfate est formé par oxydation du SO<sub>2</sub>, qui provient lui-même de l'oxydation du diméthylsulfure émis par les algues. Il est appelé SS (sea sulfate). L'aérosol marin ne contient qu'une faible part de composés organiques.

- *la source volcanique*

L'aérosol volcanique est injecté dans l'atmosphère, non pas de façon continue comme les deux précédents, mais par bouffées. Il est constitué de métaux et de sulfates provenant de la conversion du SO<sub>2</sub> gazeux, émis en abondance par les volcans. Cet aérosol se retrouve principalement dans la stratosphère, car la force de propulsion verticale est très forte. Les apports troposphériques sont faibles et on ne prendra pas en compte cette source.

• la source biogénique

L'aérosol biogénique provient, d'une part de l'émission directe d'hydrocarbures lourds par les plantes et les arbres et d'autre part de l'oxydation atmosphérique d'hydrocarbures biogéniques plus légers comme l'isoprène. On trouve aussi des cires vasculaires (esters) à haut poids moléculaire. Cet aérosol est donc quasi exclusivement organique, même si on trouve aussi du potassium.

**L'aérosol anthropique ou aérosol de pollution**

Il a deux sources :

- une source directe (aérosol primaire) et,
- une source physico-chimique (aérosol secondaire).

L'aérosol primaire est émis directement sous forme solide. Il représente de 20 à 30 % de l'aérosol de pollution. Il est constitué essentiellement de particules carbonées, non fonctionnalisées, comme les débris de pneus ou de charbon et de particules métalliques comportant du plomb, du zinc, du fer, du cuivre, du vanadium, etc. On trouve aussi des HAP et des PCB. Ces composés minoritaires en masse sont toxiques ou cancérogènes.

L'aérosol secondaire (70 à 80 %) est produit par condensation des vapeurs émises. Cette transformation physique s'accompagne le plus souvent d'une oxydation photochimique. Les vapeurs gazeuses se condensent ou nucléent, lorsque la pression de vapeur excède le point de saturation. Il se forme des particules de très petites tailles, qui grossissent par coagulation ou fixation de la vapeur d'eau. Cet aérosol est appelé « aérosol de conversion ». Il provient des rejets industriels ou véhiculaires et des gaz émis par les combustions du bois et des combustibles fossiles. Il est principalement formé de matière organique fonctionnalisée et de sulfates.

Comme la conversion s'accompagne souvent d'une oxydation, on retrouve beaucoup de composés oxygénés. La matière organique particulaire (POM) se forme par oxydation des COV. Les sulfates résultent de la conversion et de l'oxydation du SO<sub>2</sub> anthropique émis par les usines ou les centrales thermiques. Ce sulfate est appelé NSS (non sea sulfate).

**Dispersion et dépôt des aérosols**

Par mouvement de convection, les particules quittent les basses couches de l'atmosphère et montent en altitude (2 à 4 km d'altitude). Elles sont dispersées et diluées et sont transportées sur de très longues distances, en voyageant dans la troposphère libre. La longueur du voyage est inversement proportionnelle à la taille des particules.

Les grosses particules (> 5 µm) sédimentent souvent rapidement et ne se déplacent pas au delà de 500 km. Néanmoins, lors d'événements particuliers comme les fronts atmosphériques tropicaux, elles peuvent voyager beaucoup plus loin (5000 km). C'est pourquoi on retrouve parfois en Europe des poussières sahariennes (les poussières rouges, constituées d'aluminosilicates de grandes tailles – environ 10 µm). Ces apports sont liés à des événements pulsés.

Les fines particules présentes dans le mode dit « accumulation » ont des tailles voisines de 0,1 µm. Elles peuvent être transportées sur de très longues distances et même faire le tour de la terre. C'est pourquoi, depuis 20 ans, on retrouve, en Arctique et en Antarctique, des poussières provenant des régions industrielles. Notons que la contamination de l'atmosphère, par les aérosols, devient générale, en raison du transport de ces fines particules.

Après leur transport, les aérosols finissent par se redéposer, soit par dépôt sec continu (gravité), soit lors des épisodes pluvieux ou neigeux. Les substances solubles telles que les sulfates se redéposent presque exclusivement par ce second mécanisme. La vie de l'aérosol est caractérisée par son temps de résidence atmosphérique. Celui-ci est en moyenne de 10 jours mais, comme on l'a vu, il varie beaucoup suivant la taille et la composition de l'aérosol. Ce chiffre est d'ailleurs contesté.

**Données sur les concentrations**

Un aérosol est caractérisé par sa masse par unité de volume, par le nombre de particules par unité de volume *N* et par la distribution en taille ( $d\text{Log}N/dD_p$ ) où *N* est le nombre de particules et *D<sub>p</sub>* le diamètre aérodynamique moyen. Ces paramètres varient fortement suivant la zone étudiée et suivant la nature de la source dominante d'aérosols.

Le tableau I présente quelques valeurs repères. Le nombre de particules par classe de taille (dit aussi densité) est maximal pour les fines particules. En revanche la masse est surtout due aux particules de grande masse donc de grande taille. La masse volumique des aérosols est assez constante et voisine de 1,7. En fait elle est comprise entre 1,0 et 2,8.

La distribution en taille est souvent bimodale, c'est-à-dire qu'elle présente deux maxima : l'un est centré vers 3 µm et correspond principalement aux aérosols naturels (sels marins et aérosols terrigènes) (Fig. 1). L'autre est centré sur 0,3 µm et dû à la conversion et à la condensation des vapeurs, donc correspond plutôt à l'aérosol de pollution.

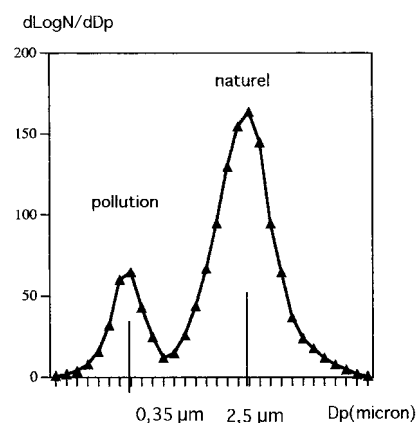


Figure 1. Distribution granulométrique de l'aérosol atmosphérique.

### Bilan des émissions d'aérosols

Le tableau II présente le bilan des émissions d'aérosols dans le monde (chiffres de 1991). La masse totale d'aérosols est de 2370 Tg. an<sup>-1</sup>. Seuls 410 Tg. an<sup>-1</sup> sont anthropiques. Cette fraction de pollution est néanmoins la plus intéressante car elle est suffisante pour perturber le climat. De plus c'est évidemment la seule potentiellement toxique.

### Modes de formation des aérosols

La plupart des aérosols sont émis directement dans l'atmosphère sous forme solide. C'est toujours le cas des sels, des métaux, des oxydes métalliques, des aluminosilicates et du carbone. En revanche, la matière organique particulaire et les sulfates sont souvent produits photochimiquement.

Nous rappelons seulement ici les modes de formation photochimique des aérosols. Nous présentons deux exemples :

- la formation du sulfate à partir du dioxyde de soufre,
- la formation des acides organiques à partir des COV.

Ces deux phénomènes impliquent la participation des radicaux atmosphériques (OH° principalement) et nécessitent donc de la lumière.

#### Formation photochimique des sulfates

On distingue quatre étapes de réaction lors de la formation de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

1. oxydation du SO<sub>2</sub> gazeux par le radical OH°



2. oxydation du radical formé par le dioxygène



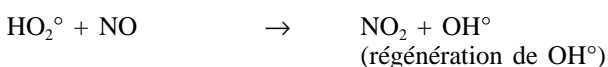
3. dissolution du SO<sub>3</sub> gazeux et formation d'acide sulfurique liquide



4. cristallisation du sulfate, le plus souvent sous forme de sulfate d'ammonium :



La seconde étape permet de régénérer le radical OH° qui est en fait un catalyseur de la réaction. En milieu pollué, en présence de monoxyde d'azote, il se forme du dioxyde d'azote qui se photolyse en ozone :



La photochimie des aérosols est donc directement liée à celle des gaz.

Tableau II. Flux d'émission des aérosols atmosphériques.

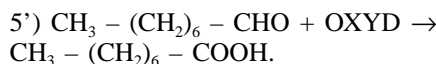
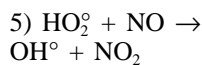
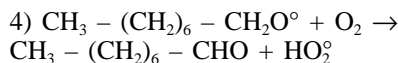
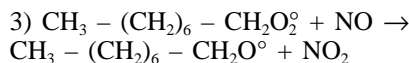
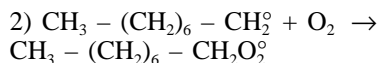
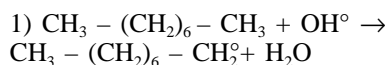
Nature de l'aérosol	Flux global (Tg. an <sup>-1</sup> )
sels de mer	1000
érosion des roches	500
volcans	25
feux de forêts	35
sulfates naturels	245
sulfates de pollution	220
nitrate naturels	75
nitrate de pollution	40
hydrocarbures (terpènes)	75
hydrocarbures de pollution	15
processus industriels	100

\* (1 Tg = 10<sup>12</sup> g = 10<sup>6</sup> tonnes).

#### Formation des acides organiques particulières

Les émissions industrielles ou naturelles d'hydrocarbures peuvent conduire à des aérosols, si le composé initial comporte plus de 5 ou 6 atomes de carbone. Les produits d'oxydation sont des acides et/ou des aldéhydes. Les réactions sont complexes et comportent de très nombreuses étapes.

À titre d'exemple les principales étapes de l'oxydation photochimique de l'octane (composé majeur émis par l'essence) sont :



Ce dernier composé est solide en raison de l'abaissement de la tension de vapeur. Il y a donc encore simultanément oxydation photochimique et conversion gaz particule.

#### Composition chimique de l'aérosol

L'aérosol est constitué de quatre fractions majeures :

- fraction minérale soluble (dans l'eau),
- fraction minérale insoluble,
- fraction carbonée,
- fraction organique.

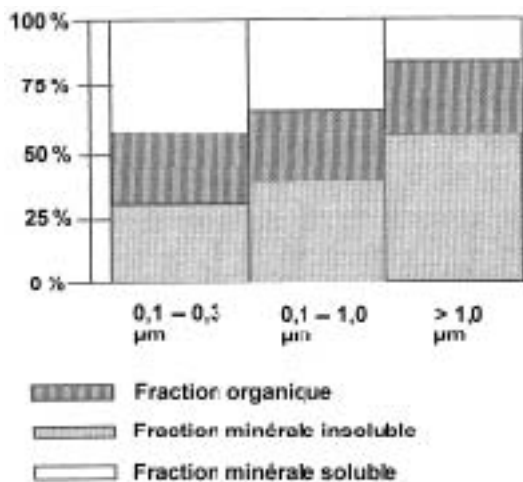


Figure 2. Proportions relatives des fractions inorganiques et organiques, solubles et insolubles, en fonction de la taille de la particule.

La répartition des fractions diffère de façon importante suivant la taille des particules. Ainsi la fraction insoluble augmente régulièrement quand la taille augmente. La fraction soluble dans l'eau diminue quand la taille augmente. L'importance relative des fractions carbonées et organiques varie beaucoup mais la somme de ces deux fractions reste approximativement constante (Fig. 2).

**La fraction inorganique**

Un exemple de composition chimique est donné pour un aérosol collecté en Allemagne (Tab. III)

Les anions les plus abondants sont les sulfates, les nitrates et les chlorures. On trouve aussi des bromures. Les cations les plus abondants sont l'ammonium, les ions alcalins (sodium principalement) et les alcalino-terreux (calcium notamment). Ces ions proviennent surtout de la source marine. Le plus souvent ces composés très solubles dans l'eau (cas du sulfate) favorisent la captation de l'eau atmo-

Tableau III. Concentration moyenne de l'aérosol inorganique à Karlsruhe (Allemagne).

Anions, cations et éléments de l'aérosol	Concentrations (µg m <sup>-3</sup> )
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	16,7
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9,7
Cl <sup>-</sup> + Br <sup>-</sup>	1,3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	6,9
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	4,0
Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>	1,4
Al	6,4
Si	21,1
Fe	3,8

sphérique donc la formation des nuages. On trouve aussi des éléments insolubles ou moins solubles tels que les aluminosilicates, le manganèse et les métaux de transition tels que le fer, provenant principalement de la source terrigène, mais aussi des industries métallurgiques. Certains éléments comme les métaux lourds ou les métaux de transition sont en traces. C'est le cas du vanadium qui provient du fuel, du chrome ou du cobalt qui proviennent de certaines industries, du zinc ou de l'étain qui proviennent des incinérateurs de déchets et enfin du plomb qui provient de l'essence (même si ce métal est de moins en moins utilisé).

Ces éléments sont très souvent toxiques.

Les sulfates sont souvent associés au cation NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (à raison de 80 %). Comme la balance ionique est en faveur des anions, il existe un déficit de charge positive, compensé par l'apport des ions H<sup>+</sup>. Ce phénomène explique que l'aérosol – et donc les pluies ou neiges formées autour de l'aérosol après captation de la vapeur d'eau – présente toujours un pH acide. Le pH est souvent voisin de 5. Il peut descendre à 4 pour certains types de neige.

**La fraction carbonée**

Elle est constituée de carbone amorphe appelé aussi « carbone suie » ou « black carbon ». Ce carbone non fonctionnalisé et hautement polymérisé est non réactif. Sa couleur noire domine dans l'aérosol de pollution [7]. Il provient de toutes les combustions (combustion fossile et combustion de la biomasse) et des débris de matériaux carbonés relargués par les activités humaines, comme les fragments de pneus.

**La fraction organique**

La conversion Gaz/Particule des polluants organiques gazeux (COV) est la troisième source d'aérosols. En terme de chimie, la composante organique de pollution n'est donc pas prépondérante, mais en terme de toxicité, ces composés présentent un danger sanitaire, au contraire de l'aérosol naturel.

Dans tous les types d'aérosol on retrouve les familles organiques suivantes [8,9] :

- les hydrocarbures aliphatiques : alcanes, alcènes, cycloalcanes et cycloalcènes. Cette famille est majoritaire (environ 40 %),
- les esters (environ 25 %),
- les dérivés des hydrocarbures aromatiques monocycliques, les hétérocycles et les terpènes (environ 15 %),
- les alcools, les cétones, les éthers et les acides (mono ou dicarboxyliques) (15 %),
- les composés présentant des hétéroatomes (chlore, azote, phosphore, soufre) (variable en %),
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) auxquels on rattache les PCB (environ 3 %).

La matière organique particulaire est constituée de composés à chaîne longue ou semilongue (de 8 à 30 atomes de carbone) [10,11]. En conséquence on trouve une grande variété de propriétés physico-chimiques. D'ailleurs, à ce jour, on ne sait pas si la matière organique est plutôt hydrophile ou plutôt hydrophobe, donc si elle favorise ou non la formation des nuages.

La concentration en matière organique varie très fortement suivant le lieu de prélèvement de l'aérosol. Elle s'étend de 100 ng m<sup>-3</sup> pour l'aérosol de fond à 2 µg m<sup>-3</sup> pour l'aérosol rural ; elle peut atteindre 500 µg m<sup>-3</sup> en milieu très pollué.

Une composition moyenne de l'aérosol organique en milieu continental est donnée dans le tableau IV (données de Karlsruhe).

### Aérosol de pollution

La fraction inorganique (40 % de la masse totale en moyenne) est riche en sels de mer et en aluminosilicates, mais on retrouve aussi en abondance tous les métaux [12]. Les sulfates et les nitrates dominent. Le sulfate est un mélange de sulfate marin (SS) et de sulfate anthropogénique (NSS) provenant de la conversion du SO<sub>2</sub>.

Dans cet aérosol on note la présence de quantités importantes de HAP. Ces derniers composés sont particulièrement intéressants car ils sont persistants et souvent très fortement cancérigènes. Comme ils sont associés à de fines particules, leurs effets sur la santé sont particulièrement néfastes. Les HAP sont des produits de combustion, provenant des combustions industrielles, du chauffage domestique (fuel et charbon), des émissions véhiculaires (diesel et essence). Ils sont aussi produits par les feux de biomasse (bois, herbes, etc.) et on les trouve en abondance dans les pays peu industrialisés (Afrique, Asie) où la déforestation et les brûlis de savane concernent de très vastes surfaces. Ces pays sont donc aussi pollués par les HAP [13].

La concentration globale de HAP est comprise entre 5 et 100 ng m<sup>-3</sup>. Les concentrations varient beaucoup avec le cycle journalier et le cycle saisonnier. En milieu urbain, les concentrations les plus élevées sont observées en hiver et le matin vers 8 h. Les HAP les plus abondants sont le fluoranthène, le pyrène, les benzofluoranthènes, le benzo [ghi] perylène, l'indénopyrène et le coronène. Ces composés ne sont pas inertes et peuvent se transformer par réactions photochimiques, même si les cinétiques sont lentes. Les principales réactions connues sont les oxydations photochimiques par les radicaux OH° et NO<sub>3</sub>° qui conduisent à des nitro HAP [14]. Ces composés sont encore plus cancérigènes que les HAP parents, mais les concentrations n'excèdent généralement pas 0,1 ng m<sup>-3</sup>, sauf lors des forts épisodes de pollution photochimique, tels que ceux enregistrés à Los Angeles.

### Structure de l'aérosol

La figure 3 synthétise la vision actuelle de la constitution de l'aérosol de pollution. Notons que cette approche reste partiellement spéculative, en raison de l'absence de preuves définitives.

L'aérosol semble donc être constitué :

- d'un cœur formé de carbone suie (carbone amorphe) et de métaux (ou oxydes métalliques). La couleur noire domine,

Tableau IV. Concentration moyenne de la fraction organique particulaire à Karlsruhe (Allemagne).

Familles organiques de l'aérosol	Concentrations (ng m <sup>-3</sup> )
alcanes	150
aromatiques	75
terpènes	45
HAP	10
alcools	200
acides carboxyliques	150
esters	40
formaldéhyde polymérisé	40

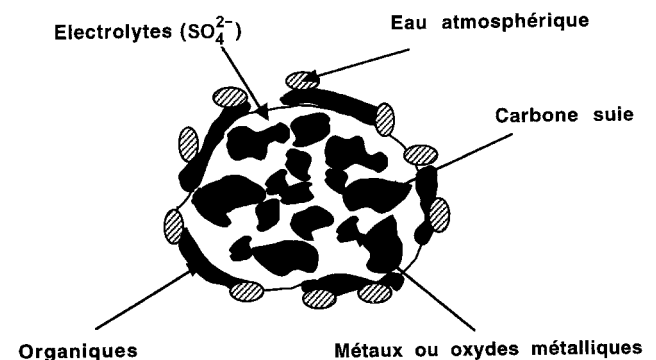


Figure 3. Structure de l'aérosol.

- d'une couverture épaisse d'électrolytes hydrosolubles tels que les sulfates,
- de composés organiques déposés sur cette couche d'électrolytes. Ces composés proviennent des gaz adsorbés (COV) ayant ou non réagi photochimiquement. À l'heure actuelle on ne connaît pas l'épaisseur de cette couche et on ne sait pas si cette couche est continue ou non,
- de l'eau à l'extérieur de la particule ayant partiellement solubilisé l'électrolyte. Elle est attachée aux composés organiques par les fonctions hydrophiles de ces derniers.

Dans ce schéma on voit l'importance des composés à la surface de l'aérosol, tant du point de vue climatique que du point de vue sanitaire, puisque ces composés sont à l'interface aérosol-monde extérieur. En raison de leur accessibilité et de leur éventuelle réactivité, ces composés réagissent avec les autres constituants de l'atmosphère lors de réactions hétérogènes. Ils peuvent aussi facilement « passer » dans l'organisme humain. S'ils sont toxiques, ils sont dangereux même aux faibles concentrations.

### Conclusion

L'aérosol a une part prépondérante dans la pollution atmosphérique. Son influence sur l'évolution du climat et son

impact sur la santé ne sont plus à démontrer. Mais les approches restent souvent assez qualitatives en raison du manque de données. Il est nécessaire de connaître la taille et la composition chimique des particules pour les différentes tailles.

L'acquisition de données complètes pour tous les types d'aérosol est en cours mais souvent les scientifiques se heurtent à des difficultés lors du prélèvement ou lors de l'analyse quantitative. Enfin, on sait que les processus réactionnels hétérogènes sont aussi importants que les réactions en phase gazeuse homogène mais il y a un manque total de données cinétiques en phase hétérogène et rien ne permet de penser que cette lacune va être comblée rapidement. L'étude des aérosols reste donc pour les scientifiques de l'atmosphère, un sujet plein d'avenir.

### Références

1. Penner, J. E.; Novakov, T. *J. Geophys. Res.* **1996**, *101*, 19373-19378.
2. Gotz, G.; Mezarios, E.; Vali, G. *Atmospheric particles and nuclei*, Budapest, 1991.
3. Grosjean, D.; Friedlander, S. K. *Adv. Env. Sci. Technol.* **1980**, *9*, 435-473.
4. Heintzenberg, J.; Covert, D. S. *J. Atm. Chem.* **1990**, *10*, 383-397.
5. Thurston, G. D. *J. Exp. Anal. Env. Epidemiol.* **1996**, *6*, 3-21.
6. Cass, G. R. *Inhalation Toxic.* **1995**, *7*, 765-768.
7. Cachier, H. *J. Geophys. Research* 1996 ; p 215-223.
8. Shauer, J. J.; Rogge, W. F.; Hildemann, L. M.; Mazurek, M. A.; Cass, G. R.; Simoneit B. R. T. *Atm. Env.* **1996**, *30*, 3837-3855.
9. Masclet, P.; Hoyau, V.; Suarez, J. *J. Atm. Chem.* 1998, sous presse.
10. Simoneit, B. R. T. *Intern. J. Env. Anal. Chem.* **1986**, *23*, 207-237.
11. Simoneit B. R. T.; Mazurek M. A. *Aeros. Sci. Technol.* **1989**, *10*, 267-291.
12. Janssen, N. A. H.; van Mansom, D. F. M.; van der Jagt, K.; Harssema, H.; Hoek, G. *J. Atm. Chem.* **1997**, *31*, 1185-1193.
13. Masclet, P.; Cachier, H.; Liousse, C.; Wortham, H. *J. Atm. Chem.* **1995**, *22*, 41-54.
14. Ciccioli, P.; Cecinato, A.; Brancaleoni, E.; Frattoni, M.; Zacchei, P.; Miguel, A. H.; de Castro Vasconcellos, P. *J. Geophys. Res.* **1996**, *101*, 19567-19581.