



Poussières fines

Questions et réponses concernant les propriétés, les émissions, les immissions, les effets sur la santé et les mesures

État en mars 2015

Table des matières

<i>Définitions</i>	2
<i>Propriétés</i>	4
<i>Emissions</i>	8
<i>Immissions</i>	10
<i>Valeurs limites d'immission</i>	18
<i>Effets sur la santé</i>	21
<i>Mesures</i>	25
<i>Bibliographie</i>	29
<i>Annexe A</i>	31
<i>Annexe B</i>	33

Définitions

- **Carbone particulaire total (CT):** somme du carbone élémentaire (CE) et du carbone organique (OC). Mis à part la suie, il comprend aussi les particules organiques secondaires qui se forment dans l'atmosphère ainsi que de la matière biologique.
- **COVNM:** composés organiques volatils non méthaniques (« hors méthane »)
- **Diamètre aérodynamique:** comme les particules en suspension dans l'air peuvent présenter des formes et des densités variables, il n'est pas aisé de leur attribuer un diamètre. Le diamètre aérodynamique est une grandeur qui se prête à la description d'une série de processus. Il correspond au diamètre qu'une particule sphérique d'une densité de 1 g/cm³ devrait avoir pour présenter la même vitesse de chute dans l'air que la particule concernée.
- **HAP ou PAH:** hydrocarbures aromatiques polycycliques ou « polycyclic aromatic hydrocarbons » (p. ex. le benzo[a]pyrène)
- **LPE:** Loi fédérale sur la protection de l'environnement, RS 814.01
- **Matière organique (MO):** les méthodes traditionnelles d'analyse chimique ne mesurent que la part de carbone (OC) de la matière organique. Pour prendre en compte les autres atomes (notamment l'hydrogène, l'azote et l'oxygène) dans le bilan massique, on multiplie la valeur de OC par un facteur de conversion. Le facteur utilisé dans la présente publication est 1,6 (MO = 1,6 * OC).
- **NH₃:** ammoniac
- **NO_x:** oxydes d'azote
- **OPair:** Ordonnance sur la protection de l'air, RS 814.318.142.1
- **Particules fines:** particules de poussière d'un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm.
- **Particules grossières:** particules de poussière d'un diamètre aérodynamique se situant entre 2,5 µm et 10 µm.
- **Particules primaires:** particules de poussière qui entrent directement dans l'air en tant que telles.
- **Particules secondaires:** particules de poussière qui se forment dans l'atmosphère à partir de précurseurs gazeux (avant tout SO₂, NO_x, NH₃, COVNM).
- **Particules ultrafines:** particules de poussière d'un diamètre aérodynamique inférieur à 0,1 µm.
- **PM10 (« Particulate matter »):** particules d'un diamètre aérodynamique ≤ 10 µm (plus précisément, particules passant un orifice qui présente un degré de 50 % d'efficacité de séparation des particules d'un diamètre aérodynamique de 10 µm).
- **PM2.5:** particules d'un diamètre aérodynamique ≤ 2,5 µm (plus précisément, particules passant un orifice qui présente un degré de 50 % d'efficacité de séparation des particules d'un diamètre aérodynamique de 2,5 µm).
- **SO₂:** dioxyde de soufre

- **Suie**: elle comprend toutes les particules primaires contenant du carbone issues de combustions incomplètes; elle est composée avant tout de carbone élémentaire (**CE**, noir) et de composés organiques mesurés en tant que carbone organique (« organic carbon », **OC**). Dans le domaine des immissions, le carbone élémentaire est souvent appelé suie (p. ex. dans la 23^e ordonnance fédérale allemande sur la protection contre les immissions - BImSchV).
- **TSP (« Total suspended particulate matter »)**: poussières en suspension dont la vitesse de chute est ≤ 10 cm/s; particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à 57 μm (micromètre).

Propriétés

- **Comment les particules se forment-elles?**

On distingue les particules primaires, qui ont été émises directement en tant que telles, et les particules secondaires, qui se sont formées dans l'atmosphère à partir de précurseurs gazeux.

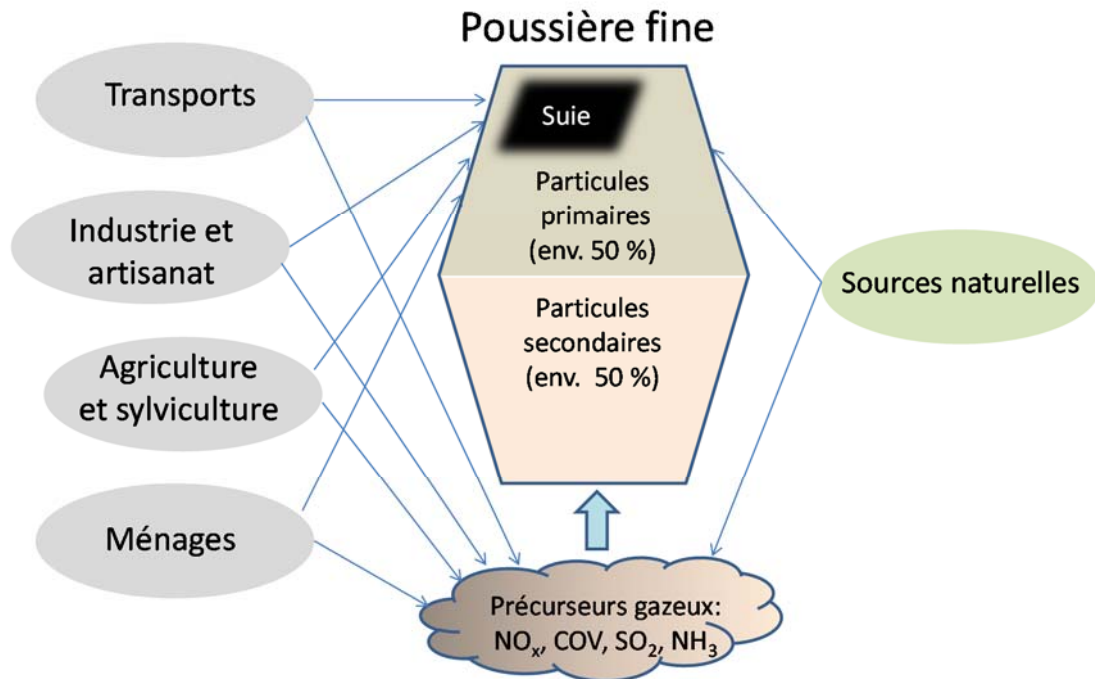


Figure 1 Représentation schématique simplifiée des poussières fines en Suisse à partir de leurs composantes primaires et secondaires, ainsi que leurs sources. La suie constitue une partie des poussières fines primaires.

Les particules primaires anthropiques se forment lors des processus de combustion; ce sont avant tout des particules ultrafines et fines d'un diamètre inférieur à environ $0,3 \mu\text{m}$ (p. ex. la suie). Les particules qui se forment par abrasion ou qui sont mises en suspension dans l'air ont en général un diamètre supérieur à $1-2 \mu\text{m}$. Les sources naturelles possibles sont le pollen, les embruns, l'érosion éolienne et les volcans. Les particules de grandeur moyenne (entre $0,1$ et $1 \mu\text{m}$) proviennent en majorité de sources secondaires et se forment par conversion gaz-particule à partir des précurseurs SO_2 , NO_x , NH_3 et COVNM.

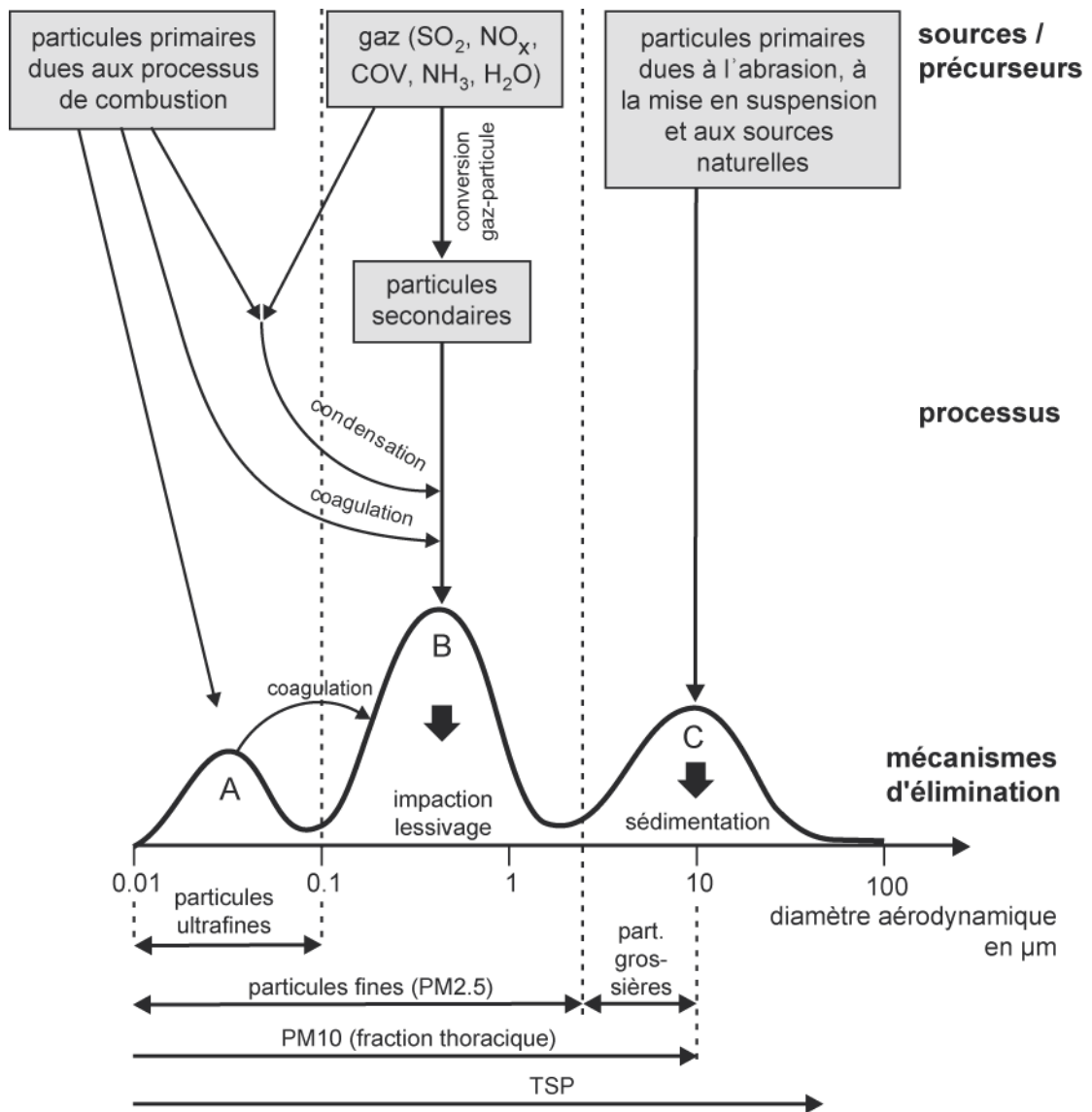


Figure 2 Représentation schématisée simplifiée de la distribution de taille des particules d'un aérosol atmosphérique proche des sources et les processus les plus importants. A: particules ultrafines, B: mode d'accumulation, C: particules grossières. Loin des sources, c'est le mode d'accumulation B qui prédomine.

- **Quelles sont les propriétés des aérosols qui sont significatives?**

La grandeur, la forme et la densité des particules en suspension dans l'air sont très variables. Le diamètre aérodynamique est une grandeur importante (cf. définitions). Il détermine en grande partie les processus ayant lieu dans l'atmosphère et qui seront significatifs pour les particules, ainsi que la durée de séjour de celles-ci. Les particules en suspension dans l'air peuvent être solides ou liquides et modifier leur état d'agrégation en fonction de l'air ambiant et de la température (p. ex. vaporisation de composés volatils). La composition chimique des particules est également déterminante, p. ex. pour leur réactivité et leur aptitude à fixer l'eau de l'atmosphère, ce qui leur permet de fonctionner comme germe de condensation pour les gouttelettes des nuages.

- **Comment la grandeur des particules atmosphériques se répartit-elle?**

On distingue 3 types de tailles:

- les particules ultrafines (diamètre aérodynamique de la particule $< 0,1 \mu\text{m}$),
- le mode d'accumulation ($0,1 - 1 \mu\text{m}$) et
- les particules grossières ($> 2,5 \mu\text{m}$).

On appelle particules fines la classe de taille inférieure à $2,5 \mu\text{m}$. Alors que les particules ultrafines ne représentent qu'une très faible partie de la masse des particules, elles sont de loin les particules les plus répandues dans l'atmosphère. Les particules grossières peuvent fortement contribuer à la masse des particules, mais leur nombre, comparé à celui des particules fines, est cependant très petit.

- **Que deviennent les particules après l'émission des particules primaires ou après la formation des particules secondaires?**

Les processus déterminants dépendent en premier lieu du diamètre des particules. Les particules supérieures à $10 \mu\text{m}$ sédimentent rapidement et sont ainsi éliminées de l'air. Les particules ultrafines ($< 0,1 \mu\text{m}$) ont de fortes vitesses de diffusion et coagulent en l'espace de quelques heures avec des particules plus grandes, se déposent en surface ou grandissent par condensation. En des endroits ne se trouvant pas à proximité immédiate d'une source importante, les particules du mode d'accumulation forment une part importante en masse de l'aérosol. Les mécanismes d'élimination ne sont pas très efficaces pour cette catégorie de taille, si bien que les particules peuvent rester plusieurs jours dans l'air et être transportées plus ou moins loin. Les particules de cette catégorie sont principalement éliminées de l'atmosphère par les précipitations, en partie par impaction. Il n'existe pas de processus efficaces permettant d'obtenir des particules grossières ($> 2,5 \mu\text{m}$) à partir des particules fines.

- **Que cela signifie-t-il pour la répartition de la masse des PM₁₀ en fonction de leur grandeur dans le cas des immissions?**

Les particules secondaires du mode d'accumulation se forment dans l'ensemble de la couche inférieure de l'atmosphère à partir des gaz précurseurs. Les particules primaires, en revanche, sont émises essentiellement sous forme de particules ultrafines (processus de combustion) ou de particules grossières (mécanismes d'abrasion) par des sources locales spécifiques et sont ensuite rapidement diluées. Pour les motifs invoqués ci-dessus et en raison de la relative rapidité d'élimination des particules ultrafines et des particules grossières de l'air, la distribution de taille est différente selon que l'on se trouve loin des sources ou à proximité de celles-ci. En des lieux éloignés de la source (aérosol « vieilli »), seul le mode d'accumulation atteint en général la masse maximum de manière

nettement visible. Le mode d'accumulation constitue environ la moitié de la masse des PM10 pour les aérosols « vieillis » (OFEV 2010).

- **Quelle est la composition chimique des PM10?**

La poussière est un mélange physico-chimique complexe. Elle comporte aussi bien des composants primaires émis que des composants secondaires formés. On peut distinguer les composants importants suivants:

	Composant	Précurseur / Cause
Composants primaires	suie (CE et OC primaire)	processus de combustion
	matériel géologique	construction, agric., trafic, vent
	métaux lourds	combustion, production
	particules formées par abrasion	effort mécanique
	matière biologique	spores de champignons, fragments de plantes
Composants secondaires	sulfates	dioxyde de soufre
	nitrates	oxydes d'azote
	ammonium	ammoniac
	matière organique (OC)	composés organiques volatils, tels que NMCOV

Tableau 1 Composition et sources des PM10

Emissions

- **Comment les émissions et les facteurs d'émissions des différentes sources sont-ils déterminés?**

On trouvera à l'annexe A des indications sur les méthodes utilisées pour déterminer les facteurs d'émissions des différentes sources. Relevons que seules les émissions de poussières fines primaires sont enregistrées, les particules secondaires ne faisant pas partie de ces facteurs d'émissions.

- **Combien de PM10 primaires les différentes sources émettent-elles en Suisse?**

En 2010, les émissions de PM10 primaires en Suisse se sont élevées à environ 19'000 tonnes (OFEV 2015). La figure ci-dessous indique la part que représentent les différents groupes de sources dans ces émissions. Outre l'industrie et les transports, l'agriculture et la sylviculture produisent une part considérable des émissions. S'agissant des ménages, on constate que les chauffages au bois, qui ne couvrent qu'une part minime des besoins en chaleur, dégagent beaucoup plus d'émissions que les chauffages au mazout ou au gaz, qui fournissent la majeure partie de l'énergie thermique consommée. En outre, les chauffages au bois et la combustion de déchets forestiers à l'air libre produisent de grandes quantités de poussières fines condensables qui ne sont pas comprises dans ces chiffres.

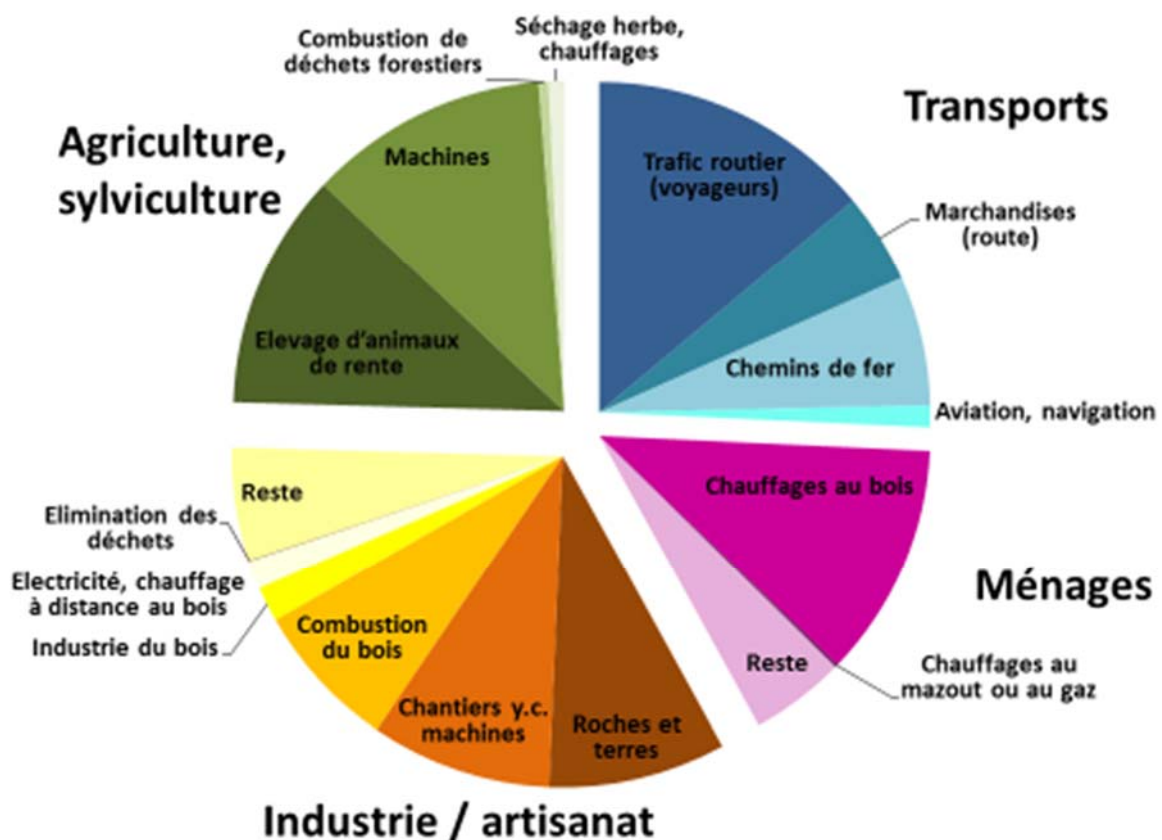


Figure 3 Part des différentes sources dans les émissions de PM10 primaires en Suisse en 2010.

- **Combien de PM10 sont formées à partir des gaz précurseurs?**

Il n'existe que des estimations sur la part des gaz précurseurs dans les immissions de PM10 (cf. p. 13).

- **Quelle est l'importance des émissions naturelles de PM10?**

Il n'existe que des estimations sur la part des PM10 naturelles dans les immissions de PM10 (cf. p. 14).

Immissions

- **Comment mesure-t-on les poussières fines présentes dans l'air?**

Il existe toute une série de méthodes de mesure pouvant servir à déterminer de manière sélective la grandeur des poussières en suspension ou certains de leurs composants. Parmi elles figurent les méthodes gravimétriques manuelles, qui consistent à recueillir des échantillons de poussière sur des filtres ou des feuilles, puis à les peser après les avoir conditionnés à l'humidité et la température prescrites. Quant aux méthodes automatiques, elles enregistrent en continu un signal qui ne correspond pas directement à une pesée selon la méthode de référence qu'est la gravimétrie manuelle. Le signal mesuré doit être converti en une concentration massique et vérifié par la méthode de référence. On trouvera à l'annexe B de plus amples informations sur diverses méthodes de mesure des immissions pour la masse des poussières fines et certaines de leurs composantes.

- **Comment la charge de PM10 se présente-t-elle en moyenne annuelle?**

Valeurs annuelles moyennes de PM10 caractéristiques pour la Suisse pour la période allant de 2009 à 2013 (source: mesures de PM10 faites par le réseau NABEL; cf. OFEV 2014b):

ville, site exposé au trafic	19 - 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
centre-ville	17 - 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
zone péri-urbaine	16 - 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
zone rurale au-dessous de 1000 m.	14 - 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
altitudes moyennes (1000 - 2000 m.)	7 - 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
haute montagne (Jungfraujoch)	2 - 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tableau 2 Moyennes annuelles de PM10 en différents types d'emplacement

- **Quelles sont les dépassements des valeurs limites de courte durée de PM10 qui ont été mesurées?**

Depuis que le réseau NABEL effectue des mesures des PM10, on constate que les moyennes journalières les plus élevées dépassent la valeur limite de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans la plupart des emplacements. La législation tolère un dépassement par année alors que la deuxième valeur journalière la plus élevée doit respecter la valeur limite.

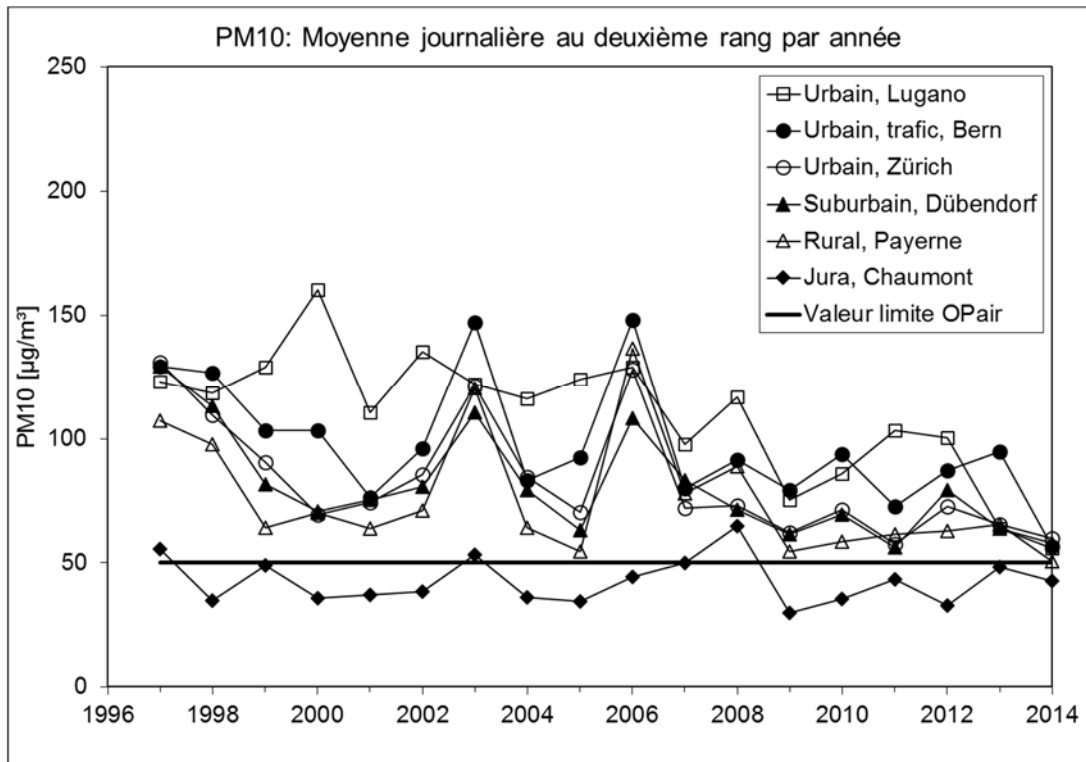


Figure 4 Évolution des deuxièmes moyennes journalières les plus élevées de PM10

- **Quelle a été l'évolution de la charge de PM10 au cours des 15 dernières années?**

Au sein du réseau NABEL, les mesures de PM10 ont débuté en 1997. Pour les années antérieures, il existe des mesures de TSP. Des mesures parallèles entre les PM10 et les TSP ont été réalisées en 1997 et 1998 (EMPA 1999). Elles attestent une corrélation élevée entre les deux grandeurs. Si l'on admet que la composition des poussières fines est restée similaire sur les divers sites, on peut convertir les séries de mesures de TSP à long terme en valeurs PM10 sans trop grand risque d'erreur.

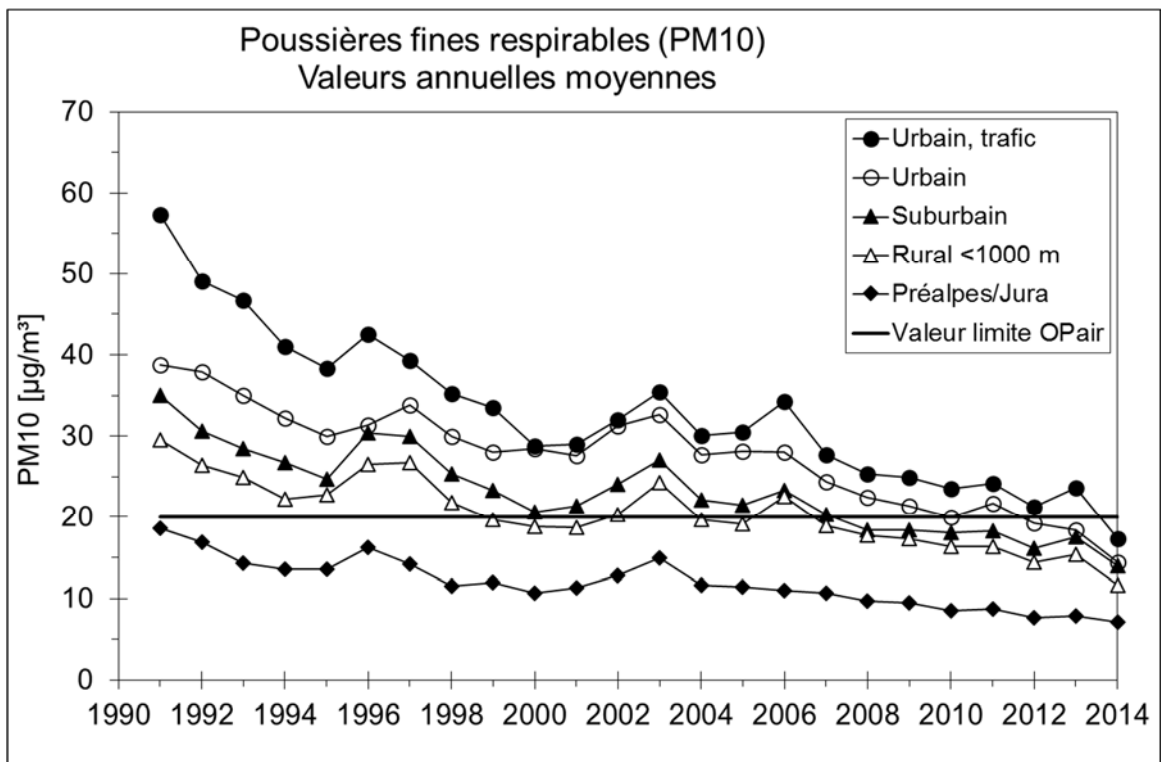


Figure 5 Évolution de la charge en PM10 selon les mesures effectuées par le réseau NABEL; les valeurs antérieures à 1997 sont converties à partir des mesures de TSP

La charge de PM10 s'est inscrite en recul à tous les emplacements depuis 1990. Une analyse des valeurs mensuelles moyennes fait apparaître une forte variation annuelle de la charge de PM10 en hiver, ce qui influence fortement la moyenne annuelle. Ceci est principalement dû à des situations fréquentes d'inversion thermique. Par conséquent, le nombre de jours affichant une charge de PM10 $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (dépassement de la valeur limite journalière) varie lui aussi fortement selon les années.

Les valeurs mesurées en 2014 sont plus basses que les valeurs des cinq dernières années en raison de situations météorologiques très instables avec de nombreuses perturbations, du vent et de la pluie, qui ont créé des situations favorables à la dispersion des polluants atmosphériques.

- **Quelles valeurs ont été mesurées au cours de l'épisode de smog hivernal en janvier et février 2006?**

En janvier et février 2006, deux périodes ont été marquées par des situations d'inversion à très basse altitude persistant longtemps. Les polluants émis dans la région à forte densité de population qu'est le Plateau, au nord des Alpes, se sont accumulés dans un volume d'air relativement limité, ce qui a entraîné une augmentation rapide des PM10 et des NOx. Les valeurs mesurées pour les PM10 aux emplacements du nord des Alpes situés à basse altitude atteignaient $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit les valeurs les plus élevées depuis 1997, année où ces mesures ont été initiées. Les stations du nord des Alpes situées au-dessus de la couche de brouillard élevé, ainsi que le sud des Alpes n'étaient en revanche pas touchés par cette situation de smog: les valeurs mesurées en janvier et février 2006 n'étaient pas supérieures à celles des années précédentes dans ces régions.

• **Quelle est la composition chimique de la charge des PM10 en Suisse?**

Les données suisses relevées dans le cadre d'un projet de recherche (Hüglin 2012) sont reproduites ci-après:

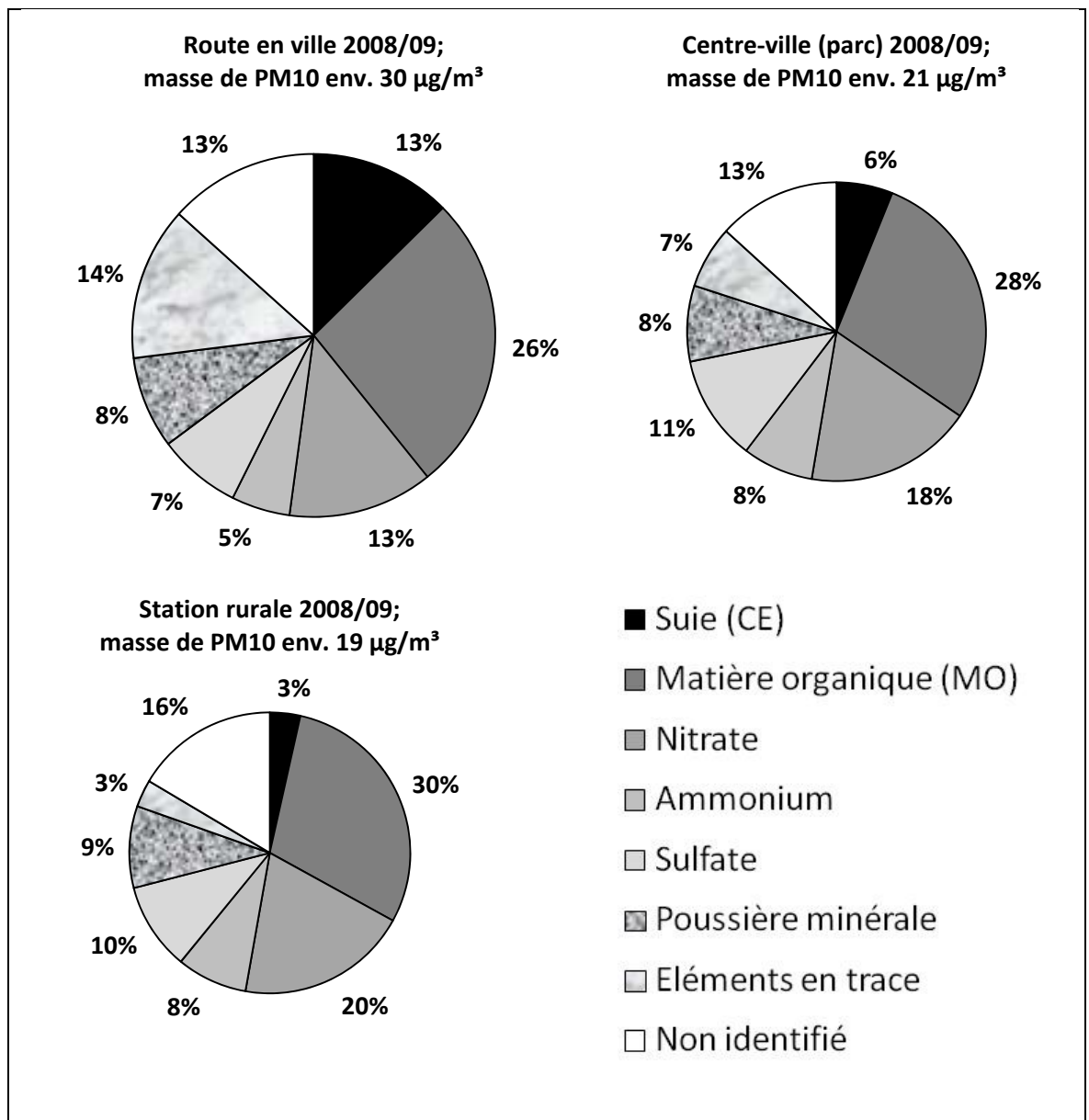


Figure 6 Composition chimique relevée sur différents sites de mesures

La part de « non identifié » contient notamment de l'eau. En résumé, on peut dire que l'ammonium, les nitrates et les sulfates constituent un tiers des PM10. Sur les sites routiers, il s'agit d'un quart. Si l'on y ajoute la matière organique secondaire (part de MO) et l'eau atmosphérique contenue dans la part non identifiée, on obtient une part d'aérosol secondaire de 50 % environ. Le carbone élémentaire et la matière organique en représentent, ensemble environ un tiers, un peu plus sur les sites routiers. La part massique des métaux lourds est très faible.

Si les sulfates et les suies ont fortement diminué par rapport au relevé précédent (1998/99), on ne constate aucune amélioration en ce qui concerne les nitrates.

En bordure de route, on trouve plus de particules ultrafines (suie) et de particules grossières (abrasion du revêtement routier et des freins, poussières de route

mises en suspension, salage des routes) qu'en zone rurale, alors qu'en chiffres absolus, la concentration des composants secondaires est analogue pour tout le Plateau suisse.

- **Y-a-t-il des mesures en continu des concentrations de suie en Suisse?**

De telles mesures de suie (resp. CE) sont effectuées en continu sur plusieurs sites du réseau NABEL depuis fin 2008. Dans des sites ruraux, les concentrations moyennes annuelles se situent entre 0,5 et 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dans les agglomérations elles s'élèvent à environ 1-2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et elles dépassent 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur les sites proches du trafic routier. Cela signifie que le trafic routier constitue l'une des sources principales des émissions de suies.

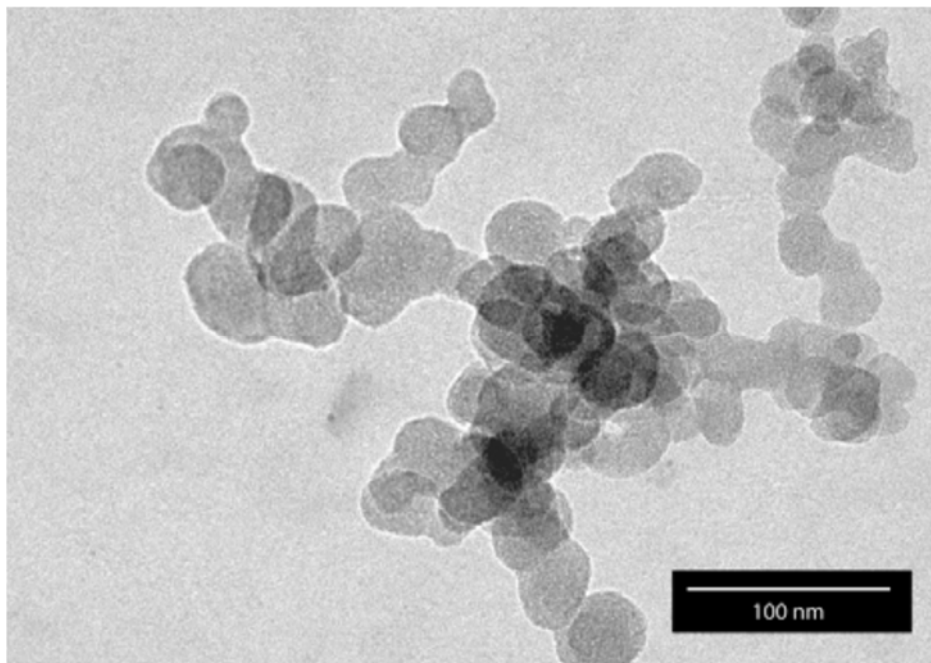


Figure 7 Agglomérat de suies de diesel

- **Quelle est la valeur de la charge de fond naturelle?**

D'une manière générale, la part moyenne de la charge de fond naturelle dans la valeur moyenne annuelle des PM10 se situe entre 1 et 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les sources naturelles peuvent être les suivantes:

le pollen, les embruns, l'érosion éolienne, les volcans.

Le pollen: la taille des grains étant la plupart du temps supérieure à 10 μm , il ne contribue que faiblement à la charge des PM10; celle des fragments de pollen et des spores peut toutefois être inférieure à 10 μm .

Les embruns: selon des études anglaises, la concentration des particules de sel marin est de 4 à 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aux emplacements proches de la côte et de 1,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ environ à l'intérieur des terres (Airborne Particles Expert Group 1999, Turnbull 2000). Des mesures datant du milieu des années quatre-vingt montrent que sur le Plateau suisse, les particules d'origine marine pourraient s'élever entre 0,5 et 0,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au maximum (Hertz 1988, Gälli Purghart 1988). De nouvelles mesures en Suisse (Hüglin 2000 et résultats non publiés) font apparaître des valeurs de sodium et de chlorure très basses en été (environ 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En hiver, les valeurs relevées sont nettement supérieures, ce qui est essentiellement dû à la mise en suspension du sel provenant du salage des routes.

L'érosion éolienne: joue un rôle surtout dans les zones arides ou semi-arides; elle n'a donc qu'une faible importance en Europe centrale. Chez nous, l'érosion éolienne peut jouer un rôle au-dessus des champs labourés. Elle doit cependant être qualifiée d'anthropique (tout comme les poussières sur les chantiers et ceux dus aux véhicules). Une partie des particules produites par cette érosion sont inférieures à 10 μm . Ceci a été en particulier mis en évidence lors d'épisodes de vents de sable en provenance du Sahara, qui sont toutefois rares en Europe centrale, où l'on a constaté que la taille maximale des particules était de 2,5 μm (Pani 1992). Selon une estimation grossière, on peut dire que de tels événements se produisent 2 à 6 fois par année. Un ou deux de ces événements contribuent à une élévation des valeurs des PM10.

Les volcans: la contribution des volcans aux immissions de PM10 suisses est négligeable.

En outre, des aérosols organiques secondaires se forment à partir des émissions de composés organiques volatils (COV) naturels des forêts. Il n'existe pas de données fiables concernant le niveau de cette pollution. En se fondant sur les résultats partiels de différentes études, on peut estimer que la concentration sur le Plateau suisse est de l'ordre de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au plus. Dans ce contexte, il convient de relever que si ces poussières fines se forment à partir d'émissions naturelles de COV, elles le font par réaction avec des polluants anthropiques.

- **Pourquoi les parts d'émissions des différents groupes de sources ne coïncident-elles pas avec les contributions d'immissions?**

Les inventaires des émissions n'englobent que les particules primaires émises. Une part importante des immissions de PM10 provient de la formation secondaire. En outre, la durée de séjour des particules dans l'atmosphère varie fortement en fonction de leur grandeur. Il est vrai que les grandes particules peuvent avoir une grande importance dans le bilan massique des émissions, mais, comme elles sont éliminées assez rapidement de l'atmosphère, elles ne contribuent que faiblement aux immissions en des lieux qui ne sont pas proches des sources. En outre, les émissions ne se répartissent pas d'une manière uniforme sur tout le territoire suisse.

- **Quelles sont les relations entre les PM10, les PM2.5 et les PM1.0?**

La distribution de taille (part massique) des particules à des emplacements éloignés des sources présente un maximum pour un diamètre de 0,5 à 1 μm .

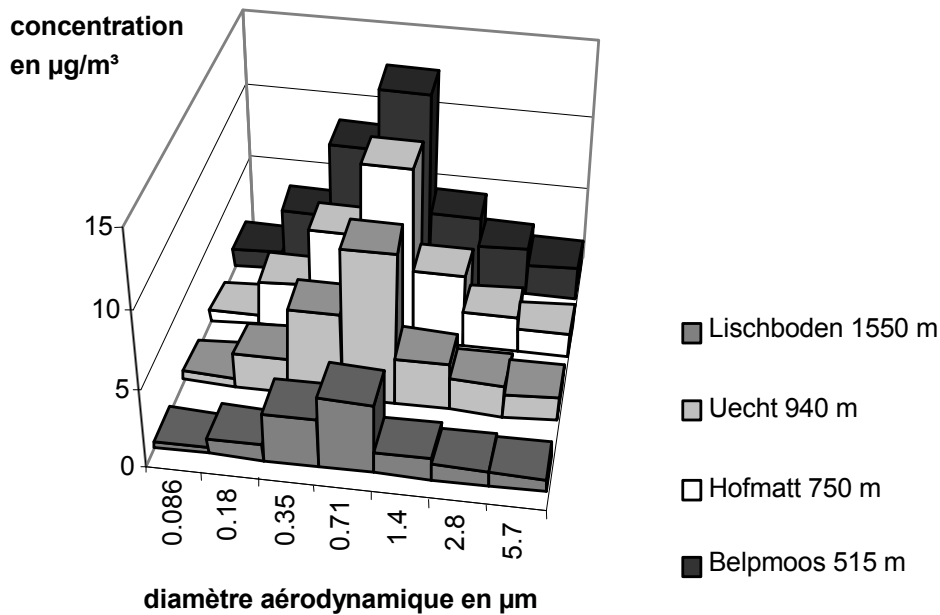


Figure 8 Répartition masse - taille de l'aérosol dans quatre lieux situés en zone rurale du canton de Berne en 1985/86 en présentation logarithmique des grandeurs de particules (Gälli Purghart, 1988).

Dans le domaine de 2,5 à 10 μm , on ne trouve qu'environ 20 à 30 % de la masse des particules. Cela signifie qu'en Suisse, les PM10 sont constituées d'environ 70 à 80 % de PM2.5.

La part des PM10 qui se trouve sous forme de PM1.0 est d'environ 50% (OFEV 2010).

- **Quelle est la relation entre la masse des particules et leur nombre du point de vue des immissions?**

Le nombre de particules est déterminé par les particules ultrafines. Leur masse, en revanche, est déterminée par les particules fines. Les résultats suivants (pour les PM2.5) ont été obtenus en Allemagne (Erfurt; Peters 1997) au cours d'une étude dont les mesures ont été faites dans une ville présentant une forte charge:

Catégorie de grandeur	Part dans le nombre de particules	Part dans la masse des particules
0,01 - 0,1 μm	73 %	1 %
0,1 - 0,5 μm	27 %	82 %
0,5 - 2,5 μm	0,01 %	17 %

Tableau 3 Rapport entre la masse et le nombre des particules dans un emplacement urbain

Les coefficients de corrélation suivants (calculés à partir de 144 moyennes journalières) ont été obtenus à partir de mesures du nombre de particules et de mesures de la masse de particules faites en parallèle:

Masse des PM10 par rapport au nombre de particules dans le domaine:	Coefficient de corrélation
de 0,01 - 2,5 μm	0,73
de 0,01 - 0,1 μm	0,60
de 0,1 - 0,5 μm	0,81
de 0,5 - 2,5 μm	0,82

Dans cette station en ville, la concentration des particules était en moyenne de 15 000 particules par cm^3 d'octobre à mars (variation des moyennes journalières: 2000 - 50 000/ cm^3)

Des mesures portant sur la concentration en nombre des particules, de tailles comprises entre 7 nm et 3 μm , à l'aide d'un compteur optique de particules (CNC) sont effectuées en cinq emplacements du réseau NABEL. À une station rurale au-dessus de 1000 m/mer, on mesure en moyenne annuelle environ 3000 particules par cm^3 , en ville de 10 000 à 30 000 particules par cm^3 . Sur des sites à proximité de l'autoroute (par ex. NABEL Härkingen ou Reiden) les valeurs élevées attestent clairement de l'influence du trafic local sur la concentration des particules. Lorsque les vents soufflaient de l'autoroute, les valeurs se situaient en moyenne à des valeurs dix fois plus élevées que lorsque l'influence de l'autoroute ne se faisait pas ressentir.

Valeurs limites d'immission

- **Quelles sont les valeurs limites d'immission applicables en Suisse?**

Depuis le 1^{er} mars 1998, l'OPair fixe les valeurs limites d'immission suivantes pour les poussières en suspension (PM10):

20 µg/m ³	pour la moyenne annuelle
50 µg/m ³	pour la moyenne journalière (ne peut être dépassée qu'une fois par an)

- **Quelles sont les valeurs limites recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé?**

L'OMS a établi qu'il y a une corrélation claire entre les concentrations de poussières fines et plusieurs effets sur la santé, principalement au niveau des maladies respiratoires et cardio-vasculaires. Cette Organisation recommande en conséquence les valeurs indicatives suivantes (OMS 2006):

PM10	20 µg/m ³	Valeur limite indicative (directive) pour la moyenne annuelle
	50 µg/m ³	valeur limite indicative pour la moyenne journalière; 99 ^e percentile (cette valeur ne peut être dépassée que 3 jours par an)
PM2.5	10 µg/m ³	Valeur limite indicative (directive) pour la moyenne annuelle
	25 µg/m ³	valeur limite indicative pour la moyenne journalière; 99 ^e percentile (cette valeur ne peut être dépassée que 3 jours par an)

Tableau 4 Valeurs indicatives de l'OMS

En résumé, on peut dire que les valeurs limites d'immission en vigueur en Suisse correspondent aux critères orientés sur les effets, tels que les valeurs indicatives recommandées par l'OMS pour les PM10.

- **Pourquoi n'y-a-t-il pas de valeur limite d'immission pour la suie en Suisse?**

La suie de diesel est classée dans l'OPair en tant que substance cancérigène. Les émissions de telles substances sont à limiter à un niveau aussi bas que possible. Cela signifie que des mesures de limitation des émissions sont à appliquer même s'il n'existe pas de valeur limite d'immission qui soit dépassée.

Selon une estimation de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) (Poussières fines en Suisse, CFHA 2007), la population suisse est exposée en moyenne annuelle à une concentration de particules de suie (CE) d'environ 2 µg/m³. Les particules de suie sont produites p. ex. par les moteurs diesel qui ne sont pas équipés de filtres efficaces ou par la mauvaise combustion de biomasse (p. ex. bois). Ces particules étant cancérogènes, leurs émissions doivent être réduites au maximum. De l'avis de la Commission, les concentrations de suie (CE) dans l'air ambiant ne devraient pas dépasser 0,1 µg/m³ en moyenne annuelle pour que la protection de la population, qui est inscrite dans la Constitution, soit garantie. En d'autres termes, il faut ramener à long terme les émissions de suie en Suisse à une valeur maximale de 100 à 200 tonnes par an.

- **Sur la base de quels critères les valeurs limites d'immission sont-elles fixées en Suisse?**

L'art. 1, al. 1, de la loi sur la protection de l'environnement (LPE) dispose que: « La présente loi a pour but de protéger les hommes, les animaux et les plantes, leurs biocénoses et leurs biotopes des atteintes nuisibles ou incommodantes, et de conserver la fertilité du sol. »

L'art. 14 dit: « Les valeurs limites d'immissions des pollutions atmosphériques sont fixées de manière que, selon l'état de la science et l'expérience, les immissions inférieures à ces valeurs:

- a. Ne menacent pas les hommes, les animaux et les plantes, leurs biocénoses et leurs biotopes;
- b. Ne gênent pas de manière sensible la population dans son bien-être;
- c. N'endommagent pas les immeubles;
- d. Ne portent pas atteinte à la fertilité du sol, à la végétation ou à la salubrité des eaux. »

L'art. 13, al. 2, précise: « Ce faisant, il [le Conseil fédéral] tient compte également de l'effet des immissions sur des catégories de personnes particulièrement sensibles, telles que les enfants, les malades, les personnes âgées et les femmes enceintes. »

Il faut tenir compte de l'effet conjugué de divers polluants qui peuvent mutuellement renforcer leurs effets.

- **Quelles sont les bases pour fixer les valeurs limites?**

La LPE, le tableau des valeurs doses effets de l'OMS et un grand nombre d'études épidémiologiques ayant été faites en Suisse ainsi que dans d'autres pays constituent les bases pour les valeurs limites appliquées aux PM10. Les bases scientifiques pour fixer les valeurs limites sont très robustes.

- **La Suisse fait-elle cavalier seul en matière de valeurs limites pour les PM10?**

Les valeurs limites d'immission fixées pour les PM10 en Suisse correspondent aux valeurs recommandées par l'OMS. En outre, le Conseil fédéral est d'avis que des valeurs limites fondées médicalement constituent une bonne base et qu'elles créent un climat de confiance entre la population, les autorités et les milieux politiques (Bulletin officiel 1997).

Au sein de l'UE, aux USA et en Californie, d'autres valeurs limites ont été choisies. Elles figurent dans le tableau ci-dessous. En ce qui concerne les valeurs de l'UE, il y a lieu de relever qu'elles ne correspondent pas aux critères de protection de la législation suisse (LPE). La Commission fédérale pour l'hygiène de l'air a récemment recommandé l'introduction en Suisse d'une valeur limite supplémentaire pour les PM2.5 de 10 µg/m³ en moyenne annuelle conformément à la valeur indicative de l'OMS.

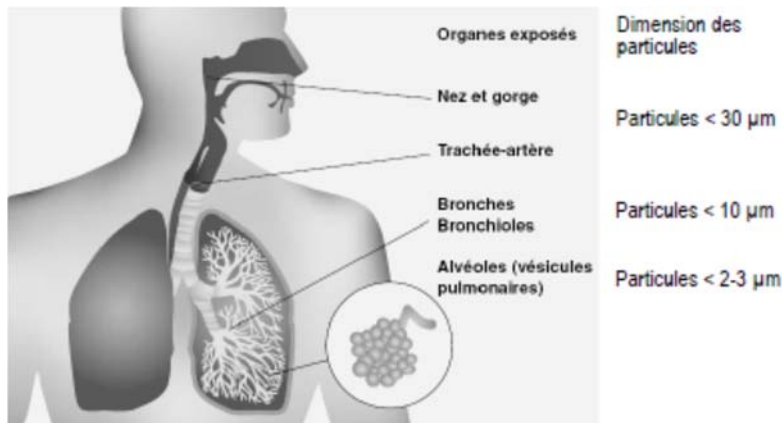
PM10		
Pays membres de l'UE et Norvège	40 µg/m ³ 50 µg/m ³	Moyenne annuelle (à respecter depuis le 1.1.2005) Moyenne journalière sur 24 h. (max. 35 dépassements autorisés par année, à respecter depuis le 1.1.2005)
USA	150 µg/m ³	Moyenne journalière sur 24 h. (peut être dépassée au max. une fois par année)
Californie	20 µg/m ³ 50 µg/m ³	Moyenne annuelle Moyenne journalière sur 24 h.
PM2.5		
Pays membres de l'UE et la Norvège	25 µg/m ³	Moyenne annuelle (à respecter dès le 1.1.2015)
USA	12 µg/m ³ 35 µg/m ³	Moyennes annuelles sur une période de 3 ans Moyenne journalière sur 24 h. (valeurs à 98-percentile, en moyenne sur 3 ans)
Californie	12 µg/m ³ ----	Moyenne annuelle Moyenne journalière sur 24 h.
Canada	10 µg/m ³ 28 µg/m ³ 8.8 µg/m ³ 27 µg/m ³	Moyenne annuelle (dès 2015) Moyenne journalière sur 24 h. Moyenne annuelle (à partir de 2020) Moyenne journalière sur 24 h.

Tableau 5: Valeurs limites pour les PM10 et PM2.5 au sein de l'UE, aux USA, en Californie et au Canada

Effets sur la santé

- **Que deviennent les particules lorsqu'elles sont respirées?**

Chaque fois que nous respirons, des milliers de particules pénètrent dans nos voies respiratoires. Une partie des poussières sont immédiatement ré-expirées, le reste suivant leur taille va s'accumuler et provoquer des symptômes et des impacts sur la santé. Plus les particules sont petites, plus elles pénètrent profondément dans les poumons. C'est la raison pour laquelle les poussières avec un diamètre entre 2.5 et 10 μm présentent des impacts sanitaires autres que les poussières plus fines.



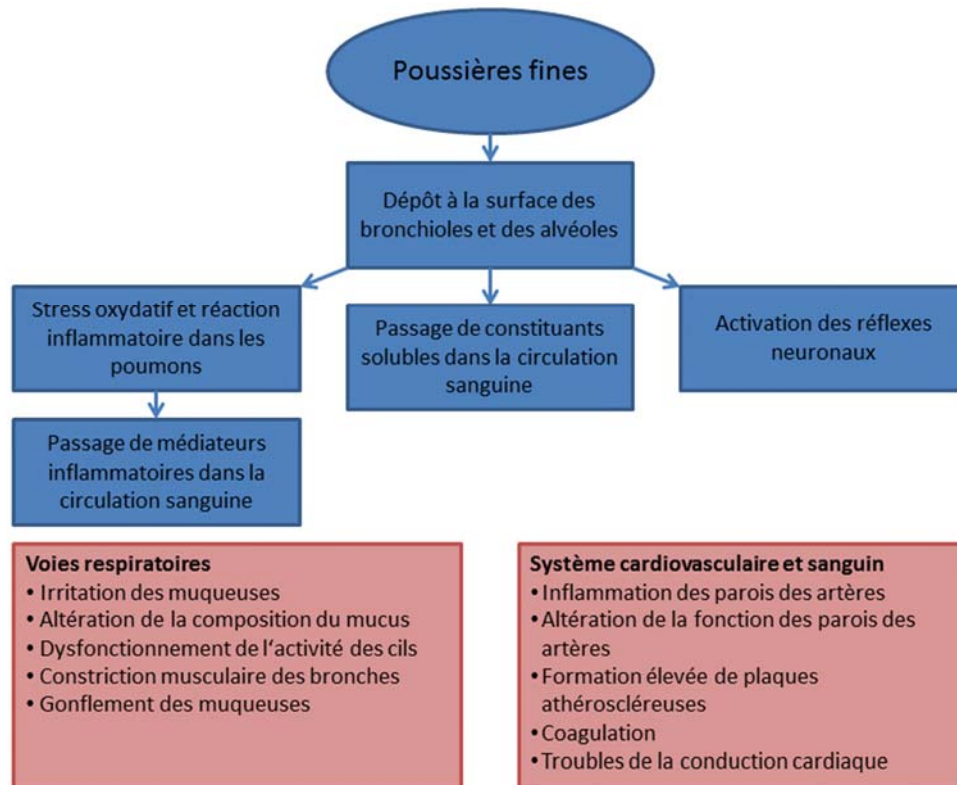
(Source : Poussières fines en Suisse, CFHA 2007)

Comment réagit le corps humain face aux poussières fines (PM)? Sur le site de leur dépôt dans les voies respiratoires, les poussières fines provoquent des irritations de courte durée des muqueuses, des réactions inflammatoires et de défenses immunitaires avec une production de mucosité accrue. Des symptômes respiratoires tels que la toux, la bronchite ou l'exacerbation des crises d'asthme en résultent. Les muqueuses des bronches et des bronchioles sont recouvertes de cellules vibratiles dont la surface est recouverte de cils qui rejettent les particules intruses. Dans les alvéoles pulmonaires, il n'y a plus de cellules ciliées. Cela signifie que les plus petites particules qui y ont pénétré doivent être éliminées ou dissoutes grâce à des mécanismes de nettoyage cellulaire par les macrophages. Les particules ultrafines ne sont pas bien résorbées par ce mécanisme et peuvent ensuite se retrouver dans le sang, dans des organes et, chez les femmes enceintes, dans le système sanguin du fœtus.

Les médiateurs d'inflammation qui sont générés dans les organes respiratoires se dissolvent dans le sang et affectent les parois des artères, ce qui peut provoquer des thromboses, de l'athérosclérose et de l'hypertension. Les jours où sont enregistrés des concentrations élevées de PM, il en résulte une augmentation des cas d'hospitalisation et une mortalité accrue en raison de maladies des poumons, du cœur ou du système circulatoire. Du point de vue sanitaire, il apparaît toutefois que les expositions durables de la population à des concentrations élevées de PM provoquent des effets chroniques plus dommageables que les pointes de courte durée. D'innombrables études réalisées à travers le monde ont démontré des relations entre des concentrations élevées de plus ou moins longue durée de PM et des effets néfastes pour la santé, en particulier des symptômes cardiovasculaires au sein de la population.

Il n'existe encore que trop peu d'études sur les effets sanitaires dus au nombre de particules ultrafines pour pouvoir en tirer des conclusions fiables. Relevons en particulier qu'il n'y a pratiquement pas d'études relatives aux effets à long terme d'une forte exposition.

L'OMS a publié une étude détaillée (Health Effects of Black Carbon, WHO 2012) sur les effets sanitaires des particules de suie (carbone élémentaire, CE). La conclusion en est qu'il existe suffisamment d'éléments probants pour établir que le carbone élémentaire a des effets sur les poumons et le système cardiovasculaire. Les données actuellement disponibles ne permettent toutefois pas d'opérer une distinction quantitative fiable entre les effets du CE et ceux d'autres composants des particules fines.



- **Des augmentations de courte durée des concentrations de PM10 peuvent provoquer une augmentation:**
 - des symptômes aigus des voies respiratoires (par ex. toux, expectoration, détresse respiratoire);
 - déclenchement de crises de bronchite, d'asthme ainsi que des perturbations du rythme cardiaque;
 - des absences pour cause de maladies à l'école ou sur la place de travail;
 - des visites médicales ou aux services d'urgences hospitaliers en raison de problèmes respiratoires ou cardio-vasculaires;
 - des hospitalisations en raison d'inflammations pulmonaires, de crises d'asthme, de cas d'infarctus, d'attaques cérébrales et d'autres effets négatifs sur le système respiratoire ou cardiovasculaire
 - des cas de décès résultant de ces maladies.

- **Des expositions chroniques à des concentrations élevées peuvent conduire à:**

- des maladies respiratoires chroniques, telles que l'asthme et COPD (bronchite chronique);
- des détériorations de la fonction pulmonaire, à une croissance ralentie des poumons chez les enfants;
- des affections cardiovasculaires chroniques telles que l'athérosclérose et l'hypertension;
- des cancers du poumon;
- des décès prématurés en raison des maladies des voies respiratoires ou cardio-vasculaires et en conséquence à une diminution de l'espérance de vie.

Lorsque la pollution diminue à la suite des mesures adoptées dans le cadre de la protection de l'air, il apparaît également une amélioration de l'état de santé de la population (ERS 2010).

- **Y-a-t-il des personnes plus sensibles à la pollution de l'air?**

Chaque individu réagit différemment face à la pollution de l'air, mais d'une manière générale les enfants, les personnes âgées ou malades sont plus sensibles. Il existe aussi des prédispositions génétiques qui peuvent jouer un rôle pour déterminer cette sensibilité.

- **Quels sont les impacts de la pollution de l'air sur la santé en Suisse?**

Dans une étude effectuée conjointement par des hygiénistes de l'air, des épidémiologistes et des économistes, les effets de la pollution atmosphérique anthropique sur la santé de la population suisse ont été calculés pour l'année 2010 avec les effets des PM10, en tant qu'indicateur principal, et tient aussi compte des oxydes d'azote, mais pas de l'ozone. Cette étude arrive à la conclusion que ce sont 3000 personnes par année qui meurent prématurément en raison de la pollution de l'air en Suisse, ceci correspond à la perte de 29000 années d'existence (Ecoplan/Infras 2014). Par rapport à l'espérance de vie pour l'ensemble de la population cela signifie une réduction moyenne d'environ 6 mois, alors que pour les personnes concernées leur espérance de vie est réduite plus fortement. Cette étude chiffre les coûts de santé annuels à 4 milliards de francs.

- **Est-ce que la pollution au centre-ville est aussi dangereuse pour la santé qu'en d'autres sites?**

D'une manière générale, il est établi que les impacts sur la santé augmentent avec l'augmentation du niveau de la charge polluante. Au centre des villes, les concentrations de poussières fines sont souvent plus élevées qu'à la campagne, il en résulte aussi des problèmes accrus en matière de santé.

L'OMS a établi que les aérosols de combustion jouent un rôle très important. Les particules résultant de la combustion de la biomasse (par ex. du bois) présentent un potentiel toxique semblable à celui des particules provenant de la combustion des carburants fossiles (par ex. le diesel).

Comment peut-on se protéger contre les concentrations excessives de poussières fines qui affectent notre santé?

La prévention doit passer par la réduction à la source des polluants précurseurs responsables de ces fortes charges polluantes.

Les recommandations de comportement suivantes peuvent contribuer à réduire le risque personnel d'atteintes à la santé dues à la pollution atmosphérique:

- Se renseigner sur les valeurs des polluants atmosphériques (site Internet de l'OFEV, application pour téléphone portable airCheck) et planifier les activités en conséquence.
 - Éviter les activités sportives en plein air pendant les épisodes de smog.
 - Consulter un médecin en cas d'apparition de troubles qui vous contraignent à réduire votre activité.
 - Prendre les médicaments prescrits par le médecin en cas de maladie respiratoire ou cardio-vasculaire et se conformer à ses instructions.
-
- **Quelle est l'importance de ces résultats pour la politique de protection de l'air?**

Les mesures de réduction de la charge en PM10 sont efficaces car elles entraînent une amélioration de la santé de la population. Ces mesures devraient toutefois porter sur l'ensemble des tailles, donc aussi bien sur les particules grossières que sur les particules fines et ultrafines. Un accent devrait être mis sur les particules de suie cancérigène (CFHA 2007).
 - **Où trouver des informations plus détaillées au sujet des effets sur la santé?**

Des informations plus détaillées au sujet des effets et impacts de la pollution de l'air sur la santé humaine et les écosystèmes se trouvent sur le site de l'OFEV: <http://www.bafu.admin.ch/luft/10804/index.html?lang=fr>

Mesures

En plus des mesures adoptées par la Confédération et les cantons, chacun, à titre individuel, peut contribuer par son comportement en matière de consommation et de mobilité quotidienne à diminuer les niveaux de pollution.

- **Quelle est la stratégie appliquée en Suisse pour diminuer les poussières fines?**

Les mesures de réductions des émissions doivent traiter non seulement des émissions primaires, mais aussi des émissions de gaz précurseurs (dioxyde de soufre, oxydes d'azote, ammoniac et composés organiques volatils).

Le tableau suivant donne un aperçu des réductions d'émissions nécessaires en Suisse afin que les valeurs limites visant à protéger la santé et les écosystèmes puissent être respectées (Conseil Fédéral 2009). En ce qui concerne les poussières fines, ce sont les PM10 qui sont mentionnées car ce sont uniquement elles qui sont, pour l'instant, réglementées sous forme de VLI.

Polluant	Réduction d'émissions nécessaire par rapport à 2005
Dioxyde de soufre SO ₂	éviter une augmentation des émissions par des mesures préventives
Oxydes d'azote NO _x	env. 50 %
Composés organiques volatils COVNM	env. 20-30 %
Poussières fines PM10 (primaires)	env. 45 %
Ammoniac NH ₃	env. 40 %
Substances cancérigènes (p. ex. la suie de diesel)	autant que la technique le permet et que cela soit proportionné

Tableau 6 Réductions d'émissions nécessaires pour respecter les objectifs environnementaux et de santé

Une priorité est mise sur la réduction des émissions de suies, qui contribuent aux PM10 et sont cancérigènes. Cela nécessite de les limiter autant que possible. En outre, il est important que les mesures de réduction des émissions qui découlent des objectifs agro-écologiques (OFEV/OFAG 2008) soient mises en œuvre pour limiter les émissions de suies de diesel des machines et véhicules et de l'ammoniac en provenance de l'agriculture.

Pour les poussières fines secondaires, le transport transfrontière joue un rôle non négligeable. C'est pourquoi, à côté des réductions réalisées en Suisse, il est important que les pays voisins réalisent aussi des diminutions significatives de leurs émissions polluantes afin de permettre le respect à large échelle des valeurs limites d'immissions.

- **Quelle est la stratégie appliquée au niveau international ?**

Dans le cadre de la Convention CEE-ONU sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, une révision du protocole de Göteborg a été adoptée en 2012 par laquelle les parties prévoient de renforcer leurs engagements concernant la réduction de leurs émissions de dioxyde de soufre (SO₂), d'oxydes d'azote (NO_x), de composés organiques volatils (COV), d'ammoniac (NH₃) et de poussières fines primaires (PM_{2.5}) d'ici à 2020 en appliquant les meilleures techniques disponibles (tableau 7). Le protocole révisé ne pourra toutefois entrer en vigueur qu'après avoir été ratifié par au moins deux tiers des parties.

	SO ₂	NO _x	COV	NH ₃	PM _{2.5}
Suisse	21%	41%	32%	8%	26%
Union européenne (UE27)	59 %	40 %	28 %	6 %	22%

Tableau 7 Engagements en matière de réduction des polluants d'ici à 2020 par rapport à 2005 selon le protocole de Göteborg révisé.

Les mesures qui seront adoptées pour limiter les PM_{2,5} profiteront aussi pour les PM₁₀. En moyenne, les PM_{2,5} représentent le 75% de la masse des PM₁₀.

En appliquant d'une manière conséquente les engagements du protocole de Göteborg, on peut s'attendre à une nette amélioration de la qualité de l'air d'ici à 2020. Les engagements prévus ne constituent qu'une étape intermédiaire vers la réalisation des objectifs de protection établis par l'OMS. D'autres efforts seront encore nécessaires au-delà de 2020, notamment pour diminuer les émissions d'ammoniac par des mesures supplémentaires dans le secteur agricole.

- **Quelles mesures ont été prises à ce jour pour réduire la pollution et quels ont été les résultats obtenus ?**

Depuis l'entrée en vigueur de la législation sur la protection de l'air, la Confédération, les cantons et les communes ont adopté un grand nombre de mesures visant à réduire les émissions de PM et de leurs polluants précurseurs. Il s'agit par exemple des mesures suivantes :

- La réduction de la teneur en soufre dans les combustibles et carburants (diesel et essence), ainsi que la réduction au minimum de la teneur en plomb dans l'essence.
- L'introduction du pot catalytique et du filtre à particules sur les véhicules routiers, ainsi que le renforcement des prescriptions sur les gaz d'échappement et des valeurs limites d'émissions pour les autres véhicules, les machines, les chauffages, l'industrie et l'artisanat.
- Les valeurs limites d'émissions pour les installations stationnaires, ainsi que la taxe d'incitation sur les COV dès 2000 ont incité l'industrie et l'artisanat à réduire considérablement leurs émissions, notamment grâce au développement de produit contenant peu de solvants (par ex. les peintures et vernis).
- Le plan d'action contre les poussières fines : les filtres à particules pour le moteurs diesel ou des mesures équivalentes pour les machines de chantiers, les bateaux, les locomotives et des prescriptions d'émissions plus basses pour les installations stationnaires de l'industrie et des chauffages, ainsi que des incitations financières en faveur de l'équipement des camions et des bus des transports publics.

Entre 1990 et 2013, les émissions en Suisse de dioxyde de soufre ont diminué de 74 %, celles de composés organiques volatils de 72%, celles d'oxydes d'azote de 52 %, et celles d'ammoniac de 16 %, alors que les PM10 primaires ont régressé de 33 %.

- **Quelles sont les mesures adoptées par l'UE ?**

L'UE a renforcé les prescriptions sur les gaz d'échappement de différents types de véhicules. Ces prescriptions seront mises en œuvre en même temps en Suisse. Les normes pour les voitures (Euro 6), les camions et les bus (Euro VI) entrent progressivement en vigueur, Les motocycles feront aussi probablement l'objet d'un renforcement des prescriptions. Alors que les prescriptions pour les installations industrielles et les grandes installations ont déjà fait l'objet d'un renforcement et exigent ainsi l'application des meilleures techniques disponibles. Ces nouvelles mesures, conjuguées à la mise en œuvre de celles qui sont déjà entrées en vigueur, entraîneront une nouvelle diminution majeure des émissions polluantes tant particulaires que gazeuses.

- **Quelles sont les mesures supplémentaires qui seront encore nécessaires ?**

La poursuite de la baisse des concentrations de PM10 nécessite prioritairement des mesures dans les secteurs suivants :

- Des exigences sévères pour les installations de combustion du bois selon l'état de la technique en ce qui concerne les émissions polluantes et leur niveau d'efficacité. Les vieilles installations avec de fortes émissions devraient être remplacées par des installations modernes avec un niveau d'efficacité élevé et de faibles émissions.
- L'introduction complète des filtres à particules ou de techniques équivalentes sur tous les moteurs diesel dans le secteur non-routier, en particulier pour les véhicules et machines agricoles, les bateaux et les moteurs stationnaires.
- Réduction des émissions d'ammoniac produites par le secteur agricole (amélioration de la construction des étables et de l'épuration des effluents gazeux, couverture des réservoirs de lisier, épandage à l'aide de distributeurs à tuyaux souples ou par injection.

- **Comment faut-il réagir en cas de smog hivernal?**

Des épisodes de forte augmentation des PM10 peuvent se manifester en hiver dans des situations météorologiques à forte inversion et faible échange entre les couches d'air. Les polluants émis s'accumulent alors dans un volume d'air relativement restreint.

Les mesures à court terme, qui ne sont prises qu'une fois que la charge de polluants est élevée, n'ont pratiquement aucune influence sur les valeurs parce qu'elles arrivent trop tard. Il faut veiller à limiter autant que possible les émissions de polluants avant même que de telles situations climatiques ne s'établissent et que des niveaux alarmants ne soient atteints. À cet effet, il convient d'adopter des mesures efficaces sur la durée, telles que celles énoncées plus haut.

Au vu des épisodes de smog hivernal que la Suisse a connus en 2005 et 2006, un plan d'action contre les poussières fines a été adopté par le Conseil fédéral en vue

de diminuer rapidement et de manière durable les particules de suie de diesel cancérigènes et des poussières fines libérées lors de la combustion du bois.

La Conférence des directeurs cantonaux des travaux publics, de l'aménagement du territoire et de la protection de l'environnement (DTAP) a adopté lors de sa réunion annuelle 2006 un concept d'intervention contre les poussières fines. En cas de concentrations très élevées de PM10, la population sera activement informée et si la charge excessive persiste (période d'inversion thermique) des mesures d'interventions seront mises en place graduellement au-delà de deux valeurs-seuils.

- **Quel rapport y a-t-il entre la protection de l'air et la lutte contre l'effet de serre?**

Le CO₂ est le gaz à effet de serre le plus important, mais l'ozone et la suie de diesel ont aussi un effet considérable sur le climat. Les mesures visant à réduire la suie de diesel, les oxydes d'azote (NOx) et les composés organiques volatils (COVNM) contribuent donc grandement à freiner le réchauffement climatique.

Par ailleurs, de nombreux polluants atmosphériques sont issus de processus de combustion qui libèrent également du CO₂. Les mesures visant à réduire la consommation de carburants et de combustibles contribuent donc généralement aussi de manière importante à la protection de l'air en diminuant simultanément la libération de plusieurs polluants. Il existe toutefois des exceptions, notamment le remplacement de l'huile de chauffage par du bois tant que les émissions polluantes des chauffages au bois ne seront pas ramenées au niveau de celles des chauffages à mazout.

La mise en œuvre des objectifs conformément au Protocole de Kyoto et à la loi sur le CO₂ est une condition préalable essentielle pour atteindre les objectifs de protection de l'air.

Bibliographie

- Airborne Particles Expert Group, Source Apportionment of Airborne Particulate Matter in the United Kingdom (janvier 1999)
- ARE, Coûts externes de transports en Suisse. Mise à jour 2005 (rapport en allemand avec résumé en français), Office fédéral du développement territorial (2010)
- Bulletin officiel de l'Assemblée fédérale, Conseil national, session de printemps 1997; interpellation Leuba, p. 577-579, Berne (1997)
- CFHA (Commission fédérale de l'hygiène de l'air), « Poussières fines en Suisse », Berne (2007)
- CFHA (Commission fédérale de l'hygiène de l'air), 25 ans de protection de l'air en application de la LPE, Thèses et recommandations, Berne 2011
- Conseil fédéral, Rapport Stratégie fédérale de protection de l'air, Feuille Fédérale 2009 p. 5941- 5972
- EMPA, « Vergleich von TSP-, PM10- und PM2.5 Schwebstaubmessungen im NABEL 1997 und 1998 », EMPA n°168'107, Dübendorf (1999)
- ERS (European Respiratory Society), Qualité de l'air et santé, Lausanne (2010) <http://www.ersnet.org/index.php/publications/reference-books.html>
- Gälli Purghart, B.C., Schwermetalle auf grössenfraktioniertem Aerosol und in der Deposition: Untersuchungen an einem Höhenprofil im Kanton Bern; Dissertation Universität Bern, Berne (1988)
- Hertz, J., et al., Chimia 42, (1988), 57-67
- Hüglin, C. et al., « Anteil des Strassenverkehrs an den PM10- und PM2.5-Immisionen. Chemische Zusammensetzung der Feinstaubes und Quellenzuordnung mit einem Rezeptormodell. » Rapports du PNR 41 « Transport et environnement », Rapport C4, Direction du programme PNR 41, Berne (2000)
- Hüglin, C., Gianini, M., Gehrig, R. „Chemische Zusammensetzung und Quellen von Feinstaub“, EMPA, Dübendorf 2012 (en allemand avec résumé en français) <http://www.bafu.admin.ch/luft/00575/00578/index.html?lang=fr>
- IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis): Scope for further environmental improvements in 2020 beyond the baseline projections, CIAM Report 1/2010, Laxenburg (2010)
- Künzler P., Stratégie de lutte contre la pollution de l'air. Bilan et actualisation, Cahier de l'environnement n° 379, OFEFP, Berne (2005)
- OFEV, « NABEL - La pollution de l'air 2013 », État de l'environnement n° 1415, Berne (2014)
- OFEV 2015, Soumission des données d'émissions annuelles à la Convention CEE-ONU CLRTAP http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/status_reporting/2015_submissions/
- OFEV 2012b, « NABEL - La pollution de l'air 2009 », État de l'environnement n° 1221, Berne (2012)
- [OMS 2006: WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide - Global update 2005. World Health Organization 2006.](#)
- Pani, R., Höhenabhängigkeit der chemischen Zusammensetzung und der Konzentration von atmosphärischen Schwebestäuben, Dissertation Universität Zürich, Zurich (1992)

- Peters A. et al. Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 155, 1376-1383 (1997)
- Turnbull, A.B. et al., *Atmospheric Environment* 34, 3129-3137, (2000)

Annexe A

- **Quelles sont les méthodes utilisées pour mesurer les émissions des véhicules et des machines?**

Dans la méthode gravimétrique préconisée (directive européenne 88/77/CEE) pour la détermination de la masse de particules, les gaz d'échappement totaux sont dilués dans un tunnel de dilution, généralement d'un facteur 5-10, et ramenés à une température inférieure à 51,7°C. Au cours du cycle prescrit de fonctionnement du moteur (cycle de test NCCE, durée: 20 min), un échantillon est dirigé à travers un filtre en fibre de verre présentant un degré de séparation défini. L'émission de particules est déterminée par une pesée différentielle, avant et après le prélèvement, et rapportée à la distance parcourue (g/km). Toutefois, suivant la composition des gaz d'échappement, une partie de la masse recueillie contient des composés très volatils dont les points de rosée sont déjà très en dessous de la température de mesure, ce qui contribue à accroître l'incertitude de la mesure. Avec l'introduction de la norme Euro 6 pour voitures de tourisme et Euro VI pour véhicules lourds, une nouvelle méthode pour la détermination du nombre de particules solides a été établie. Cette nouvelle méthode a été élaborée et validée dans le cadre du programme de mesure des particules (PMP) du groupe GRPE de la CEE-ONU ainsi que lors d'un programme conjoint de l'OFEV et de l'EMPA (cf. procédure de comptage des particules des règlements CEE n° 83 et 49). Cette méthode de mesure et la valeur limite pour le nombre de particules entreront en vigueur en 2013/14 avec les normes d'émissions EURO 6 pour les voitures de tourisme et EURO VI pour les poids lourds. La méthode utilise un compteur de particules à condensation (CPC) en amont duquel est montée une unité de vaporisation dans laquelle les substances très volatiles des particules contenues dans les gaz d'échappement dilués sont vaporisées à 300°C. Les différents éléments constituant cette chaîne de mesures, tels que l'unité de dilution supplémentaire, l'unité de vaporisation et le compteur de particules, doivent satisfaire à des exigences sévères en ce qui concerne l'efficacité et la calibration. Les améliorations visées par la nouvelle méthode sont une plus grande précision des mesures, une meilleure prise en compte des particules relativement petites et une définition plus claire des particules. Le cycle de test NCCE encore en vigueur aujourd'hui devrait être remplacé par le nouveau cycle de test mondial harmonisé WLTP à partir de 2017 (WLTP: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure).

- **Quelles sont les méthodes utilisées pour mesurer les émissions d'installations stationnaires?**

Les mesures des émissions des installations stationnaires sont faites généralement dans le flux d'échappement chaud, c'est-à-dire directement dans la cheminée. Elles sont effectuées selon les recommandations de mesures de l'OFEV conformément aux directives VDI 2066 feuillet 2 ou 7 ou selon les nouvelles normes internationales EN 13284-1. Un volume déterminé de rejets sera aspiré à travers un filtre et à partir de la différence de masse du filtre il sera possible de déterminer la concentration de poussières totales émises dans ces rejets. Par ce processus, il n'est pas possible de différencier entre les fractions de poussières (par ex. PM10 ou PM1.0) Il est cependant approprié pour permettre la mise en œuvre de l'OPair, qui prescrit des valeurs limites d'émissions pour l'ensemble des poussières en provenance des installations stationnaires. Pour déterminer les différentes fractions des poussières, on peut avoir recours à d'autres normes,

telles que par exemple des procédures basées sur des impacteurs en cascade. Ces procédures ne sont toutefois pas appropriées pour les mesures dans la pratique sur le terrain.

Annexe B

- Comment mesure-t-on les immissions de poussières fines?

Méthodes gravimétriques manuelles	Les échantillons de poussière sont recueillis sur des filtres ou des feuilles; ils sont ensuite pesés après avoir été conditionnés à l'humidité et la température prescrites.
« High Volume Sampler » avec différentes têtes d'échantillonnage fixant les particules du flux d'air selon leur grandeur avant le prélèvement d'échantillons	Appareils de mesure aspirant de grands volumes (env. 30 m ³ /h) à travers un filtre; ils sont utilisés dans les stations NABEL (avec des têtes pour les PM10, les PM2.5 ou les PM1).
« Low Volume Sampler » avec différentes têtes d'échantillonnage fixant les particules du flux d'air selon leur grandeur avant le prélèvement d'échantillons	Appareils de mesure aspirant de petits volumes (env. 1 -3 m ³ /h) à travers un filtre.
Impacteurs en cascade	Ils permettent de recueillir séparément des particules de différentes classes de taille. Les appareils à plusieurs paliers sont constitués de plaques trouées, dont les trous deviennent de plus en plus petits et derrière lesquelles sont placées des plaques qui reçoivent les impacts, sur lesquelles les particules sont séparées selon leur taille (inertie).
Procédés automatiques fonctionnant en (quasi) continu (moniteurs)	Ils utilisent d'autres principes de mesure qui génèrent un signal (quasi) continu pour la concentration massique. Lorsque l'on utilise ces appareils, il faut, à chaque emplacement, s'assurer de l'équivalence avec le procédé de référence ou définir un algorithme de conversion. Un problème fréquemment rencontré est la perte de composés volatils sur les filtres de collecte, qui sont légèrement chauffés pour éviter la condensation.
Jauges β	Elles aspirent de l'air à travers un filtre et mesurent de manière continue ou à brefs intervalles l'absorption des rayons β .
TEOM (« Tapered Element Oscillating Microbalance »)	Ces microbalances mesurent la modification de la fréquence de résonance du filtre oscillant chargé de particules. Avec les appareils plus anciens (où le filtre est à 50 °C), on a des pertes de masse moyennes pouvant atteindre 30 %. Les nouveaux analyseurs équipés d'un système FDMS (Filter Dynamics Measurement System) peuvent compenser ces pertes.

Appareils optiques	Ils mesurent la diffraction de la lumière lorsque celle-ci rencontre des particules, ce qui permet de calculer la concentration massique. La conversion dépend de la composition des particules et varie d'un site à l'autre.
---------------------------	---

D'autres appareils permettent de déterminer différentes caractéristiques des aérosols. Par exemple, la diffraction de la lumière peut être mesurée à l'aide d'un néphélomètre, la surface à l'aide d'un épiphaniomètre, le nombre de particules à l'aide d'un compteur de germes de condensation. La répartition granulométrique des particules, quant à elle, peut être mesurée à l'aide d'un analyseur différentiel de mobilité (DMA), d'un SMPS (« Scanning Mobility Particle Sizer »), d'un système de diffusion (DC), d'un système ELPI (« Electric Low Pressure Impactor ») ou d'un compteur optique de particules. Les informations concernant la composition chimique des particules sont obtenues par des analyses des échantillons de filtre, voire en ligne, à l'aide de spectromètres de masse pour aérosols. Un appareil à tambour rotatif (« Rotating Drum Impactor ») permet de recueillir, avec une résolution temporelle élevée, des particules de différentes classes de taille pour des analyses subséquentes. Les techniques de microscopie ou de microanalyse, telles la microscopie électronique à balayage (SEM), la microscopie électronique à transmission (TEM) ou la microscopie à force atomique (AFM), permettent de caractériser la morphologie de particules isolées et d'en effectuer l'analyse chimique.

- **Comment mesure-t-on la masse du carbone élémentaire et du carbone organique lié (suie)?**

Bien que la suie consiste en un mélange complexe de carbone élémentaire et de carbone organique lié, lors de mesures des immissions de suie, la détermination porte uniquement sur le carbone élémentaire (CE). La mesure s'effectue soit manuellement sur les différents échantillons de filtre, soit de manière quasi continue, à l'aide de moniteurs, par séparation thermographique et combustion du carbone élémentaire et quantification du dioxyde de carbone formé. On utilise aussi fréquemment des méthodes optiques, telles que l'éthalomètre (mesure de la transmission optique des échantillons de filtre) et le procédé fumée noire (mesure de la réflexion optique des échantillons de filtre), ainsi que les senseurs photoélectriques d'aérosols, qui mesurent la photoionisation des composés aromatiques polycycliques adsorbés sur les particules de suie. Bien que ces méthodes soient assez simples et rapides, elles exigent néanmoins une détermination spécifique de la relation quantitative avec la concentration de CE pour l'emplacement considéré et en fonction de la saison.

- **Quelle est la procédure recommandée pour la mesure des PM10?**

La norme européenne EN 12341 sur les mesures de poussières en suspension fixe les méthodes de référence gravimétriques manuelles à employer pour déterminer la fraction de PM10 dans les poussières en suspension. La Suisse a repris cette norme. Les recommandations relatives au mesurage des immissions de polluants atmosphériques publiées par l'OFEPF en janvier 2004 donnent des indications pour mesurer correctement les PM10. S'agissant des PM2.5, c'est la norme européenne (EN 14907), également basée sur des méthodes de référence gravimétriques manuelles, qui s'applique.

En cas de recours à des méthodes de mesure autres que les méthodes de référence, l'exploitant du réseau de mesures doit démontrer l'équivalence entre les résultats qu'il obtient et ceux obtenus avec les méthodes de référence. Dans la pratique des réseaux de mesure nationaux et internationaux, cette exigence s'applique surtout aux données mesurées à l'aide de moniteurs automatiques (TEOM, jauges β), dont l'équivalence avec la méthode de référence n'a pas pu être obtenue jusqu'ici en appliquant des facteurs de correction simples. Toutefois, ces méthodes étant malgré tout assez répandues du fait qu'elles sont plus rapides et qu'elles ont une meilleure résolution temporelle que les méthodes de référence, une grande prudence est de mise lors de la comparaison de données provenant de sources différentes. Dans le cadre du réseau NABEL, des appareils TEOM FDMS et des jauges Béta sont en service. Des mesures journalières sont effectuées avec des collecteurs Hi-Vol de façon à assurer l'équivalence avec les mesures gravimétriques et le cas échéant appliquer des facteurs de correction aux résultats des moniteurs.

En Europe, les concentrations de particules mesurées sont rapportées aux conditions régnant pendant la mesure (température, pression atmosphérique). Les polluants gazeux sont, en revanche, rapportés de manière uniforme à 20 °C et 1013 hectopascals.