

## Pollution par les moteurs diesel lors de la construction de tunnels

### Bulletin 5:

Particules invisibles dans l'air inhalé  
– dangers pour l'organisme

#### 1. Les poumons – porte ouverte aux polluants

En situation de travail, les polluants sont principalement absorbés par les poumons. Le risque de contact peut être décrit ainsi: en l'espace d'une minute, en situation normale, 20 l d'air et 10 l de sang entrent en contact sur une surface d'échange d'env. 100 m<sup>2</sup>. Seules deux couches cellulaires de moins de deux millièmes de millimètres d'épaisseur séparent le sang de l'air. Les échanges gazeux et l'absorption de polluants se font à travers 500 millions d'alvéoles d'env. 1/10 de millimètre de diamètre, alimentées par un réseau de vaisseaux capillaires d'env. 2000 km de long. A partir du pharynx, tout le profil transversal des voies respiratoires se dilate jusqu'à près de 1 m<sup>2</sup> et se ramifie jusqu'aux bronchioles, dont le diamètre peut atteindre jusqu'à 8 mm à l'inspiration et 3 mm à l'expiration. La vitesse de l'air (alors extrêmement faible) et la durée de séjour (proportionnellement longue) permettent à des particules de polluants

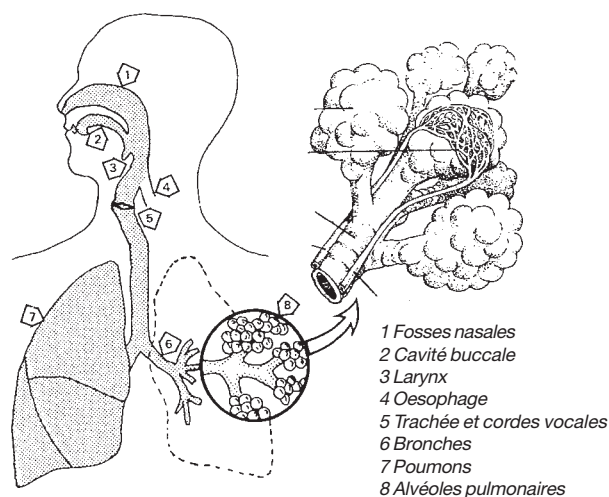


Fig. 1: Les poumons, porte ouverte aux polluants.  
Source: Birgersson, *Chemie und Gesundheit* 1988 [1].

de se déposer (sédimentation, diffusion), voire même de pénétrer plus profondément dans l'organisme à travers les fines membranes cellulaires.

Au cours de l'évolution, le système des voies respiratoires et les tissus pulmonaires ont développé des mécanismes de défense très efficaces: la poussière s'élimine sur les surfaces humides, la couche de mucus est continuellement évacuée en direction du pharynx par de fins cils vibratiles et un système d'alerte complexe, doté de senseurs chimiques sensibles, déclenche toux et éternuements afin que les poumons restent propres, à quelques détails près. Les alvéoles et les voies respiratoires disposent en outre de cellules «voraces» (macrophages), capables d'absorber et d'évacuer les particules et les microorganismes, voire de les éliminer, lorsqu'il s'agit de matière organique.

Tout fonctionne au mieux pour les substances xénobiotiques naturelles auxquelles l'organisme s'est adapté. D'une taille approximative de 2,5 mm (1 mm = 1 millième de mm), ces poussières ont la dimension des plus petites particules transportées par la poussière saharienne qui atteint nos latitudes. En présence de particules polluantes d'une taille inférieure à 1 mm – voire de quelques nanomètres seulement (1 nanomètre = 1 millionième de mm) –, les mécanismes de défense et de protection se révèlent moins efficaces que lorsqu'il s'agit de lutter contre des particules en suspension d'une taille

### Editorial

Aujourd'hui, la protection de l'air concentre ses efforts sur la question des risques sanitaires liés aux poussières colloïdales. Pour la médecine du travail, le sujet n'est pas nouveau. Mais ce n'est que dans les dernières années que l'on a effectivement constaté que l'ampleur des risques est inversement proportionnelle à la taille des particules – dont la surface, la composition et autres caractéristiques jouent également un rôle déterminant – et que l'effet toxique dépend non seulement de la masse globale, mais aussi, en grande partie, du nombre de particules. Au cours du projet, VERT a accordé une attention grandissante à la question, y adaptant ses critères d'essai, ses décisions et son mode d'analyse. Nous en concluons actuellement que seuls des filtres extrêmement puissants, placés dans le flux des gaz d'échappement, constituent une solution aux émissions de particules de diesel invisibles, considérées comme particulièrement dangereuses selon de récentes études toxicologiques. Le présent bulletin tente de présenter une vue d'ensemble du problème.

AUVA, Suva, TBG

supérieure. Les particules issues de combustions techniques sont en effet 10 fois plus petites que les poussières naturelles. Par rapport à celle-ci, même les plus fines ramifications des canaux pulmonaires sont grandes; les microparticules de poussière pénètrent aisément dans les régions alvéolaires, dépourvues de cils vibratiles et donc de mécanisme de rejet efficace. La durée de séjour à l'intérieur des poumons est extrêmement longue. Il faudrait plusieurs mois avant qu'elles ne puissent éventuellement être désintégrées ou éliminées grâce à l'action nettoyante des macrophages – qui, du reste, ne semblent pas reconnaître les microparticules – et pénètrent dans le sang et la lymphe à travers les parois cellulaires ou finissent par se déposer dans les tissus pulmonaires. Les poussières colloïdales offrent en outre de larges surfaces crevassées auxquelles adhèrent d'autres substances toxiques qui sont ainsi transportées au fond des poumons où elles peuvent devenir actives. Les différents paramètres exerçant une influence néfaste sur l'organisme – durée de séjour, solubilité, taille, surface et concentration des particules – constituent une charge globale contre laquelle le corps n'est pas toujours capable de lutter.

## 2. Quelle est la dimension des microparticules?

Grain de sable (gros)	1 mm
Alvéole	0,1 mm
Cheveu (le plus fin)	0,01 mm
Bronchiole	0,006 mm
Cellule (la plus petite)	0,001 mm
Lumière (limite de visibilité inférieure)	0,0004 mm
Particule de diesel (taille moyenne)	0,0001 mm
Virus	0,00001 mm
Molécule de gaz (grosse)	0,000001 mm

Les particules de diesel sont très petites par rapport aux alvéoles et relativement petites par rapport aux cellules épithéliales pulmonaires. On parle donc aussi de particules ultrafines ou de nanoparticules. Etant en particulier plus petites que la longueur d'onde de la lumière visible, elles sont par conséquent invisibles.

S'agissant d'infimes particules, leur masse globale très réduite semble représenter un avantage pour évaluer la concentration de ces polluants dans l'air inhalé ou dépister un phénomène de surcharge. Cependant, d'un point de vue biologique, c'est sur ce point précis que le bât blesse. En effet, ces particules sont si fines qu'elles peuvent traverser les membranes cellulaires et pénétrer aisément à l'intérieur de l'organisme.

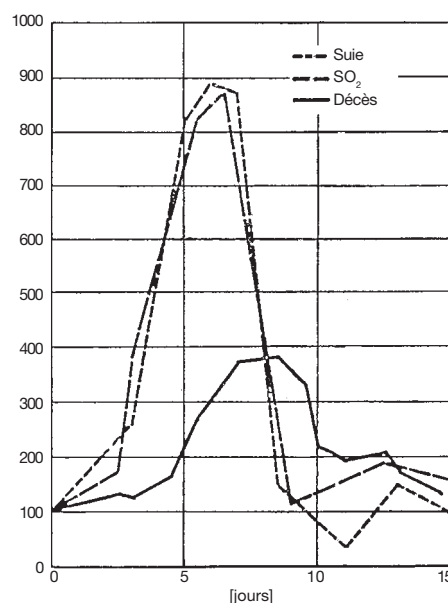
En cas d'inhalation d'émissions de diesel non diluées, chaque alvéole absorbe env. 1000 particules par minute, soit env. 10 particules par alvéole et par minute pour une dilution normale au poste de travail (1 : 100). Est-ce peu ou beaucoup?

A titre de comparaison avec des émissions diluées (c.-à-d. une quantité infime de 300 particules seulement par alvéole), les tests pratiqués sur des adultes sains révèlent des signes d'irritation pulmonaire après une exposition de 30 minutes, bien que des phénomènes de surcharge ne se manifestent qu'après plusieurs décennies, et ce même en cas d'inhalation concentrée.

Les mesures de protection usuelles, comme les masques ou les filtres à alvéoles, sont pratiquement inefficaces contre des particules d'une telle finesse. Leur efficacité est généralement limitée à moins de 1 µm.

## 3. Risques sanitaires liés aux poussières colloïdales

Le phénomène n'est pas tout à fait nouveau.



Courbes supérieures: augmentation de la suie et du SO<sub>2</sub>.  
Courbes inférieures: augmentation des cas de décès.

Fig. 2: Corrélation entre la pollution de l'air et les cas de décès lors d'un épisode de smog à Londres, en 1952.  
Source: EPA, Workshop, avril 1996.

Dès 1952, une corrélation évidente entre la pollution atmosphérique et des cas de décès spontanés a été observée à Londres lors d'épisodes de smog résultant des produits de combustion de chauffages domestiques et de moteurs à combustion interne. Par ailleurs, on a relevé des phénomènes à long terme, allant jusqu'à se traduire par des cancers du poumon, qui ont fait l'objet de vastes études épidémiologiques, d'expérimentations animales (in vitro) et d'expériences cellulaires (in vitro), basées sur des populations particulièrement exposées, et menées à l'échelle mondiale. Les recherches sont loin d'être terminées. Le nombre d'études, toujours plus vastes et détaillées, ne cesse de croître à mesure que les craintes augmentent. Les études suisses SAPALDIA (adultes) et SCARPOL (enfants) [2] ont démontré que la courbe d'augmentation des symptômes

et infections des voies respiratoires est quasiment parallèle à celle du nombre de particules présentes dans l'air inhalé. Compte tenu de la très modeste augmentation de la concentration en poussières colloïdales ( $10 \text{ mg/m}^3$ ), telle qu'on la rencontre généralement en terrain propre, il est permis de prévoir les effets suivants:

Total des décès prématurés	4,4 %
Incapacités de travail	10 %
Bronchites chez l'adulte	25 %
Bronchites chez l'enfant	35 %
Difficultés respiratoires (enfants)	54 %

Les effets impressionnants et inquiétants de la pollution atmosphérique sur la santé en Suisse furent analysés pour la première fois en 1996 (SET n° 272). Au total, la pollution atmosphérique cause 3 800 décès prématurés, 53 000 bronchites chez l'enfant et 791 000 jours d'incapacité de travail par an. Elle engendre également de lourdes charges économiques, illustrées ci-dessous:

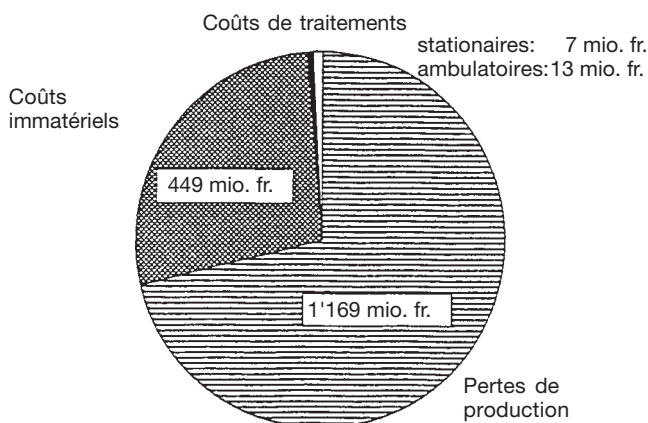


Fig. 3: Coûts externes de la santé en Suisse.  
Source: SET n° 272/1996 [1].

Ces calculs reposent sur les effets de la pollution atmosphérique due aux fameuses PM10, des poussières colloïdales d'une dimension de  $10 \text{ mm}$  max. que l'on considère du point de vue de leur composition matérielle globale. Reste à savoir le rôle exact des émissions d'origines diverses présentes dans les PM10, notamment celles émises par les moteurs de voitures diesel qui contiennent de très fines particules insolubles. Mais l'on suppose avec raison qu'elles jouent un rôle primordial en matière de risques pour la santé.

#### 4. Les poussières colloïdales et la médecine du travail

La médecine du travail s'intéresse depuis toujours aux poussières, fumées et brouillards, dus notamment à l'empoussiérage souterrain. Les valeurs limites furent constamment renforcées et harmonisées au niveau international. Des conventions et des objectifs se rapportant à la définition du taux de pénétration, de déposition

et de toxicologie pulmonaires furent très rapidement élaborés. En 1959 déjà, la Convention de Johannesburg prévoyait donc de se restreindre à l'étude des particules susceptibles de pénétrer dans les alvéoles, puis s'ajoutèrent le critère du taux de solubilité et la prise en considération de la toxicité des diverses substances. La catégorisation de «probablement cancérigène pour l'homme», qui passe pour être le plus stricte de ces critères, fut introduite peu à peu dans de nombreux pays à partir de 1988 pour les particules de diesel; tous les ouvrages de référence exigent impérativement la réduction de ce polluant «en fonction du niveau technique». La figure suivante, tirée des dossiers VME 97, montre clairement comment la probabilité de déposition des nanoparticules augmente à mesure que leur taille diminue, surtout lorsqu'elles sont non hygroscopiques, comme la suie de diesel. Cela correspond à l'augmentation de leur «mobilité» sous l'influence du mouvement moléculaire brownien. Théoriquement, on suppose une influence quadratique, compte tenu de la fameuse correction de Cunningham. Le risque devient alors évident.

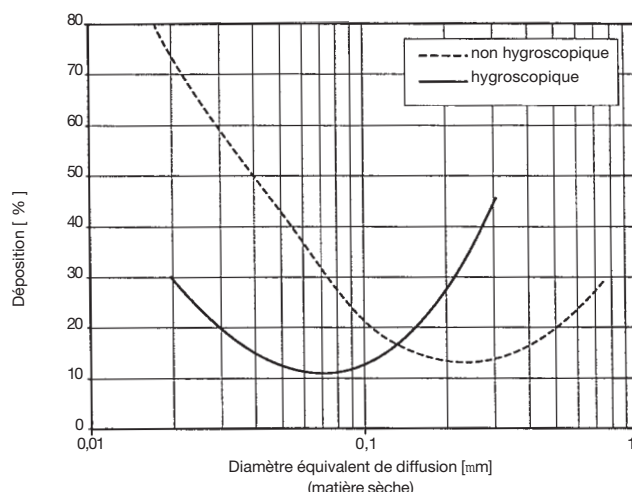


Fig. 4: Probabilité de déposition des nanoparticules dans les régions alvéolaires [3].

Ces minuscules particules n'ont presque aucune influence sur la masse globale des particules. Il paraît donc évident que des particules de dimensions si petites ne puissent être évaluées uniquement en fonction de leur masse, mais aussi, et surtout, en fonction de leur nombre, au sens d'une «concentration numérique», ou de leur surface globale. Partant du principe que tous les processus biologiques dépendent fortement des caractéristiques de la surface, celle-ci apparaît donc de plus en plus importante.

## 5. Mécanismes de lésion

Chaque particule qui n'est pas évacuée, et qui entre en contact avec la surface d'une cellule épithéliale, déclenche un processus réactif pouvant se traduire par des allergies ou des irritations. Il paraît clair que plus le nombre de cellules touchées est élevé (plus les particules s'accumulent et restent longtemps en contact avec la surface des cellules de la région alvéolaire), plus le processus est violent. Les réactions, qui se manifestent sous la forme de cellules inflammatoires et d'enzymes spéciaux que l'on retrouve dans les sécrétions bronchiques, se traduisent aussi, dans les cas plus graves, sous la forme de symptômes allant des éternuements à la toux, en passant par l'expectoration, la dégradation des fonctions pulmonaires et des crises d'asthme, voire une insuffisance cardio-vasculaire chez les sujets âgés et les malades.

Les nanoparticules peuvent aussi transpercer l'épithélium. Comme l'indique la figure suivante, elles pénètrent dans les capillaires du réseau sanguin et dans les vaisseaux lymphatiques, s'infiltrant ainsi presque partout dans l'organisme; la plupart d'entre elles seraient même assez petites pour pouvoir franchir la fameuse barrière cérébrale.

L'éventail des lésions pouvant être déclenchées par les particules de diesel est encore loin d'être répertorié dans tous les détails.

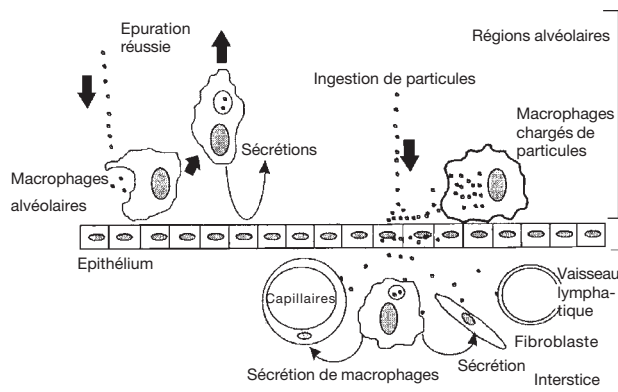


Fig. 5: Trajet des particules dans l'organisme.  
Source: Donaldson [4].

Des études épidémiologiques révèlent néanmoins que les nanoparticules, loin de nuire aux seuls poumons, produisent des effets extrêmement nocifs sur le système vasculaire en raison, par exemple, d'une élévation de la viscosité sanguine. Des expérimentations animales effectuées d'après la méthode Oberdörster [6] indiquent en effet que les particules extrêmement fines (30 nm env.) sont beaucoup plus agressives que les particules de 250 nm. De même, les observations faites par Wichmann/Erfurt [5] sur des asthmatiques révèlent que les particules ultrafines sont les principales responsables d'effets hautement nocifs. Aux USA, on a même observé l'apparition d'une proportion inquiétante de tachycardies chez des sujets prédisposés (victimes d'infarc-

tus) en cas de forte concentration de particules dans l'air inhalé. De multiples effets pathogènes sont incriminés dont, depuis peu, ceux des traces de métaux lourds, résidus de combustion, capables de former des particules autonomes auxquelles peuvent adhérer des particules de suie. Il est notamment question des fameux métaux de transition dont fait également partie le fer.

Des études épidémiologiques révèlent en outre, sans surprise aucune, que la fréquence des accidents suit une courbe parallèle à celle de la pollution atmosphérique.

## 6. Règles et valeurs limites

En règle générale, les valeurs limites d'immission légales se rapportent au volume d'air ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), les valeurs limites d'émission se rapportant pour leur part à l'énergie ( $\text{g}/\text{kWh}$ ) ou au trajet ( $\text{g}/\text{km}$ ). Elles sont indiquées ci-dessous de manière simplifiée afin de permettre une comparaison:

**Emissions** (nombre total de particules TPM):

• Machines de chantier	EU1	116 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Machines de chantier	EU2	50 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Poids lourds	EURO 2	17 $\text{mg}/\text{m}^3$
• PL (proposition 22.12.98)	EURO 4/5	3 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Moteur diesel stationnaire	OPair 98	5 $\text{mg}/\text{m}^3$

**Immissions** (diverses définitions: suie, CE, CE+CO):

• VME/CH au poste de travail	200 $\text{mg}/\text{m}^3$
• TRC/D au poste de travail	100 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Postes de travail USA:	
proposition 95	160 $\text{mg}/\text{m}^3$
proposition 98	50 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Conductance centre-ville/D 98 (suie)	8 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Air extérieur Suisse 98 (PM10)	20 $\text{mg}/\text{m}^3$

À l'évidence, ces deux domaines présentent encore d'importantes différences concernant les définitions, les méthodes de mesure et le niveau des valeurs limites. Cette liste fait cependant apparaître une tendance marquée au renforcement des valeurs limites, en raison des inquiétudes relatives aux risques sanitaires dus aux nanoparticules, tant pour les émissions des moteurs diesel que pour les concentrations dans l'air inhalé (immission).

## 7. Suie de diesel

Nous nous sommes donc efforcés de caractériser les particules de suie de diesel dans le cadre du projet VERT. Conscients de la portée des conclusions, il était important de connaître la granulométrie de ces particules, leur concentration numérique et, approximativement du moins, leur composition chimique. Il s'agissait en outre d'examiner si ces résultats pouvaient être généralisés, en observant les variations de leurs caracté-



ristiques selon les moteurs et leur état de fonctionnement. C'est dans cet objectif que nous avons mené une étude à grande échelle: des mesures ont été effectuées sur le terrain sur 10 moteurs de véhicules utilitaires – des moteurs conventionnels de machines de chantier pour la plupart – et 5 moteurs diesel de voitures particulières, sur des bancs d'essai pour moteurs ou sur le rouleau. La figure suivante montre un résultat typique:

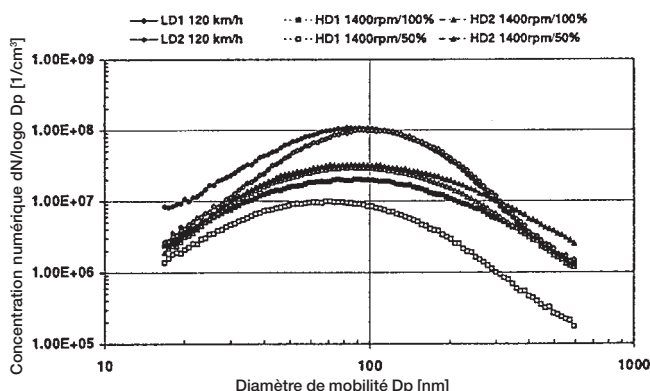


Fig. 6: Granulométrie des particules de suie de diesel de 2 moteurs de véhicules utilitaires et 2 moteurs de voitures particulières: VERT [7].

On trouve en principe des concentrations numériques relativement uniformes avec un pic situé aux alentours de 100 nm, et donc du domaine de l'invisible. Au premier abord, il peut sembler étonnant que les granulométries soient si uniformément représentées pour tous les modèles de moteurs. De nombreuses études ont confirmé cette observation. Il semble s'agir d'un phénomène très répandu lors de la combustion d'hydrocarbures par des moteurs; aujourd'hui, ce phénomène s'explique du reste facilement grâce à des représentations théoriques [8].

Le résultat [10] indiquant que les nouvelles générations de moteurs ne semblent présenter guère plus d'avantages que les anciennes est particulièrement inquiétant. La tendance actuelle à l'amélioration des carburants au diesel (moins de soufre et d'aromates, indice de cétane plus élevé) n'a presque aucun effet sur la granulométrie et la concentration des nanoparticules.

Situé à la limite de la saturation et atteignant souvent 100 millions de particules au cm³ dans la totalisation de carburant – toutes classes confondues –, le taux de concentration est impressionnant.

Le niveau de connaissance acquis au cours du projet, recoupant largement les résultats d'autres recherches, permet de conclure que les moteurs diesel émettent des particules d'hydrocarbure relativement sèches et hydrophobes, présentant une vaste surface crevassée dans des concentrations très élevées. Ces particules doivent être considérées comme particulièrement dangereuses du point de vue de la pollution de l'air inhalé.

Pour ramener ces concentrations à des proportions acceptables, il faudrait obtenir une dilution dépassant largement les possibilités techniques offertes par un ren-

forcement des mesures d'aération des postes de travail lors de la construction de tunnels. Nous sommes donc contraints de conclure que le mal doit être attaqué à la racine et que seule une filtration très efficace des émissions de diesel peut être considérée comme un moyen avantageux pour réduire les émissions de particules dans une proportion acceptable (facteur cible >100) [11].

## 8. Proportion de suie de diesel dans l'air inhalé

Il s'agit évidemment de savoir dans quelle mesure les émissions de diesel sont responsables de la forte concentration de poussières colloïdales dans l'air inhalé. Il n'y a pas de réponse générale en la matière. Les données varient fortement entre sites urbains et sites ruraux, en fonction des saisons, de l'heure et de la proportion de moteurs diesel utilisés. Pour la Suisse, l'OFEFP [9] fournit les données du réseau de mesures NABEL qui, dans la figure ci-dessous, révèlent des valeurs alarmantes pour un site rural tel que Payerne:

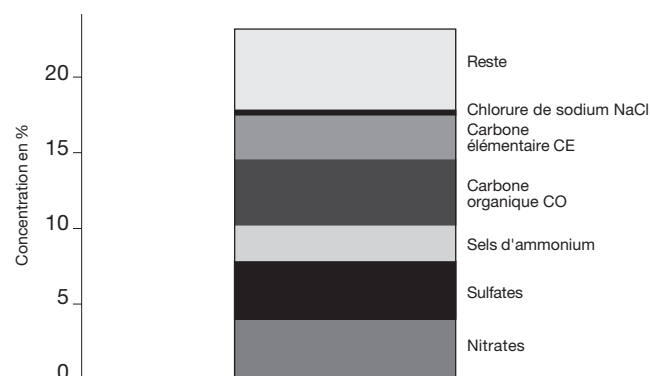


Fig. 7: Composition des poussières colloïdales à Payerne. Source: OFEFP [9].

La proportion de poussières colloïdales issues de combustions, composées ici de carbone élémentaire CE + carbone organique CO, représente malgré tout presque 1/3 des immissions PM10. Celles-ci proviendraient en grande partie d'émissions de diesel.

A Los Angeles, les poussières colloïdales contiendraient 36% de particules de diesel, proportion atteignant 53% à New York, malgré le peu de voitures roulant au diesel dans ces deux villes. Dans les métropoles fortement polluées au diesel, comme Paris et Londres, ces valeurs seraient encore plus élevées.

Si ces données se rapportent généralement à la masse globale de toutes les particules d'une taille inférieure à 10 µm, l'étude faite à Erfurt [5] tient compte de particules de tailles diverses. La figure ci-dessous indique clairement que les particules les plus fines (0,01–0,1 µm) ont une masse à peine plus élevée; mais ce sont elles qui, justement, présentent les plus fortes concentrations numériques, à l'inverse des particules les plus

grosses. L'étude menée sur le comportement d'asthmatiques exposés à l'inhalation de nanoparticules conclut que « les effets nocifs doivent être attribués aux particules les plus fines », ce qui donne une indication précise sur le rôle de la concentration numérique et de la surface.

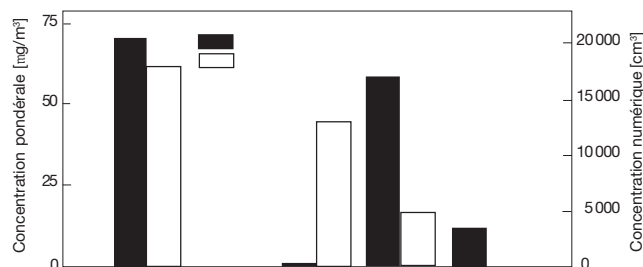


Fig. 8: Répartition des poussières urbaines à Erfurt.  
Source: Wichmann [5].

## 9. Technique de mesure

Jusqu'à présent, les émissions de particules de diesel ont été généralement examinées grâce à des méthodes utilisant le poids des particules ou leurs effets émettant un signal dans la lumière visible: soit on pèse les particules recueillies dans un filtre (gravimétrie), soit on évalue l'opacité du faisceau lumineux par absorption et réflexion (opacimétrie). Ces deux méthodes légales sont utilisées lors des contrôles périodiques et de la certification des véhicules.

Aucune ne permet cependant de mesurer précisément l'émission des particules de 100 nm qui n'ont aucune incidence majeure sur le poids ou l'opacité.

D'autre part, les plus récentes études considèrent désormais ces particules, peu prises en compte jusqu'ici, comme étant les composantes les plus nocives des émissions de diesel: on leur attribue en effet une virulence potentielle largement supérieure à celle de particules plus grosses et donc visibles, telles que les particules agglomérées sur lesquelles se concentraient auparavant les efforts de la recherche.

Les méthodes de mesure traditionnelles ont un second inconvénient: les émissions se refroidissent rapidement, permettant ainsi à des gouttelettes (condensation spontanée) de se former p. ex. à partir de vapeur d'eau et d'oxydes de soufre: elles sont prises pour des particules bien qu'elles n'aient aucune ressemblance avec les particules solides de suie, issues de combustions.

En principe, dans la réalité, ce type de particules ne peut se former à cause de la grande dilution du flux des gaz d'échappement dans l'atmosphère. D'autre part, l'effet toxique de ce genre de condensats acidifiés est considéré comme très faible par rapport à celui des particules solides.

Il a fallu prendre du recul par rapport à ce type de méthodes de mesure en raison de la formation effective

d'artefacts menant à des interprétations ambiguës. Des méthodes plus modernes de caractérisation de la suie, appliquées avec l'aide de l'ETH, de l'Office fédéral de métrologie OFMET, de l'EMPA et de l'Institut Paul Scherrer, ont permis de classer, de compter, d'analyser et d'évaluer les particules en fonction de leur taille et de leur surface.

Les nouveaux acquis techniques appliqués durant ces recherches ont donné le jour à une méthode de mesure permettant l'étude «on line» de l'émission proprement dite de nanoparticules, en conditions réelles et pour différents états de fonctionnement.

Cette technique de mesure (NanoMet) sera présentée dans l'un de nos prochains Bulletins.

## 10. Examen des moyens disponibles

Rappelons que l'objectif est d'obtenir une réduction de facteur 100 du nombre de particules solides dans les émissions de diesel pour les particules d'une taille supérieure à 10 nm (limite de la gamme de mesure).

Tous les moyens connus, disponibles ou imaginables pour une application pratique ont été examinés dans la perspective de l'objectif fixé. Force a été de constater que:

- Les nouvelles générations de moteurs (comme le fameux système à injection common rail, à haute pression d'injection, commandé par microprocesseur) elles-mêmes ne réduisent pas l'immission de nanoparticules et semblent même encore faire diminuer leur taille, d'où une probable augmentation des risques.
- Les nouveaux carburants, y compris les combustibles synthétiques de grande pureté, sans soufre ni aromates, ne réduisent pas non plus les émissions de particules.
- S'ils ne présentent aucun avantage quant aux nanoparticules, les catalyseurs d'oxydation présentent en revanche des inconvénients quant au NO<sub>2</sub> et au SO<sub>3</sub>, qui ne répondent ni l'un ni l'autre aux critères de la médecine du travail.
- D'autres moyens relatifs au réglage du moteur, à la recirculation des gaz du carter, au refroidissement de l'air de suralimentation, ou autres, n'ont apporté aucune diminution notable du nombre de nanoparticules. Le seul moyen efficace consiste à utiliser des filtres à particules, tels que ceux que nous avons déjà décrits dans le Bulletin 2. Ces filtres ont fait l'objet d'études approfondies sur le terrain (voir Bulletin 4).

Exemple de résultat typique:

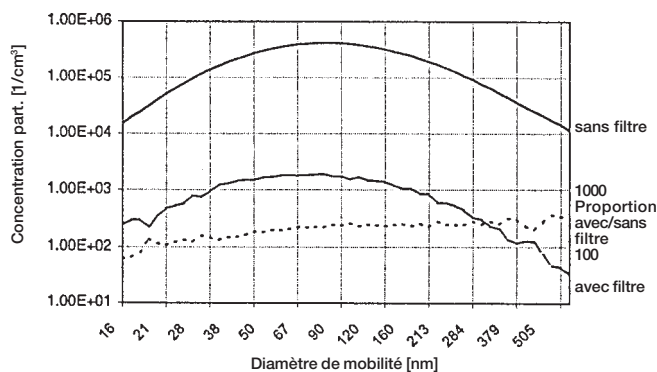


Fig. 9: Emission de particules dans les gaz d'échappement d'une machine de chantier équipée d'un moteur Liebherr, avec et sans filtre à particules. Source: VERT [10].

La concentration numérique des particules solides est représentée en fonction de leur taille, avec et sans filtre. La différence entre les courbes «gaz brut/gaz purifié» correspond au facteur 100 – 500, c.-à-d. que l'on obtient un taux de filtration de 99%, même pour les particules les plus fines.

Il ne s'agit ici que d'un exemple parmi tant d'autres. Certains filtres atteignent un taux de filtration supérieur à 99,9%, même pour des particules <20 nm.

Ce type de filtres convient à toutes les générations de moteurs diesel, quels qu'en soient la taille ou le modèle. En principe, il serait donc possible de faire baisser durablement la concentration de particules présentes dans l'air inhalé en équipant tous les moteurs de la zone donnée (tunnel, chantier, centre-ville), ce qui permettrait également une élimination efficace des nanoparticules. Entre-temps, sur les chantiers allemands de construction de tunnels où tous les moteurs diesel doivent être équipés de filtres à particules en vertu des TRGS 554 [Technische Regeln Gesundheitsschutz], on a constaté que la concentration de particules de suie de diesel dans l'air inhalé avait été ramenée à des valeurs inférieures à 0,1 mg/m<sup>3</sup>, alors que l'on mesurait encore des concentrations atteignant jusqu'à 2 mg/m<sup>3</sup> avant l'introduction de cette mesure.

Les filtres à particules sont efficaces aussi bien en conditions stationnaires qu'en accélération libre (en phase d'accélération maximale du moteur), comme l'indique la fig. 10.

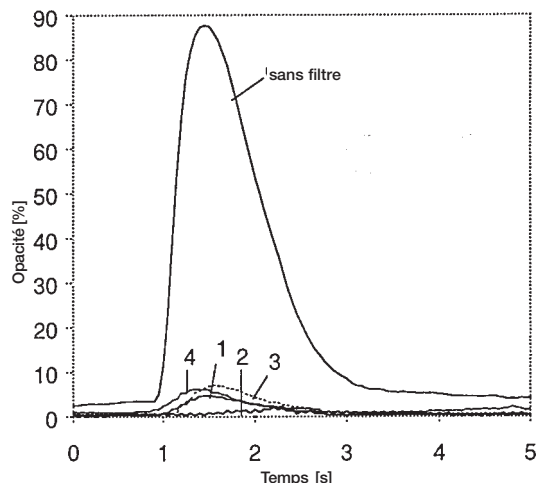


Fig. 10: Accélération libre d'un moteur de machine de chantier équipée d'un moteur Liebherr, avec différents filtres (1-4) et sans filtre à particules. Source: VERT [7].

## 11. Vision d'avenir: un moteur diesel ultra propre

En comparaison avec tous les procédés de combustion moteur connus, la combustion thermodynamique du moteur diesel est la meilleure et la plus complète. Ce type de moteur est donc aussi, et de loin, le plus économique. A ce point de vue, d'autres progrès sont encore possibles. Il est en effet permis de supposer que les progrès techniques des systèmes à injection et de suralimentation se poursuivront et permettront une nette amélioration du rendement, même pour les petits moteurs de voitures diesel, en particulier si l'on ne doit pas faire de concession concernant les émissions de gaz d'échappement.

Le mot d'ordre est donc le suivant: découplage de la combustion et de l'émission de gaz d'échappement, donc combustion optimale et recyclage efficace des émissions, comme c'est le cas depuis longtemps sur les moteurs à essence avec catalyseur à trois voies. Comme le catalyseur appartient aujourd'hui au moteur à essence, le filtre à particules appartiendra au moteur diesel, sans doute amélioré peu à peu grâce à des mesures catalytiques permettant de réduire encore l'émission d'oxyde d'azote.

Le moteur diesel pourra défendre sa place et s'imposer face à toutes les substances polluantes, y compris le CO<sub>2</sub>. Il sera alors considéré comme le meilleur moteur, le plus économique et le plus propre du point de vue écologique.

Le présent Bulletin sur les particules de diesel, loin d'être un pamphlet contre les moteurs diesel, soutient le développement de ce type de moteurs dont la longévité est exemplaire.

**Bibliographie**

1. B. Birgersson, Chemie und Gesundheit, VCH-Verlagsgesellschaft mbH, 1988, ISBN 3-527-26455-8
2. Monétarisation des coûts externes de la santé imputables aux transports. Mandat SET n° 272, mai 1996
3. Valeurs limites d'exposition aux postes de travail. VME/VLE, VBT, valeurs admissibles pour agents physiques, Suva, janvier 1997
4. Ultrafine (Nanometre) Particle Mediated Lung Injury. Donaldson et al., J. Aerosol Sc. 5.6 1998
5. Respiratory Effects Are Associated with the Number of Ultrafine Particles. Wichmann et al. Maximilians Universität, München, 1997
6. Increased pulmonary toxicity of inhaled ultrafine particles: Due to lung overload alone? Oberdörster et al., Elsevier Sc. Publ., New York, 1994
7. Partikelfilter für die Nachrüstung von Baumaschinenmotoren, VERT-Abschlussmessungen und Umsetzung. SAE 1999-01-0116
8. Characterization of Carbon Particles in Diesel Exhaust in Relation to Environmental Protection. L. Jing, EAM/Wabern.
9. Ambient PM10 in Switzerland. Nyffeler et al., Environm. Congress, Durban, September 1998
10. VERT: Diesel Nano-Particulate Emissions: Properties and Reduction Strategies. SAE 980539/1998
11. VERT, Bulletin 3: Plus d'air ou moins de gaz polluants? Juillet 1996

**Abréviations**

AUVA	Allg. Unfallversicherungsanstalt / Autriche
OFEFP	Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage / Berne
CE	Carbone élémentaire
EMPA	Eidg. Materialprüfungs- u. Forschungsanstalt/Dübendorf (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche)
EPA	Environment Protection Agency (U.S.A.)
SET	Service d'étude des transports (Suisse)
VME	Valeur limite moyenne d'exposition
PL	Poids lourd
mg	Microgramme = $10^{-6}$ g
mm	Micron = $10^{-6}$ m
nm	Nanomètre = $10^{-9}$ m
CO	Carbone organique
PM10	Particule <10 mm
SAE	Society of Automotive Engineers
Suva	Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents
TBG	Tiefbau-Berufsgenossenschaft (syndicat allemand des employés des travaux publics)
TPM	Total particulate matter (total des particules)
TRC	Technical reference concentration (limite d'exposition permise)
VERT	Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau (réduction des émissions des machines réelles lors de la construction de tunnels), un projet AUVA, Suva, TBG et OFEFP

**Direction du projet:**

Bureau d'ingénieur TTM, A. Mayer, Fohrhölzlistr. 14b  
CH-5443 Niederrohrdorf  
Tél. 0041 (56) 496 6414, fax 0041 (56) 496 64 15  
E-Mail: TTM.a.mayer@bluewin.ch

**Organismes à contacter:**

AUVA: J. Weidhofer, 0043 (1-331 11) 584  
ÖSBS: A. Schuster, 0043 (38 42) 243 17-21  
TBG: Prof. D. Kieser, 0049 (761) 731 35  
Suva: W. Scheidegger, 0041 (41) 419 50 60  
OFEFP: Max Wyser-Heusi, 0041 (31) 322 93 69

**Commandes de Bulletins:**

**AUVA:** Allgemeine Unfallversicherungsanstalt  
Division de la prévention des accidents et des maladies professionnelles, Adalbert-Stifterstr. 65, A-1200 Vienne (Madame Radosztics)  
Tél. 0043 (1-331 11) 418, fax 0043 (1-331 11) 347  
Réf.: AUVA-Report 4/2

**TBG:** Tiefbau-Bauberufsgenossenschaft  
Am Knie 6, D-81241 Munich  
Tél. 0049 (89) 88 97 505, fax 0049 (89) 88 97 494

**Suva:** Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents,  
Service clientèle central, Case postale, 6002 Lucerne  
Tél. 0041 (41) 419 58 51, fax 0041 (41) 419 59 17