

Point fort : problématiques poussières fines

Autor(en): **Müller, Thomas / Meili, Erika / Schindler, Christian**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Horizons : le magazine suisse de la recherche scientifique**

Band (Jahr): - **(2006)**

Heft 71

PDF erstellt am: **27.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-552481>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Problématiques poussières fines

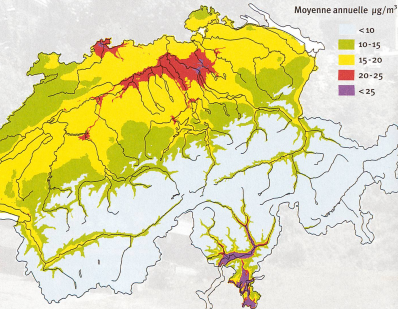
Depuis l'an 2000, les concentrations de particules fines dans l'air stagnent à un haut niveau. Confédération et cantons ont adopté des plans de mesures. Selon les experts, ils ne vont toutefois pas assez loin. Quant aux épidémiologistes, ils sont formels: les poussières fines rendent malade. Reste que les effets précis des différentes particules sont encore mal connus. Les chercheurs commencent seulement à les comprendre. **Photo Hans-Christian Wepfer/Studio25, LoD**

Chaque année, les **poussières fines** provoquent le **décès prématuré de 3700 personnes**. Depuis le début des années 2000, les émissions stagnent à un niveau élevé. Selon les experts, **les mesures prises** cette année par la Confédération et les cantons **sont insuffisantes**. Par Thomas Müller, image en arrière-fond Heinz Leuenberger/Desair

Une réduction de moitié s'impose

En janvier et février 2006, le smog a stagné en plaine durant des semaines et fait grimper à certains endroits les concentrations de poussières fines à un niveau quatre fois supérieur à la valeur limite. Ces chiffres ont mis sous pression offices responsables ainsi que députés communaux et cantonaux. Finalement, onze cantons ont ordonné début février une réduction générale de la limite de vitesse à 80 km/h pendant cinq jours. Mais entre temps, les recherches de l'Institut Paul Scherrer (PSI) ont montré que la combustion du bois, dans les poêles et les cheminées, avait joué un rôle important et jusqu'ici totalement sous-estimé dans la production de poussières fines.

L'abaissement de la limite de vitesse n'a donc eu qu'un effet restreint. A proximité des autoroutes, la pollution due aux poussières fines



Au Tessin et dans les grandes villes, la valeur limite annuelle de 20 µg/m³ est nettement dépassée: concentrations de PM10 en Suisse de 2000 à 2005. www.kada.admin.ch

a plus fortement diminué (entre 5 et 10 pour cent) qu'ailleurs, ont constaté les cantons concernés. Mais ces mesures ont aussi poussé de nombreuses personnes à renoncer à leur

voiture, entraînant une baisse de 14 pour cent du trafic autoroutier. Selon Urs Baltensperger, chef du Laboratoire de chimie atmosphérique au PSI, elles ont donc eu pour effet de sensibiliser la population.

Problème à grande échelle

Cet épisode a montré que les poussières fines, comme l'ozone, sont un problème à grande échelle. Dès qu'une inversion météorologique durable s'installe en plaine, il se forme une nappe d'air froid dans laquelle les polluants atmosphériques forment un cocktail complexe.

Etant donné le caractère récurrent de cette situation météo, il n'y a pas d'autre solution que de faire systématiquement baisser de moitié les émissions de poussières fines et celles de leurs gaz précurseurs. Là-dessus, les experts sont d'accord.

et le sel marin, ne représentent qu'une petite partie de la pollution. Dans les espaces fermés, le tabac et la cuisson des mets sont les principales sources de poussières fines. Les poussières fines naissent aussi de réactions chimiques entre des polluants atmosphériques comme l'ammoniac, le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote ou les composés organiques volatils (COV). Il en résulte des particules secondaires (nitrates, sulfates ou ammonium) qui forment près de la moitié des émissions en milieu urbain. En Suisse, la valeur moyenne quotidienne ne pas dépasser est de 50 microgrammes de particules PM10 par mètre cube d'air (µg/m³). La moyenne annuelle est d'environ 20 µg/m³ (UE: 40 µg/m³). A de nombreux endroits, la moyenne annuelle n'est pas atteinte, alors que la valeur moyenne quotidienne est régulièrement dépassée (CH et UE: 50 µg/m³)

Qu'est-ce que les poussières fines ?

Les poussières fines sont composées de minuscules particules d'un diamètre inférieur à 10 millièmes de millimètres (microns), qui pénètrent profondément dans les poumons. En comparaison, un cheveu humain est dix fois plus gros. La taille des particules est décrite en PM. PM10 désigne une particule d'un diamètre inférieur à 10 microns, PM2,5 une particule d'un diamètre inférieur à 2,5 microns.

En Suisse, plus de la moitié des poussières fines dans l'air provient de l'industrie, de l'usure mécanique des routes et du rail, ainsi que de poussières tourbillonnantes. Un peu moins de la moitié provient de la combustion incomplète de carburants et de combustibles, dont le bois. 17 pour cent des poussières fines sont dues aux moteurs diesel, 15 pour cent à la combustion du bois. Les poussières d'origine naturelle, comme celles du Sahara



Visible pollution due aux poussières fines dans le village de Roveredo sur l'axe du San Bernardino. Elle est notamment liée à la combustion de bois et au trafic routier, comme l'ont montré des mesures effectuées par l'Institut Paul Scherrer. www.psi.ch

L'évolution à long terme des concentrations de poussières fines montre que l'entreprise n'est pas désespérée. Depuis le début des mesures en 1998, les valeurs moyennes annuelles ont considérablement baissé jusqu'en l'an 2000. Mais depuis, le taux d'émissions stagne à 21000 tonnes de poussières fines par année. Conséquences selon l'Office fédéral de l'environnement: 3700 décès prématurés et des coûts de santé annuels de 4,2 milliards de francs.

Valeur limite de PM2,5

Les particules les plus dangereuses seraient celles d'un diamètre inférieur à 2,5 microns (PM2,5). Pour Urs Baltensperger, il y a une nette corrélation entre leur concentration dans l'air extérieur et la mortalité. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a récemment proposé l'introduction d'une valeur limite de PM2,5. Mais bien que des valeurs à six endroits dans l'air helvétique (et à quatre endroits pour les PM10), la Suisse n'a pas encore décidé de l'introduire.

De son côté, le Conseil fédéral a arrêté un plan d'action qui prévoit, outre la réduction des émissions des chaudières à bois, l'examen de

l'introduction rapide et anticipée par rapport à l'UE de la norme Euro 5 pour les véhicules diesel jusqu'à 3,5 tonnes 57 pour cent des véhicules diesel vendus avant août 2006 y satisfait déjà. Mais il faudra attendre dix ans avant que l'ensemble du parc automobile soit renouvelé, estime-t-on chez Auto-Suisse. L'Association des importateurs suisses d'automobiles.

En revanche, la Confédération n'envisage pas d'introduction anticipée de la norme Euro 5 pour les camions (valeur limite de 0,005 g/kWh). Depuis le 1er octobre 2006, c'est la norme Euro 4 (0,025 g/kWh) qui règle les autorisations de mise en circulation des nouveaux modèles. La possibilité de faire bénéficier dès 2008 les propriétaires de poids lourds équipés d'un filtre à particules d'une réduction de la redevance poids lourds liée aux prestations (RPLP) est toutefois en discussion.

Mesures insuffisantes

«Le plan d'action de la Confédération ne suffit pas, note l'expert. Mais c'est un pas dans la bonne direction.» A ses yeux, il faudra aussi réduire à moyen terme l'émission d'oxydes d'azote des moteurs diesel et, ce qui est encore plus

important, investir dans des poêles plus efficaces.

Il sera presque impossible d'éviter des actions à court terme lors d'une inversion de températures prolongée. La Conférence suisse des directeurs des travaux publics, de l'aménagement du territoire et de l'environnement (DTAP) a donc adopté un plan d'intervention qui prévoit, en cas de double dépassement de la moyenne quotidienne autorisée, des réductions de la limite de vitesse et l'interdiction de feu en plein air et en cheminée. Si la norme est dépassée trois fois, l'utilisation de machines non équipées de filtres à particules (agriculture, sylviculture et chantiers) serait interdite.

La Commission fédérale de l'hygiène de l'air estime que ce plan ne va pas assez loin. C'est pourquoi elle exige que toutes ces mesures soient prises dès que la norme est dépassée deux fois. Selon elle, ce n'est qu'ainsi que l'on pourra protéger le plus grand nombre possible de gens en cas de smog hivernal aigu.

Pollution atmosphérique (valeurs actualisées quotidiennes): http://www.umwelt.schweiz.ch/buwalp/fr/fachgebiete/ig_luft/luftbelastung/aktuell/index.html

Sources de nuisances

- Environ 37 pour cent** des émissions de poussières fines proviennent de la combustion de bois et de l'économie forestière.
- La norme Euro 5 est la dernière norme de l'origine d'environ 57 pour cent des émissions.
- En Suisse, la combustion de bois est la principale source de pollution dans les vallées alpines. Au total, les ménages y contribuent pour 77 pour cent.
- Quelque 21 pour cent des émissions de suie de diesel sont dues aux 17 pour cent de l'agriculture et l'économie forestière.
- Une fois à travers un filtre à poussières fines, le poids des particules déposées est mesuré.



Grâce à l'étude Sapaldia, la Suisse a la valeur limite de poussières fines la plus basse d'Europe. Cette étude a montré pour la première fois que ces particules étaient aussi nocives pour les adultes en bonne santé. Il s'agit maintenant de trouver quelles sont les sources de nuisances les plus dangereuses. Par Erika Meili, Photos Derek Li Wan Po

« Des marqueurs précoces de maladies graves »

à des vérifications avant cinq ans environ.

Liu: Avec la fonction pulmonaire et les caractéristiques cardiovasculaires, Sapaldia étudie des marqueurs précoces de maladies graves. C'est important pour la prévention. Par ailleurs, plusieurs études ont montré une corrélation entre mauvaise fonction pulmonaire et élévation de la mortalité.

Les poussières fines seraient responsables chaque année de décès prématurés de 3700 personnes en Suisse. D'où vient ce chiffre?

Schindler: Il repose notamment sur les résultats de trois études américaines de cohorte, qui ont été reportés en Suisse en prenant en considération un modèle détaillé de pollution par poussières fines. Entre-temps, des études menées aux Pays-Bas, en Norvège et en Suède ont confirmé la validité de ces chiffres pour l'Europe. L'estimation de 3700 personnes a été faite par une équipe de chercheurs dirigée par Nino Künzli qui a lui aussi participé à Sapaldia.

Quelles sont les conséquences des particules ultrafines?

Liu: Nous n'avons pas encore de résultats à ce sujet. Il est difficile de mesurer la pollution en PM0.1 (particule ultrafine) pour chaque personne, étant donné qu'il n'existe que très peu de stations de mesure. Des

éléments indiquent que les particules ultrafines favorisent certaines maladies des nerfs et l'artériosclérose, mais rien n'est encore tout à fait certain.

Entre 1995 et 2000, la pollution due aux poussières fines a nettement diminué. Avec une amélioration pour la santé?
Schindler: C'est surtout dans les zones fortement polluées, dans les villes, que la pollution par poussières fines a nettement régressé. Avec un effet positif sur la fonction pulmonaire. Les gens se sont donc partiellement rétablis - c'est une bonne nouvelle!

Quelles sont les mesures les plus prometteuses pour lutter contre les poussières fines?

Liu: Pour le dire il faudrait connaître la source qui provoque le plus de problèmes de santé et il n'y a pratiquement pas d'études à ce sujet. Sapaldia s'efforce ici de combler une lacune. Nous sommes en train de développer un modèle de charge individuelle pour nos participants. Cela permet de savoir si quelqu'un est plus fortement touché par les émissions du trafic, de l'industrie, du ménage, ou par des particules transportées sur de longues distances. Cet instrument sera précieux pour identifier les sources les plus nocives.

Peut-on déjà tirer certaines conclusions?



L.-J. Sally Liu est directrice de recherche à l'Institut de médecine sociale et préventive de l'Université de Bâle, professeure à l'Institut de médecine sociale et préventive de l'Université de Bâle. Il est responsable du dépouillement statistique des données depuis le début de l'étude Sapaldia.

Christian Schindler est docteur en mathématiques et statisticien à l'Institut de médecine sociale et préventive de l'Université de Bâle. Il est responsable du dépouillement statistique des données depuis le début de l'étude Sapaldia.

Liu: Certains éléments indiquent que les poussières fines issues du trafic routier affectent plus fortement la fonction pulmonaire que d'autres sources. Nous avons ainsi découvert que les personnes qui vivent à 20 mètres ou moins d'une rue très fréquentée ont 35 pour cent de troubles respiratoires (toux ou essoufflement) supplémentaires. Une étude hollandaise a par ailleurs montré que la proximité avec le trafic routier renforce la sensibilité à certains allergènes.

Schindler: Nous avons eu des résultats analogues dans le cadre d'une étude partielle à Bâle. Les personnes qui vivent près d'une route à gros trafic ont une plus forte sensibilité au pollen.

Qu'est-ce qui est le plus dangereux? Les épisodes de smog ou la pollution à long terme par poussières fines?

Liu: Les deux sont mauvais, mais leur impact sur la santé diffère probablement. Au nord-est des Etats-Unis, par exemple, avec une pollution atmosphérique due au trafic routier, on observe davantage de problèmes cardiovasculaires et une mortalité plus élevée. Au nord-ouest des Etats-Unis, où les feux de bois provoquent des épisodes de smog hivernal, les troubles de la fonction pulmonaire et les affections asthmatiques sont plus fréquents. Il se pourrait qu'en Suisse aussi, l'impact diffère selon les saisons. Il est toutefois très difficile de différencier la pollution à long terme et le smog hivernal. Il faudrait des

mesures plus exactes et des marqueurs spécifiques pour chaque source.

Quels résultats attendez-vous de la deuxième enquête Sapaldia?

Schindler: Outre le développement du modèle de charge individuelle, nous continuons d'analyser les changements en matière de santé entre 1991 et 2002. En 2002, nous

50 ans. Cette dernière est un facteur de risque connu et des études à court terme montrent que la pollution atmosphérique entrave la fonction cardiaque. Nous avons également analysé l'importance de certaines dispositions génétiques et d'autres facteurs de risque comme le diabète, les allergies, la fumée passive, l'alimentation, l'excès de poids, la sédentarité ou les charges profes-



Quels sont les effets des poussières fines sur la santé, d'après Sapaldia?

Christian Schindler: L'étude montre qu'il existe un rapport linéaire entre la pollution annuelle par poussières fines et la fonction pulmonaire. Par ailleurs, cette même pollution à long terme - même en faibles quantités - conduit à une augmentation de symptômes (essoufflement, toux et bronchites). Enfin, nous avons découvert que les variations quotidiennes de la pollution atmosphérique ont des effets sur la fonction pulmonaire dans une population normale. Ces résultats ont conduit à l'adoption en Suisse d'une limite basse pour les poussières fines.

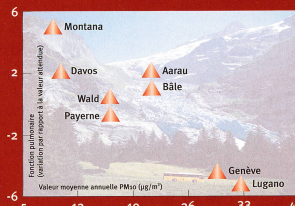
L.-J. Sally Liu: On savait depuis longtemps que les enfants souffrent de la pollution atmosphérique. Sapaldia a montré pour la première fois qu'elle affecte aussi la santé pulmonaire d'adultes en bonne santé.

La pollution atmosphérique a-t-elle eu un effet sur la mortalité?

Schindler: Jusqu'ici, le nombre de décès dans le cadre de Sapaldia est encore insuffisant pour y déceler un impact de la pollution atmosphérique. Nous ne pourrions pas procéder

Etude de cohorte Sapaldia

Les poussières fines diminuent la fonction pulmonaire



La valeur moyenne annuelle PM10 (µg/m³) à chaque site de mesure. Les sites de mesure sont indiqués par des triangles rouges. Source: www.unibas.ch

Sapaldia (Swiss Study on Air Pollution and Lung Diseases in Adults) a démarré en 1991 dans le cadre du Programme national de recherche « Homme, santé, environnement ». L'étude s'est penchée sur le rapport entre pollution atmosphérique et maladies pulmonaires. 9651 adultes âgés de 18 à 61 ans répartis entre huit sites - Aarau, Bâle, Davos, Genève, Lugano, Montana, Payerne et Wald (ZH) - y ont participé. Ils ont été sélectionnés au hasard et interrogés. Cette cohorte - c'est ainsi que l'on désigne un ensemble de personnes interrogées à plusieurs reprises sur une période importante - a été sollicitée à nouveau dans le cadre de Sapaldia 2. 83 pour cent de ces personnes participent à cette nouvelle enquête. En Europe, il n'y a pas d'autre étude de cohorte capable d'examiner sur plus de dix ans et avec une base de données comparables les effets de la pollution atmosphérique sur la santé de la population. www.ispm-unibas.ch

avons mesuré pour la première fois des caractéristiques cardiaques, en enregistrant avec un électrocardiogramme de 24 heures la variabilité de la fréquence cardiaque de presque deux mille personnes de plus de

sionnelles. Enfin, nous aimerions mener un troisième sondage dans quelques années pour analyser les conséquences à long terme de la pollution atmosphérique sur le système cardiovasculaire.

Selon des études épidémiologiques, les poussières fines représentent des risques pour la santé des **poumons** et du **système cardiovasculaire**. Mais on ignore encore de quelle façon elles pénètrent dans les cellules et comment elles les endommagent. Par Ruth Jahn, Images Institut d'anatomie de l'Université de Berne

Que deviennent les poussières fines dans l'organisme ?

La science sait encore peu de choses au sujet des effets des poussières fines inhalées sur l'organisme. Les épidémiologistes évoquent des risques pour la santé sur la base de premières études à long terme. On observe davantage de décès liés à des problèmes cardiovasculaires lorsque la concentration de poussières fines augmente. Et les biologistes s'efforcent de mettre en évidence la façon dont, une fois inhalées, ces particules se répartissent dans l'organisme et y provoquent des dégâts. Leur objectif : comprendre comment les poussières fines endommagent les voies respiratoires, le système cardiovasculaire, le système nerveux, et provoquent certains cancers. « Nous aimerions marier biologie cellulaire et épidémiologie », explique Peter Gehr, professeur d'histologie à l'Université de Berne et expert dans le domaine de l'interaction entre poussières fines et poumons.

Les alvéoles comme porte d'entrée

On sait aujourd'hui que plus la particule de poussière fine inhalée est petite, plus elle pénètre profondément dans les poumons. Une particule d'un diamètre de 3 à 10 microns est interceptée par les voies respiratoires moyennes et supérieures, alors que les particules d'un diamètre inférieur à 3 microns atteignent les bronchioles et les alvéoles, où a lieu l'échange gazeux. Toutefois, la plupart des particules qui parvien-

nent jusque-là sont ultrafines (d'un diamètre moyen de 0,1 micron). Or les alvéoles constituent la plus grande surface du corps humain – l'équivalent d'un court de tennis selon les estimations de Peter Gehr – mais aussi sa plus mince barrière : moins d'un micron de tissu sépare les voies respiratoires du sang. Pour les particules de poussières ultrafines, cette membrane constitue donc la porte d'entrée dans l'organisme.

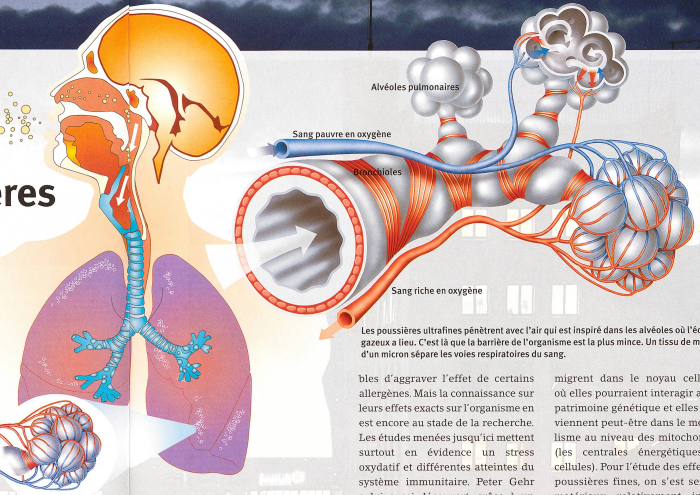
Autonettoyage insuffisant

« Le système respiratoire humain dispose de deux mécanismes de défense particulièrement efficaces », explique Marianne Geiser, biologiste et doctorante en histologie à l'Université de Berne. Des cils vibratiles purifient les voies respiratoires en réacheminant sans cesse les particules vers le haut avec du liquide. Et dans les alvéoles, des phagocytes (macrophages) font le ménage en absorbant les particules ou en les décomposant et en les acheminant vers les cils vibratiles. « Mais les macrophages échouent avec les poussières fines d'un diamètre inférieur à 0,1 micron, poursuit la biologiste. L'autonettoyage des poumons n'est manifestement pas réglé pour les poussières les plus fines. » C'est ce que montrent du moins des expériences avec des rats qui ont inhalé de la poussière d'oxyde de titane.

En éprouvette aussi, les poussières fines de la dimension de 0,1 micron montrent d'étonnantes propriétés : de petites sphères fluore-

scentes de polystyrol, par exemple, sont capables de pénétrer dans les globules sanguins, comme l'a montré une étude de l'Institut d'anatomie de l'Université de Berne. Mais les chercheurs ignorent toujours le déroulement de ce processus. « En fait, les globules rouges ne sont absolument pas équipés pour absorber des particules, souligne Peter Gehr. Les poussières ultrafines franchissent donc les barrières cellulaires d'une manière différente de celle que nous connaissons en biologie. »

Une étude de Marianne Geiser sur l'inhalation de poussière d'oxyde de titane chez les rats ainsi que des essais analogues menés en Allemagne montrent par ailleurs qu'un faible pourcentage de particules fines réussit à pénétrer dans le sang et reste détectable dans les reins, le foie, la rate, le cœur et le cerveau.

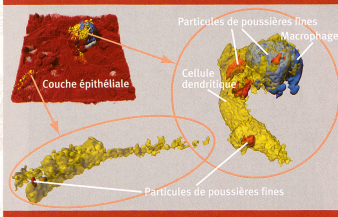


Les poussières ultrafines pénètrent avec l'air qui est inspiré dans les alvéoles où l'échange gazeux a lieu. C'est là que la barrière de l'organisme est la plus mince. Un tissu de moins d'un micron sépare les voies respiratoires du sang.

bles d'aggraver l'effet de certains allergènes. Mais la connaissance sur leurs effets exacts sur l'organisme est encore au stade de la recherche. Les études menées jusqu'ici mettent surtout en évidence un stress oxydatif et différentes atteintes du système immunitaire. Peter Gehr a lui aussi découvert, grâce à un modèle (voir encadré ci-dessous) constitué de trois cellules (des macrophages, cellules de la paroi des voies respiratoires et cellules immunitaires spécifiques), que les particules ultrafines étaient susceptibles de provoquer un stress oxydatif et des réactions inflammatoires. Elles

migrent dans le noyau cellulaire où elles pourraient interagir avec le patrimoine génétique et elles interviennent peut-être dans le métabolisme au niveau des mitochondries (des centrales énergétiques des cellules). Pour l'étude des effets des poussières fines, on s'est servi de matériaux relativement inertes, dépourvus d'effet polluant – comme l'oxyde de titane ou l'argent. Les interactions avec d'autres particules ou des polluants atmosphériques comme l'ozone ou les oxydes d'azote que l'on trouve dans l'air urbain ont été intentionnellement laissées de côté.

Comment des particules de poussière fines traversent la paroi pulmonaire



Pour étudier les particules de poussières fines, l'équipe de Peter Gehr a développé un modèle de la paroi pulmonaire. La petite illustration (en haut à gauche) montre un détail de ce modèle avec des cellules épithéliales (rouge), une cellule dendritique (jaune) sur la partie inférieure et un macrophage (bleu) sur la partie supérieure de la couche épithéliale. Les chercheurs ont fait deux découvertes intéressantes (grande illustration en bas à droite). Premièrement, la cellule dendritique forme un prolongement à travers la couche épithéliale et entre en contact avec le macrophage. Deuxièmement, le macrophage transmet des particules de poussières fines (rouge clair) à la cellule dendritique qui les fait passer à travers la couche épithéliale dans la partie inférieure de cette couche. L'organisme pourrait ainsi absorber les particules de poussières fines de manière active.



Les spores du champignon d'une grosseur de 3 microns pénètrent dans les alvéoles pulmonaires.

Dans les alvéoles, les spores de champignons sont récupérés d'un film liquide...

...digérés par des macrophages (macrophages) et ensuite transportés plus loin.



Alvéoles (A) avec leurs fines parois (P) visibles au microscope à balayage électronique. Au centre, une voie respiratoire périphérique (V).

Partie sectionnée d'une tige avec des globules rouges (en rouge).

Globules rouges avec des particules ultrafines (en vert) qui sont trop grandes pour y pénétrer.

Macrophage (en vert) dans lequel des particules de poussières ultrafines (vert) ont pénétré.

Macrophage d'un rat dans lequel une particule ultrafine d'oxyde de titane (enroulée en rouge) a pénétré in vivo.

Ce qui se passe dans l'organisme