

Les poussières fines en Suisse 2013

Un état des lieux dressé par la Commission fédérale de l'hygiène de l'air



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Commission fédérale de l'hygiène de l'air CFHA

Impressum

Editeur

Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA)

La Commission fédérale de l'hygiène de l'air est composée d'experts du domaine de la protection de l'air. En tant que commission extraparlamentaire, elle est instituée par la Confédération. Elle est l'organe consultatif du Département de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) et de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) pour toutes les questions scientifiques et méthodologiques relatives à la protection de l'air et aux effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine et l'environnement. Du point de vue fonctionnel, elle est une commission administrative indépendante et interdisciplinaire, qui peut aussi consulter des spécialistes d'autres domaines pour traiter certaines questions spécifiques.

Auteurs

Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA)

Référence bibliographique

Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CHFA) 2013: Les poussières fines en Suisse 2013. Berne 66 p.

Secrétariat de la CFHA

Brigitte Gälli Purghart, division Protection de l'air et produits chimiques, Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Conception graphique

Karin Nöthiger, 5443 Niederrohrdorf

Photos de la page de couverture

Bâle 2013 © N. Künzli

Téléchargement au format PDF

<http://www.ehl.admin.ch/fr/dokumentation/publikationen/index.html>

(pas de version imprimée)

Cette publication est également disponible en italien (sans les annexes) et en allemand.

© CFHA 2013

Table des matières

Abstracts	4
Avant-propos	6
Résumé	7
1 Introduction	9
2 Questions abordées dans le rapport	12
3 Réponses aux quatre questions et demandes de la CFHA	13
4 Perspectives	18
Annexe	19
A1 Comment se forment les poussières fines?	19
A2 Effets sur la santé	27
A3 Immissions et méthodes de mesure	35
A4 Exigences que doivent remplir les VLI pour les polluants atmosphériques	55
A5 Chronologie des VLI pour les particules en suspension et des recommandations de la CFHA concernant les particules en suspension, les poussières fines et la suie	57
A6 Liste des abréviations	59
A7 Bibliographie	63

Abstracts

Seven years after its previous comprehensive evaluation, the Federal Commission for Air Hygiene has once again carried out an in-depth analysis and evaluation of the new findings regarding the effects of ambient particulate matter on the health of the population. Its recommendations are as follows: 1) to retain the short and long term ambient air quality standards specified for PM10 in the Ordinance on Air Pollution Control (OAPC); 2) to harmonise the particulate matter ambient air quality standards with the globally applicable impact-related air quality guidelines of the World Health Organisation (WHO) and to add a new annual mean ambient air quality standard for PM2.5 to Appendix 7 of the OAPC; 3) to specify a binding 10-year interim target for the reduction of carcinogenic soot to 20 percent of the present-day level. This means that additional measures need to be taken to reduce emissions of pollutants contributing to ambient particulate matter, especially from diesel engines and wood-fired stoves. Other indicators of ambient particulate matter (e.g. number of particles, concentration of toxic substances) should be permanently monitored at selected locations, and efforts to define internationally recognised reference measurement procedures need to be resolutely pursued.

Keywords:

Ordinance on Air Pollution Control (OAPC), ambient air quality standards, particulate matter, PM10, PM2.5, soot, elemental carbon (EC), black carbon (BC), organic carbon (OC), organic material (OM), ultrafine particles, number of particles, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), heavy metals, air pollution, health, climate, diesel engines, wood-fired stoves

Sieben Jahre nach der letzten umfassenden Beurteilung hat die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Auswirkungen der Feinstaubbelastung auf die Gesundheit der Bevölkerung erneut eingehend analysiert und bewertet. Sie empfiehlt, 1) die kurz- und langfristigen Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) für PM10 zu belassen; 2) die Feinstaubgrenzwerte mit den wirkungsorientierten, weltweit anwendbaren Richtwerten der WHO in Einklang zu bringen und neu durch einen Jahresmittelwert für PM2.5 in Anhang 7 der LRV zu ergänzen, 3) ein verbindliches 10-Jahres-Zwischenziel für die Reduktion von krebserregendem Russ auf 20 % der heutigen Werte zu setzen. Somit sind zusätzliche Massnahmen zur Verminderung der für die Feinstaubbelastung relevanten Emissionen zu treffen, insbesondere bei Dieselmotoren und Holzfeuerungen. Weitere Messgrössen der Feinstaubbelastung (wie z. B. Partikelanzahl, toxische Inhaltsstoffe) sollen an ausgewählten Standorten dauerhaft erfasst und die Definition international anerkannter Referenzmessverfahren vorange-trieben werden.

Stichwörter:

Luftreinhalte-Verordnung LRV, Immissionsgrenzwerte, Feinstaub, PM10, PM2.5, Russ, EC, BC, OC, OM, ultrafeine Partikel, Partikelanzahl, PAK, Schwermetalle, Luftbelastung, Gesundheit, Klima, Dieselmotoren, Holzfeuerungen

Sept ans après son dernier examen approfondi de la question, la CFHA a une nouvelle fois analysé et évalué les conséquences de l'exposition aux poussières fines pour la santé humaine. Elle fait les trois recommandations suivantes: 1) maintenir les valeurs limites d'immission à court et à long terme pour les PM10 définies dans l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair); 2) aligner nos valeurs limites pour les poussières fines sur les recommandations de l'OMS, fondées sur les effets et applicables dans le monde entier, en inscrivant notamment dans l'annexe 7 de l'OPair une valeur moyenne annuelle pour les PM2,5; 3) définir un objectif intermédiaire contraignant visant à ramener d'ici 10 ans les concentrations de suies cancérigènes à 20% des valeurs actuelles. Il importe de limiter davantage les émissions responsables de la charge en poussières fines, notamment pour les moteurs diesel et pour les chauffages à bois. Enfin, il faudra suivre l'évolution d'autres indicateurs (nombre de particules, composants toxiques, p. ex.) à divers emplacements clés et progresser dans la définition de méthodes de mesure internationalement reconnues.

Mots-clés:

Ordonnance sur la protection de l'air (OPair), valeurs limites d'immission, poussières fines, PM10, PM2,5, suie, EC, BC, OC, OM, particules ultrafines, nombre de particules, HAP, métaux lourds, pollution atmosphérique, santé, climat, moteurs diesel, chauffage à bois

Sette anni dopo l'ultima valutazione globale, la Commissione federale d'igiene dell'aria ha nuovamente analizzato e valutato in dettaglio le nuove conoscenze scientifiche sugli effetti dell'inquinamento da polveri fini sulla salute della popolazione. La commissione raccomanda di: 1) mantenere per il PM10 i valori limite d'immissione a breve e a lungo termine sanciti dall'ordinanza contro l'inquinamento atmosferico (OIA); 2) armonizzare i valori limite per le polveri fini con i valori indicativi orientati agli effetti dell'OMS, applicabili su scala mondiale, e completarli con un valore annuo medio per il PM2,5 nell'allegato 7 OIA; 3) fissare un obiettivo intermedio vincolante a 10 anni per la riduzione della fuliggine cancerogena al 20 per cento dei valori attuali. Occorre quindi adottare misure supplementari per ridurre le emissioni rilevanti per l'inquinamento da polveri fini, in particolare quelle dei motori diesel e degli impianti di combustione a legna. È inoltre necessario rilevare a lungo termine, in siti selezionati, altre grandezze che misurano l'inquinamento da polveri fini (p. es. il numero di particelle, i composti tossici) e portare avanti la definizione di metodi di misurazione di riferimento riconosciuti a livello internazionale.

Parole chiave:

Ordinanza contro l'inquinamento atmosferico (OIA), valori limite d'immissione, polveri fini, PM10, PM2,5, fuliggine, EC, BC, OC, OM, particelle ultrafini, numero di particelle, IPA, metalli pesanti, inquinamento atmosferico, salute, clima, motori diesel, impianti di combustione a legna

Avant-propos

Sept ans après son dernier examen approfondi de la question, la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) livre dans son nouveau rapport *Les poussières fines en Suisse en 2013* des recommandations fondées sur l'état des connaissances concernant les valeurs limites d'immission pour les poussières fines (annexe 7, OPair) et les autres mesures visant à réduire la charge en particules. Ces recommandations, adressées au Conseil fédéral se fondent, comme l'exige la loi sur la protection de l'environnement (LPE), sur l'état de la science et l'expérience concernant les effets des particules fines. La santé humaine est l'un des objectifs majeurs poursuivis par la LPE, et les recherches menées au niveau tant national qu'international attestent clairement les graves conséquences de la pollution de l'air sur celle-ci. A cet égard, relevons en particulier les résultats de recherches suisses, qui montrent non seulement les répercussions pour la santé de la charge de poussières fines, mais également, et de manière spectaculaire, les bénéfices d'une meilleure qualité de l'air. C'est dans ce contexte que la CFHA émet ses nouvelles recommandations qui, loin d'appeler à un changement de stratégie, confirment la justesse des mesures prises jusqu'ici. Il convient néanmoins de combler les lacunes qui ont pu être identifiées dans la réglementation sur les poussières fines. A cet égard, on se référera avec profit aux directives de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) relatives aux particules en suspension, fondées sur les effets et applicables à l'échelle internationale.

La proposition visant à introduire une valeur limite d'immission pour la charge annuelle moyenne de PM_{2,5} s'inscrit dans la ligne suivie par l'OMS pour ses directives en la matière, qui s'appuient sur les résultats de recherches menées dans le monde entier et qui façonnent les politiques publiques de lutte contre la pollution de l'air dans de nombreux pays. Jusqu'ici, la Suisse s'est référée uniquement au paramètre cumulatif des PM₁₀, en renonçant à légiférer sur les fractions plus fines, qui ont elles aussi des incidences importantes sur la santé. Si la CFHA reconnaît les succès remportés par la Suisse dans la lutte contre les émissions de suies grâce à la définition de valeurs limites d'émission progressistes, elle note également avec une certaine inquiétude que l'on n'exploite de loin pas l'ensemble des possibilités techniques de réduction des émissions de particules ultrafines (nanoparticules), dont font partie les suies cancérigènes, et que les teneurs en suie continuent de ce fait de dépasser sensiblement les limites acceptables, même dans les régions rurales.

C'est pourquoi nous proposons d'intégrer les recommandations de la CFHA dans l'OPair, et de combler la lacune qui persistait jusqu'ici, pour accélérer la réduction des teneurs en substances nocives et cancérigènes et améliorer encore la protection de la population. A la lumière du récent classement des poussières fines parmi les substances cancérigènes du groupe 1 (agents cancérigènes certains pour l'homme), il est urgent d'agir plus drastiquement encore tant sur les émissions que sur les immissions. Moyennant ces quelques améliorations, la Suisse continuera de jouer son rôle de leader mondialement reconnu dans la lutte contre la pollution de l'air.

J'adresse mes plus sincères remerciements à tous les membres de la CFHA et aux autres experts impliqués pour l'immense et précieux travail accompli. La CFHA a approuvé le présent rapport à l'unanimité en décembre 2013.

Nino Künzli
Président de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA)

Résumé

Pour protéger tant la santé humaine que l'environnement, le Conseil fédéral a inscrit dans l'ordonnance sur la protection de l'air des valeurs limites d'immission pour les principaux polluants atmosphériques. Aux termes de la loi sur la protection de l'environnement, ces valeurs limites d'immission doivent être définies de telle manière que, selon l'état des connaissances scientifiques et l'expérience acquise jusqu'ici, la santé humaine et l'environnement ne soient pas mis en danger moyennant respect de ces limites. Sept ans après son dernier examen approfondi de la question, la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA), en sa qualité d'organe consultatif du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), a à nouveau vérifié si les valeurs limites d'immission en vigueur pour les particules fines répondaient encore aux critères définis dans la loi sur la protection de l'environnement. S'il n'y a pas lieu de remanier en profondeur notre stratégie de lutte contre la pollution atmosphérique, la CFHA estime clairement nécessaire d'intervenir sur les valeurs limites d'immission et de prendre des mesures supplémentaires pour protéger tant la population que l'environnement des effets néfastes des particules fines. Se fondant sur l'état des connaissances scientifiques, elle recommande au Conseil fédéral d'adapter les valeurs limites d'immission pour les poussières fines inscrites dans l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air (OPair: cf. tab. 1) de façon à tenir compte des résultats des plus récentes recherches menées en Suisse et à l'étranger concernant les effets des poussières fines sur la santé. A cet égard, il s'agit de satisfaire trois exigences fondamentales:

1. Il convient de conserver les valeurs limites à long terme et à court terme pour les PM10, en faisant passer de un à trois le nombre des dépassements tolérés. Cette adaptation répond aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et apporte à la Suisse la cohérence voulue dans la mise en œuvre des valeurs limites d'immission à court et à long termes.
2. Il convient par ailleurs d'introduire une valeur limite d'immission pour les fractions plus fines (PM2,5), en reprenant les recommandations de l'OMS qui s'appuient sur l'état des connaissances scientifiques (moyenne annuelle de 10 µg/m³).
3. Les immissions de suies cancérigènes devront être ramenées à 20 % de leur niveau actuel d'ici à dix ans et, pour protéger la santé de la population, il faudra veiller à maintenir aussi basses que possible les concentrations de ce type de polluants cancérigènes.

Se fondant sur la situation actuelle et sur l'état des connaissances scientifiques et des techniques de mesure, la CFHA renonce à proposer une valeur limite supplémentaire pour certains composants ou pour le nombre de particules. Elle recommande en revanche une réduction drastique des fortes charges de particules ultrafines et de suies cancérigènes mesurées à proximité des sources d'émission. Elle préconise également que l'on adapte les valeurs limites d'émission inscrites dans l'OPair pour qu'elles répondent à l'état de la technique. Il importe de réduire les fortes émissions de poussières fines des chauffages à bois, et, pour tous les types de moteurs (y compris les moteurs à essence, les moteurs de tracteurs et ceux d'installations stationnaires), d'imposer l'installation de filtres à particules ou de prendre des mesures équivalentes. Même sans définir de valeurs limites supplémentaires pour ces paramètres, il faudra assurer leur suivi permanent dans certaines stations NABEL, de façon à documenter les résultats des dispositions prises pour limiter les émissions.

Tab. 1 > Modifications proposées de l'OPair

en caractères gras, rouges.

Poussières en suspension (PM10)	20 µg/m ³ 50 µg/m ³	Moyenne annuelle (moyenne arithmétique) Moyenne sur 24h; dépassement toléré au maximum trois fois par an
Poussières en suspension (PM2,5)	10 µg/m³	Moyenne annuelle (moyenne arithmétique)
Plomb (Pb) dans les poussières en suspension (PM10)	500 ng/m ³	Moyenne annuelle (moyenne arithmétique)
Cadmium (Cd) dans les poussières en suspension (PM10)	1,5 ng/m ³	Moyenne annuelle (moyenne arithmétique)

1 Introduction

La protection de l'homme et de son environnement contre les atteintes nuisibles ou incommodantes constitue l'objectif principal inscrit dans la loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE). Cette exigence est par ailleurs inscrite dans la Constitution (art. 74 Cst.). Pour remplir cette mission, la LPE définit une stratégie à deux niveaux. Aux termes de l'art. 11, al. 2, LPE, indépendamment des nuisances existantes (donc dans tous les cas), il convient de limiter les émissions dans la mesure que permettent l'état de la technique et les conditions d'exploitation et pour autant que cela soit économiquement supportable (premier niveau). En effet, le principe de précaution veut que l'on maintienne la pollution atmosphérique à un niveau aussi bas que possible et que l'on n'attende pas pour intervenir que l'homme ou l'environnement soient exposés à une menace directe. En décidant qu'il suffirait que le caractère nuisible ou incommodant d'une émanation polluante soit probable, le législateur a ménagé une marge de sécurité allant dans le sens du principe de précaution.

Des mesures plus sévères sont requises dès lors qu'il est établi ou qu'il faut s'attendre à ce que de nouvelles émanations, ajoutées aux charges existantes, induisent des atteintes nuisibles ou incommodantes, soit en d'autres termes que les immissions soient excessives par rapport à l'objectif constitutionnel. Dans ce cas, l'art. 11, al. 3, LPE prévoit une limitation plus stricte des émissions (deuxième niveau). Dans le cadre de ce deuxième niveau, la protection de l'être humain et de son environnement contre les atteintes excessives prend le pas sur les considérations économiques. Mais même à ce stade, il convient de respecter le principe de proportionnalité.

Pour décider s'il suffit de prendre les mesures requises par le principe de précaution ou si des restrictions supplémentaires s'imposent, il convient de déterminer si la charge polluante présente ou non un caractère excessif. Pour ce faire, il faut pouvoir disposer de critères contraignants. En vertu de la LPE, le Conseil fédéral est tenu de définir pour certains polluants, qui servent d'indicateurs de pollution atmosphérique, des valeurs limites d'immission (VLI) à ne pas dépasser. Ces valeurs doivent prendre en compte les groupes de personnes particulièrement sensibles, comme les enfants, les personnes malades, les personnes âgées et les femmes enceintes (art. 13 LPE). Il faut par ailleurs tenir compte du fait que certaines immissions ne surviennent généralement pas seules, mais en lien avec d'autres, et qu'il faut également les évaluer collectivement et dans leur action conjointe (art. 8 LPE). Les VLI d'une douzaine de polluants atmosphériques figurent à l'annexe 7 de l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air (OPair).

En juillet 1986, suite à l'entrée en vigueur de la LPE le 1^{er} janvier 1985 et de l'OPair le 1^{er} mars 1986, le Conseil fédéral instituait la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) en tant qu'organe consultatif permanent, chargé de conseiller le département et l'office compétents pour toutes les questions scientifiques et méthodologiques ayant trait à la protection de l'air. La CFHA a de ce fait focalisé ses activités sur l'élaboration et la vérification des bases servant à définir les VLI, selon l'état de la science et de l'expérience au sens des art. 13 et 14 LPE.

Les VLI doivent être réexaminées à intervalles réguliers. Il convient d'observer sans relâche l'évolution des charges polluantes afin de déceler les effets et les risques qui ne seraient pas encore ou insuffisamment couverts. Une fois les effets et les risques établis au plan scientifique, il est possible de mieux réagir en adaptant les valeurs limites existantes ou en en fixant de nouvelles, pour enfin réduire les charges par des mesures ciblées. Dans son rapport, *25 ans de protection de l'air sur la base de la loi sur la protection de l'environnement – Thèses et recommandations* (2010), la CFHA a no-

tamment recommandé de continuer à édicter des VLI répondant à l'état des connaissances, basées sur leurs effets et faciles à mettre en œuvre. Cela revient à dire que les VLI définies dans l'OPair doivent rester axées sur la protection de l'homme et de son environnement. Si dans son précédent rapport *Les poussières fines en Suisse*, paru en 2007, la CFHA avait renoncé à proposer la mise en place d'une valeur limite supplémentaire pour les PM_{2,5}, elle avait recommandé que l'on réévalue la situation quelques années plus tard, à la lumière des nouvelles découvertes scientifiques. Dans le cadre du projet *REVIHAAP – Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution* (Données relatives aux aspects sanitaires de la pollution atmosphérique en vue de réviser les politiques de l'UE), cofinancé par l'UE, un comité de 30 experts a étudié 24 questions ayant trait aux polluants atmosphériques et à la santé, ainsi qu'à la future politique européenne en matière de qualité de l'air, et formulé des réponses ad hoc. Le travail des experts a consisté à rassembler et à évaluer les découvertes les plus récentes relatives à la pollution atmosphérique et à ses effets sur la santé (Organisation mondiale de la santé (OMS) 2013). Comme la CFHA avait elle-même délégué plusieurs experts, il a été possible d'intégrer directement les dernières conclusions concernant les poussières fines et la santé dans le présent rapport.

Comme le soulignent ses auteurs, l'étude REVIHAAP permet d'étayer plus solidement encore les recommandations existantes de l'OMS, sur la base des découvertes scientifiques les plus récentes. C'est dire l'importance que revêt le respect de ces recommandations pour la protection de la santé humaine. Par ailleurs, les valeurs indicatives publiées par l'OMS ne prévoient aucune marge de sécurité, ce qui signifie que même à des concentrations plus faibles, on observe encore des effets sur la santé. Les auteurs du rapport constatent que les valeurs limites définies par l'UE divergent pour l'heure considérablement par rapport aux directives sur la qualité de l'air émises par l'OMS. Les experts recommandent à l'UE de vérifier en particulier les valeurs limites relatives aux PM_{2,5}, et de définir des valeurs plus restrictives. Il convient également de suivre de près certains risques sanitaires nouvellement identifiés, comme ceux liés aux suies (Impact sanitaire du carbone noir, OMS 2012; voir la définition des suies dans l'encadré) ou aux très hautes concentrations de poussières ultrafines issues de processus de combustion, en vue de compléter et d'adapter les VLI dès lors que l'on disposera de suffisamment d'éléments scientifiques les concernant.

A la lumière du récent reclassement par le Centre international de Recherche sur le cancer (CIRC) des poussières fines parmi les substances cancérigènes du groupe 1, soit les agents cancérigènes pour l'homme, il est urgent d'agir plus drastiquement encore tant sur les émissions que sur les immissions.

Qu'est-ce que la suie?

Il est difficile de donner une définition simple et univoque de ce qu'est la suie (Petzold 2013). Par suie, on entend l'ensemble des particules primaires contenant du carbone, issues d'une combustion incomplète. Elle est constituée de carbone élémentaire (elemental carbon, EC), de couleur noire, et de divers composés organiques, regroupés sous le terme générique de carbone organique (organic carbon, OC). Dans le contexte des immissions, le mot suie est souvent utilisé pour se référer uniquement au carbone élémentaire (cf. 23^e Bundes-Immissionschutz-Verordnung, BImSchV, ordonnance fédérale allemande sur la protection contre les immissions,). Le terme de carbone noir (black carbon, BC) est une désignation opérationnelle utilisée pour toutes les particules contenant du carbone et pouvant être mesurées à l'aide de procédés optiques (absorption lumineuse et/ou diffraction). On appliquait autrefois un procédé très simple, destiné à mesurer les concentrations de fumées noires, et qui consistait à faire circuler de l'air à travers un filtre et à mesurer la réflexion optique. Tant le carbone élémentaire que le carbone organique sont déterminés à l'aide de procédés chimiques ou thermo-optiques. Le carbone organique est constitué d'une très grande variété de composés organiques, que l'on n'a de loin pas tous identifiés. Parmi les composés connus, on peut citer le lévoglucosane, un composant de la fumée de bois, les acides organiques simples ou complexes, les alcanes à longue chaîne, les oligomères organiques et les composés aromatiques polycycliques (hydrocarbures aromatiques polycycliques, HAP).

2 Questions abordées dans le rapport

L'actuelle ordonnance sur la protection de l'air définit les VLI suivantes :

Poussières en suspension (PM10)	20 µg/m ³	moyenne annuelle (moyenne arithmétique)
	50 µg/m ³	moyenne sur 24h; ne doit pas être dépassée plus d'une fois par année
Plomb (Pb) contenu dans les poussières en suspension (PM10)	500 ng/m ³	moyenne annuelle (moyenne arithmétique)
Cadmium (Cd) contenu dans les poussières en suspension (PM10)	1,5 ng/m ³	moyenne annuelle (moyenne arithmétique)

En se fondant sur la situation décrite en introduction, la CFHA souhaite répondre aux quatre questions suivantes dans le cadre du présent rapport:

1. La concentration en PM10 est actuellement réglementée par le biais d'une VLI à court terme pour la moyenne journalière (24 h) et d'une VLI à long terme pour la moyenne annuelle. Cette approche est-elle encore appropriée aujourd'hui?
2. Si l'on choisit de conserver une VLI à court terme pour les PM10, faut-il adapter la concentration (50 µg/m³) et le seuil de tolérance (un dépassement de la moyenne journalière par an) actuellement en vigueur?
3. Si l'on choisit de conserver une valeur limite d'immission à long terme pour les PM10, faut-il adapter la VLI de 20 µg/m³ actuellement en vigueur (en moyenne annuelle)? Faut-il la compléter par une VLI à long terme pour les PM2.5, ou peut-on toujours se passer de réglementation séparée pour les PM2.5?
4. Faut-il réglementer les paramètres qui ne l'ont pas été jusqu'ici, en particulier dans la fraction inférieure à un micromètre (1 µm), en définissant de nouvelles VLI dans l'OPair, de manière notamment à réduire la pollution atmosphérique aux abords des routes et celle générée par les chauffages à bois?

Dans le chapitre qui suit, nous allons répondre à ces questions et tâcher de tirer les conclusions qui s'imposent, en indiquant brièvement comment nous parvenons à ces dernières. Dans l'annexe, nous présentons dans le détail les principales informations contextuelles nécessaires à la compréhension de la problématique, ainsi que l'état des connaissances qui ont permis d'apporter des réponses aux questions posées. A cet égard, l'annexe A7) renvoie à divers ouvrages et publications consacrés à la problématique des poussières fines. L'annexe A1 résume les connaissances relatives aux processus générateurs de poussières fines dont il faut tenir compte dans la définition des réglementations ad hoc. L'annexe A2 présente les diverses fractions de poussières fines et leurs effets spécifiques sur la santé. L'annexe A3 décrit les rapports temporels et spatiaux qui lient les immissions de particules et d'autres critères d'évaluation des poussières fines, l'état des techniques de mesure, ainsi que les rapports entre cette classe de polluants et le changement climatique. L'annexe A4 résume les principales exigences auxquelles devrait répondre une nouvelle VLI, et évalue les indicateurs potentiels en fonction de leur opérabilité.

3 Réponses aux quatre questions et demandes de la CFHA

La concentration en PM10 est actuellement réglementée par le biais VLI à court terme pour la moyenne journalière (24 h) et d'une VLI à long terme pour la moyenne annuelle. Cette approche est-elle encore appropriée aujourd'hui?

A la différence des moyennes journalières, qui se prêtent avant tout à la lutte contre des surcharges passagères et dont les effets sur la santé sont visibles à brève échéance, les moyennes annuelles sont plutôt adaptées pour prévenir les conséquences à long terme de l'exposition aux polluants atmosphériques. Les deux aspects revêtent une égale importance du point de vue de la santé, raison pour laquelle il faut continuer de définir ces deux types de valeurs de manière indépendante. A cet égard, on veillera en particulier à considérer les aspects suivants: si les effets à court terme des poussières influent également sur les problèmes de santé à long terme, les effets à long terme ne sont pas la somme des effets à court terme. Les personnes touchées par les deux types d'effets ne sont pas forcément les mêmes, et les mécanismes biologiques en jeu dans la production des réactions aiguës ne coïncident pas nécessairement avec ceux responsables des conséquences à long terme. Par ailleurs, malgré le respect des moyennes annuelles, il peut y avoir des épisodes de surcharge passagère.

Réponse à la question 1

Pour toutes ces raisons, il importe de continuer à évaluer la charge en PM10 sur la base de ces deux types d'indicateurs, une valeur limite à court terme et une autre à long terme.

Si l'on choisit de conserver une VLI à court terme pour les PM10, faut-il adapter la concentration (50 µg/m³) et le seuil de tolérance (un dépassement de la moyenne journalière par an) actuellement en vigueur?

Il convient de conserver la VLI à court terme de 50 µg/m³ actuellement en vigueur (moyenne sur 24h), en alignant toutefois le nombre de dépassements autorisés sur les recommandations de l'OMS, qui tolèrent 3 dépassements par an (ce qui correspond au 99^e percentile). Cette adaptation apportera davantage de cohérence dans l'imposition de valeurs limites à court et à long termes, ce qui s'avèrera précieux pour la mise en application. Elle ne pose aucun problème des points de vue de la santé et de l'hygiène de l'air. En revanche, pour des raisons de santé publique, on ne saurait reprendre la réglementation en vigueur au sein de l'UE, qui autorise 35 dépassements par année, et qui contreviendrait aux exigences définies dans la législation environnementale de notre pays. Au contraire de la Suisse, l'UE n'a pas défini pour les poussières fines de valeurs fondées sur les effets, mais des valeurs limites à atteindre dans un laps de temps donné, et dont le non-respect peut donner lieu à une action juridique. Ces valeurs limites sont en outre complétées par un système complexe de valeurs cibles, d'obligations et d'objectifs de réduction de l'exposition.

Réponse à la question 2

Il convient de conserver la VLI à court terme de 50 µg/m³ actuellement en vigueur (en moyenne sur 24h), en faisant passer de un à trois le nombre de dépassements autorisés par an.

Si l'on choisit de conserver une VLI à long terme pour les PM10, faut-il adapter la VLI de 20 µg/m³ actuellement en vigueur (en moyenne annuelle)? Faut-il la compléter par une VLI à long terme pour les PM2,5, ou peut-on toujours se passer de réglementation séparée pour les PM2,5?

Les incidences sur la santé d'une charge excessive prolongée en poussières fines et les coûts qui en découlent sont plus importants encore que les conséquences des surcharges passagères. Les effets nocifs pour la santé se font sentir à des concentrations modestes déjà, sans que l'on puisse identifier clairement un seuil d'innocuité. C'est pourquoi les mesures introduites par les pouvoirs publics doivent impérativement porter sur l'ensemble des fractions de poussières fines.

Réponse à la question 3

Les PM10 se composent de fractions fines (taille inférieure à 2,5 µm, soit PM2,5) et de fractions grossières (taille comprise entre 2,5 µm et 10 µm). Si l'ensemble de ces différentes fractions (PM2,5, fractions grossières et ensemble des PM10) entraînent des effets sur la santé, les mécanismes en jeu dans leur action ainsi que leurs effets sont en partie différents. Pour préserver la santé de la population, il importe de réduire le plus possible aussi bien les concentrations des fractions fines que celles des fractions plus grossières.

En Suisse, on observe une forte corrélation entre les fractions de poussières PM2,5 et PM10. Les concentrations massiques des deux fractions de poussières ont diminué en parallèle presque partout dans le pays ces dernières années, et les mesures de protection de l'air ont montré la même efficacité pour les PM2,5 que pour les PM10. En moyenne, les PM2,5 représentent environ 75 % des PM10. Respecter l'actuelle VLI à long terme pour les PM10, fixée à 20 µg/m³ reviendrait donc à respecter une valeur annuelle moyenne de 15 µg/m³ pour les PM2,5. Cependant, les recherches menées confirment clairement que les PM2,5 ont des incidences sur la santé en-deçà de ce seuil. Dans une perspective de santé publique, il ne suffit donc pas de respecter une teneur annuelle moyenne en PM2,5 de 15 µg/m³. Les Etats-Unis ont par exemple décidé en 2012 de suivre l'exemple de la Californie, en faisant passer la VLI pour les PM2,5 de 15 µg/m³ à 12 µg/m³. L'OMS préconise quant à elle une valeur limite annuelle de 10 µg/m³ pour les PM2,5.

La CFHA estime qu'il convient d'agir spécifiquement pour réduire la charge en PM2,5 supportée par la population en l'alignant sur les valeurs recommandées par l'OMS, qui tiennent compte des résultats des études les plus récentes menées en Suisse et ailleurs dans le monde. Aux termes de la LPE, les VLI doivent se fonder sur l'état des connaissances scientifiques. Or, alors même que la Suisse respecte actuellement la moyenne annuelle de 20 µg/m³ pour les PM10, les teneurs en PM2,5 continuent de dépasser de 50 % les valeurs recommandées par l'OMS.

A l'exemple des politiques mises en place par nombre de pays et par l'Union européenne (UE), il convient de compléter les VLI pour les PM10 par une VLI à long terme pour les PM2,5. Pour répondre au mandat légal de protection de la santé contre les fractions de poussières plus fines, il faut suivre les recommandations de l'OMS en inscrivant dans l'OPair une VLI annuelle de 10 µg/m³ pour les PM2,5.

Proposition de la CFHA

La VLI de 10 µg/m³ pour les PM2,5 représente une exigence scientifiquement fondée qui, conformément aux dispositions légales, répond à un impératif de santé publique. Elle ne peut pas être comparée aux valeurs limites en vigueur au sein de l'UE, qui suivent une logique différente et ne peuvent plus être dépassées à partir d'un moment

défini. Dans le rapport sur l'étude REVIHAAP, les experts de l'OMS recommandent instamment à l'UE de revoir à la baisse ses valeurs limites pour les PM_{2,5}.

Pour pouvoir respecter la VLI recommandée par la CFHA pour les PM_{2,5}, il convient de définir des normes basées sur l'état de la technique pour toutes les sources de poussières fines et de leurs gaz précurseurs. Les nouvelles normes Euro 6 pour les gaz d'échappement devraient permettre ces prochaines années de réduire fortement les émissions polluantes du trafic routier. Un resserrement des normes est par ailleurs nécessaire pour les autres types de véhicules (tracteurs, véhicules industriels, etc.), pour les moteurs d'installations stationnaires (couplage chaleur force, groupes électrogènes, etc.) ainsi que pour les installations de combustion (surtout celles à combustibles solides). Il importe de remplacer les chauffages à bois à fortes émissions par des installations répondant à l'état de la technique, efficaces et moins polluantes. Pour davantage de détails concernant les VLI recommandées, consulter l'annexe A4.

Faut-il réglementer les paramètres qui ne l'ont pas été jusqu'ici, en particulier dans la fraction inférieure à un micromètre (1 µm), en définissant de nouvelles VLI dans l'OPair, de manière notamment à réduire la pollution atmosphérique aux abords des routes et celle générée par les chauffages à bois?

Il est urgent d'agir pour réduire les teneurs en particules à proximité des sources, qui ne sont pas prises en compte par les VLI, et ce pour diverses raisons:

Réponse à la question 4

1. La dispersion temporelle et spatiale des PM₁₀ et des PM_{2,5} ne reflète pas assez fidèlement la dispersion des particules caractéristiques des zones proches des sources d'émission (particules ultrafines, suies, etc.). Elle ne peut donc pas servir d'indicateur pour ces dernières. Or les particules les plus fines (en particulier celles d'un diamètre inférieur à 0,5 micromètre) présentent des modes d'action quelque peu différents de ceux des fractions plus grossières. Lorsqu'elles sont inhalées, elles parviennent à pénétrer dans les cellules et les tissus, pour se disperser dans tout l'organisme. On ne connaît pour l'heure que partiellement les conséquences pour la santé de ce comportement, mais de nombreux chercheurs y travaillent. Il faut toutefois partir du principe que les effets sur la santé de ces polluants typiques des zones proches des sources d'émission, effets que l'on commence à étudier, diffèrent en partie de ceux des fractions plus grossières, au diamètre supérieur à 1 µm. Les suies de diesel, constituées quasi exclusivement de particules de moins de 1 µm, ont par ailleurs aussi un effet **cancérogène**, et sont classées depuis 2012 par le CIRC de l'OMS dans le groupe des cancérogènes de classe 1. Ce même classement est appliqué depuis octobre 2013 aux poussières fines dans leur ensemble.
2. En vertu du principe de précaution, il est nécessaire et adéquat de réguler et de chercher à **réduire** autant que faire se peut les plus petites fractions de particules.
3. On ne peut être sûr que les mesures appliquées aujourd'hui auront le même effet sur les polluants typiques des zones proches des sources d'émission, pas encore réglementés, que sur les polluants déjà pris en compte. Il convient donc d'inclure de façon ciblée ces polluants dans l'OPair.

La CFHA a mené des recherches intensives pour savoir comment réglementer les polluants particuliers caractéristiques des zones proches des sources de manière à satisfaire aux exigences de santé publique. Grâce au plan d'action contre les poussières fines, la Suisse a déjà abaissé la charge de cette classe de polluants, quoique pas encore suffisamment. La CFHA s'est quant à elle attachée à vérifier si l'introduction d'une VLI supplémentaire pour un indicateur restant à déterminer (nombre de particules, p. ex.) pourrait constituer un bon outil. Les critères à remplir lors de la définition d'une

VLI se trouvent résumés dans l'annexe A4. Les motifs exposés ci-dessous s'opposent à la définition, pourtant légitime, d'une VLI supplémentaire:

- Les méthodes de mesures des immissions pour les fractions de particules les plus fines, ainsi que les autres indicateurs pouvant en principe servir à mesurer les charges à proximité des sources ne sont pas encore standardisés au niveau international. Introduire une nouvelle VLI de ce type entraînerait donc des difficultés considérables pour la mesure et l'évaluation des charges polluantes, mais aussi pour la mise en application.
- Les charges polluantes à proximité des sources d'émission sont constituées d'un mélange complexe de substances aux caractéristiques variées. Pour choisir un indicateur permettant d'évaluer au mieux les effets sur la santé du mélange, il faut tenir compte d'une grande diversité de critères. Plusieurs candidats sont actuellement en lice, comme la masse de suies, le nombre de particules ou leur surface spécifique, le potentiel oxydatif ou encore la teneur en métaux. On manque toutefois pour l'instant de bases scientifiques pour effectuer un choix fondé.
- Les variations temporelles et spatiales extrêmes souvent constatées dans la concentration de ces types de particules viennent encore compliquer la définition d'une VLI adéquate. Des moyennes à long terme peuvent dissimuler de fortes surcharges momentanées, par exemple dans les endroits connaissant de fortes variations dans leurs conditions de vent, alors que des valeurs limites à court terme peuvent conduire à des estimations, et donc à des décisions très différentes selon la période où sont effectuées les mesures. Un seul véhicule passant à proximité de la station de mesure peut ainsi, selon son type de moteur, son année de construction et les conditions de vent, multiplier à court terme la concentration moyenne en particules ultrafines par 10, voire par 20.
- Même sans VLI, on est parvenu en Suisse au cours des 20 dernières années à diminuer considérablement les émissions de suies, en appliquant de façon conséquente le principe de précaution. On voit ainsi que les mesures de protection de l'air comportent des effets positifs même pour les polluants qui ne sont pas directement pris en compte par les VLI.

Pour ces diverses raisons, la CFHA s'abstient de préconiser pour l'heure l'introduction d'une VLI spécifique pour les particules d'un diamètre inférieur à un micromètre. Elle demande toutefois, dans une optique de santé publique, d'inscrire dans l'OPair des normes d'émission progressistes pour les polluants caractéristiques des zones proches des sources d'émission, en particulier pour les particules ultrafines (nanoparticules), et de renforcer encore les dispositifs de mise en œuvre. Pour ce faire, elle fait les propositions suivantes:

- a) La Suisse doit s'engager résolument au plan international en faveur d'une standardisation des méthodes de mesures des immissions ainsi que d'une détermination plus précise des dispersions spatiale et temporelle des polluants à proximité des sources et de leur évolution dans le temps. L'attention des chercheurs, en Suisse comme à l'étranger, porte en particulier sur le carbone élémentaire, qui constitue un indicateur facilement mesurable. Parmi les autres indicateurs étudiés, il faut citer le nombre de particules, le carbone organique, ainsi que les hydrocarbures aromatiques polycycliques, notamment le benzo(a)pyrène. Ces divers polluants continueront d'être mesurés sur une sélection de sites NABEL (*Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe*, Réseau national d'observation des polluants atmosphériques) et ces relevés serviront à vérifier l'efficacité des mesures qui auront été prises.
- b) Etant donné qu'il n'existe pas de seuil d'innocuité pour les substances cancérogènes, on applique d'ores et déjà le principe de précaution pour ce qui est des émissions de suie (composée principalement d'EC et d'OC). Toutefois, ce principe de précaution

n'est généralement pas appliqué de manière conséquente. Malgré des améliorations sensibles, les charges mesurées en de nombreux endroits continuent de dépasser largement les niveaux inscrits dans la LPE, jugés «tolérables» pour ce qui est des risques de cancer. L'objectif de santé publique visé est un risque sur la vie entière d'un cas au maximum sur un million d'habitants (CFHA 2007, CFHA 2010). Cela signifie que la concentration en EC pondérée par nombre d'habitants ne doit pas dépasser $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne sur l'année. Or elle se situe aujourd'hui aux alentours de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations en EC relevées par les stations de mesure situées dans des zones à très fort trafic devraient rester en-deçà de $0,2$ à $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (recommandation de la CFHA, valeur cible), alors qu'elles atteignent 2 à $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aujourd'hui. Pour ce qui est des émissions, la masse totale annuelle ne devrait pas dépasser 100 à 200 tonnes de suie par année (CFHA 2007). Entre 2010 et 2012, une moyenne de 2 à 3000 tonnes de suie a encore été émise chaque année en Suisse. A long terme, il faudra donc réduire les émissions de suie d'un facteur de 10 à 20 par rapport à la situation actuelle. **La CFHA suggère, à titre d'objectif intermédiaire, que nous réduisions les concentrations de suie ou de EC à proximité des sources d'émission à 20 % au maximum de leurs valeurs actuelles d'ici à dix ans, et que nous atteignons cet objectif par le biais des mesures énumérées ci-après.**

- La CFHA préconise l'introduction rapide et exhaustive de filtres à particules ou d'autres procédés équivalents pour tous les moteurs diesel, autant routiers que stationnaires, et en particulier aussi pour les véhicules agricoles, les génératrices diesel, les navires et les installations CCF, ainsi que pour les groupes électrogènes de secours. Non équipés de filtres, ces derniers types d'installation émettent de très grandes quantités de suies pendant leurs seuls brefs cycles d'essai périodiques. De plus, la CFHA demande que l'on mette les véhicules diesel et à essence sur un pied d'égalité, et que l'on applique aux deux types de moteurs les normes correspondant à l'état de la technique.
- La commission demande également une réduction des émissions provenant des deux-roues à moteur, et l'application à cette catégorie aussi des normes répondant à l'état de la technique.
- Elle préconise l'application aux chauffages à bois de normes correspondant à l'état de la technique pour ce qui est des émissions polluantes et des rendements. Les installations peu efficaces (cheminées de salon, p. ex.) ne doivent plus servir d'installation de chauffage. Les vieilles installations, fortes émettrices de polluants atmosphériques, doivent être remplacées par des installations plus modernes, plus efficaces et plus propres. Les matériaux critiques (écorces, vieux bois, paille et équivalents) ne doivent plus être brûlés que dans de grandes installations agréées, gérées par des professionnels, et équipées de filtres à particules efficaces.

4 Perspectives

Les dispositions complémentaires inscrites dans l'OPair et les mesures supplémentaires de lutte contre la pollution atmosphérique contribueront de manière significative à la protection de la santé. Les relevés destinés à évaluer la qualité de l'air et les études ad hoc ont pour fonction de documenter et d'établir le bien-fondé de ces diverses démarches. Dans les prochaines années, l'OMS commanditera à n'en pas douter une nouvelle évaluation des données scientifiques à disposition, étant donné les progrès importants accomplis en matière de protection de l'air et de la santé, et les nombreux travaux consacrés à l'action spécifique des nanoparticules. La CFHA suivra de près ces processus et débatera des aspects importants pour la Suisse. La situation sera réévaluée dans cinq ans, notamment pour ce qui est des charges de suies. Les recherches viseront en particulier à évaluer dans quelle mesure il a été possible de réduire les concentrations de particules fines et de suies sur les sites fortement touchés. De nouvelles évaluations seront menées, visant à déterminer si les dispositions complémentaires de l'OPair auront permis d'améliorer sensiblement la situation sanitaire, ou s'il sera nécessaire d'introduire une VLI spécifique pour les suies ou pour d'autres critères d'évaluation de la charge en poussières fines. Ces discussions devront être menées non seulement au sein de la CFHA, mais également au sein des instances internationales, et impliquer des experts suisses.

Annexe

A1 Comment se forment les poussières fines?

A1-1 Introduction

Savoir quelles sont les principales sources de poussières fines permet de définir des priorités et de prendre des mesures de réduction adéquates. Les poussières fines proviennent de sources anthropogènes, mais également de sources naturelles. Une partie d'entre elles parviennent directement dans l'air sous forme d'aérosols solides ou liquides, une autre, relativement importante, se forme dans l'atmosphère par le biais de processus complexes, à partir de gaz précurseurs.

Les recherches menées en Suisse concernant la composition des poussières fines montrent qu'en moyenne annuelle, la fraction des PM10 mesurée sur les sites modérément pollués des villes et des agglomérations est formée pour un tiers environ d'aérosols contenant du carbone (EC et OC), pour un autre tiers d'aérosols anorganiques secondaires (nitrates, sulfates et ammoniac), et pour le dernier tiers de minéraux, d'éléments traces et d'humidité (Hüglin 2012).

Les concentrations mesurées pour les composants principaux des PM10 sur les sites non directement exposés au trafic sur le Plateau suisse sont en grande partie semblables. Les concentrations en PM10 légèrement élevées, mesurées en milieu urbain par rapport aux zones rurales, s'expliquent principalement par des apports plus importants en EC et en éléments traces (Hüglin 2012).

Les véhicules à moteur et les chauffages à bois figurent parmi les principales sources des particules fines, et donc des composés organiques et de la suie qu'elles contiennent. Les parts de particules comportant des incidences sur la santé proviennent pour leur majorité directement (particules primaires) ou indirectement (particules secondaires) de processus de combustion (moteurs et bois avant tout). Les installations de combustion participent à la pollution particulaire en dégageant aussi bien des particules primaires que des gaz précurseurs:

- polluants particulaires, surtout des particules émises comme la suie (EC), des mélanges de substances organiques à point d'ébullition élevé, des oxydes métalliques;
- polluants gazeux, soit les gaz précurseurs de particules secondaires, partiellement convertibles en particules/aérosols à la source. En font notamment partie les mélanges de substances organiques à point d'ébullition bas et les produits de leur transformation (composés oxydés et azotés, p. ex.), ainsi que des gaz acides ou alcalins (SO₂, NH₃, NO₂/HNO₃) et les produits de leur transformation (sels).

A1-2 Emissions anthropogènes issues des processus de combustion

Mesurer cette grande variété de composants de gaz d'échappement requiert la mise en œuvre de techniques complexes. A cet égard, la stricte distinction opérée entre EC (BC) et OC n'est pas triviale; en effet, selon la méthode d'analyse utilisée, on décèle dans le EC des quantités différentes de carbone issu de composés organiques réfractaires (résistants à la chaleur) ou colorés (Herich 2011).

A1-2.1 Morphologie et composition chimique des polluants particuliers

Les émissions des moteurs diesel sont des mélanges complexes de suies, de composés organiques, HAP compris, de composés azotés et soufrés, ainsi que d'oxydes métalliques. La majeure partie des particules présentent un diamètre aérodynamique inférieur à 1 µm. A ce titre, elles peuvent traverser la paroi alvéolaire des poumons et ont donc des conséquences particulièrement importantes sur le plan de la santé. La quantité et la composition des particules émises par les moteurs diesel sont fonction du carburant utilisé (teneur en soufre, p. ex.), du régime d'exploitation (charge, nb de tours/min., température), de la conception du moteur (suralimentation, injection électronique, recyclage des gaz d'échappement, etc.) et du système de traitement des gaz d'échappement (catalyseur d'oxydation, filtre à particules, système SCR). Depuis 2011, pour obtenir leur homologation, les voitures de tourisme et de livraison à moteur diesel doivent respecter non plus seulement une valeur limite fondée sur la masse des particules, mais également une limite numérique de $6,0 \times 10^{11}$ par kilomètre. Pour les véhicules utilitaires lourds, une limite similaire, fixée à $8,0 \times 10^{11}$ par kilowattheure, est applicable depuis la norme Euro 6 (2013/14)¹. Parallèlement, la valeur limite applicable aux oxydes d'azote précurseurs des particules secondaires est, elle, divisée par deux.

Moteurs diesel

Les moteurs à essence émettent nettement moins de particules que les moteurs diesel sans filtre à particule. Grâce à leurs systèmes de traitement catalytiques très performants, ils émettent aussi moins de NO_x. Pour ce qui est des émissions de particules, les moteurs à injection directe, qui gagnent rapidement du terrain, se distinguent clairement des moteurs dotés d'un système SRE (injection dans le collecteur d'admission), encore très répandus aujourd'hui. Les causes de la formation de particules – déficits dans la formation du mélange (en charge stratifiée, p. ex.) et déposition sur les parois – sont plus ou moins les mêmes, mais il y a des différences quant à la composition des effluents: dans les deux cas, la production de suie est moindre que pour les moteurs diesel, mais la part relative de carbone organique est sensiblement plus élevée pour les moteurs à injection directe. Comme le laissent supposer les mécanismes de production de particules, les émissions sont particulièrement importantes lors de la phase de démarrage à froid et, pour les moteurs à système SRE, également lors des accélérations. Depuis novembre 2009 (Euro 5), les moteurs à essence sont eux aussi tenus de respecter une limite fondée sur la masse. Eu égard à leurs particularités, les moteurs à injection directe seront en outre soumis dès 2014 (Euro 6) à une limite de concentration numérique de $6,0 \times 10^{12}$ par kilomètre. Et, à compter de 2017, ils devront respecter la même limite que les moteurs diesel. Les moteurs à essence à injection directe respectent certes les limites fondées sur la masse de particules, mais cela pourrait s'avérer difficile pour les limites de concentration numériques prévues. De plus, comme leurs émissions en conditions réelles, hors cycle d'essai, dépassent de plusieurs fois la limite de concentration numérique, le montage de filtres à particules deviendra aussi courant pour ce type de moteurs à essence que pour les moteurs diesel.

Moteurs à essence

La combustion de bois génère divers types de particules primaires. Parmi celles-ci, on trouve le carbone élémentaire (EC/suie), les composés organiques volatils ou peu volatils (aldéhydes, acides carboxyliques, composés aromatiques oxydés et azotés, HAP, goudron, etc.) et les particules solides anorganiques (oxydes métalliques ou sels).

Chauffages à bois

Pour la fraction de particules PM₁ générées par la combustion de bois, on trouve de grandes différences dans les installations de petite taille entre celles dotées d'une

¹ Le 1^{er} délai concerne l'homologation, le second la mise en circulation de véhicules neufs.

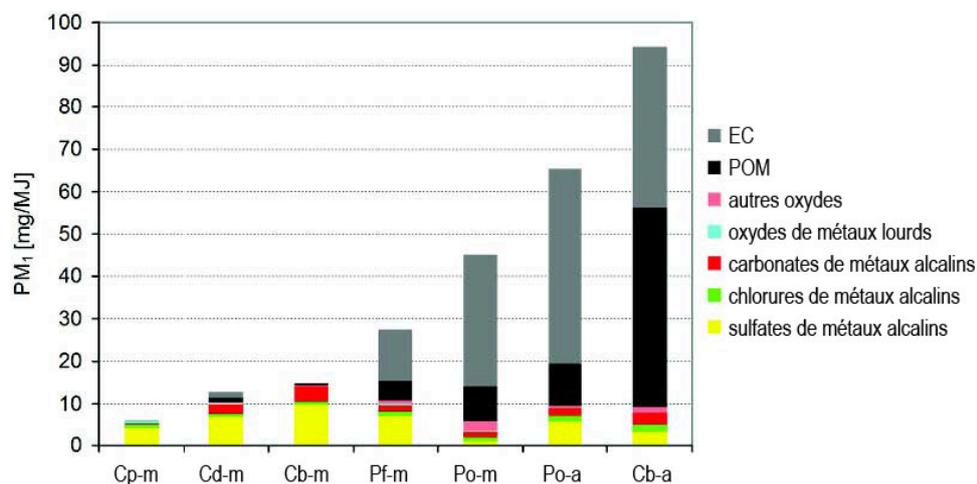
régulation automatique et les autres. Ces différences tiennent d’une part à la quantité de particules émises, et d’autre part à la composition chimique de ces dernières.

Les installations à combustion améliorée comme les chaudières modernes à pellets, à plaquettes ou à bûches dégagent nettement moins de OC et de suie (EC) que les fourneaux à bois alimentés à la main comme les poêles et les poêles en faïence, ou que les vieilles installations. Les nouvelles chaudières à pellets émettent jusqu’à 100 fois moins de PM1 que les vieilles chaudières à bûches.

Plus la combustion est complète, moins il y a de dégagements de suie et de composés organiques condensables (OC ou OM). Les plus hautes émissions sont le fait d’installations alimentées manuellement et à feu traversant (combustion de bas en haut), qui plus est s’il y a limitation de l’arrivée d’air (Klippel 2007). Les échantillons de poussières prélevés après combustion incomplète de bois présentent par ailleurs une concentration 20 fois plus élevée en HAP (Klippel 2007).

Fig. 1 > Composition chimique typique des particules émises

Par divers types de chaudières à bois sur une journée typique. Carbone élémentaire EC, composés carbonés organiques (POM) et composants minéraux.



Source: Kelz 2012

L’examen a porté sur les types d’installations suivants: Cp-m: chaudière à pellets moderne; Cd-m: chaudière à bois déchiqueté moderne; Cb-m: chaudière à bûches moderne; Pf-m: poêle en faïence moderne; Po-m: poêle moderne; Po-a: poêle de technologie dépassée (produit bas de gamme); Cb-a: chaudière à bûche, ancienne; mesures effectuées sur gaz de combustion dilués, à moins de 40° C.

La formation d’aérosols anorganiques dépend principalement de la composition des combustibles utilisés. Lors de la combustion de bois, ils sont formés principalement à partir des composants volatils (en particulier K, Na, S, Cl, Zn et traces de métaux lourds) qui passent en phase gazeuse lors de la combustion. On assiste alors à la formation dans les effluents gazeux humides de sulfates, de chlorures et de carbonates de métaux alcalins, ainsi que d’oxydes et de chlorures métalliques, qui peuvent se déposer sur les particules fines (suie, p. ex.).

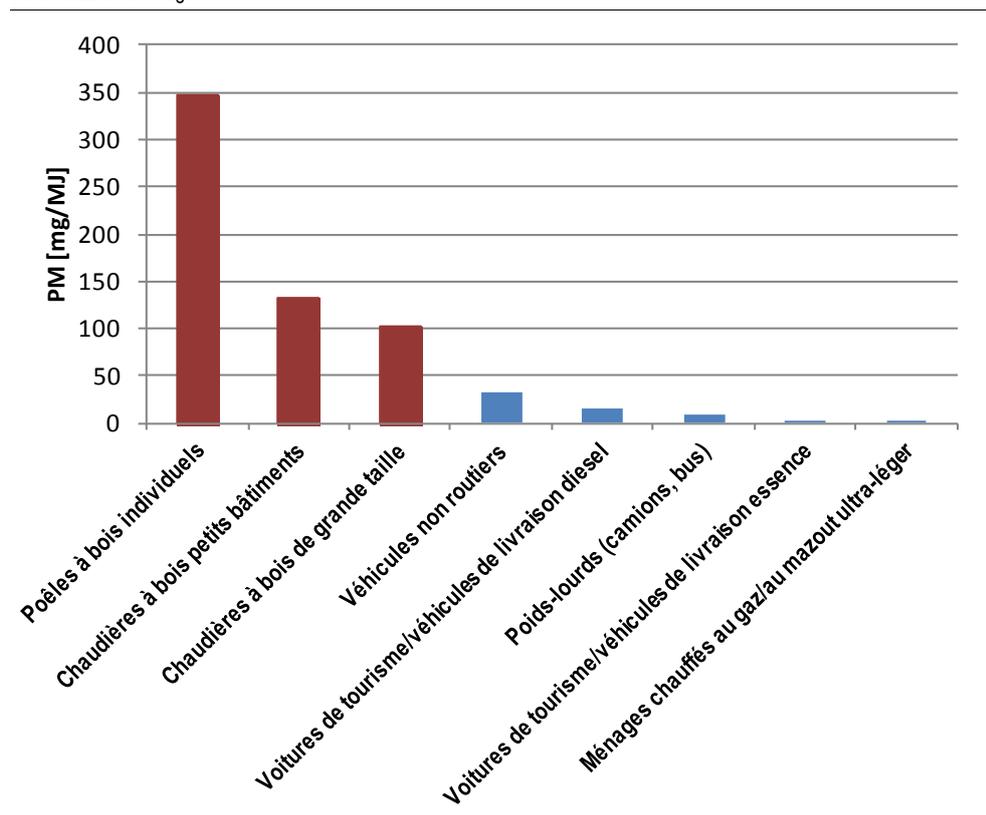
A1-2.2 Charges de composants particulaires et condensables issus d'installations de combustion

Les propriétés physico-chimiques des particules émises exercent une influence déterminante sur leur mode d'action biologique. Les particules de diamètre <1 µm issues de moteurs de véhicules et de chauffages à bois varient fortement dans leur granulométrie, leur microstructure, leur composition et leur teneur en HAP. Les variations de température et de pression mesurées dans les différents processus de combustion se traduisent par différentes modalités de formation et de transformation des particules à proximité des sources d'émission (nucléation, oxydation, condensation).

Comme on le voit ci-dessous, pour une quantité d'énergie donnée, les chauffages à bois produisent beaucoup plus de particules fines que les moteurs ou les installations brûlant du gaz ou du pétrole.

Fig. 2 > Emissions de particules fines du parc suisse d'installations et de véhicules, par unité d'énergie produite

issues de processus de combustion (y compris composés condensables, sans particules secondaires ni particules d'abrasion ou resuspendues). Les colonnes rouges figurent les chauffages à bois, les bleues les moteurs ainsi que les chauffages à gaz ou au mazout ultra-léger.



Source: inventaire des émissions de l'OFEV et tab. 2

Tab. 2 > Emissions des divers processus de combustion (année de référence 2010²)

Les chiffres se fondent sur les inventaires officiels; autres estimations *en italique*. Les charges élevées liées aux propriétés techniques des installations ou à un certain comportement de conduite ou d'exploitation ne sont que partiellement prises en compte ci-après. Les deux-roues ainsi que les chauffages à mazout et à gaz sont exclus.

Sources d'émission Critères	Trafic				Combustion de bois		
	Voitures de tourisme et de livraison à essence	Voitures de tourisme et de livraison diesel	Véhicules utilitaires	Véhicules et engins non routiers	Poêles individuels	Chaudières de petits bâtiments	Grandes chaudières automatisées
Nombre (2010)	3 400 000	950 000	52 000	1 270 000	562 803	79 774	8 941
Type de source	Linéaire	Linéaire	Linéaire	Linéaire/ ponctuelle	Ponctuelle	Ponctuelle	Ponctuelle
Activités des sources			durant les jours ouvra- bles	(durant les jours ouvra- bles)	durant la période de chauffe		
Proximité des sources avec la population	++	++	+	+	+++	++	++
Consommation de combustibles en t par an (2010) ³ CH	2 680 000	1 043 000	682 000	384 000			
Consommation d'énergie en TJ par an (2010) ^{3,4} CH	114 000	45 000	29 000	16 000	8 657	9 780	15 751
Emissions de particules en t/a ^{3,5,6}	180	690	270	540	3 000 ⁷	1 300 ⁷	1 600 ⁷
EC ⁸ t/a	30	410	200	400	900	780	1 450
OM t/a	150	280	70	140	2 100	500	100
HAP ⁹ t/a	0.08	0.06	0.04	0.00	5.8	4.8	1.4
Effluents gazeux							
COVNM t/a	12 300	600	500	4 400	¹⁰ <	¹⁰ <	¹⁰ <
CO t/a	97 700	3 200	3 900	41 300	26 400	16 700	5 600
NO _x t/a	11 400	12 300	15 000	9 300	690	780	1 260
SO ₂ t/a	44	21	14	11	173 ¹¹	195 ¹¹	315 ¹¹
NH ₃ t/a	2 770	19	8	9	78	88	142

A1-2.3 Conclusions

Pour réduire efficacement les charges de particules fines, nous devons parvenir à limiter fortement les effluents particuliers (EC/OC), condensables (OC/COVNM) et gazeux (NO_x, COVNM, SO₂) issus de processus de combustion, par le biais de mesures techniques et d'exploitation. Il faut par ailleurs que nous réduisions autant que faire se peut les émissions issues de processus d'abrasion et de resuspension, ainsi que celles issues de l'agriculture.

Un renouvellement rapide du parc automobile suisse en faveur de véhicules plus modernes et moins polluants, ainsi que le montage de filtres à particules efficaces sur les machines et les véhicules diesel à longue durée de vie devraient contribuer efficacement à abaisser les émissions de suie. C'est à cette fin que tendent les mesures

² Statistiques de l'OFS et de l'OFEV, ainsi que *Switzerland's Informative Inventory Report 2012* (OFEV)

³ Pour le secteur non routier: année de référence consommations et parcs existants 2005; Source OFEV 2008, série Connaissance de l'environnement n° 0828. Trafic routier: estimations sur la base de la publication Connaissance de l'environnement n° 1021, OFEV 2010.

⁴ Statistique de l'énergie produite à partir du bois (Holzenergiestatistik), OFEN 2011

⁵ Pour les chaudières à bois, calculé sur la base des facteurs d'émission (FE) (Nussbaumer 2008, resp. OFEV 2005) pour les poêles individuels (surtout alimentés à la main), catégorie 1–6: FE COVNM 400 kg/TJ, poussières 150 kg/TJ; pour les chaudières de petits bâtiments (alimentées automatiquement/à la main, avec du bois à l'état naturel), catégorie 7–12: FE COVNM 50 kg/TJ, poussières 100 kg/TJ; grandes chaudières automatiques, catégorie 13–18: FE COVNM 15 kg/TJ, poussières 100 kg/TJ

⁶ Trafic routier: répartition EC/OM sur la base des publications de l'EMPA (Schreiber 2007)

⁷ Somme poussières + ½ COVNM (hypothèse: la moitié des COVNM sont condensables)

⁸ Pour les installations de combustion de bois, les chiffres peuvent inclure des parts de substances minérales.

⁹ Comprend du benzo(a)pyrène, du benzo(b)fluoranthène, du benzo(k)fluoranthène, de l'indeno(1,2,3-cd)pyrène.

¹⁰ La partie condensable des émissions de combustion du bois est comptabilisable en tant que matière organique.

¹¹ Le plus souvent sous forme de sulfate

regroupées dans le plan d'action contre les poussières fines de 2006, ainsi que les incitations mises en place par le biais de la redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations (RPLP). Les deux secteurs encore insuffisamment réglementés sont celui des tracteurs et celui des groupes électrogènes de secours. L'entrée en vigueur de la norme Euro 6 fera également diminuer les émissions de NOx des véhicules diesel. Dans un deuxième temps, il sera également nécessaire de réduire sensiblement les dégagements de COVNM des voitures de tourisme à essence (démarrage à froid), pour prévenir la formation de particules organiques secondaires.

Pour réduire sensiblement les dégagements de poussières fines, de carbone élémentaire et de carbone organique dans les zones d'habitation, surtout pendant la période de chauffe (phase de smog hivernal), il faut exiger des installations de chauffage à bois qu'elles répondent à l'état de la technique. Il ne faut tolérer, en guise de systèmes de chauffage principal, que les chaudières à bois présentant une bonne efficacité énergétique et qui, du point de vue technique comme de celui de l'exploitation, assurent une combustion la plus complète possible.

Qu'elles soient ouvertes ou fermées, les cheminées de salon sont si mauvaises sur le plan énergétique et sur celui de la combustion qu'en vertu de l'OPair, elles ne doivent plus être admises en tant que systèmes de chauffage principal. De plus, il convient de restreindre l'utilisation des poêles individuels à réservoir intégré à des phases de chauffe brèves, défendables au plan de l'énergie et de l'hygiène de l'air (en règle générale un chargement du réservoir par jour). Quant aux combustibles problématiques, fortement générateurs d'aérosols (écorces, bois usagé, paille et similaires), ils ne peuvent être utilisés que dans les grandes installations dotées de filtres à particules efficaces.

A1-3 Autres sources (hors combustion)

A part les processus de combustion, les particules fines sont également formées par abrasion, par resuspension et par formation secondaire à partir de gaz précurseurs présents dans l'atmosphère. L'abrasion est un phénomène d'usure caractéristique des véhicules de toutes sortes: des freins des véhicules routiers ou ferroviaires, des routes et des rails, des pneus, des roues des véhicules ferroviaires et des caténaires par les trains, les trams et les trolleybus. Les émissions par resuspension, essentiellement anthropogènes, sont produites sur les routes, les chantiers et les surfaces agricoles, ainsi que dans les étables. Etant données les conditions météorologiques régnant dans notre pays, l'érosion naturelle par l'action du vent y joue un rôle tout à fait mineur, tout comme les particules générées par les embruns.

Les particules secondaires représentent près de la moitié de la charge totale de PM10 (Hüglin 2012). Elles proviennent de processus de transformation chimique (oxydation et réactions acide-base en phase aqueuse – dans des gouttelettes de brouillard ou de nuages, sur la surface humide de particules en suspension – ou en phase gazeuse avec condensation subséquente) à partir de précurseurs tels que les oxydes de soufre (SO₂, SO₃), les oxydes d'azote (NO, NO₂), les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) ou encore l'ammoniac (NH₃). Les substances résultantes sont par exemple le nitrate d'ammonium (NH₄NO₃), le sulfate d'ammonium ((NH₄)₂SO₄) et divers composés organiques peu volatils (acides, polymères, etc.). Une partie des gaz précurseurs, en particulier les oxydes de soufre et d'azote, proviennent de processus de combustion, l'autre partie de processus d'évaporation ou de volatilisation (surtout pour l'ammoniac).

A1-4 Distribution spatiale des composants des particules fines

Les émissions de particules fines par resuspension et par abrasion proviennent principalement de sources linéaires ou ponctuelles. Les particules qui en résultent présentent en général un diamètre assez important, se situant dans le haut de la fourchette des PM10. Leur concentration décroît rapidement avec l'éloignement de la source, par dilution et par déposition (OFROU 2009; Infras 2007), d'où les différentiels de concentration importants constatés pour ce type de particules. Ainsi, les très grandes différences mesurées en termes de charge de particules entre une artère à fort trafic (canyon urbain) et le contexte urbain général, ou entre les côtés au vent d'une route à fort trafic sont essentiellement le résultat des processus d'abrasion et de resuspension propres au trafic routier (OFROU 2003).

On mesure également de fortes variations spatiales dans le cas des particules ultrafines (diamètre inférieur à 0,1 µm) issues de processus de combustion. Comme pour les phénomènes de resuspension et d'abrasion, ces types de particules sont généralement issus de sources linéaires ou ponctuelles. Leur nombre décroît rapidement à mesure que l'on s'éloigne de leur source, par dilution et par coagulation. C'est pourquoi les charges de PM10 liées aux émissions des moteurs, à l'abrasion et à la resuspension tendent à coïncider avec les axes routiers (fig. 3, OFEV 2013).

Les particules secondaires se forment quant à elles non seulement à proximité des sources d'émission des gaz précurseurs, mais dans toute l'atmosphère, chaque fois que des partenaires de réaction sont présents en quantité suffisante. La formation de particules fines (<1 µm) est donc un phénomène relativement homogène et à grande extension spatiale. D'où la relative homogénéité constatée dans les proportions des différents composants des poussières fines, ainsi que dans leur répartition sur l'ensemble du Plateau suisse. Les stations situées plus en altitude, en particulier celles situées au-dessus de la couche d'inversion hivernale, mesurent quant à elles des concentrations bien moindres. La fig. 4 illustre ce phénomène à l'exemple des nitrates particulaires (NO₃⁻) (OFEV 2013).

Fig. 3 Concentrations en PM10, trafic

Concentrations en particules liées au trafic en 2005; résolution du modèle 200 m x 200 m

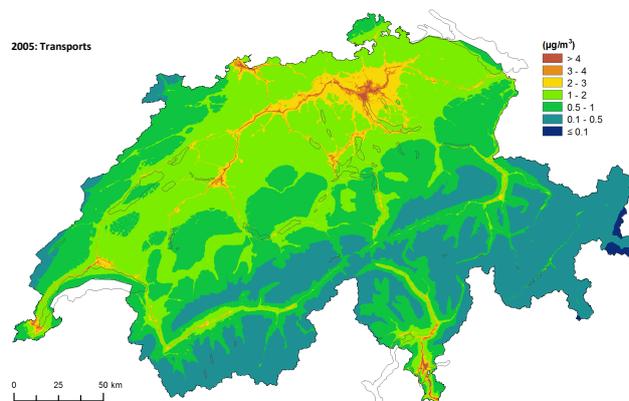
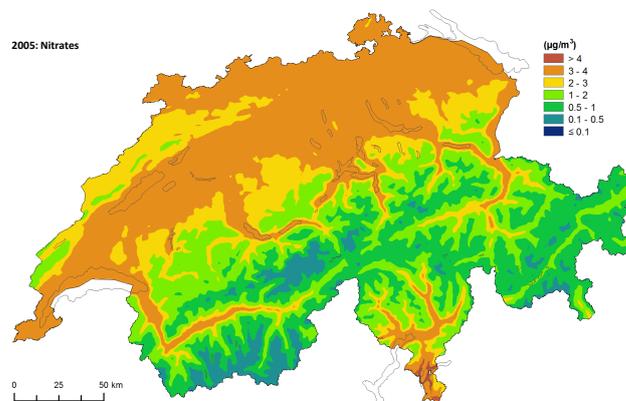


Fig. 4 Concentration en nitrates dans les PM10

En 2005; résolution du modèle 200 m x 200 m



Source: OFEV 2013

A1-5 Variations saisonnières des composants des poussières fines

fonction des saisons. Excepté pour les sites d'altitude, au-dessus de la couche d'inversion hivernale, il en résulte des concentrations de poussières fines plus importantes en hiver qu'en été. Les données collectées dans le cadre d'un projet examinant la composition chimique des poussières fines (Hüglin 2012) permettent de tirer des conclusions concernant les variations saisonnières des divers composants.

Les concentrations de poussières minérales sont réduites et ne semblent pas corrélées avec les saisons. Certains événements ponctuels tels que le transport de sables du Sahara vers la Suisse peuvent toutefois conduire à court terme à des concentrations fortement élevées.

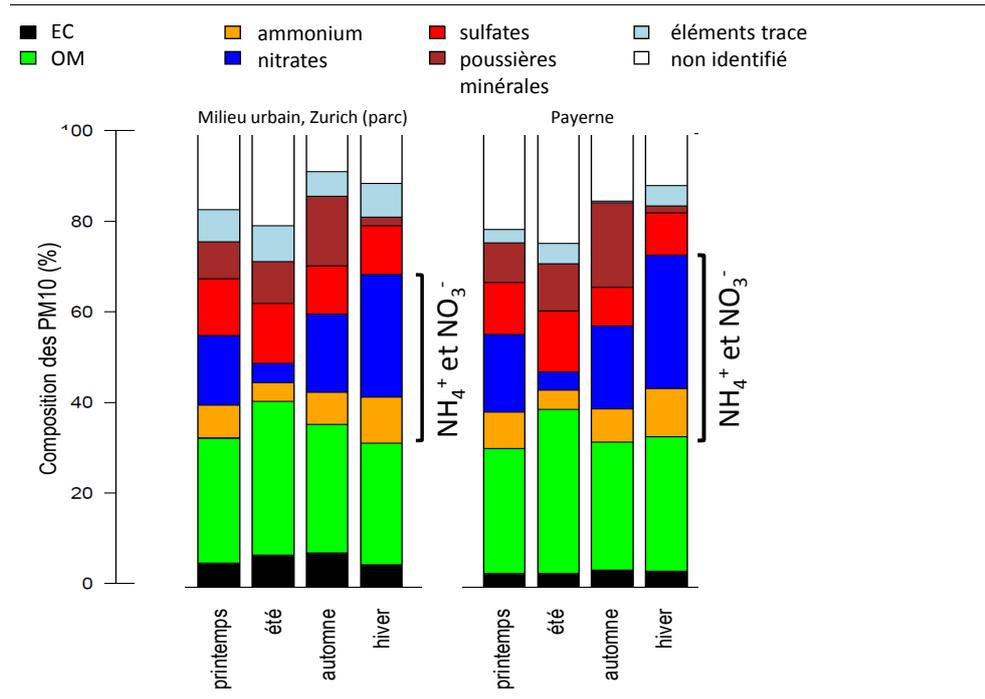
Sur les sites où le trafic routier joue un rôle nettement plus important que la combustion de bois, on ne constate pas de variations saisonnières des teneurs en suie (EC). En revanche, là où la combustion de bois joue un rôle comparable ou plus important, les concentrations de suie sont plus élevées en période de chauffe.

Les concentrations en sulfates et en composés organiques mesurées dans la plupart des stations sont elles aussi plus élevées en hiver.

Au nord des Alpes, les variations saisonnières les plus marquées concernent le nitrate et l'ammonium, qui lui est indissociablement lié, avec des concentrations très faibles en été et très fortes en hiver. La part des nitrates dans les PM10 approche ainsi des 40% pendant l'hiver (cf. fig. 5, parts en % des différents composants des poussières fines sur le Plateau suisse). Au sud des Alpes, où les émissions dues à la combustion de bois jouent un rôle encore plus important qu'au nord des Alpes, les émissions de suie (EC) et de matières particulaires organiques (OM) présentent une forte variabilité saisonnière et peuvent représenter jusqu'à 60% des PM10 en hiver.

Fig. 5 > Parts en % des différents composants des PM10

valeurs mesurées par les stations NABEL de Zurich Kaserne et de Payerne pendant les quatre saisons, de mi-2008 à mi-2009.



Source: Hüglin 2012

A2 Effets sur la santé

A2-1 Conséquences pour la santé des charges de poussières fines, mesurées sur la base des fractions PM_{2,5} et PM₁₀

Depuis la dernière étude consacrée par la CFHA aux poussières fines en 2007, plusieurs études épidémiologiques récentes ont démontré plus clairement encore les effets néfastes pour la santé. Les aspects étudiés vont des cheminements pathophysiologiques fondamentaux à l'augmentation de la mortalité, en passant par les déficits cognitifs, la péjoration de valeurs-cibles à la naissance et de la croissance pulmonaire des enfants, les pathologies circulatoires et respiratoires, sans oublier la multiplication des cas d'asthme et d'allergies. Le tab. 3 recense les effets sur la santé établis avec certitude. Les aspects encore en discussion sont les incidences sur le développement prénatal (naissance prématurée, poids à la naissance), ainsi que les incidences sur le développement neuronal et les performances cognitives.

Tab. 3 > Effets sur la santé établis avec certitude, liés aux PM₁₀ ou aux PM_{2,5}

Pathologies physiologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Inflammations localisées dans les voies respiratoires, signalées p. ex. par la production de granulocytes neutrophiles • Inhibition de la fonction des cellules immunitaires dans les poumons • Aggravation de la tendance aux allergies • Modifications dans le contrôle du rythme cardiaque • Modification des paramètres sanguins (coagulation, paramètres inflammatoires) • Modification de la fonction des parois vasculaires
Effets à court et à moyen terme	<ul style="list-style-type: none"> • Aggravation de l'état de personnes souffrant d'asthme ou de bronchite chronique • Multiplication de maladies infectieuses des voies respiratoires chez les enfants • Augmentation du nombre d'hospitalisations pour maladies cardiovasculaires • Hausse de la mortalité des nourrissons associée à des maladies respiratoires • Augmentation du nombre de décès dus à des affections cardio-pulmonaires
Effets à long terme	<ul style="list-style-type: none"> • Détérioration de la fonction pulmonaire et ralentissement du développement pulmonaire chez les enfants • Diminution de l'espérance de vie du fait d'affections cardiaques et pulmonaires, cancer des poumons compris

Pour nourrir la discussion autour d'un abaissement de la valeur limite applicable aux PM₁₀ ou de l'introduction d'une valeur limite pour les PM_{2,5}, nous présentons ci-après sous forme condensée plusieurs études examinant les deux valeurs de référence.

Il n'existe que trois études européennes de cohorte comparant les incidences des deux fractions de particules. Toutes trois ont établi des liens avec la santé (Raaschou-Nielsen 2013, Naess 2007, Oftedal 2008). A charges comparables, les études transversales européennes ont relevé des liens légèrement plus étroits entre les paramètres sanitaires examinés et les PM_{2,5} qu'avec les PM₁₀. Quant aux quelques études nord-américaines qui ont comparé les effets des deux fractions, la plupart ont conclu à des incidences plus importantes pour les PM_{2,5} que pour les PM₁₀, mais pas toutes.

**Effets à long terme
de la charge de PM₁₀ et
de PM_{2,5}**

Les études européennes analysant les effets à court terme des deux fractions concluent parfois à des incidences plus marquées pour les PM10, parfois pour les PM2,5, mais souvent aussi à des effets équivalents. Les résultats sont fonction de la pathologie ou du paramètre physiologique examiné. Ainsi, les études européennes examinant la mortalité en fonction de la charge de particules à court terme ont plus souvent identifié des effets significatifs pour les PM10, soit pour la fraction la plus grossière, que pour les PM2,5. Quant aux admissions et aux consultations à l'hôpital, elles étaient liées pour partie aux PM10, pour partie aux PM2,5, ou aux deux, selon la pathologie concernée.

Effets à court terme
des PM10 et des PM2,5

Peu d'études sanitaires ont jusqu'ici examiné les répercussions sanitaires des fractions grossières des PM10 (20 publications européennes consacrées aux effets à court terme, aucune aux effets à long terme). Bon nombre d'études européennes ont montré que les fractions grossières avaient des incidences graves sur la santé, soit une augmentation des taux de mortalité, ainsi que diverses affections des voies respiratoires et des crises aiguës d'asthme.

Fraction grossière
(entre 2,5 et 10 µm)

En règle générale, les études longitudinales ne permettent pas d'identifier un seuil de concentration pour les PM10 ou les PM2,5 en-dessous duquel elles n'auraient pas d'effet. C'est notamment le cas des études suisses SCARPOL et SAPALDIA (Bayer-Oglesby 2005, Schindler 2009, p. ex.). Seule l'étude norvégienne Naess de 2007 mentionnait des valeurs que l'on pourrait interpréter comme valeurs seuils, à 14 µg/m³ pour les PM2,5 et 19 µg/m³ pour les PM10, à partir desquels la mortalité commencerait à augmenter. L'analyse récemment parue du projet à grande échelle ESCAPE, regroupant les données de plus de 300 000 participants à 22 études à long terme réalisées en Europe (y compris SAPALDIA) n'a, quant à elle, montré aucune valeur seuil de ce type. Le projet ESCAPE a en revanche révélé l'existence de liens clairs entre les expositions individuelles à long terme aux PM2.5 évaluées au lieu de domicile et la mortalité, et ce même au sein du groupe exposé à une charge maximale de 15 µg/m³ (Beelen 2013).

Seuils d'effet

Pour les effets à court terme, les études menées en Europe et ailleurs dans le monde ne permettent pas non plus de conclure à des seuils d'innocuité. Dans la grande majorité des cas, les conséquences pour la santé augmentent ou diminuent de manière linéaire, en même temps que la charge de particules.

Les effets à court terme des polluants atmosphériques sont plus faciles à documenter et sont en fait déjà établis depuis nombre d'années. L'analyse des effets à long terme exige des moyens bien plus importants et c'est pourquoi ils n'ont pas été étudiés de façon aussi détaillée. Pourtant, si l'on considère l'importance relative des deux types de risques (incidences globales sur la santé, coûts, etc.), les effets à long terme dominent nettement (Pope 2007 et Brook 2010).

Effets à long terme
vs
effets à court terme

A2-2 Incidences sur la santé corrélées avec d'autres indicateurs de particules

Il convient de prêter une attention particulière aux plus petites fractions de particules. A la différence des particules de l'ordre du micromètre, les particules de diamètre inférieur à 500 nm sont à même de pénétrer dans les cellules et les tissus. Elles parviennent à franchir la barrière air-sang-tissus et à entrer dans les vaisseaux capillaires pour être transportées dans tous les organes du corps. Les fractions de particules les plus petites ont ainsi le potentiel de nuire à la santé par d'autres mécanismes que ceux décrits pour les fractions plus grossières.

A2-2.1 Nombre de particules

Des expériences menées sur cultures cellulaires et sur modèle animal ont montré que, pour une masse et une composition chimique identiques, les particules ultrafines présentent une toxicité plus importante que les particules d'un diamètre de l'ordre du micromètre. Elles provoquent des inflammations massives dans les voies respiratoires, traversent les parois cellulaires et endommagent les cellules immunitaires dans les poumons. Ce constat est à l'origine de l'hypothèse selon laquelle ces particules ultrafines sont les principales responsables des affections cardio-vasculaires observées dans le cadre d'études menées sur des populations exposées à une pollution atmosphérique importante.

Expériences sur cultures cellulaires et sur modèle animal

L'importance que revêt en termes de toxicité la plus grande surface totale des particules les plus fines pour une même masse a été confirmée maintes fois dans le cadre d'expériences sur cultures cellulaires. La capacité des particules à provoquer un stress oxydatif et à déclencher un processus inflammatoire dépend toutefois aussi de leur composition chimique. L'un des résultats alarmants des études effectuées sur modèle animal a été que les nanoparticules pouvaient passer des voies respiratoires dans le circuit sanguin, ainsi que du nez au cerveau par le biais des nerfs olfactifs (Geiser 2005; Kreyling 2002; Oberdörster 2004; Rothen-Rutishauser 2007; Semmler 2004). De plus, les souris qui avaient été exposées durant une période prolongée à des particules ultrafines présentaient une artériosclérose plus importante de l'aorte.

Des expériences menées sur volontaires humains ont par ailleurs confirmé la déposition plus importante et les temps de séjour plus longs des particules ultrafines dans les poumons. Dans les concentrations testées, les effets sur les voies respiratoires étaient négligeables, mais l'on a en revanche remarqué des modifications de la fonction vasculaire et de la régulation du rythme cardiaque. On n'est toutefois pas parvenu à démontrer que ces effets étaient différents de ceux des fractions plus grossières. Les études menées sur modèle humain n'ont jusqu'ici pas permis de prouver un passage des particules ultrafines dans le circuit sanguin, ni de corroborer l'hypothèse du passage des microparticules du nez au cerveau. On n'a pas établi avec certitude si ce passage se fait indépendamment de la composition chimique des particules, ni à quelle échelle ce phénomène se produit dans l'organisme humain. Toutefois, les conséquences à long terme pourraient être graves.

Expériences sur volontaires humains

Les effets des fractions les plus fines sur la population générale ont presque toujours été analysés sur la base du nombre de particules. Outre les particules ultrafines, ce type de relevés prend également en compte celles dont le diamètre est compris entre 100 nm et 1 µm. Parfois aussi, ces études examinent la surface totale des particules d'une fraction particulière, ou leur potentiel oxydatif.

Nombre de particules et effets sur la santé de la population générale

Si dans certaines études, le nombre de décès par jour variait parallèlement au nombre de particules dans l'atmosphère, dans d'autres la corrélation était moins claire, voire nulle, et la même chose a pu être observée pour le nombre des consultations d'urgence et des hospitalisations pour troubles cardiaques ou pulmonaires. Dans une étude européenne, le nombre d'hospitalisations pour infarctus augmentait avec le nombre de particules de diamètre inférieur à 0,1 µm dans trois des villes examinées, mais pas dans les deux autres. Sur l'ensemble des cinq villes, c'est avec les concentrations de monoxyde de carbone qu'on pouvait relever le rapport le plus étroit (Lanki 2006).

Nombre d'études similaires fondées sur des données tirées des registres statistiques ont fait état de liens entre le nombre de cas et le nombre de particules, mais pas toujours pour les mêmes maladies, ni toujours dans les mêmes catégories de la population ou les mêmes groupes d'âges. D'autres études examinant les mêmes maladies n'ont décelé aucun rapport de ce type. Dans presque toutes les études, les cas de maladies étaient également corrélés avec d'autres polluants, et il n'a pas toujours été possible d'attribuer clairement tel effet uniquement au nombre de particules ou à une fraction spécifique.

On constate la même hétérogénéité de résultats parmi les études analysant en détail les liens entre la charge de particules et la santé d'individus spécifiques sur une période donnée. Il a certes été possible d'observer un parallélisme entre le nombre de particules et des modifications dans la régulation du rythme cardiaque, de la pression artérielle ou de la fonction vasculaire, ainsi que dans la concentration des constituants sanguins caractéristiques des états inflammatoires ou des processus de coagulation. Mais les résultats n'étaient pas constants, et d'autres fractions de particules ou polluants gazeux montraient des effets similaires.

Aucune étude longitudinale n'a pu jusqu'ici établir de rapport clair entre les effets sur la santé à long terme et le nombre de particules.

La difficulté à établir les effets sur la santé du nombre de particules dans les études sur la population n'est sans doute pas due à une absence d'effet, mais plutôt à la forte variabilité spatiale de ce paramètre. Les mesures effectuées dans des stations fixes ne reflètent que très partiellement la charge effective supportée par la population (cf. annexes A1-4 et A3-2).

Le nombre de particules ou la fraction des particules de diamètre inférieur à 0,1 µm ne sont donc pas les seuls responsables des effets amplement documentés de l'inhalation de poussières fines. Ils pourraient toutefois exercer des effets supplémentaires, et en partie indépendants l'un de l'autre.

A2-2.2 Carbone noir (BC) et carbone élémentaire (EC)

Pour étudier les effets des composants carbonés des particules présentes dans l'air ambiant, on utilise soit des particules de carbone pur, soit un concentré de particules prélevées dans l'air ambiant avec une part élevée de particules ultrafines, soit encore des particules issues de processus de combustion (gaz d'échappement de moteurs diesel, p. ex.).

Etudes expérimentales sur l'homme

Jusqu'à une concentration dix fois plus élevée que dans l'air ambiant, les particules de carbone pur des fractions ultrafines ne semblent pas exercer d'influence sur les états inflammatoires des voies respiratoires, mais modifient tout au plus légèrement les fonctions vasculaires et les facteurs de coagulation dans le sang. Pour ce qui est des échantillons de particules concentrés tirés de l'air ambiant, leur teneur en carbone est variable, et parfois restreinte. Jusqu'à des concentrations de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM, les modifications des fonctions vasculaires sont restées légères. Quant aux études réalisées avec des gaz d'échappement de moteur diesel présentant des concentrations de particules d'environ 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et une proportion élevée de particules ultrafines, elles révèlent un accroissement des signes d'inflammation et, chez les personnes asthmatiques, un accroissement de la résistance au passage de l'air dans les voies respiratoires. On a également observé un ralentissement de la fibrinolyse, une péjoration de l'irrigation sanguine du muscle cardiaque, et des modifications dans la régulation de la fonction vasculaire. Des études comparant les effets sur la santé des effluents de moteurs diesel équipés ou non de filtres, ainsi que des particules de carbone pur, ont montré que seuls les effluents diesel non filtrés entraînaient une péjoration de la fonction vasculaire. A eux seuls, les effluents diesel filtrés et les particules de carbone ultrafines ne modifient pas la fonction vasculaire (Mills 2011).

Il semble par conséquent que les modifications de la fonction vasculaire sont dues aux particules carbonées de diamètre inférieur à 1 μm , et que ces effets ne sont pas directement liés à la teneur en carbone, mais aux autres constituants adsorbés sur le carbone des particules, comme les métaux ou les substances organiques. On n'a en revanche pas vérifié si ces effets se restreignent aux particules carbonées de diamètre inférieur à 1 μm , ou s'ils apparaissent aussi lors d'une exposition à des fractions plus grossières.

Le BC et le EC sont fréquemment utilisés dans les études sur la population en tant qu'indicateurs pour les particules issues de processus de combustion et pour les suies, notamment pour les groupes de personnes particulièrement sensibles comme celles souffrant de problèmes cardiaques ou de bronchite. Dans nombre d'études, on a fourni aux participants des compteurs de particules portables ou l'on a calculé la charge de particules à leur domicile à l'aide de modèles géographiques. La charge ainsi calculée était liée à des perturbations du rythme cardiaque, à une moins bonne irrigation du muscle cardiaque, et à des changements dans la régulation du rythme cardiaque. Le nombre de décès, d'hospitalisations et d'urgences cardiaques et pulmonaires a lui aussi évolué parallèlement aux charges de carbone noir et de carbone élémentaire. Or ces deux types de particules ne représentent qu'une partie de la masse totale de particules. Comme on peut s'y attendre, les estimateurs des effets par microgramme de masse sont plus élevés que pour les indicateurs globaux que sont les PM_{2,5} et les PM₁₀, étant donnée leur concentration bien moindre. Si toutefois l'on compare leurs effets non pas uniquement en fonction de la masse mais que l'on tient compte de la dispersion statistique de la charge de particules (p.ex. la différence entre les 10 % de personnes exposées aux charges les plus basses et les 10 % supportant les charges les plus importantes dans une région donnée), les effets constatés sont semblables (Janssen 2011).

La distribution spatiale des particules ultrafines, du carbone noir et du carbone élémentaire dépend étroitement de leur source, d'où l'intérêt beaucoup plus grand à connaître l'exposition individuelle pour ce type de particules que pour les indicateurs plus uniformément répartis que sont les PM₁₀ et surtout les PM_{2,5}. C'est notamment le cas pour les études consacrées aux effets à long terme sur la santé, dont les coûts gonflent en conséquence. Etant donné les taux de déposition plus importants et la durée de séjour plus longue des particules ultrafines dans les voies respiratoires, et leur aptitude à se propager dans tous les organes via la circulation sanguine, il est primordial d'étudier ces effets à long terme.

Etudes sur la population
consacrées aux effets à
court terme

Effets à long terme liés aux
charges de carbone
élémentaire ou de carbone
organique

Des études menées en Californie, ainsi qu'en Allemagne et aux Pays-Bas ont suivi l'évolution de la santé pulmonaire de groupes d'enfants sur plusieurs années, et ce depuis leur naissance pour les études européennes. Le principal paramètre examiné était leur développement pulmonaire et leur risque de développer un asthme. Proportionnellement à l'accroissement de la concentration de particules carbonées, mais également du NO₂ et d'autres polluants, on observe un ralentissement du développement des poumons et une aggravation du risque de devenir asthmatique. Dans toutes ces études réalisées sur des populations d'enfants, on a mesuré l'absorption lumineuse sur filtres à particules PM_{2,5}, et les relevés réalisés sur des sites à fort trafic coïncidaient étroitement avec les concentrations en carbone élémentaire, et ce bien plus que pour les sites situés à la campagne.

Les auteurs des études attribuent les effets des particules fines au trafic routier (Gehring 2010; Gaudermann 2004). Bien évidemment, toutes ces études à long terme prennent en compte les autres facteurs pouvant influencer sur la santé, comme l'âge, le niveau d'instruction, le niveau de vie ainsi que les comportements individuels tels que la tabagie, l'alimentation et l'activité physique, confirmant que les effets observés sont bien dus au trafic routier.

Une vue d'ensemble des risques de décès à long terme en fonction de la charge de divers polluants atmosphériques a résumé récemment les résultats obtenus pour la suie par sept études longitudinales, dans le cadre d'une méta-analyse spécifiquement consacrée à la question (Hoek 2013). Quatre études prenaient pour paramètre de référence le carbone élémentaire, trois autres les fumées noires (un autre facteur de noircissement), qui ont été converties en EC à l'aide d'un facteur de conversion spécifique. Sur la base de cette compilation, l'équipe de chercheurs a conclu à une augmentation de 6 % du risque de décès (intervalle de confiance de 95 %, 5–7 %) lors d'un accroissement de 1 µg/m³ de l'exposition au carbone élémentaire. Pris séparément, les résultats des différentes études n'étaient pas significatifs. Mais dans tous les cas l'on a observé une corrélation linéaire, ce qui veut dire que le risque s'aggrave de manière constante à mesure qu'augmente l'exposition. L'exposition individuelle moyenne au carbone élémentaire des participants aux études se situait aux alentours de 0.4–1.1 µg/m³. Une étude américaine rattachant le risque lié aux immissions constatées à la station de mesure la plus proche faisait état de niveaux d'immission de l'ordre de 0.1–2.0 µg EC/m³, avec une moyenne de 0.6 µg/m³. Les niveaux de nuisance décrits dans ces études sont ainsi directement comparables à la situation en Suisse (cf. annexe A3, fig. 16).

On ne dispose malheureusement pour l'heure d'aucune étude réalisée au sein de la population générale qui ait pu établir de lien clair entre une certaine charge de particules ultrafines ou de carbone élémentaire et un niveau de risque de cancer des poumons. Dans nombre d'études réalisées, le risque de cancer des poumons augmente parallèlement à la charge de PM₁₀, de PM_{2,5} ou d'oxydes d'azote, en partie aussi avec la charge de trafic à proximité du domicile. Souvent toutefois, les résultats obtenus n'étaient pas significatifs. Dans la dernière analyse commune des études de cohorte européennes ESCAPE, publiée tout dernièrement, la fréquence des cancers des poumons était clairement corrélée à la charge de PM₁₀, mais pas de manière significative avec l'absorption lumineuse des PM_{2,5} (un indicateur de suies ou de carbone noir) (Raaschou-Nielsen 2013). Pour apporter la preuve statistique de causes rares de décès, il faut d'une part disposer de très grandes cohortes, et d'autre part recenser les différences géographiques dans les niveaux d'immissions avec précision et sur de longues périodes. On a toutefois déjà apporté la preuve d'une incidence plus importante du cancer des poumons chez les personnes exposées professionnellement à de fortes charges d'effluents diesel, par exemple chez les chauffeurs de bus (Coi 2012). Quant

aux ouvriers de mines dans lesquelles on a mesuré les concentrations de carbone élémentaire et pour lesquelles on a donc calculé les charges à long terme, ils ont vu leur risque de cancer du poumon augmenter parallèlement à leur exposition, mais avec un décalage (attendu) dans le temps d'environ 15 ans. En 2012, sur la base de ces résultats, le CIRC a classé les effluents diesel parmi les substances cancérigènes du groupe 1, soit les agents cancérigènes certains (CIRC 2012).

A2-2.3 Autres indicateurs des effets à long terme des immissions de particules

Parallèlement au carbone élémentaire, nombre d'études de cohorte se sont également penchées sur les charges en **OC** sous l'angle de leurs conséquences à longue échéance en termes de risque de décès ou de développement pulmonaire chez les enfants, par exemple. Le carbone organique étant systématiquement corrélé à d'autres polluants issus du trafic, il était difficile d'attribuer les effets de façon univoque. Certaines études ont également mis en rapport les **masses d'HAP** avec leurs conséquences à long terme: le développement prénatal et le développement en bas âge étaient partiellement corrélés avec les charges de HAP, mais pas plus étroitement qu'avec les PM10, p. ex. Dans la seule étude dédiée à l'espérance de vie, cette dernière était moins étroitement liée aux HAP qu'aux autres fractions de particules. Divers travaux de médecine du travail ont démontré qu'une charge accrue de **benzo(a)pyrène** (en tant qu'indicateur de l'effet cancérigène des HAP) aggravait le risque de cancer des poumons, ce que n'ont pas confirmé jusqu'ici les recherches sur la population. Parmi les autres indicateurs utilisés dans les études sur la population, il faut citer la **surface des particules** et leur **potentiel oxydatif**. La seule étude longitudinale consacrée à ce dernier indicateur a révélé que l'un des indices de l'artériosclérose était plus étroitement lié à la concentration massive en PM10 qu'avec leur potentiel oxydatif. Dans l'ensemble, on ne dispose pour évaluer ces autres paramètres que de trop rares bases scientifiques, tout particulièrement pour ce qui est des conséquences à long terme. De plus, il n'est pas certain que les résultats de ces recherches, menées dans des conditions spécifiques, soient transposables à la Suisse.

A2-2.4 Implications pour la mesure de la qualité de l'air et la définition de valeurs limites

A court terme, les conséquences décrites en lien avec le nombre de particules ou avec la suie ne sont pas très différentes de celles d'autres polluants atmosphériques. Dans la mesure où les méthodes de mesures sont standardisées, il devrait être possible de déduire de la littérature des fonctions exposition-effet sur la base desquelles calculer le risque à court terme par unité (exprimé p. ex. pour le carbone élémentaire en μg par m^3), pour un niveau de risque donné (valeur limite). Toutefois, avec les valeurs limites à court terme actuelles qui s'appliquent aux PM10 et au NO_2 , on limite également les pointes de pollution dues au trafic routier. On ne dispose pas pour l'heure des bases épidémiologiques nécessaires pour déduire les fonctions de risque de pics de charge encore plus brefs (quelques heures, p. ex.) pour les particules ultrafines et les particules carbonées, pas forcément corrélés avec les charges de NO_2 .

Du point de vue sanitaire, les paramètres les plus importants sont la charge à long terme de particules de diamètre inférieur à $1 \mu\text{g}$ ou de particules primaires issues de la combustion. Il se pourrait que leur durée de séjour plus longue dans les poumons et leur aptitude à pénétrer dans la circulation sanguine leur confèrent un potentiel de nuisance supérieur ou différent de celui des fractions plus grossières ou du NO_2 . Il

n'est pas certain pour l'instant que ce soit réellement le cas ou que les risques d'asthme et de troubles cardiaques et circulatoires observés à proximité des axes routiers à forte fréquentation soient à mettre uniquement au compte des particules les plus fines, ou encore qu'ils soient liés à une autre substance corrélée à celles-ci ou à une combinaison de gaz et de particules présents dans les aérosols de combustion. On n'est pas sûr non plus s'il faut rattacher ces risques de façon non spécifique à l'ensemble des particules de diamètre inférieur à $1\ \mu\text{m}$, ni dans quelle mesure la composition chimique joue un rôle. Comme mentionné plus haut, certains indices tendent à montrer que le problème ne vient pas tant des particules en tant que telles que de leur rôle de véhicule pour d'autres substances.

Un paramètre à plus grande variabilité spatiale que les PM_{10} serait précieux pour caractériser les charges de particules primaires issues de la combustion pour les études sur la population. Cela exigerait toutefois un réseau relativement serré de mesures et de modèles d'immission à petite échelle. On ne dispose pas pour l'heure des bases scientifiques nécessaires. Aucune des études européennes à long terme n'a pris le carbone élémentaire comme valeur de référence pour la suie. On peut toutefois partir du principe que les conséquences pour la santé constatées sur la base des autres indicateurs utilisés pour la suie, comme le carbone noir ou les fumées noires, augmenteraient parallèlement au carbone élémentaire.

A3 Immissions et méthodes de mesure

A3-1 Relation entre les PM10 et les PM2,5 dans l'air ambiant

La législation suisse limite les immissions de poussières fines par le biais de VLI à court et à long termes pour les PM10. A la différence de l'UE et des Etats-Unis, on a en Suisse jusqu'ici renoncé à fixer des valeurs limites distinctes pour les PM2,5. Certaines stations de mesure NABEL relèvent néanmoins les teneurs en PM2,5 aux côtés des PM10 depuis nombre d'années, et ces relevés montrent qu'il existe un rapport très étroit entre les deux fractions de particules. Le tab. 4 ci-dessous donne un aperçu des stations de mesure NABEL effectuant des relevés pour les PM2,5 ainsi que pour d'autres paramètres. Les sites de mesure ont été choisis de manière à refléter les types d'exposition typiques d'une large part de la population suisse.

Tab. 4 > Caractérisation des stations NABEL

Stations effectuant des relevés pour d'autres fractions et types de poussières.

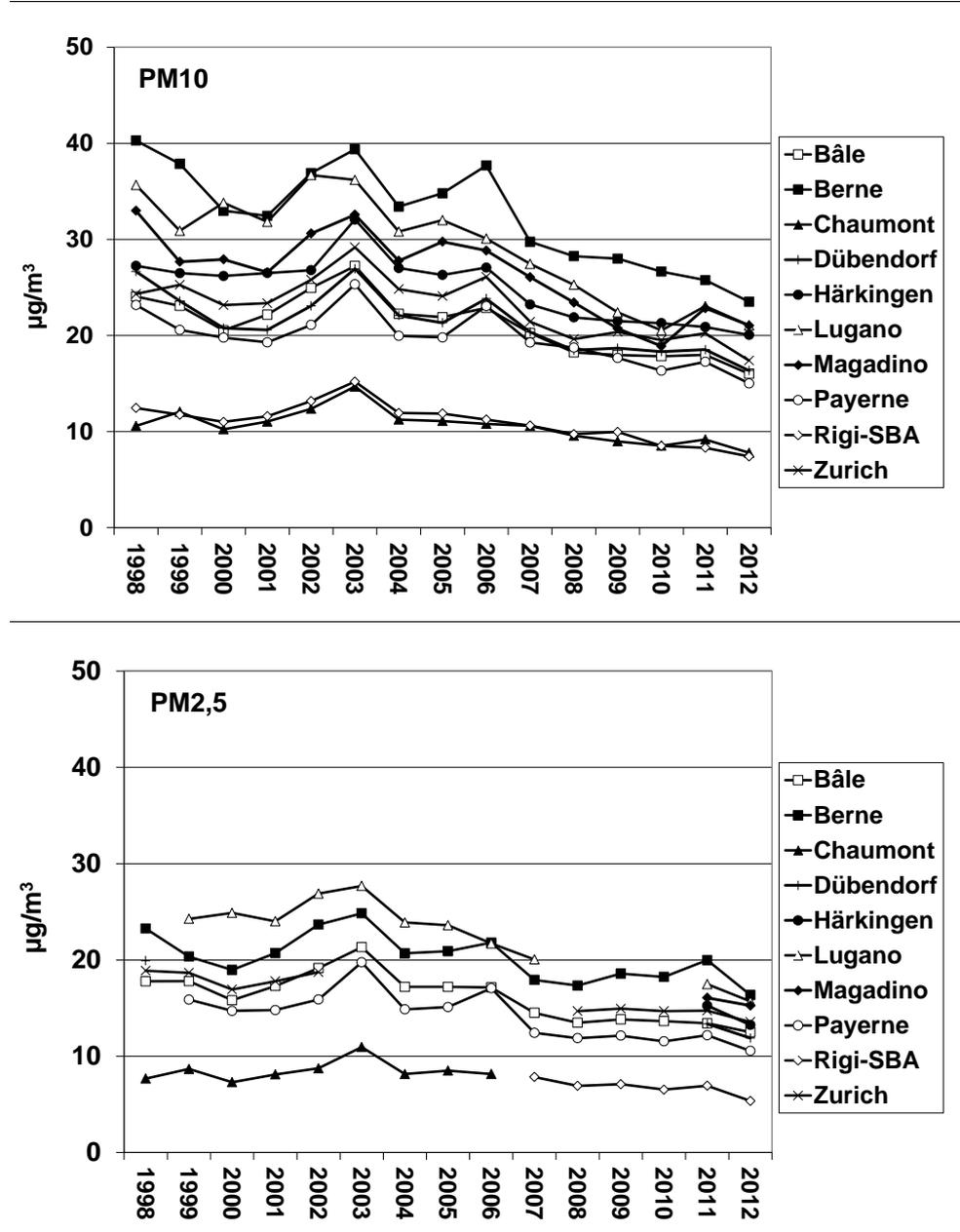
Bâle	type suburbain, située en bordure de la ville, sur le territoire de la commune de Binningen
Berne	type urbain, directement sur l'axe de circulation principal, à env. 3 m du bord d'une artère à fort trafic
Chaumont	type rural, à plus de 1000 m d'altitude
Dübendorf	type périurbain, à env. 150 m de l'axe de circulation principal
Härkingen	à env. 20 m au nord de l'autoroute A1
Lugano	type urbain, située dans une cour relativement ouverte; sud des Alpes
Magadino	type rural, au-dessous de 1000 m; sud des Alpes
Payerne	type rural, au-dessous de 1000 m
Rigi-Seebodenalp	type rural, au-dessus de 1000 m
Zurich	type urbain, située dans une cour, à relative distance du trafic

La fig. 6 montre l'évolution à long terme des concentrations pour les fractions PM10 et PM2,5. Aussi bien les PM10 que les PM2,5 suivent en général une courbe descendante. La fig. 7 donne un aperçu de l'évolution du rapport journalier moyen entre les fractions PM2,5 et PM10. Elle illustre la marge de variation relativement restreinte de ces proportions d'une station à une autre, à l'exception de la station située en ville de Berne, sur un axe à fort trafic, et qui présente une proportion bien plus importante de particules grossières (et donc un rapport PM2,5/PM10 plus petit). Ces dernières années, la proportion mesurée par cette station s'est fortement rapprochée des autres et, depuis 2010, le rapport PM2,5/PM10 mesuré en ville de Berne est à peu près équivalent à celui des autres stations NABEL. Cela pourrait être dû au fait que l'on a renouvelé le revêtement routier à proximité, mais étant donnée la modification de nombreux autres facteurs d'influence possibles (pistes, gestion du trafic, fermetures provisoires, rénovations de bâtiments, etc.), il n'est pas possible d'attribuer cela à une cause en particulier. L'exemple de Berne montre de façon éloquent que l'on ne peut pas considérer le rapport PM2,5/PM10 mesuré à une date donnée comme une constante, et qu'il faut le vérifier périodiquement. A Payerne aussi, on observe une évolution quelque peu atypique: après avoir toujours oscillé entre 0,71 et 0,78 jusqu'en 2006, le rapport PM2,5/PM10 est soudain passé à 0,6 en 2007–2008, avant de remonter à 0,65 entre 2009 et 2012. Une analyse détaillée révèle que ce sont avant tout les rapports PM2,5/PM10 estivaux qui ont diminué, ce qui indiquerait une augmentation des émissions de poussières minérales grossières (travail du sol à des fins agricoles, poussières de chantier, etc.). Toutes les stations examinées mesurent des rapports PM2,5/PM10 plus élevés en hiver, bien qu'à des degrés différents (fig. 8). La fig. 9 montre à l'exemple des stations de Bâle (site périurbain), de Berne (axe à fort trafic) et de

Payerne (site rural) une corrélation des charges journalières de PM_{2,5} et de PM₁₀ très élevée sur toute la période de mesure (depuis 1998).

Le tab. 5 révèle une corrélation très étroite entre les charges journalières de PM₁₀ et de PM_{2,5}, ce qui permet de déduire avec une relative précision les concentrations de PM_{2,5} à partir des données sur les PM₁₀, du moins pour ce qui est des moyennes annuelles. Pour quantifier précisément la charge de PM_{2,5}, on procédera au moins de manière occasionnelle à des échantillonnages simultanés des deux fractions, pour ne pas passer à côté des possibles modifications du rapport PM_{2,5}/PM₁₀ au fil du temps (cf. exemple de Berne).

Fig. 6 > Evolution à long terme des charges annuelles moyennes de PM₁₀ et de PM_{2,5}



Source: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa (Gehrig 2013a)

Tab. 5 > Coefficients de corrélation (r) entre les valeurs journalières de PM2,5 et de PM10, et rapport PM2,5/PM10

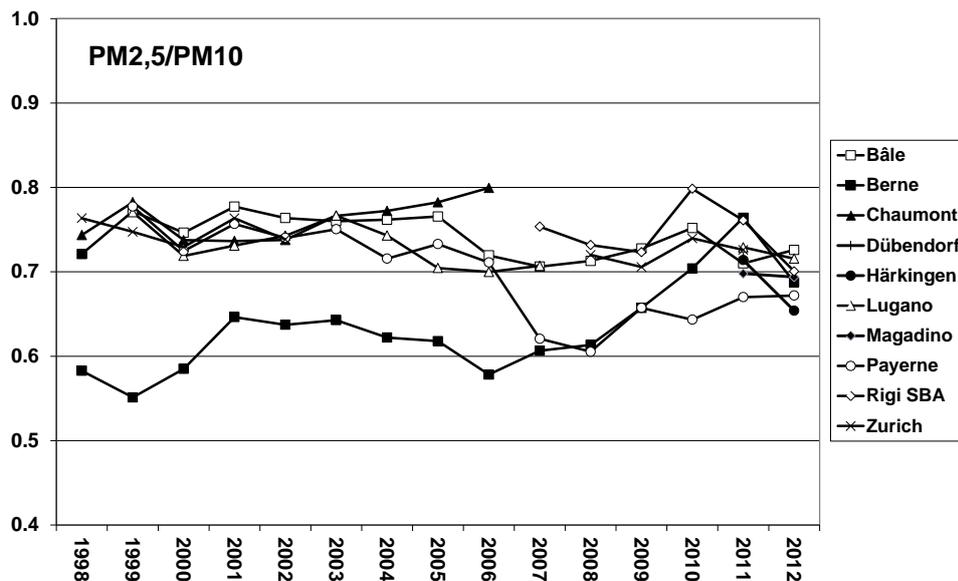
Mesures effectuées dans certaines stations NABEL entre 1998 et 2011 sur la base des valeurs journalières.

	r	PM2,5/PM10
Bâle	0,97	0,74
Berne	0,93	0,63
Chaumont	0,91	0,76
Dübendorf	0,98	0,71
Härkingen	0,90	0,68
Lugano	0,96	0,73
Magadino	0,98	0,70
Payerne	0,96	0,70
Rigi Seebodenalp	0,90	0,75
Zurich	0,96	0,74
Valeur moyenne	0,95	0,71

Chaumont uniquement 1998–2006, Rigi-Seebodenalp uniquement 2007–2012, Dübendorf et Härkingen uniquement 2011–2012

Fig. 7 > Evolution à long terme des rapports moyens PM2,5/PM10

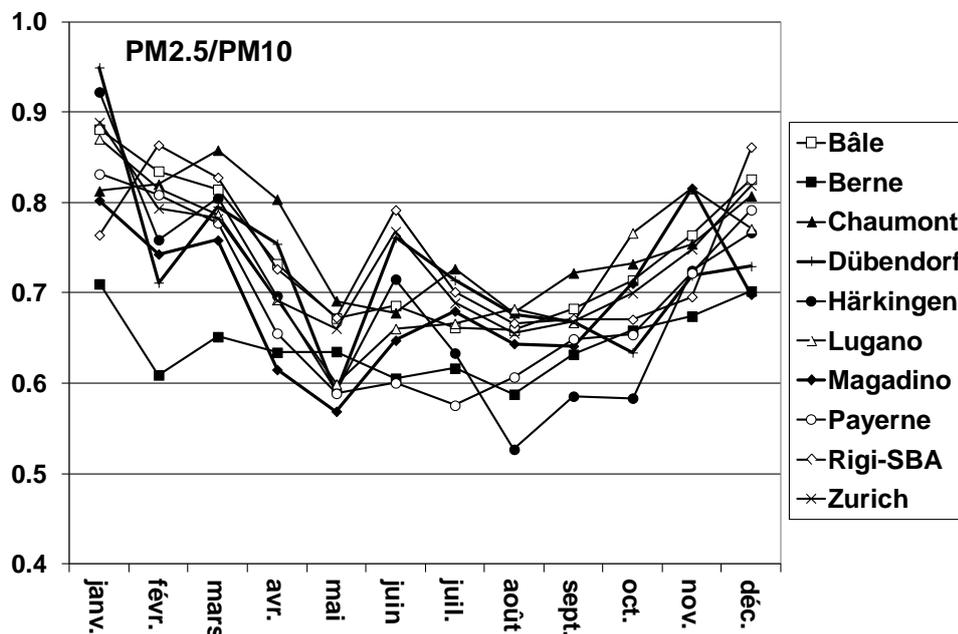
sur la base des valeurs journalières.



Source: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa (Gehrig 2013a)

Fig. 8 > Evolution moyenne sur une année des rapports PM2,5/PM10

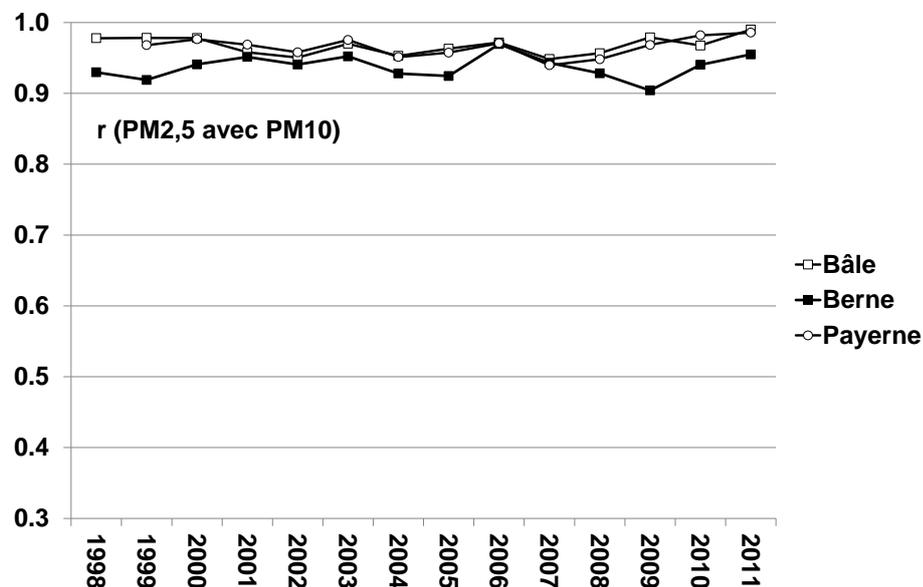
Moyennes mensuelles



Source: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa (Gehrig 2013a)

Fig. 9 > Evolution à long terme des coefficients de corrélation entre les PM2,5 et les PM10

Sur la base des valeurs journalières mesurées par certaines stations NABEL.



Données: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa

L'analyse des corrélations entre les valeurs journalières de PM10 mesurées par différentes stations peut livrer des informations intéressantes sur la variabilité spatiale des PM10 (tab. 6). Ainsi, excepté celles situées nettement plus en altitude, toutes les stations du Plateau suisse présentent une corrélation étonnamment élevée entre elles (cellules grisées). Cela montre clairement que la variabilité des concentrations de poussières fines dépend davantage de la dilution météorologiquement induite des

émissions, toutes provenances confondues (trafic, chauffages à bois, etc.), et de la formation d'aérosols secondaires à grande échelle, que des émissions locales spécifiques. Cela explique la faible corrélation entre des stations soumises à des conditions météorologiques très différentes, que ce soit parce qu'elles sont situées de part et d'autre des Alpes, ou à des altitudes très différentes et donc soit au-dessus soit au-dessous de la ligne d'inversion. Comme on peut s'y attendre, les deux stations de Chaumont et de Rigi Seebodenalp, toutes deux en altitude, présentent une corrélation élevée.

Tab. 6 > Coefficients de corrélation r entre les valeurs journalières des PM10

entre diverses stations NABEL.

	Bâle	Berne	Chaumont	Härkingen	Lugano	Payerne	Rigi
Berne	0,83						
Chaumont	0,51	0,43					
Härkingen	0,89	0,87	0,46				
Lugano	0,43	0,49	0,26	0,48			
Payerne	0,88	0,87	0,56	0,90	0,47		
Rigi SBA	0,48	0,43	0,84	0,42	0,28	0,54	
Zurich	0,91	0,84	0,50	0,91	0,44	0,89	0,49

1998–2011

Les cartes présentées aux fig. 10 et fig. 11, établies sur la base des résultats de modélisations effectuées en 2010, permettent de visualiser la dispersion géographique des fractions PM10 et PM2,5.

Fig. 10 Concentrations de PM10 en 2010

Résolution du modèle 200 m x 200 m

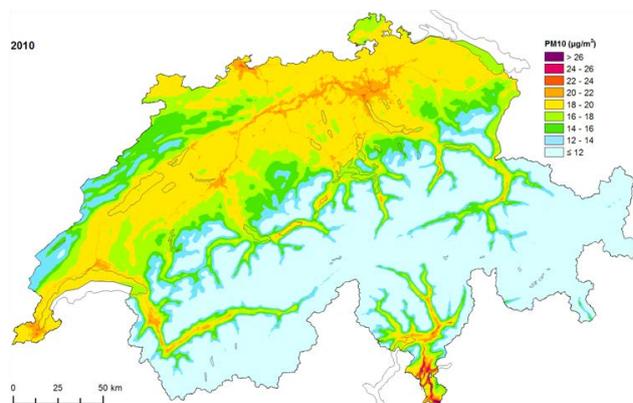
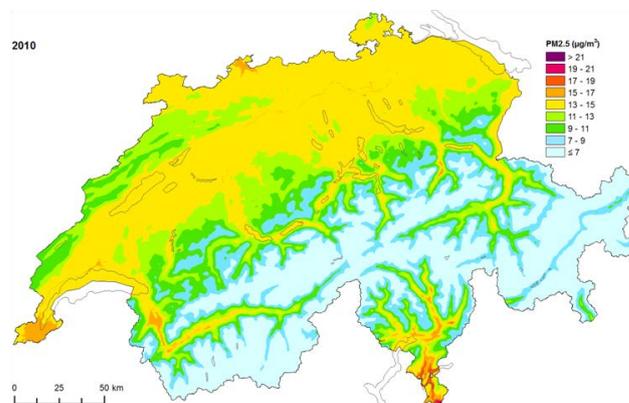


Fig. 11 Concentrations de PM2,5 en 2010

Résolution du modèle 200 m x 200 m



Source: OFEV 2013

A3-2 Etat des techniques de mesure et réglementation de nouveaux polluants atmosphériques

Pour ce qui est des immissions, la Suisse a défini des valeurs limites pour les concentrations massiques de PM10 (valeur limite à court et à long termes) ainsi que pour les concentrations de plomb et de cadmium dans les PM10. Un certain nombre d'experts se demandent si ces valeurs limites sont suffisantes, ou s'il ne conviendrait pas de surveiller également des paramètres comme la concentration numérique, la concentration superficielle, ou certains composants spécifiques des poussières fines (métaux lourds supplémentaires, suies, aromates polycycliques, potentiel d'oxydation, et.), ou d'introduire des valeurs limites supplémentaires.

Une des conditions indispensables à l'introduction de nouveaux paramètres dans les programmes des réseaux de mesure axés sur la mise en œuvre est la disponibilité de méthodes de mesure praticables et harmonisées à l'échelle internationale. Il faut en particulier que les conditions ci-dessous soient remplies:

- les données doivent être comparables à l'échelle internationale;
- la méthode de mesure doit pouvoir être calibrée selon une norme internationalement reconnue et certifiée (traçabilité) ou être équivalente à une procédure de référence donnée (p. ex. gravimétrie pour les PM10 et les PM2,5);
- elle doit être utilisable pour des contrôles de routine au sein d'un réseau de mesure, soit offrir la possibilité d'effectuer des mesures stables durant au moins deux semaines, sans entretien (intervalle de maintenance usuel des stations);
- la méthode doit garantir une résolution temporelle suffisante.

A plus d'un titre, il serait utile de mesurer également les teneurs en particules ultrafines, qui, étant donnée leur masse très réduite, ne sont pas prises en compte de manière adéquate par les mesures de concentration massique. Cela vaut en particulier pour les nouvelles particules issues de processus de combustion, qui appartiennent de manière prépondérante à la fraction ultrafine. Outre les PM10, l'un des indicateurs privilégié pour les particules ultrafines est celui de la concentration numérique, un paramètre qui montre la nette domination des particules de diamètre inférieur à 100 nm. Pour s'en convaincre, il suffit d'examiner les distributions granulométriques mesurées par la station NABEL de Härkingen (tab. 7 et fig. 12). Située à proximité immédiate de l'autoroute A1, cette station peut mesurer aussi bien des concentrations caractéristiques des sites à fort trafic que des concentrations typiques des régions rurales du Plateau (charge de fond), en fonction de la direction du vent.

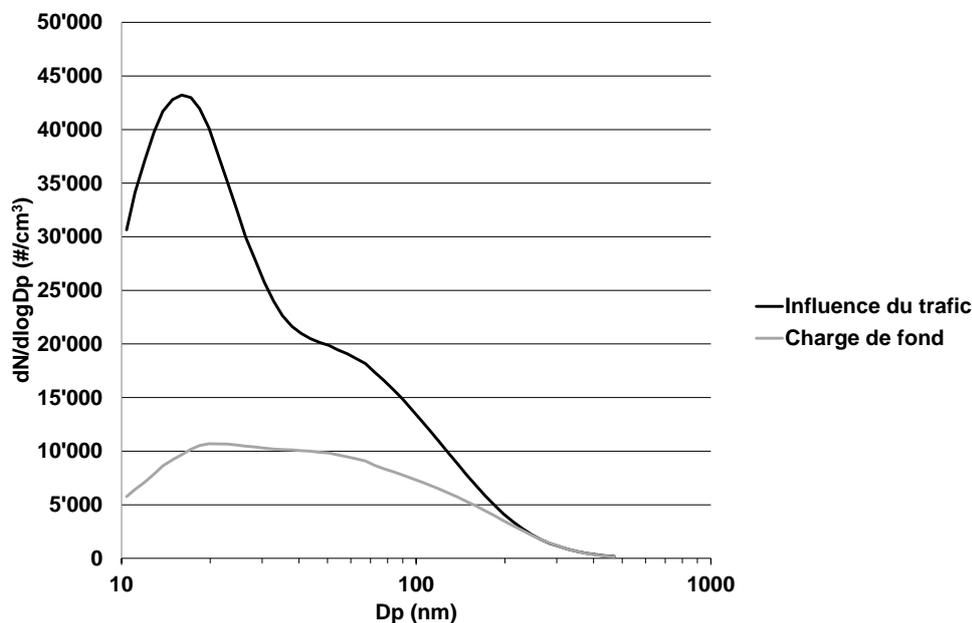
Tab. 7 > Concentrations numériques des particules de diamètre supérieur ou inférieur à 100 nm

(Plage de mesure: 10–500 nm) relevées par la station NABEL en fonction de la direction du vent: influence directe de l'autoroute A1 (Trafic) ou pas d'influence directe (Charge de fond).

		Trafic		Charge de fond	
		Hiver	Eté	Hiver	Eté
10–100 nm	#/cm ³	37 929	17 855	10 250	8 622
100–500 nm	#/cm ³	3 401	1 957	2 530	1 315
10–500 nm	#/cm ³	41 331	19 812	12 779	9 936
Proportion de particules <100 nm		92 %	90 %	80 %	87 %

Fig. 12 > Distribution granulométrique moyenne

relevée à la station de mesure NABEL de Härkingen en fonction de la direction du vent: avec ou sans influence du trafic (Dp = diamètre des particules; dN/dlogDpv = nombre de particules comprises dans un intervalle logarithmique du diamètre des particules).



Données: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa

Bien souvent, le suivi de paramètres supplémentaires comme la concentration numérique, la charge de suie, etc. serait mieux à même que les relevés de PM10 de recenser et de surveiller les effets de certaines mesures prises pour réduire les émissions (filtres à particules, modification des régimes de circulation).

On dispose aujourd'hui d'appareils capables de mesurer les concentrations numériques et les concentrations superficielles des particules avec une résolution temporelle élevée. Il n'existe toutefois ni matériaux de référence standardisés pour la calibration, ni méthode de référence. Un groupe de travail du Comité européen de normalisation (CEN) travaille actuellement à l'élaboration d'une norme destinée à harmoniser les méthodes de mesure du nombre et de la distribution granulométrique des particules. L'élaboration de la norme devrait toutefois encore prendre quelques années.

La situation est comparable pour les techniques de mesure des particules carbonées. Ces techniques comprennent des procédés thermo-optiques pour le carbone élémentaire (EC), le carbone organique (OC) et le carbone total (TC = EC+OC) ainsi que des procédés optiques destinés à mesurer la teneur en suie (BC = carbone noir ou BS = fumées noires). Dans ce domaine, les travaux de standardisation du CEN sont déjà relativement avancés. La méthode de référence sera vraisemblablement un procédé thermo-optique permettant de déterminer séparément les teneurs en carbone élémentaire et en carbone organique, et fondé sur la combustion successive et contrôlée des différentes particules déposées sur les filtres, selon un programme de températures donné, avec correction optique des dépôts de calamine. Il faudra en outre élaborer des directives relatives à l'application des méthodes de mesure optiques (éthalomètres, p. ex.) du carbone noir à la mesure du carbone élémentaire selon la méthode de référence. Une méthode de référence validée pourrait être disponible d'ici un à deux ans.

Pour mesurer les composants toxiques des poussières fines (métaux, aromates polycycliques), il existe d'ores et déjà des méthodes normées ainsi que des matériaux de

référence pour la calibration. Ces méthodes exigent toutefois des techniques élaborées d'analyse en laboratoire des échantillons de filtre, relativement coûteuses. Si l'on se contente d'une résolution temporelle limitée (relevés trimestriels ou annuels, p. ex.), on pourra déterminer les charges correspondantes à un coût acceptable, surtout dans les stations de mesure disposant déjà d'échantillons de filtre utilisés pour les mesures gravimétriques. Les particules organiques ainsi que les ions anorganiques hydrosolubles (nitrate, sulfate, ammonium, chlorure, etc.) sont eux aussi souvent déterminés sur la base d'échantillons de filtres.

Le potentiel oxydatif des particules (dérivés réactifs de l'oxygène, ROS) est fréquemment proposé comme un paramètre intéressant pour évaluer le potentiel de dommage cellulaire des poussières fines. Il n'existe toutefois pas encore de méthode de référence normalisée pour la mesure du ROS.

Le tab. 8 recense les paramètres essentiels et les méthodes de référence.

Tab. 8 > Vue d'ensemble des paramètres essentiels et des méthodes de référence pour la mesure des particules

Paramètre	Méthode de référence	Résolution temporelle
Concentration massique (PM10, PM2,5)	Procédé manuel gravimétrique (EN 12341, EN 14907)	Le plus souvent sur une journée
Concentrations numériques, distribution granulométrique	Norme relative aux compteurs de noyaux de condensation SMPS (<i>scanning mobility particle sizer</i>) en préparation	Elevée (minutes)
Surface spécifique	Pas de méthode de référence. Déduction possible à partir des concentrations numériques et de la granulométrie	Elevée (minutes)
Particules carbonées (EC, OC, TC)	Norme relative aux méthodes thermo-optiques selon le protocole EUSAAR2 en préparation (CEN/TR 16243:2011)	Le plus souvent sur une journée
Suies (BC)	Ethalomètre. Directives concernant le rattachement à la mesure du carbone élémentaire selon EUSAAR2 en préparation	Elevée (minutes)
Aromates polycycliques (HAP)	Analyses sur filtres (EN 15549), pour des raisons de coûts, on n'analyse le plus souvent que des échantillons agrégés sur une période prolongée	Basse. Valeurs mensuelles ou annuelles
Métaux	Analyses sur filtres (EN 15549), pour des raisons de coûts, on n'analyse le plus souvent que des échantillons agrégés sur une période prolongée	Basse. Valeurs mensuelles ou annuelles
Potentiel oxydatif des particules (ROS)	Aucun	--

A3-3 Rapports entre les polluants réglementés et les candidats à de nouvelles réglementations

Comme nous l'expliquons dans l'annexe A3-2, la mesure de paramètres autres que les concentrations massiques de PM10 et de PM2,5 présente un grand intérêt. NABEL a reconnu il y a des années déjà l'importance que pourraient revêtir des paramètres comme les concentrations numériques, les particules carbonées, les métaux et les hydrocarbures aromatiques polycycliques, et a commencé à intégrer des relevés ad hoc dans les programmes de mesures de certaines de ses stations. Etant donné que les particules ultrafines (<100 nm), fraction de loin la plus abondante en termes de nombre de particules, contribuent beaucoup plus que les autres aux concentrations numériques (cf. tab. 7 et fig. 12), ce paramètre constitue un très bon indicateur pour les particules les plus fines qui, du fait de leur masse quasi insignifiante, ne sont pas représentées

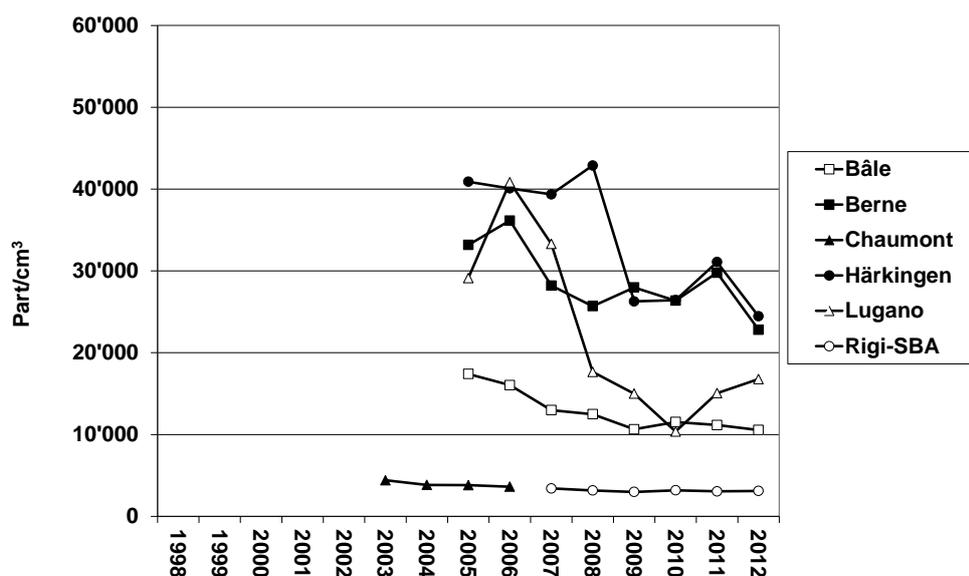
correctement par les méthodes de mesure usuelles. Les particules carbonées, les métaux et les HAP sont des composants importants et potentiellement toxiques des poussières fines (taille typiquement comprise entre <100 nm et 1 µm).

Les fig. 13 à fig. 21 fournissent un aperçu des paramètres supplémentaires déjà mesurés par NABEL. Pour les métaux lourds que sont le plomb et le cadmium (fig. 18 et fig. 19) ainsi que pour le carbone élémentaire (fig. 16, avec des données prélevées de façon discontinue, et homogénéisées à partir de diverses méthodes de mesure), on dispose d'ores et déjà de très longues séries de mesures, qui toutes indiquent un fort recul du niveau des immissions. Pour les concentrations numériques (fig. 13), le benzo(a)pyrène (en tant que principal représentant des composés aromatiques polycycliques, fig. 17) ainsi que pour les métaux que sont le nickel et l'arsenic (fig. 20 et fig. 21), les séries de relevés sont hélas moins étendues et ne révèlent pas de tendances claires. D'une façon générale, toutefois, ces paramètres semblent eux aussi engagés sur une courbe descendante. Il est intéressant de constater que la principale source de benzo(a)pyrène cancérigène est non pas le trafic comme on pourrait s'y attendre, mais la combustion de bois. Cela ressort clairement des valeurs élevées mesurées par la station NABEL de Magadino ainsi que par les stations cantonales de San Vittore et d'Ebnat-Kappel. Les premiers résultats d'une campagne de mesure menée en Appenzell semblent eux aussi désigner les mêmes causes.

La fig. 14 donne un bon aperçu des concentrations gravimétriques de PM1 mesurées depuis 2003: elles décroissent légèrement, de façon à peu près parallèle aux PM2,5 et aux PM10. La fig. 15 montre quant à elle que sauf pour les stations de Chaumont et de Rigi-Seebodenalp, situées en altitude, les PM1 représentent typiquement 50 à 60 % des PM10.

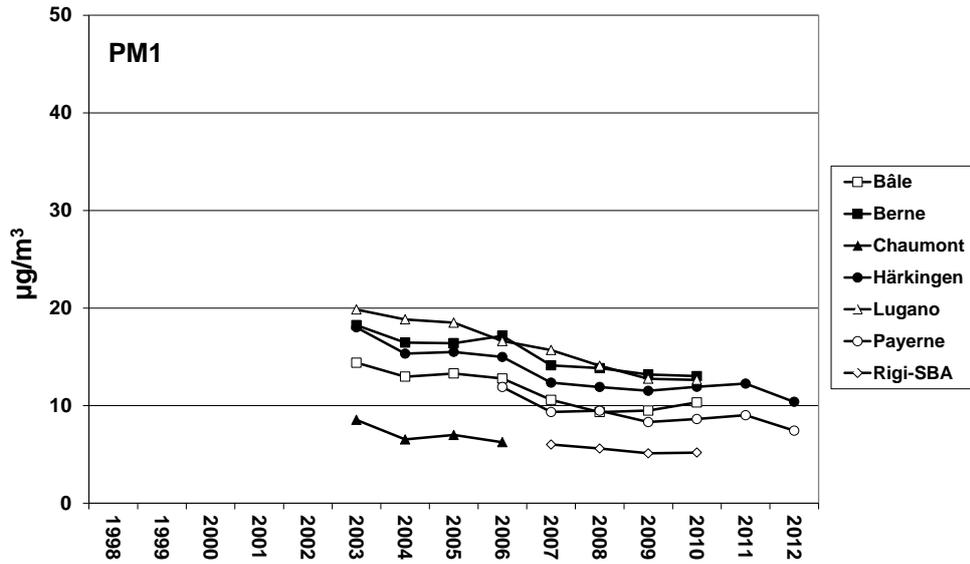
A titre de comparaison, la fig. 22 montre que sur la majorité des sites de mesure, les concentrations de NO₂ n'ont que faiblement diminué depuis 1998.

Fig. 13 > Evolution à long terme des concentrations numériques de particules



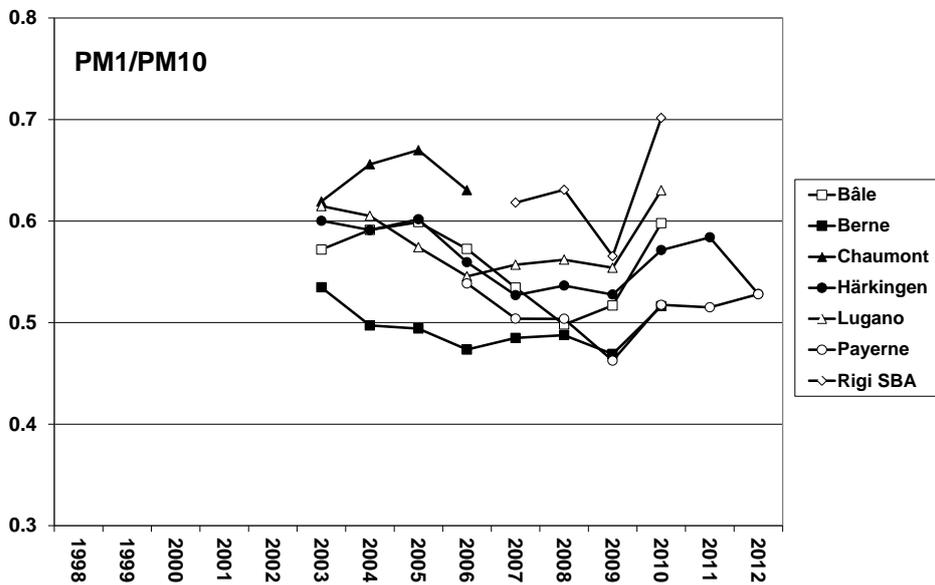
Source: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa (Gehrig 2013a)

Fig. 14 > Evolution à long terme des concentrations de PM1



Source: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa (Gehrig 2013a)

Fig. 15 > Evolution à long terme de la proportion entre les valeurs journalières de PM1 et de PM10



Source: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa (Gehrig 2013a)

Fig. 16 > Concentrations de carbone élémentaire (EC)

mesurées à Payerne et à Dübendorf depuis la fin des années 1960. Mesures effectuées selon diverses méthodes et corrigées pour correspondre au nouveau procédé EUSAAR2.

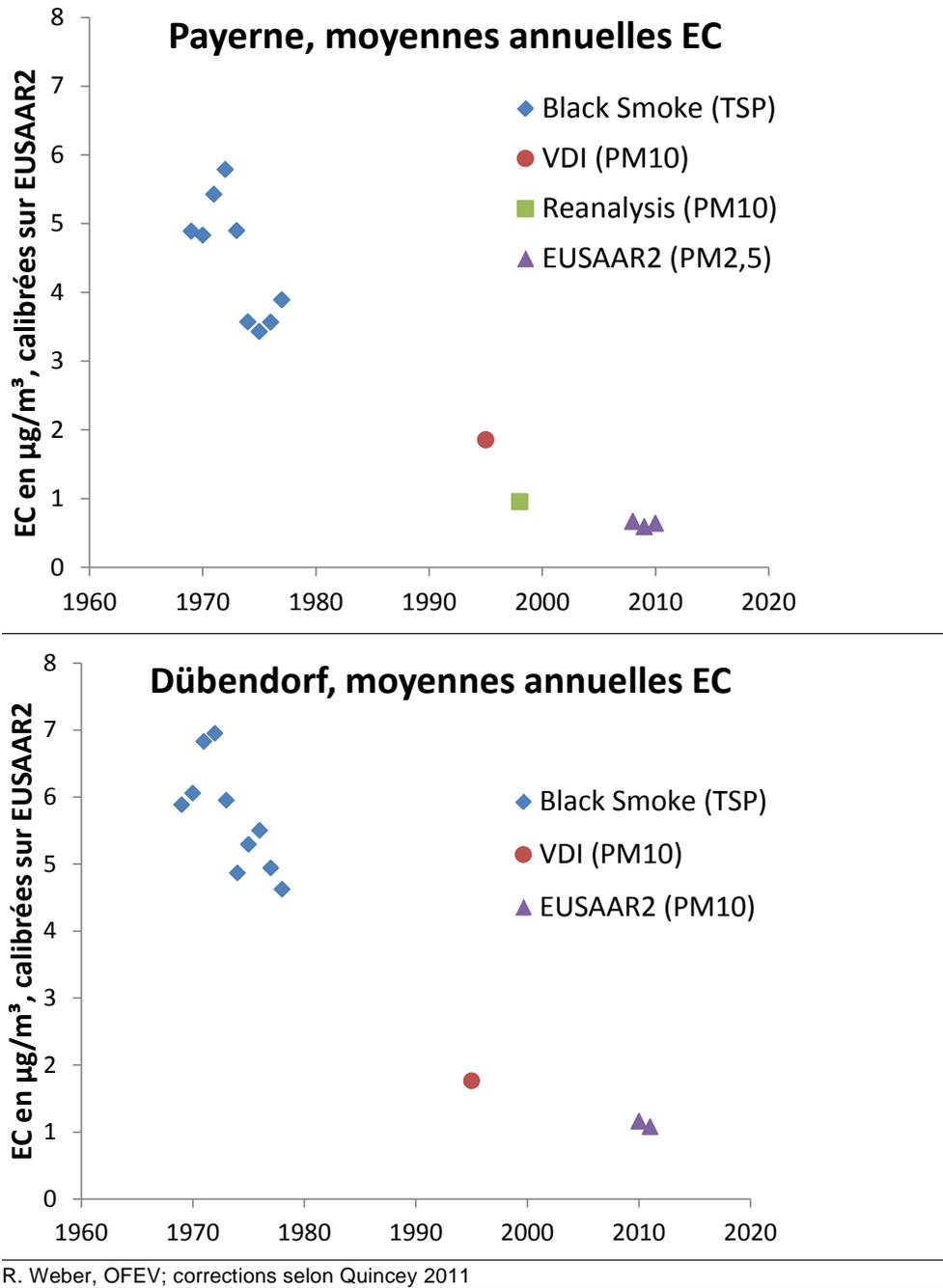


Fig. 17 > Concentrations annuelles moyennes de benzo(a)pyrène dans les PM10

En-haut, sites urbains, périurbains et fort trafic, en-bas sites ruraux (Ebnat-Kappel: uniquement juillet 2010 à juin 2012).

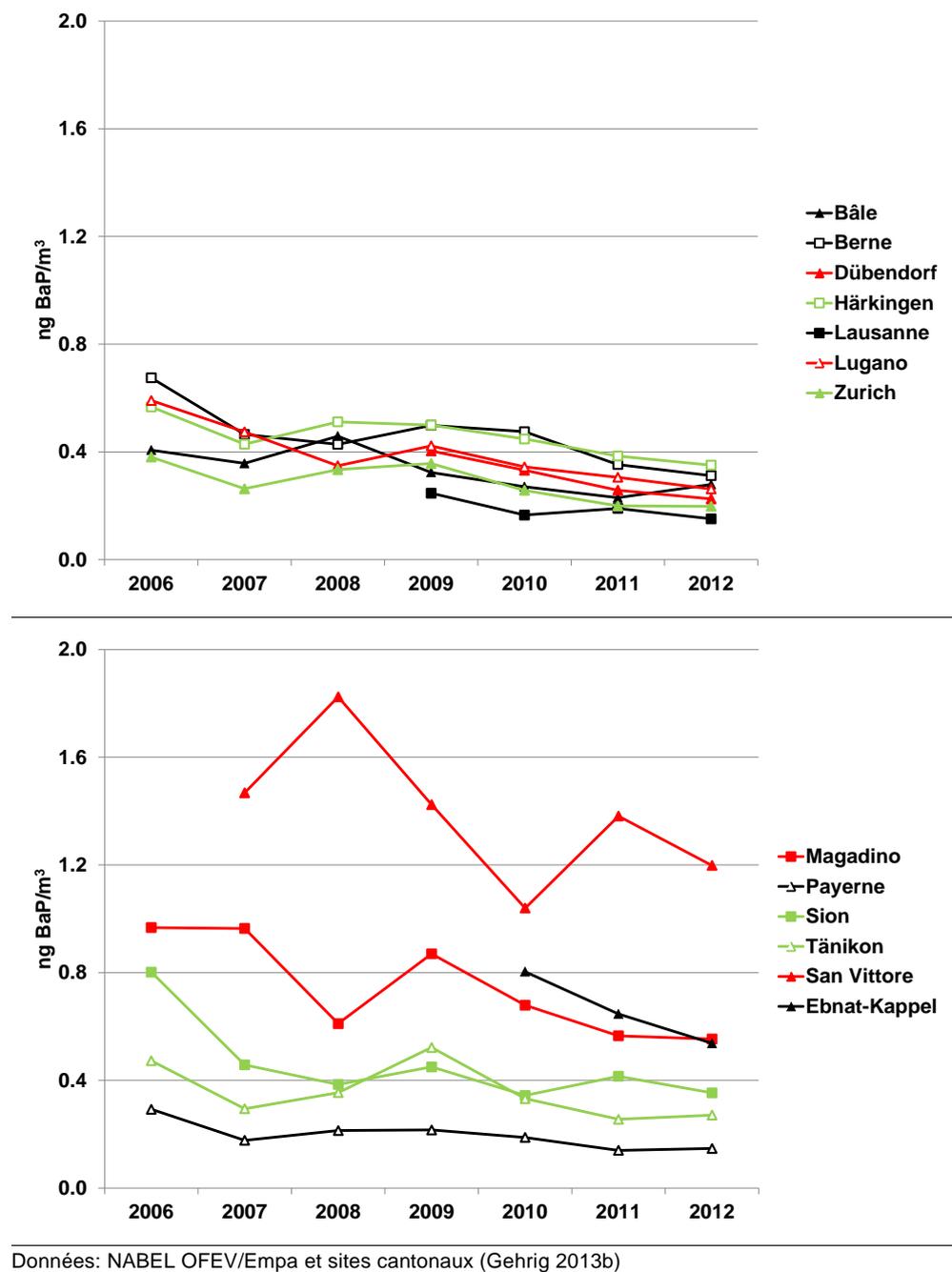
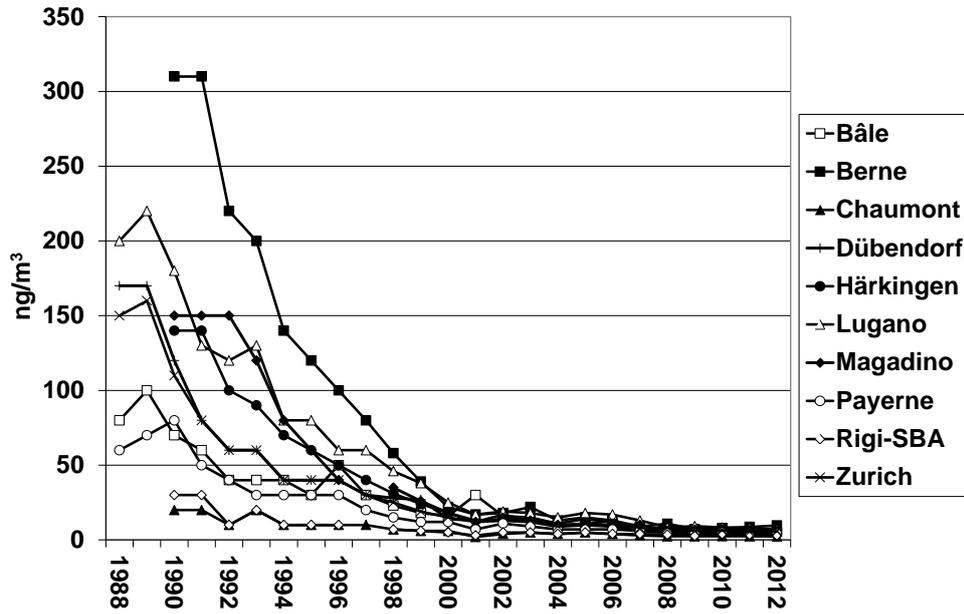
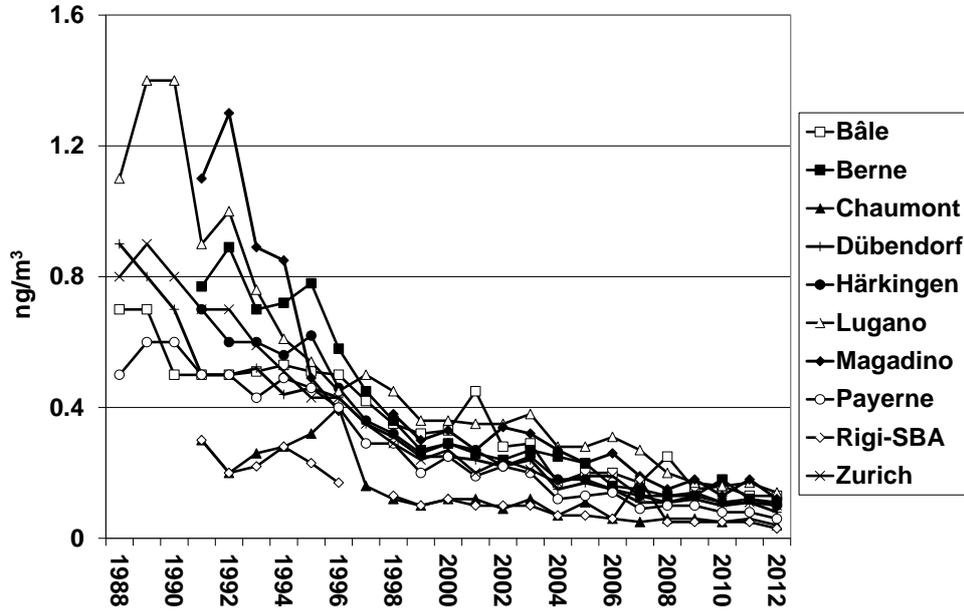


Fig. 18 > Plomb dans les PM10



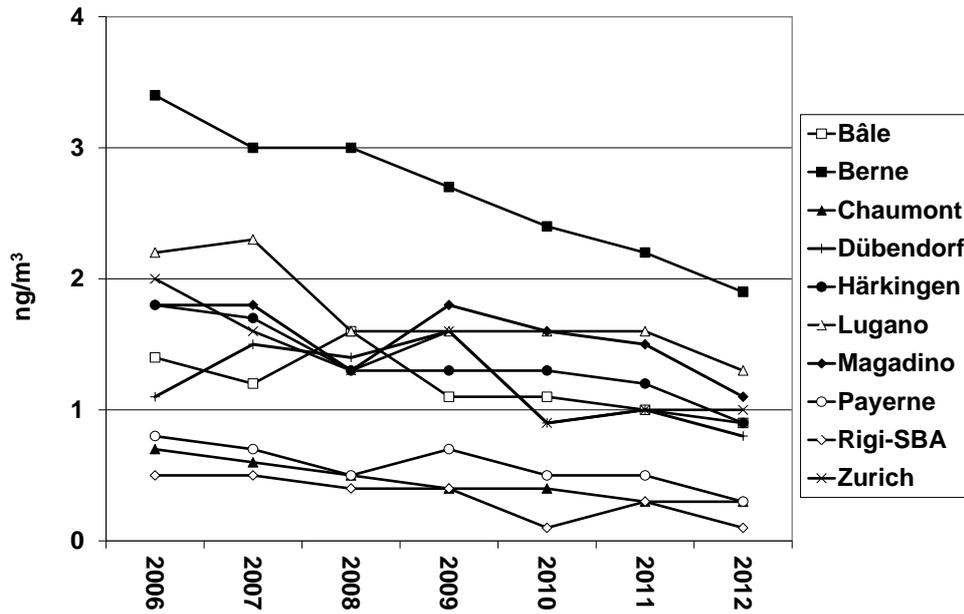
en TSP jusqu'en 1997; données: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa

Fig. 19 > Cadmium dans les PM10



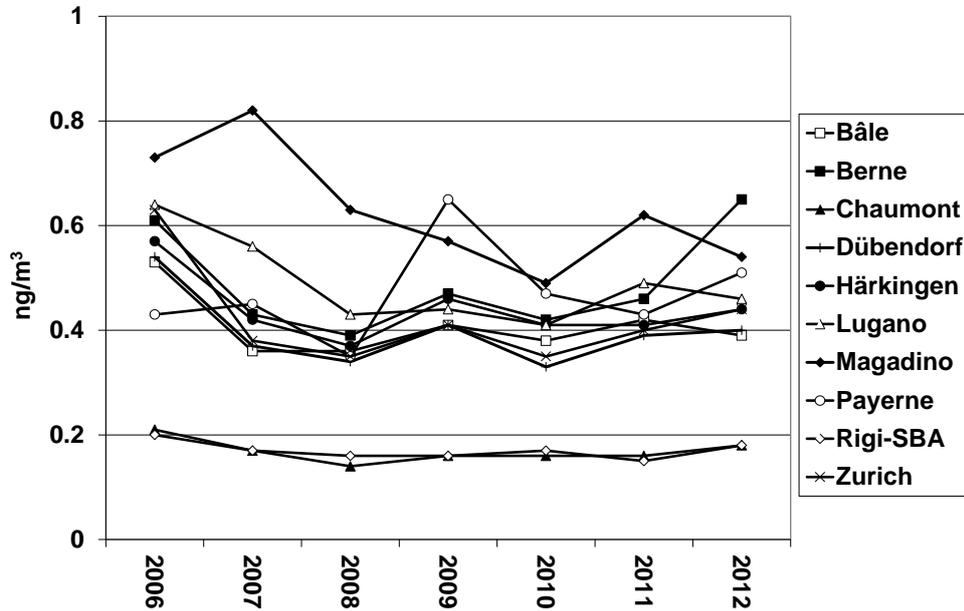
en TSP jusqu'en 1997; données: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa

Fig. 20 > Nickel dans les PM10



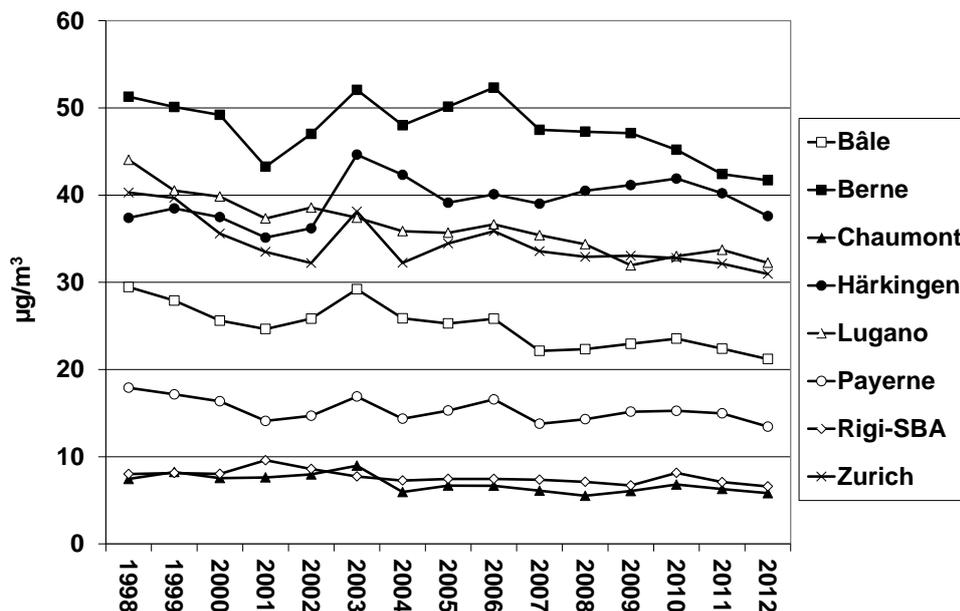
Données: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa

Fig. 21 > Arsenic dans les PM10



Données: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa

Fig. 22 > Evolution à long terme des concentrations de dioxyde d'azote



Données: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa

La mesure de ces paramètres supplémentaires est très exigeante en termes d'équipement et de travail d'analyse, et elle est donc chère. C'est pour cette raison qu'en plus des concentrations en valeur absolue, on cherche également à savoir si, à l'instar des PM2,5 et des PM10, il existe des corrélations marquées entre ces divers paramètres qui permettraient de remplacer de coûteuses mesures par des estimations obtenues à partir d'autres paramètres.

Tab. 9 > Coefficients de corrélation entre les valeurs journalières mesurées dans une sélection de stations NABEL pour une sélection de paramètres, groupés par deux

	PM10 PM2,5	PM10 nombre	PM2,5 nombre	PM10 EC	PM2,5 EC	PM10 NO ₂	PM2,5 NO ₂
Bâle	0,97	0,56	0,58	0,85	0,86	0,77	0,79
Berne	0,93	0,48	0,45	0,65	0,65	0,56	0,52
Chaumont	0,91	0,44	0,42			0,54	0,64
Härkingen		0,37		0,69		0,51	
Lugano	0,96	0,36	0,29	0,84	0,87	0,68	0,73
Payerne	0,96			0,80	0,80	0,75	0,78
Rigi	0,90	0,37	0,31			0,51	0,67
Zurich	0,96			0,76	0,66	0,76	0,69
Valeur moyenne	0,94	0,43	0,41	0,76	0,77	0,64	0,69

	Nombre EC	NO ₂ EC	NO ₂ nombre
Bâle	0,57	0,88	0,68
Berne	0,53	0,66	0,74
Chaumont			0,20
Härkingen	0,69	0,73	0,68
Lugano	0,65	0,88	0,58
Payerne		0,79	
Rigi			0,04
Zurich			
Valeur moyenne	0,61	0,79	0,49

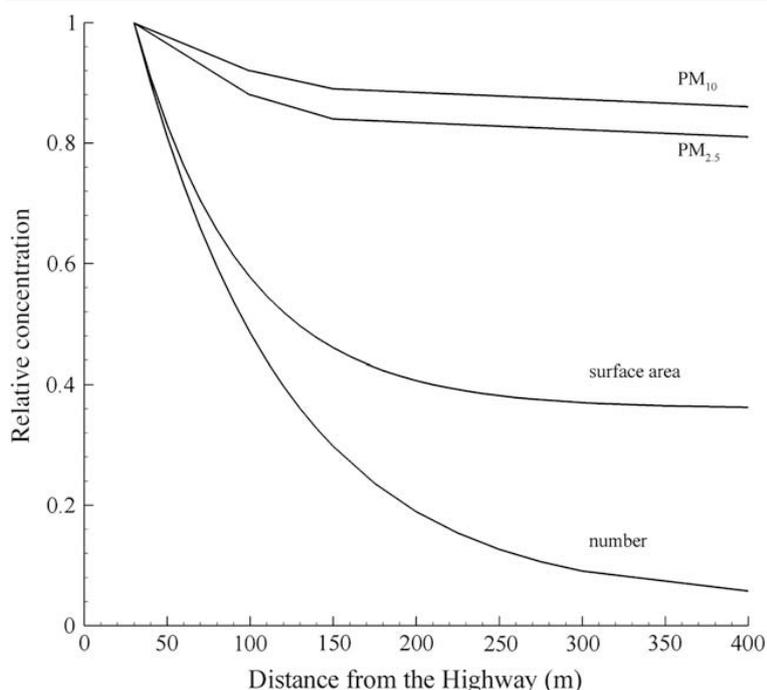
Le tab. 9 montre toutefois qu'à part entre les PM_{2,5} et les PM₁₀, discutés en détail dans l'annexe A3-1, il n'existe pas de corrélation assez étroite entre deux ou plusieurs paramètres pour permettre des déductions un tant soit peu fiables. On observe certes certaines corrélations positives (en grande partie déterminées par la météo), mais elles ne permettent pas d'effectuer des évaluations quantitatives suffisamment précises. C'est le cas notamment du dioxyde d'azote, proposé parfois comme indicateur pour les particules issues de la combustion. Si les corrélations observées dans toutes les stations de mesure entre le NO₂ et le carbone élémentaire sont sensiblement plus élevées qu'entre le NO₂ et les PM₁₀ ou entre le NO₂ et les PM_{2,5}, cela ne permet pas de déduire de manière fiable les concentrations de suie à partir des relevés de NO₂. La corrélation relativement faible constatée entre les PM₁₀ ou les PM_{2,5} d'une part et la concentration numérique d'autre part révèle qu'il n'existe pas de rapport suffisamment étroit entre les concentrations massiques et la charge de particules ultrafines pour pouvoir renoncer à mesurer l'un ou l'autre de ces paramètres.

Les corrélations établies dans le cadre du projet ESCAPE par 20 stations de mesure européennes entre les PM_{2,5}, les PM₁₀, le carbone élémentaire (mesuré dans le cadre du projet en tant qu'absorbance des PM_{2,5}) et le NO₂ sont très semblables aux résultats des chercheurs suisses (Eeftens 2012) et les confirment.

Les fig. 23 et fig. 24 illustrent la distribution spatiale très différente des concentrations numériques (domination nette des particules ultrafines) et des concentrations massiques à l'exemple de deux routes à fort trafic. Contrairement aux particules ultrafines émises avec les gaz d'échappement, qui diminuent rapidement à mesure qu'on s'éloigne de la route, les particules plus grossières et plus lourdes, dotées d'une plus longue durée de vie et provenant d'une variété de sources (pas seulement locales) connaissent une répartition spatiale plus homogène.

Fig. 23 > Diminution relative des concentrations massiques (PM10 et PM2,5)

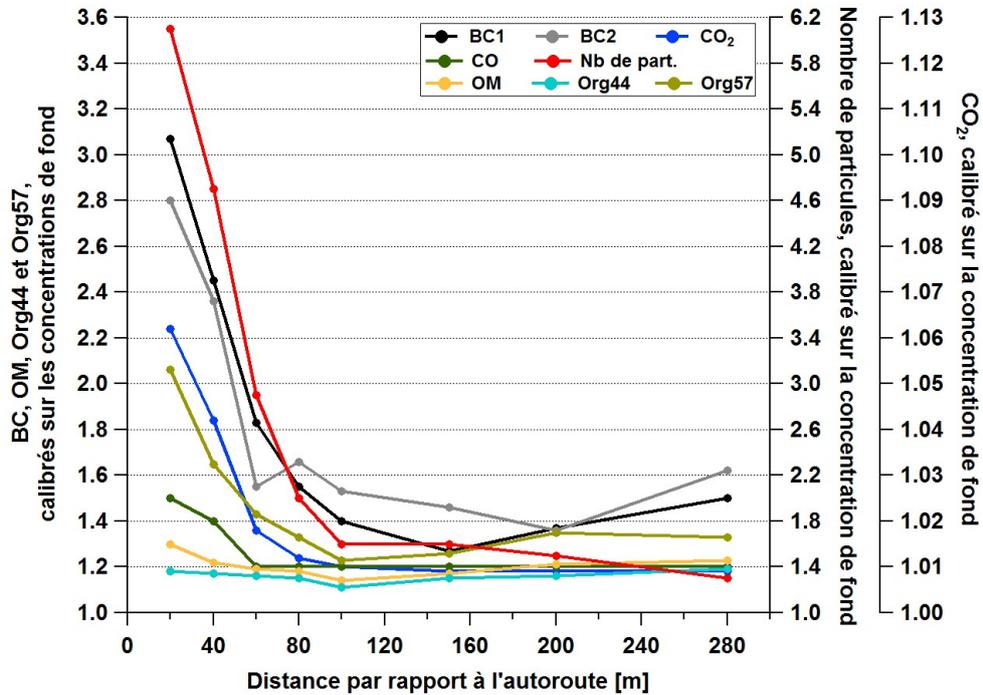
ainsi que des concentrations superficielles et des concentrations numériques à mesure qu'on s'éloigne d'une autoroute.



Source: Buonanno 2009

Fig. 24 > Diminution relative des concentrations à mesure qu'on s'éloigne d'une autoroute

BC (mesuré selon deux méthodes différentes) et matière particulaire organique (OM), deux marqueurs dans l'aérosol organique (Org57 pour l'aérosol organique primaire, Org44 pour l'aérosol organique secondaire), nombre de particules, ainsi que monoxyde de carbone et dioxyde de carbone. Valeurs calibrées sur les concentrations de fond.

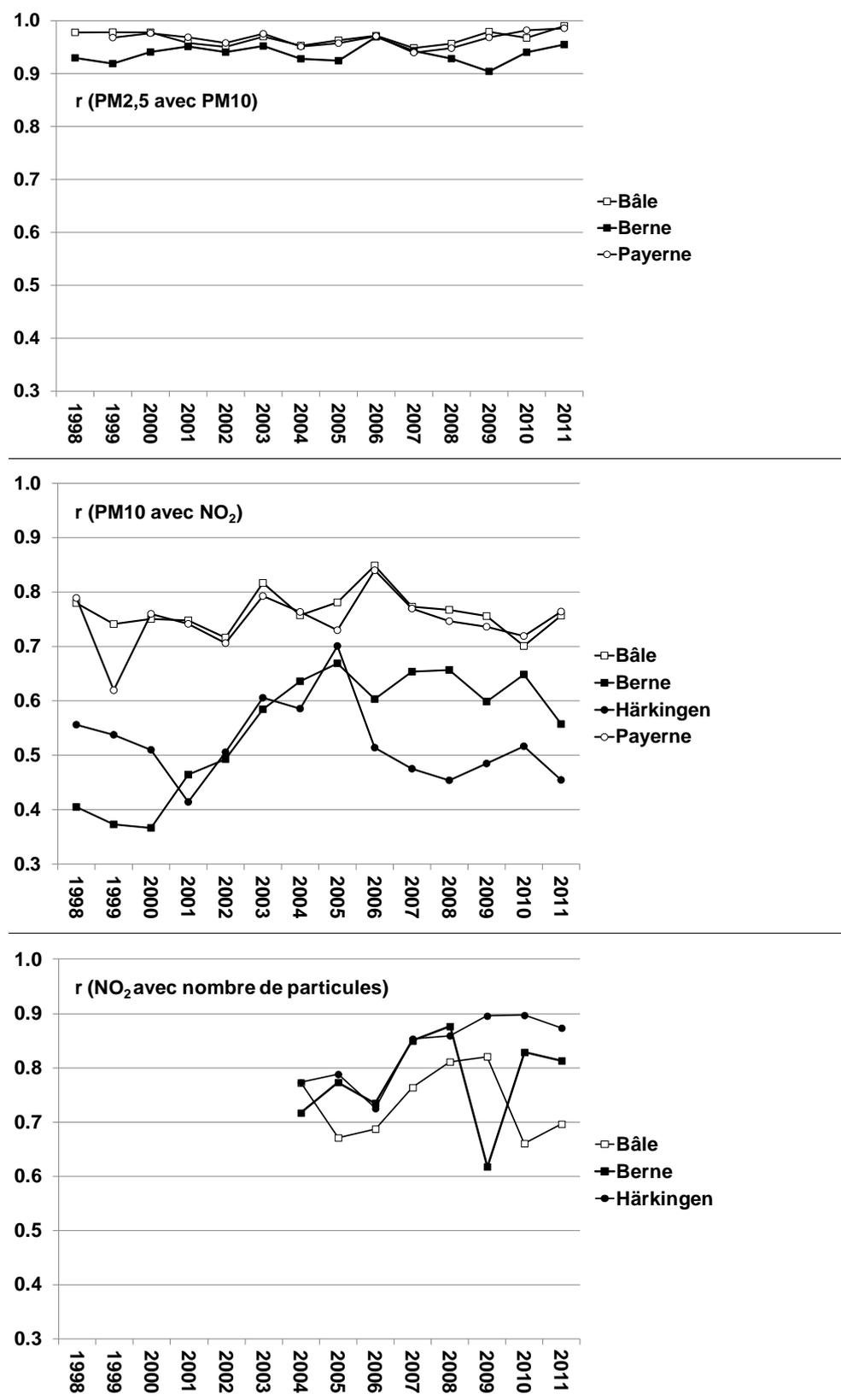


Données: Institut Paul Scherrer (PSI)

La fig. 25 montre l'évolution à long terme des coefficients de corrélation entre une sélection de paramètres, groupés par deux.

Fig. 25 > Evolution à long terme d'une sélection de coefficients de corrélation

sur la base des valeurs journalières.

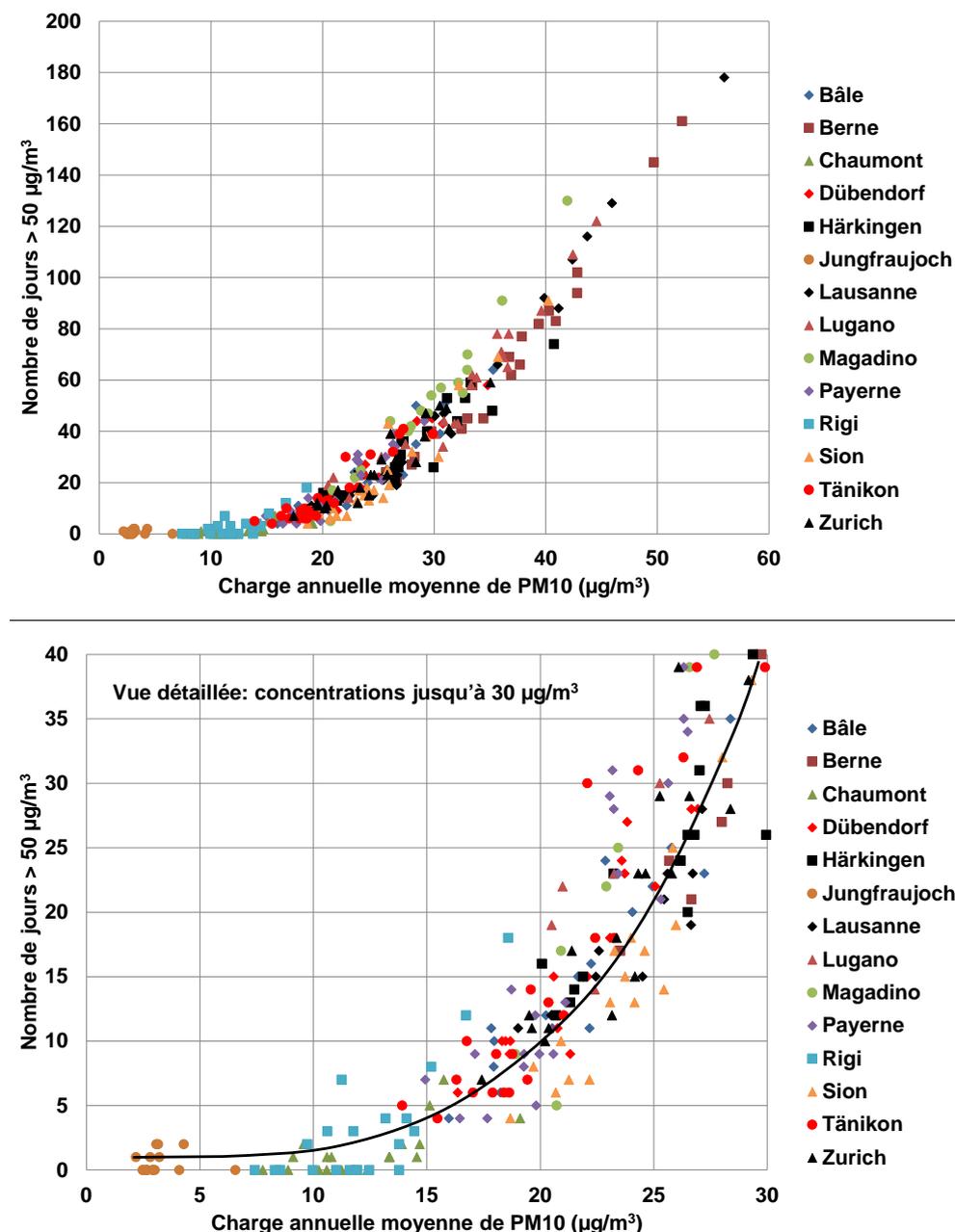


Données: réseau de mesure NABEL OFEV/Empa

L'OPair définit aussi bien une valeur limite à long terme (maximum de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle) qu'une limite à court terme (maximum d'un dépassement de la moyenne journalière de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) pour les PM10. La fig. 26 montre, sur la base des valeurs relevées par NABEL, le lien entre les moyennes annuelles mesurées pour les PM10 et le nombre correspondant de dépassements de la valeur limite à court terme. On s'aperçoit qu'il est manifestement bien plus difficile de respecter la valeur limite à court terme que son équivalent à long terme.

Fig. 26 > Corrélation entre les charges annuelles moyennes de PM10 et le nombre de dépassements de la valeur limite journalière de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

En-haut: totalité de la plage de mesures. En-bas: agrandissement de la portion allant jusqu'à $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Données: Réseau de mesure NABEL 1991–2012

A3-4 Synergies air-climat: EC/BC/OC/TC/suies

Outre les effets sur la santé décrits plus haut, le carbone comporte également des répercussions sur le climat. En absorbant la chaleur du soleil, les particules de carbone noir contribuent à transformer la lumière en chaleur, qu'elles restituent à leur environnement. Le carbone noir contribue donc à réchauffer l'atmosphère, par le phénomène dit du forçage radiatif. Son coefficient de forçage radiatif a été évalué à $+0,6 \text{ W/m}^2$ dans le 5^e rapport du GIEC (2013), soit pour $0,4 \text{ W/m}^2$ en provenance de sources fossiles et $0,2 \text{ W/m}^2$ de la combustion de biomasse. Avec le méthane, le carbone noir est ainsi le deuxième composant responsable du forçage radiatif, après le dioxyde de carbone, dont le coefficient est évalué à $+1,68 \text{ W/m}^2$. Le carbone noir exerce en outre un effet de réchauffement sur la surface de la neige et de la glace, qui est évalué à $0,04 \text{ W/m}^2$ (GIEC 2013). Une réduction des émissions de carbone noir comporterait donc des effets positifs non seulement pour la santé mais également pour le climat, car elle permettrait de freiner et de réduire le réchauffement. Pour les composants des poussières fines qui dispersent davantage la lumière qu'ils ne l'absorbent (sulfate, nitrate, carbone organique, poussière minérale), une réduction des émissions induit au contraire un réchauffement. Etant donné que la plupart des sources de carbone noir émettent également des quantités plus ou moins importantes d'autres composants des poussières fines, une élimination complète des sources de carbone noir ne permettrait pas d'éviter la totalité de son pouvoir de forçage radiatif, évalué à $0,64 \text{ W/m}^2$, mais bien moins. A la différence des émissions de CO_2 toutefois, une réduction se ferait sentir rapidement pour le carbone noir car sa durée de séjour dans l'atmosphère est d'à peine une semaine, de sorte qu'on assisterait à une baisse rapide de sa concentration.

Une réduction des émissions de carbone noir serait donc non seulement souhaitable sur le plan sanitaire, mais contribuerait également à protéger le climat. De plus, contrairement aux réductions obtenues pour d'autres gaz à effet de serre, une baisse de la charge de carbone noir aurait rapidement des effets positifs.

Comme mentionné plus haut, les principaux émetteurs de carbone noir sont les chauffages à bois de petite taille. Outre leurs répercussions négatives sur la santé, les émissions de suie qui en résultent péjorent le bilan climatique du bois en tant que source d'énergie renouvelable. Il va sans dire qu'il faut encourager l'usage du bois en tant que ressource renouvelable, mais on veillera à l'utiliser plutôt comme matériau de construction et de fabrication. Si le bois est utilisé comme combustible, on le fera de préférence dans des installations de grande taille et à haut rendement, exploitées par des professionnels, et munies de systèmes efficaces d'épuration des fumées, pour maintenir les émissions de poussières fines et notamment de carbone noir à un minimum.

A4 Exigences que doivent remplir les VLI pour les polluants atmosphériques

Pour être pertinente, une valeur limite supplémentaire doit se fonder sur un paramètre présentant un rapport clair avec les répercussions observées sur la santé et sur l'environnement. Elle doit pouvoir être mesurée à l'aide d'une méthode de référence reconnue, et les réseaux de mesure établis doivent pouvoir vérifier son respect ou son dépassement à un coût raisonnable. Une VLI ne suffit toutefois pas à elle seule à améliorer la qualité de l'air, ce qui ne se fera que moyennant des mesures efficaces de réduction des émissions. La procédure à mettre en place à cet effet est régie par les art. 31 à 34 OPair. Les domaines prioritaires en termes de protection de l'air sont la combustion de bois, les émissions des véhicules à moteur et celles de l'agriculture. Il faut remarquer à cet égard que l'on a déjà pris en Suisse de nombreuses mesures pour agir sur les paramètres propres au trafic: poussières totales, carbone élémentaire, nombre de particules. Les nombreuses mesures introduites ces dernières années (norme Euro 6 (voitures de tourisme, véhicules de livraison et poids-lourds), incitations résultant de la RPLP, valeurs limites de l'OPair pour les engins de chantier, dispositions de l'OEMB pour les moteurs de bateaux, DE-OCF pour les locomotives diesel, obligation de post-équipement pour les bus d'entreprises de transport concessionnaires, accord visant à équiper les engins de damage de filtres à particules) permettront de réduire fortement les émissions de particules et de carbone élémentaire ces prochaines années.

Il existe un lien clairement établi entre les PM_{2,5} et les effets sur la santé et l'on dispose pour les mesurer d'une méthode de référence internationalement reconnue. Outre la VLI proposée pour les PM_{2,5}, la CFHA a évalué diverses autres possibilités. Pour la plupart des autres valeurs de référence envisageables (nombre de particules, OC, HAP, ROS, autres métaux), le lien entre l'exposition de la population et les conséquences pour la santé ne sont pas établis de façon suffisamment sûre. Quelques indicateurs (EC/BC notamment) n'entrent pas en ligne de compte, faute de méthode de mesure reconnue. La VLI pour les PM_{2,5} proposée par la CFHA occasionnera toutefois des coûts supplémentaires pour la mesure des immissions.

La CFHA a également examiné la possibilité de conserver la même approche que jusqu'ici, à savoir réduire les concentrations de PM_{2,5} par le biais de la réglementation des PM₁₀. Du fait de la corrélation étroite et relativement constante entre les deux valeurs dans toutes les stations de mesure, les objectifs sanitaires visés pourraient également être atteints par une réduction de la VLI pour les PM₁₀ à 15 µg/m³. L'OPair divergerait toutefois fortement des recommandations de l'OMS sur ce point. Or la CFHA rejette unanimement toute velléité de faire cavalier seul dans la régulation des PM₁₀.

Bien que l'introduction d'une nouvelle valeur limite pour les PM_{2,5} induirait des coûts supplémentaires pour la Confédération comme pour les cantons en termes de suivi des immissions, la CFHA considère un tel surcoût comme acceptable. De nombreuses stations NABEL mesurent d'ores et déjà les charges de PM_{2,5}, qui sont aussi régulièrement déterminées dans le cadre d'études sanitaires importantes, si bien que le surcoût serait en réalité limité. Qui plus est, les mesures effectuées actuellement suffisent à donner une bonne vue d'ensemble des charges de PM_{2,5} sur le territoire suisse. Etant donnée la répartition spatiale relativement homogène des PM_{2,5}, il est possible de renoncer à un monitoring détaillé. Il faut que la Confédération et les cantons recherchent des solutions peu onéreuses impliquant un petit nombre de stations de mesure supplémentaires, tout en garantissant bien sûr que les VLI soient respectées quelle que soit la typologie du site.

Si certains cantons devaient malgré tout considérer le surcoût comme trop important, on peut envisager une seconde solution: étant donnée la corrélation relativement stable entre les valeurs annuelles moyennes pour les PM_{2,5} et les PM₁₀ observée ces dernières années, il est possible de déduire la charge de PM_{2,5} à partir des mesures effectuées pour les PM₁₀, aussi longtemps que le rapport entre les deux reste stable.

A5 Chronologie des VLI pour les particules en suspension et des recommandations de la CFHA concernant les particules en suspension, les poussières fines et la suie

En juillet 1986, suite à l'entrée en vigueur de la LPE, le 1^{er} janvier 1985, et de l'OPair, le 1^{er} mars 1986, le Conseil fédéral a institué la CFHA en tant qu'organe consultatif permanent, chargé de conseiller le département et l'office compétents pour toutes les questions scientifiques et méthodologiques ayant trait à la protection de l'air. La CFHA a de ce fait focalisé ses activités sur l'élaboration et la vérification des bases servant à définir les VLI, selon l'état de la science et de l'expérience au sens des art. 13 et 14 LPE.

Dès les années 1985/86, les particules en suspension ont figuré parmi les thématiques prioritaires de la CFHA. Dans le rapport «Valeurs limites d'immission pour les polluants atmosphériques» (OFPE 1986), la commission retenait notamment que les effets sur la santé des poussières fines étaient fonction de la taille des particules et de leur composition, et qu'à cet égard, les fractions respirables constituaient le paramètre déterminant. Se fondant sur les recommandations de la CFHA, le Conseil fédéral inscrivait dans l'OPair en 1986 les VLI suivantes pour les «poussières totales»: 70 µg/m³ en moyenne annuelle et 150 µg/m³ en tant que valeur au 95^e centile des moyennes journalières sur une année. Ces valeurs correspondaient aux limites fixées dans d'autres pays, p. ex. en Suède et au Canada, pour les charges de particules fines et pour la masse totale des particules en suspension (TSP). Les VLI suisses correspondaient à peu près aux lignes directrices de l'OMS relatives aux particules en suspension et aux recommandations de la VDI (fédération des ingénieurs allemands) concernant les poussières fines. Aux Etats-Unis, et notamment en Californie, on avait déjà imposé des valeurs limites plus sévères pour les PM10.

Quelque dix ans plus tard, la CFHA s'est à nouveau penchée sur le thème des poussières en suspension et, en 1996, elle publiait le rapport «Particules en suspension. Mesure et évaluation des effets sur la santé» (OFEFP 1996). Se fondant sur les connaissances scientifiques d'alors, et notamment sur les résultats de la grande étude suisse de cohorte SAPALDIA, la commission recommandait de remplacer les VLI fixées dans l'OPair pour la totalité des particules en suspension par des valeurs plus restrictives centrées sur les PM10. En 1998, le Conseil fédéral adoptait les recommandations de la CFHA et inscrivait dans l'OPair les valeurs ci-après pour les PM10: 20 µg/m³ en moyenne annuelle et 50 µg/m³ en tant que valeur moyenne sur 24h, qui ne doit pas être dépassée plus d'une fois par an. Ces valeurs sont toujours en vigueur aujourd'hui.

En 2006, la commission a repris une nouvelle fois la thématique des poussières fines et publié le rapport «Poussières fines en Suisse» (CFHA 2007). Peu auparavant, l'OMS avait dressé un état des lieux des connaissances concernant les effets de la charge de particules fines sur la santé humaine, et avait publié les résultats de ses recherches dans le rapport «Lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air – mise à jour mondiale» (OMS 2006). S'appuyant sur les résultats d'études épidémiologiques, l'OMS y proposait de compléter les valeurs guides pour les PM10 par des valeurs guides pour les PM2,5 (10 µg/m³ en moyenne annuelle et 25 µg/m³ en tant que 99^e centile des moyennes journalières sur une année). Les valeurs de référence définies par l'OMS en 2005 pour les PM10 étaient en grande partie équivalentes aux limites que la Suisse avait définies dès 1998. Etant donnée la très forte corrélation entre les deux fractions dans notre pays ($r > 0,9$ pour les moyennes journalières), la CFHA avait alors estimé que les PM10 constituaient un bon indicateur non seulement pour les fractions

fine et grossière réunies, mais également pour les PM_{2,5}. De plus, en dehors des Etats-Unis, seules de rares études épidémiologiques réalisées dans le monde (et en Suisse) utilisaient les PM_{2,5} comme indicateur. Pour ces diverses raisons, la CFHA avait proposé en 2007 de renoncer à fixer une VLI supplémentaire pour les PM_{2,5}. Elle avait toutefois fait remarquer qu'il importait de suivre l'évolution de la situation, et de la réévaluer d'ici à cinq ans au plus tard, pour déterminer s'il convenait de fixer une valeur limite complémentaire.

La CFHA retenait également dans son rapport de 2007 que les particules de suie méritaient une attention particulière. Celles-ci sont produites notamment par les moteurs diesel dépourvus de filtres efficaces ainsi que par la combustion incomplète de biomasse (bois, p. ex.) et sont cancérigènes. Pour certaines substances cancérigènes comme la suie de diesel, l'OPair exige une réduction aussi drastique que possible des émissions. NABEL a commencé à mesurer les suies en continu en 2005. La commission a recommandé à l'époque d'intensifier ces mesures, afin d'obtenir de meilleures données sur l'exposition de la population aux particules de suie et de pouvoir évaluer l'efficacité des mesures (filtres à particules, p. ex.).

A5-1 Directive de l'UE sur les particules fines – objectif national de réduction de l'exposition (indicateur d'exposition moyenne, IEM)

Outre des valeurs limites et des valeurs cibles pour les PM_{2,5}, la directive 2008/50/CE de l'UE définit également des objectifs de réduction de l'exposition moyenne aux PM_{2,5}. Ces objectifs de réduction sont exprimés en %, et dépendent donc de la charge de particules et non des valeurs limites et des valeurs cibles en vigueur pour les PM_{2,5}. Ces objectifs n'ont pour l'instant pas force contraignante au sein de l'UE, mais le groupe d'experts chargés de l'étude REVIHAAP a suggéré que des indicateurs d'exposition moyenne (IEM) contraignants pourraient constituer un complément judicieux aux valeurs limites et aux valeurs cibles en vigueur. Pour les relations linéaires concentration-effet sans seuil d'innocuité identifiable, toute réduction de l'exposition de la population présente une utilité du point de vue sanitaire, indépendamment de la charge mesurée ou d'une quelconque valeur limite. La CFHA a cherché à savoir si un objectif contraignant de réduction de l'exposition en % pourrait aussi servir en Suisse à la mise en place de mesures supplémentaires pour réduire l'exposition de la population. Bien qu'elle considère l'idée comme tout à fait pertinente, la commission a renoncé à proposer un tel objectif contraignant pour les PM_{2,5} ou les PM₁₀. Elle recommande en revanche dans le cadre du présent rapport de définir un objectif de réduction pour la suie.

La CFHA

La Commission fédérale de l'hygiène de l'air est une commission administrative indépendante et interdisciplinaire de la Confédération œuvrant dans le domaine de la protection de l'air en collaboration avec les milieux scientifiques et avec les organes chargés d'administrer et de mettre en œuvre les mesures. Elle est l'organe consultatif du Département de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) et de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) pour toutes les questions scientifiques et méthodologiques relatives à la protection de l'air et aux effets de la pollution atmosphérique sur l'homme, les animaux et les plantes, leurs biocénoses et leurs biotopes. Elle est notamment chargée d'élaborer documentations, rapports, recommandations et propositions ad hoc.

A6 Liste des abréviations

BaP	benzo(a)pyrène (un hydrocarbure aromatique polycyclique, HAP)
BC	<i>black carbon</i> , carbone noir, un indicateur de la teneur en suie
BS	<i>black smoke</i> , fumée noire, un indicateur de la teneur en suie
CE	Communauté européenne
CEN	Comité européen de normalisation
CEN/TR	rapport technique du CEN
CFHA	Commission fédérale de l'hygiène de l'air
CIRC	Centre international de Recherche sur le cancer de l'OMS
Cl	symbole atomique du chlore
CO	monoxyde de carbone
CO ₂	dioxyde de carbone
COVNM	composés organiques volatils non méthanique
Cst.	Constitution fédérale (RS 101)
DE-OCF	dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les chemins de fer (RS 742.141.11)
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
EC	<i>elemental carbon</i> , carbone élémentaire, indicateur de la teneur en suies
EL	(mazout) extra-léger
EMPA	Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
EN	norme européenne
ESCAPE	<i>European Study of Cohorts for Air Pollution Effects</i> , étude européenne de cohortes sur les effets de la pollution atmosphérique. Un projet de l'UE.
EUSAAR2	Méthode, basée sur des variations de températures, développée dans le cadre du projet EUSAAR (<i>European Supersites for Atmospheric Aerosol Research</i>), pour la mesure thermo-optique de la teneur en carbone des particules (EC et OC)
FE	facteur d'émission
HAP	hydrocarbures aromatiques polycycliques
HNO ₃	acide nitrique

ID	injection directe (technique d'injection de carburant dans les moteurs)
IEM	indicateur d'exposition moyenne – exposition moyenne de la population (aux polluants atmosphériques)
K	symbole atomique du potassium
LPE	loi sur la protection de l'environnement (RS 814.01)
Na	symbole atomique du sodium
NABEL	<i>Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe</i> , réseau national d'observation des polluants atmosphériques
NH ₃	ammoniac
(NH ₄) ₂ SO ₄	sulfate d'ammonium
NH ₄ ⁺	ammonium
NH ₄ NO ₃	nitrate d'ammonium
NO	monoxyde d'azote
NO ₂	dioxyde d'azote
NO ₃ ⁻	nitrate
NO _x	oxydes d'azote (NO + NO ₂)
OC	<i>organic carbon</i> , carbone organique particulaire, composant des particules et de la suie
OEMB	Ordonnance sur les prescriptions relatives aux gaz d'échappement des moteurs de bateaux dans les eaux suisses (RS 747.201.3)
OFEFP	Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (actuel OFEV)
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OFPE	Office fédéral de la protection de l'environnement (actuel OFEV)
OFROU	Office fédéral des routes
OM	<i>organic matter</i> , matière organique (particulaire); carbone organique comportant des atomes provenant de composés organiques; généralement estimé par déduction à partir du carbone organique, à l'aide d'un facteur constant
OMS	Organisation mondiale de la santé
OPair	ordonnance sur la protection de l'air (RS 814.318.142.1)

PFI	<i>port fuel injection</i> , système conventionnel d'injection par tubulure d'admission, utilisé pour les moteurs à essence
PL	poids lourds (camions, bus, etc.)
PM	<i>particulate matter</i> , matière particulaire ou particules en suspension
PM1	masse de toutes les particules en suspension d'un diamètre aérodynamique égal ou inférieur à 1 µm (le plus souvent en µg/m ³)
PM10	masse de toutes les particules en suspension d'un diamètre aérodynamique égal ou inférieur à 10 µm (le plus souvent en µg/m ³)
PM2,5	masse de toutes les particules en suspension d'un diamètre aérodynamique égal ou inférieur à 2,51 µm (le plus souvent en µg/m ³)
POM	<i>particulate organic matter</i> , matière particulaire organique ou OM
r	coefficient de corrélation
REVIHAAP	<i>Review of evidence on health aspects of air pollution to review EU policies</i> , rapport de l'OMS à l'intention de la Commission européenne sur l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique, en vue de réviser les politiques de l'UE
ROS	Dérivés réactifs de l'oxygène, indicateur du potentiel oxydatif des particules
RPLP	redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations
S	symbole atomique du soufre
SAPALDIA	<i>Swiss study on Air Pollution And Lung Disease In Adults</i> , étude suisse sur la pollution de l'air et les maladies respiratoires chez l'adulte
SCARPOL	<i>Swiss Study on Childhood Allergy and Respiratory Symptoms with Respect to Air Pollution</i> , étude suisse sur les maladies respiratoires et les allergies chez les enfants
SCR	<i>selective catalytic reduction</i> , réduction catalytique sélective; technique de réduction des oxydes d'azote dans les gaz d'échappement
SMPS	<i>scanning mobility particle sizer</i> , appareil servant à évaluer la distribution granulométrique des particules
SO ₂	dioxyde de soufre
SO ₃	trioxyde de soufre
TC	<i>total carbon</i> , carbone total ou teneur totale en carbone (particulaire), somme du carbone élémentaire (EC) et du carbone organique (OC)
TSP	<i>total suspended particulate matter</i> , particules totales en suspension. Particules dont la vitesse de chute est ≤ 10 cm/s; particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à 57 µm
UE	Union européenne

UFP	<i>ultrafine particles</i> , particules ultrafines d'un diamètre ≤ 100 nm
VDI	Verband deutscher Ingenieure (fédération des ingénieurs allemands)
VLI	valeur limite d'immission
VT	voiture de tourisme
Zn	symbole atomique du zinc

Unités de mesure

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	microgramme par mètre cube (millionième de gramme par mètre cube)
μm	micromètre (millionième de mètre)
dN/dlogDp	nombre de particules comprises dans un intervalle logarithmique (du diamètre des particules)
kWh	kilowattheure
nm	nanomètre (milliardième de mètre)
part/cm ³ , #/cm ³	nombre de particules par centimètre cube d'air
t/a	tonnes par an
TJ	térajoule = 10^{12} joules

A7 Bibliographie

Bayer-Oglesby L., Grize L., Gassner M., Takken-Sahli K., Sennhauser F.H., Neu U., Schindler C., Braun-Fahrländer C. 2005: Decline of ambient air pollution levels and improved respiratory health in Swiss children. *Environmental health perspectives*: 113 (11), 1632–1637.

Beelen R., Raaschou-Nielsen O., Stafoggia M., Jovanovic Andersen Z., Weinmayr G., Barbara Hoffmann B., Wolf K., Samoli E., Fischer P., Nieuwenhuijsen M., Vineis P., Xun W., Katsouyanni K., Dimakopoulou K., Oudin A., Forsberg B., Modig L., Havulinna A., Lanki T., Turunen A., Oftedal B., Nystad W., Nafstad P., De Faire U., Pedersen N.L., Östenson C.-G., Fratiglioni L., Penell J., Korek M., Pershagen G., Thorup Eriksen K., Overvad K., Ellermann T., Eeftens M., Peeters P.H., Meliefste K., Wang M., Bueno-de-Mesquita B., Sugiri D., Krämer U., Heinrich J., de Hoogh K., Key T., Peters A., Hampel R., Concin H., Nagel G., Ineichen A., Schaffner E., Probst-Hensch N., Künzli N., Schindler C., Schikowski T., Adam M., Phuleria H., Vilier A., Clavel-Chapelon F., Declercq C., Gioni S., Krogh V., Tsai M.-Y., Ricceri F., Sacerdote C., Galassi C., Migliore E., Ranzi A., Cesaroni G., Badaloni C., Forastiere F., Tamayo I., Amiano P., Dorronsoro M., Katsoulis M., Trichopoulos A., Brunekreef B., Hoek G. 2013: Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *The Lancet*, Early Online Publication, 9 December 2013; doi:10.1016/S0140-6736(13)62158-3.

Brook R.D., Rajagopalan S., Pope C.A., 3rd, Brook J.R., Bhatnagar A., Diez-Roux A.V., Holguin F., Hong Y., Luepker R.V., Mittleman M.A., Peters A., Siscovick D., Smith S.C., Jr., Whitsel L., Kaufman J.D., American Heart Association Council on E., Prevention C.o.t.K.i.C.D., Council on Nutrition P.A., Metabolism. 2010: Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*: 121 (21), 2331–2378.

Buonanno G., Lall A.A. and Stabile L. 2009: Temporal size distribution and concentration of particles near a major highway. *Atmos. Environ.* 43(5): 1100–1105.

CFHA 2007: Poussières fines en Suisse. Rapport de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air, Berne.

CFHA 2010: 25 ans de protection de l'air selon la loi sur la protection de l'air. Berne.

CIRC 2012: Diesel engine exhaust carcinogenic. *Cent Eur J Public Health*. 20 (2):120, 138.

Eeftens M. et al. 2012: Spatial variation of PM_{2,5}, PM₁₀, PM_{2,5} absorbance and PM_{coarse} concentrations between and within 20 European study areas and the relationship with NO₂ – Results of the ESCAPE project. *Atmos. Environ.* 62: 303–317.

Gauderman W.J., Avol E., Gilliland F., Vora H., Thomas D., Berhane K., McConnell R., Kuenzli N., Lurmann F., Rappaport E., Margolis H., Bates D., Peters J. 2004: The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. *N Engl J Med* 351 (11): 1057–1067.

Gehrig R. 2013 a: Zusätzliche Partikelmessungen im NABEL. Bericht über die Messungen 2012. Empa Nr. 203 056/20, Empa, Dübendorf www.empa.ch/plugin/template/empa/*/122282.

Gehrig R. 2013 b: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM₁₀ an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone. Messbericht 2012. Empa Nr. 203 056/21, Empa, Dübendorf www.empa.ch/plugin/template/empa/*/139652.

Gehring U., Wijga A.H., Brauer M., Fischer P., de Jongste J.C., Kerkhof M., Oldenwening M., Smit H.A., Brunekreef B. 2010: Traffic-related air pollution and the development of asthma and allergies during the first 8 years of life. *Am J Respir Crit Care Med* 181 (6): 596–603.

Geiser M. B.M. Rothen-Rutishauser N. Kapp S. Schürch W. Kreyling H. Schulz M. Semmler V. Im Hof J. Heyder, Gehr P. 2005. Ultrafine particles cross cellular membranes by non-phagocytic mechanisms in lungs and in cultured cells. *Environ. Health Perspect.* 113: 1555–1560.

GIEC 2013, CONTRIBUTION DU GROUPE DE TRAVAIL I AU CINQUIEME RAPPORT D'EVALUATION DU GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'EVOLUTION DU CLIMAT (AR5), CHANGEMENT CLIMATIQUE 2013: LES ELEMENTS SCIENTIFIQUES. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/.

Herich H., Hüglin C. 2011: Monitoring der Russimmissionen im Rahmen des NABEL (suivi des immissions de suie dans le cadre du NABEL). EMPA, laboratoire des polluants atmosphériques/techniques environnementales. Rapport intermédiaire 2010.

Hoek G., Krishnan R.M., Beelen R., Peters A., Ostro B., Brunekreef B., Kaufman J. 2013: Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environ Health* 12:43.

Hüglin C., Gianini M., Gehrig R. 2012: Chemische Zusammensetzung und Quellen von Feinstaub (composition chimique et sources des poussières fines). EMPA, Dübendorf www.bafu.admin.ch/luft/00575/00578/index.html?lang=fr.

Infras 2007, Heldstab J., Kljun N.: PM10-Emissionen Verkehr, Teil Schienenverkehr (émissions de PM10 du trafic, partie trafic ferroviaire), Berne www.bafu.admin.ch/luft/11017/11046/11268/index.html?lang=fr.

Janssen N.A.H., Hoek G., Simic-Lawson M., Fischer P., van Bree L., ten Brink H., Keuken M., Atkinson R.W., Anderson H.R., Brunekreef B., Cassee F.R. 2011: Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared to PM10 and PM2,5. *Environ Health Perspect* 119 (12): 1691–1699.

Kelz J., Brunner T., Obernberger I. 2012: Emission factors and chemical characterisation of fine particulate emissions from modern and old residential biomass heating systems determined for typical load cycles. *Environmental Sciences Europe*, 24:11 www.enveurope.com/content/24/1/11.

Klippel N., Nussbaumer T. 2007: Einfluss der Betriebsweise auf die Partikelemissionen von Holzöfen (influence du mode d'exploitation sur les émissions de particules des chauffages à bois). Office fédéral de l'énergie, Berne.

Kreyling WG, Semmler M, Erbe F, Mayer P, Takenaka S, Schulz H, Oberdörster G, Ziesenis A. 2002: Translocation of ultrafine insoluble iridium particles from lung epithelium to extrapulmonary organs is size dependent but very low. *J Toxicol Environ Health A* 65: 1513–1530.

Lanki T., Pekkanen J., Aalto P., Elosua R., Berglind N., D'Ippoliti D., Kulmala M., Nyberg F., Peters A., Picciotto S., Salomaa V., Sunyer J., Tiittanen P., von Klot S., Forastiere F. 2006: Associations of traffic-related air pollutants with hospitalisation for first acute myocardial infarction. The HEAPSS study. *Occup Environ Med* 63: 844–851.

Mills N.L., Miller M.R., Lucking A.J., Beveridge J., Flint L., Boere A.J., Fokkens P.H., Boon N.A., Sandstrom T., Blomberg A., Duffin R., Donaldson K., Hadoke P.W., Cassee F.R., Newby D.E. 2011: Combustion-derived nanoparticulate induces the adverse vascular effects of diesel exhaust inhalation. *Eur Heart J* 32 (21): 2660–2671.

Naess O., Nafstad P., Aamodt G., Claussen B., Rosland P. 2007: Relation between concentration of air pollution and cause-specific mortality: four-year exposures to nitrogen dioxide and particulate matter pollutants in 470 neighborhoods in Oslo, Norway. *American journal of epidemiology*: 165 (4), 435–443.

Nussbaumer T. 2008: Feinstaub-Emissionsfaktoren von Holzheizungen: Übersicht aus Ländern der Internationalen Energie Agentur. Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung. Tagungsband zum 10. Holzenergie-Symposium, 12. September 2008 an der ETH Zürich, Verenum Zürich 2008 ISBN 3-908705-19-3.

Oberdörster G., Sharp Z., Atudorei V., Elder A., Gelein R., Kreyling W., Cox C. 2004: Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicol* 16: 437–445.

OFEFP 1996: Particules en suspension. Mesures et évaluation des effets sur la santé. Rapport de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air. Berne.

OFEN 2011: Schweizerische Holzenergiestatistik, Erhebung für das Jahr 2010 (statistique 2010 de l'énergie-bois suisse), Office fédéral de l'énergie, Berne.

OFEV 2005: Arbeitsblatt Emissionsfaktoren Feuerungen (notice sur les facteurs d'émission des installations de combustion, en allemand seulement), état à septembre 2005, Office fédéral de l'environnement, Berne.

OFEV 2008, Schäffeler U., Keller M., Consommation de carburant et émissions polluantes du secteur non routier. Connaissance de l'environnement n° 0828. Office fédéral de l'environnement, Berne.

OFEV 2010: Emissions polluantes du trafic routier de 1990 à 2035. Connaissance de l'environnement n° 1021. Office fédéral de l'environnement, Berne.

OFEV 2013: PM10 and PM2,5 ambient concentrations in Switzerland. *Environmental Studies* 1304. Office fédéral de l'environnement, Berne. Résumé disponible en français: www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01700/index.html?lang=fr&show_kat=%2Fpublikationen.

OFPE 1986: Valeurs limites d'immissions pour les polluants atmosphériques, Berne.

OFROU 2003: Vérification des facteurs d'émissions de PM10 de la circulation routière. Mandat de recherche OFROU 2000/415, Office fédéral des routes, Berne.

OFROU 2009: PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs/Facteurs d'émission des particules d'abrasion dues au trafic routier, Mandat de recherche OFROU 2005/007, Office fédéral des routes, Berne (rapport en anglais avec résumé en allemand) www.bafu.admin.ch/luft/11017/11019/index.html?lang=fr.

Oftedal B., Brunekreef B., Nystad W., Madsen C., Walker S.E., Nafstad P. 2008: Residential outdoor air pollution and lung function in schoolchildren. *Epidemiology*: 19 (1), 129–137.

OMS 2006: Lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air: particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre – mise à jour mondiale 2005. Bureau régional de l'OMS pour l'Europe, Copenhague.

OMS 2012: Impact sanitaire du carbone noir. N Janssen et al.

OMS 2013: Données relatives aux aspects sanitaires de la pollution atmosphérique – projet REVIHAAP. Rapport technique final (en anglais uniquement). Bureau régional de l'OMS pour l'Europe, Copenhague.
www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report.

Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li S.M., Baltensperger U., Holzer-Popp T., Kinne S., Pappalardo G., Sugimoto N., Wehrli C., Wiedensohler A., Zhang X.Y. 2013: Recommendations for the interpretation of «black carbon» measurements. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 13, 9485–9517

Pope C.A., 3rd. 2007: Mortality effects of longer term exposures to fine particulate air pollution: review of recent epidemiological evidence. *Inhalation toxicology*: 19 Suppl 1, 33–38.

Quincey P., Butterfield D., Green D. and Fuller G.W. 2011: Black Smoke and Black Carbon: Further investigation of the relationship between these ambient air metrics. *Atmos. Environ.* 45(21): 3528–3534.

Raaschou-Nielsen O., Andersen Z.J., Beelen R. et al. 2013: Air pollution and lung cancer incidence; prospective analyses in 17 European cohorts within the ESCAPE study. *Lancet Oncology*; doi: 10.1016/S1470-2045(13)70279-1.

Rothen-Rutishauser B., Muhlfeld C., Blank F., Musso C., Gehr P. 2007: Translocation of particles and inflammatory responses after exposure to fine particles and nanoparticles in an epithelial airway model. *Part Fibre Toxicol* 4: 9.

Schindler C., Keidel D., Gerbase M.W., Zemp E., Bettschart R., Brandli O., Brutsche M.H., Burdet L., Karrer W., Knopfli B., Pons M., Rapp R., Bayer-Oglesby L., Kunzli N., Schwartz J., Liu L.J., Ackermann-Liebrich U., Rochat T., Team S. 2009: Improvements in PM10 exposure and reduced rates of respiratory symptoms in a cohort of Swiss adults (SAPALDIA). *Am J Respir Crit Care Med*: 179 (7), 579–587.

Schreiber D., A.-M. Forss M. Mohr and P. Dimopoulos 2007: Particle Characterisation of Modern CNG, Gasoline and Diesel Passenger Cars. SAE Paper 2007-24-0123.

Semmler M., Seitz J., Erbe F., Mayer P., Heyder, J., Oberdörster G., Kreyling W.G. 2004: Long-term clearance kinetics for inhaled ultrafine insoluble Iridium particles from the rat lung, including transient translocation into secondary organs. *Inhal. Toxicol.*, 16 (6–7), 453–459.

Tsoi C.T., Tse L.A. 2012: Professional drivers and lung cancer: a systematic review and meta-analysis. *Occup Environ Med* 69 (11): 831–836.