

« Poussières, fumées et brouillards sur les lieux de travail : risques et prévention »

Toulouse, 11-13 juin 2001

Ce colloque international, organisé conjointement par le Comité Chimie et le Comité Recherche de l'Association internationale de la Sécurité sociale (AISS), a réuni à Toulouse 270 participants de 20 pays différents. Plus de 70 communications et posters ont été présentés sur le thème « Poussières, fumées et brouillards sur les lieux de travail : risques et prévention », réparties en quatre grands sous-thèmes : évaluation de l'exposition aux polluants particulaires, effets biologiques des particules inhalées, réduction de l'exposition aux polluants particulaires en milieu de travail, particules ultrafines et poussières spécifiques. Sont résumées ici les principales communications ou posters susceptibles d'intéresser les médecins du travail.

ÉVALUATION DE L'EXPOSITION AUX POLLUANTS PARTICULAIRES

→ J.H. Vincent (Université du Michigan, Etats-Unis), J.F. Fabries (INRS, Centre de Lorraine), P. Görner (INRS, Centre de Lorraine), S. Grinshpun (Université de Cincinnati, Etats-Unis) ont présenté des communications dont les principaux messages sont résumés ci-après.

En hygiène industrielle, la mesure des expositions aux particules en suspension était, il y a quelques années, assez rudimentaire et se bornait souvent à la mesure pondérale des poussières, sans bien définir ces dernières. Or, les particules en suspension dans l'air sont inhalées au cours de la respiration et déposées en différentes régions des voies respiratoires, qui constituent ainsi l'accès principal à l'organisme. La probabilité de passage à travers le nez ou la bouche et la probabilité de dépôt dépendent de nombreux paramètres : physiques (vitesse et direction du vent extérieur, diamètre aérodynamique des particules), anatomiques (calibres bronchiques, angles de ramification) et physiologiques (type de cycle respiratoire, volume courant, fréquence respiratoire). Le site de dépôt des particules est un paramètre très important dans l'expression de la toxicité des substances qu'elles contiennent. En effet, le transfert des substances vers le sang dépend de l'état physique des particules (solide, liquide), de leur temps de séjour dans les différents compartiments (bronches, alvéoles) et de leur solubilité dynamique dans les fluides

GLOSSAIRE

Fraction inhalable : fraction massique des particules totales en suspension dans l'air inhalée par le nez et la bouche. La fraction inhalable dépend de la vitesse et de la direction de l'air, de la fréquence respiratoire et d'autres facteurs.

Fraction thoracique : fraction massique des particules inhalées pénétrant au-delà du larynx.

Fraction alvéolaire : fraction massique des particules inhalées qui pénètrent dans les voies aériennes non ciliées.

biologiques en contact (mucus bronchique, surfactant alvéolaire, contenu des lysosomes des macrophages). Ce temps de séjour dépend lui-même du site de dépôt en raison des mécanismes de clairance. Pour des particules solides déposées dans l'arbre trachéo-bronchique, il est de l'ordre de quelques heures à quelques jours tout au plus, alors que dans la région alvéolaire non ciliée il se chiffre en mois, voire en années. Par ailleurs, certains effets induits localement par les particules sont très variables en intensité suivant les sites, comme par exemple les phénomènes d'irritation ou le développement d'une fibrose qui concerne le poumon profond. Pour évaluer les risques pour la santé liés à l'exposition aux polluants particulaires, il convient donc de prendre en compte les paramètres pertinents : concentration moyenne de l'aérosol présent au niveau des voies respiratoires supérieures d'une personne exposée, taille des particules, composition chimique, en identifiant autant que possible les composés chimiques et pas seulement les éléments. C'est ainsi que ces dernières années un vaste effort de standardisation de ces poussières sur le

D. LAFON (*)

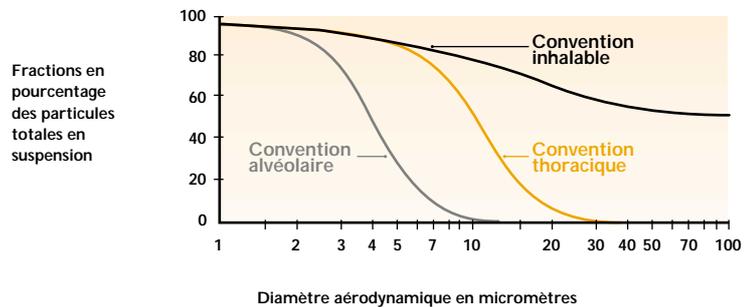
(*) Département Etudes et assistance médicales, INRS, Centre de Paris

INRS

Documents pour le médecin du travail
N° 87
3^e trimestre 2001

335

Fig. 1 : Courbes conventionnelles définissant les fractions inhalable, thoracique et alvéolaire d'un aérosol en fonction du diamètre aérodynamique des particules.



plan granulométrique a été effectué. Les organismes internationaux (CEN, Comité européen de normalisation, NIOSH, National Institute for occupational Safety and Health, ISO, Organisation internationale de normalisation) ont publié des courbes conventionnelles définissant les fractions inhalable, thoracique et alvéolaire d'un aérosol en fonction du diamètre aérodynamique des particules. Ces conventions (inhalable, thoracique, alvéolaire) constituent des critères que doivent satisfaire le mieux possible les échantillonneurs sélectifs en taille des particules (figure 1).

A partir de là, la recherche sur ce thème a pu s'orienter sur les directions suivantes :

- validation des appareils de prélèvements par des exercices d'inter-comparaisons. En effet, la mesure des aérosols est une science complexe et l'expérience de terrain montre chaque jour des résultats discordants lors d'utilisation d'appareils différents. Deux appareils mis côte à côte dans une même ambiance industrielle peuvent aboutir à des résultats fort différents sans que l'on sache ni bien l'expliquer, ni quelle valeur retenir. Il est donc apparu extrêmement important d'évaluer les performances de chaque appareil, notamment de connaître les fractions d'aérosols prélevées en fonction des granulométries et des types d'aérosols. La plupart des études se sont consacrées pour l'instant aux appareils prélevant les fractions alvéolaires et inhalables, les fractions thoraciques ayant été peu étudiées. De nombreuses publications, depuis cinq ans, ont ainsi comparé les différents appareils, soit sur le terrain, soit dans des installations validées à cet effet. Un certain nombre des études récentes ou en cours sur ce sujet ont été présentées lors de ce colloque. Les lecteurs désirant approfondir cette question pourront se reporter aux actes du colloque qui seront publiés en 2002.

- spéciation chimique. Il est connu que pour un même élément, sa forme chimique peut modifier sa biodisponibilité et sa toxicité. Il est donc important de ne pas seulement mesurer, par exemple, le nickel total, mais les différentes formes de nickel et ce pour les dif-

férentes tranches granulométriques présentes. Cette approche est encore peu fréquente en hygiène industrielle et doit se développer dans les années à venir.

EFFETS BIOLOGIQUES DES PARTICULES INHALÉES

→ D. Choudat (CHU Cochin, Paris) a introduit ce thème en soulignant d'emblée que les particules inhalées peuvent provoquer des effets biologiques très divers du fait de la multitude des polluants en cause et de la variété des réponses de l'organisme. Deux chiffres, qu'il est bon de rappeler, traduisent l'importance de l'exposition : des millions de m³ d'air sont inhalés au cours de toute la vie d'un individu et cet air entre au contact d'une surface alvéolaire considérable, environ 100 à 150 m² chez l'adulte.

Il existe des moyens de défense remarquablement efficaces, mais les mécanismes physiopathologiques sont en nombre relativement limité. Dès lors, les effets biologiques observés sont peu spécifiques des nuisances.

On peut analyser les facteurs dont ils dépendent selon une démarche classique de prévention.

L'identification du danger en est la première étape. Elle est fonction de la nature même de la particule, mais souvent compliquée par une association de dangers (expositions professionnelles multiples, tabagisme) et par l'intrication de divers mécanismes (par exemple, les spores d'*Aspergillus* peuvent être responsables de pneumopathies d'hypersensibilité, d'asthme, d'infection broncho-pulmonaire)

La deuxième étape consiste à estimer l'exposition. Cette dernière et la dose reçue sont influencées par :

- la concentration atmosphérique,
- la durée d'exposition,
- la taille et la forme des particules,

- le volume inhalé, le port des masques...

Cette exposition peut être continue, constante, ou au contraire périodique, aléatoire, par pics...

La quantification de l'exposition, en fonction des effets attendus, va s'intéresser à :

- un index cumulé d'exposition, plus pertinent en cas de biopersistance de particules minérales responsables de pneumoconiose et en cas d'effet rémanent génique et responsable de cancer ;
- la concentration atmosphérique ou le débit de dose en cas d'asthme, par exemple.

Enfin, la troisième étape consiste à définir les relations dose-effet. L'absence de spécificité de ces effets biologiques rend complexe l'établissement de ces relations qui ne sont évaluées que pour peu de produits.

L'identification du risque qui est la mesure de la probabilité de survenue d'un dommage est dès lors difficile. En fait, cette estimation scientifique du risque pour des particules inhalées n'existe que pour de rares substances avec des franges d'incertitudes considérables (exemple de l'amiante, des pneumoconioses des mineurs de charbon). C'est pourtant un préalable indispensable à la mise en place de moyens de prévention adaptés et à une évaluation sociale du risque en vue d'une réparation plus juste. A défaut, le principe de précaution sera avancé avec, probablement dans bien des cas, un gaspillage des ressources.

Cette approche nécessite une collaboration entre les spécialistes de la métrologie des aérocontaminants, les biologistes et toxicologues, les épidémiologistes, les médecins du travail.

→ *W. Schneider (médecin du travail, BAuA, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Allemagne)* a ensuite abordé les problèmes liés à l'évaluation épidémiologique des relations dose-effet en cas d'inhalation de polluants particuliers.

Son exposé a été centré sur les bronchopneumopathies chroniques obstructives (BPCO). Bien que les données toxicologiques (influence de la surcharge en particules sur la clairance alvéolaire) et les points de vue les plus récents sur leur pathogenèse donnent à penser que toutes les particules de poussières peuvent, en principe, contribuer à la survenue de cette affection très répandue, cela n'a été confirmé par les données épidémiologiques que pour quelques types de poussières (poussières des mines de charbon, poussières de fonderie, poussières agricoles).

Cette pénurie de données peut s'expliquer par les points suivants :

- l'exposition n'est pas déterminée sur une période de temps suffisamment longue, correspondant aux délais d'apparition des BPCO ; des classements erronés, pour ce qui est de la dose, conduisent à gommer d'éventuelles relations dose-effet ;
- les cohortes étudiées sont souvent trop jeunes

pour qu'il soit possible de trouver des effets à long terme ;

- le tabagisme est reconnu pour avoir les effets les plus marqués : le manque de précision dans la prise en compte de ce facteur peut conduire à masquer les effets, plus faibles, des cofacteurs d'origine professionnelle ;

- les études transversales chez les sujets d'âge moyen ou élevé ne fournissent généralement pas d'information sur la sélection (imputable aux médecins du travail ou résultant d'une auto-sélection) ; l'étude porte alors sur une population restante présentant une résistance particulière ;

- le critère cible que constitue l'obstruction peut être mesuré avec une bonne reproductibilité (variance intra-individuelle +/- 3 %) par spirométrie ; cela suppose néanmoins un personnel bien entraîné, ce qui n'est pas toujours le cas des examens de routine réalisés en médecine du travail ;

- la comparaison des données spirométriques avec le domaine dit « normal » est très peu sensible, car ce domaine couvre +/- 20 % de la valeur de référence ;

- les études longitudinales permettent d'évaluer la fonction pulmonaire dans son évolution intra-individuelle ; c'est une méthode plus sensible pour l'établissement de relations dose-effet dans le cas d'effets non spécifiques des poussières. Des techniques utilisables en épidémiologie et fournissant des informations aussi précoces que les données expérimentales sur la clairance (comme les examens d'air exhalé) sont encore en cours de développement ;

- en pratique, les expositions mixtes à différents types de poussières (mêlées entre elles ou associées à des gaz toxiques) dominant, si bien que les résultats d'études épidémiologiques ne permettent pas de se prononcer clairement sur les effets des différentes particules.

Compte-tenu de ces handicaps, les petites études transversales, même conduites en grand nombre, ne permettront pas de faire progresser de façon décisive les connaissances. Il serait souhaitable de conduire des études longitudinales relatives aux effets de différentes particules sur les voies respiratoires, afin d'élucider le rôle de ces expositions dans la survenue des BPCO.

Des exposés ou des posters ont ensuite été consacrés aux effets de particules spécifiques.

→ *J.C. Martin (CHU Cochin, Paris)* a rapporté une méthode de quantification de la réactivité bronchique spécifique lors de tests de provocation bronchique. Des sujets asthmatiques, exposés professionnellement à la farine, ont effectué un test contrôle au lactose puis à la farine de blé. Les mesures instantanées de la concentration et du débit inspiratoire permettent le calcul précis de la dose reçue et l'établissement des

relations dose-réponse. Les résultats sont exprimés :

- par la dose de farine provoquant une chute de 20 % du VEMS ;
- par la comparaison de la variation du VEMS lors du test à la farine à la distribution des valeurs observées lors du test au lactose.

Les résultats montrent que, chez les sujets étudiés, l'inhalation de lactose ne modifie pas les débits aériens. La réactivité bronchique spécifique à la farine est une variable continue qui permet de distinguer :

- les sujets ayant une hyperréactivité bronchique spécifique nette avec diminution du VEMS de plus de 20 %,
- les sujets non réactifs sans variation significative du VEMS pour des doses de farine supérieures à 1 400 µg,
- les sujets ayant une réactivité intermédiaire, avec des diminutions significatives par rapport au test au lactose, mais inférieures à 20 %. Pour ces sujets, le débit de dose influence la réponse.

Au total, le déclenchement des crises d'asthme est lié à la dose inhalée, mais aussi au débit de dose.

→ *F. Bochmann (BIA, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit, Allemagne)* a ensuite présenté une méta-analyse des études épidémiologiques consacrées aux effets silicogène et cancérogène pulmonaire du quartz.

La relation entre l'exposition aux poussières de quartz, la silicose et le cancer du poumon fait depuis longtemps l'objet d'un débat dans les milieux de la prévention des risques professionnels. En 1997, le CIRC, Centre international de recherche sur le cancer, a classé la silice cristalline inhalée sous forme de quartz ou de cristobalite comme cancérogène pour l'homme (groupe 1), avec toutefois deux restrictions, à savoir que ce classement ne s'applique qu'à l'exposition professionnelle et que la relation de cause à effet n'a pas pu être établie pour tous les secteurs d'activité.

L'auteur a réalisé un inventaire complet des études épidémiologiques publiées à ce jour (335 études en tout). Au total, 35 études ont été retenues pour effectuer une méta-analyse.

Les résultats montrent un taux de cancers pulmonaires qui n'est pas accru, par rapport à la population générale, chez les personnes professionnellement exposées aux poussières de quartz, lorsque celles-ci ne présentent pas de silicose. Pour la prévention, cela signifie que les mesures destinées à prévenir la silicose sont également efficaces contre une élévation du taux de cancer du poumon.

→ *W. Zschiesche (Caisse d'assurance accidents de l'électrotechnique et de la mécanique de précision, Allemagne)* a présenté une étude sur la survenue des alvéolites chez les soudeurs d'aluminium. L'objectif était de déterminer si la structure complexe des

fumées de soudage contenant de l'aluminium est susceptible d'entraîner une fibrose pulmonaire.

L'étude a porté sur un groupe de 46 soudeurs d'aluminium exposés de façon prolongée aux fumées de soudage dans 5 entreprises et sur un groupe témoins.

Conçue comme une étude longitudinale, avec trois analyses transversales sur cinq ans, l'étude comportait une surveillance de l'environnement, une surveillance biologique, des épreuves fonctionnelles respiratoires et des examens pulmonaires par tomographie à haute résolution. Les résultats présentés lors de ce colloque ne concernent que la première analyse transversale qui constitue une phase pilote destinée à évaluer les méthodes et la conception de cette étude multicentrique.

Les résultats montrent une exposition importante avec des concentrations de poussières respirables dans la zone respiratoire de 6,2 mg/m³ (intervalle : 0,5-17,3) et une médiane de 86 µg/g de créatinine (intervalle : 18-399) pour l'aluminium urinaire (valeur BAT - valeur biologique - allemande : 200 µg/l). Des valeurs ponctuelles d'ozone pendant le maintien de l'arc ont été trouvées dans un intervalle compris entre 0,02 et 0,4 ppm (valeur MAK - valeur limite d'exposition - allemande : 200 µg/l)

Chez 7 des 46 soudeurs, la tomographie à haute résolution a révélé la présence d'opacités arrondies diffuses caractéristiques de la bronchiolite ou de l'alvéolite. Les types d'opacités observées sont identiques à ceux qui caractérisent les premiers stades de l'aluminose chez les travailleurs exposés à la poudre d'aluminium. Ils sont très différents de ceux que l'on observe dans le cas de sidérose qui affectent parfois les soudeurs. Aucun symptôme de lésion pulmonaire n'a été mis en évidence par questionnaire ou entretien. La fonction pulmonaire ne présentait pas d'altération caractéristique d'une pathologie obstructive ou restrictive.

Cette étude montre une exposition importante aux fumées parmi les soudeurs d'aluminium. La survenue d'alvéolites demande à être explorée. Les résultats actuels ne permettent pas clairement de désigner l'aluminium comme agent responsable.

→ *D. Lafon (INRS, Centre de Paris)* a ensuite présenté les axes de recherche depuis cinq ans vis-à-vis de la toxicité des particules diesel. Depuis 25 ans, de très nombreuses études ont été consacrées à l'impact sur la santé des particules diesel. Toxline, base de données spécialisée en toxicologie, recense environ 5 000 publications.

L'importance du développement des moteurs diesel, le nombre de personnes potentiellement exposées, des enjeux industriels majeurs, mais aussi la complexité des effets toxicologiques des particules émises, expliquent cette frénésie de recherches.

Au milieu des années 90 plusieurs organismes inter-

nationaux ou nationaux ont publié des synthèses sur la toxicité des émissions diesel (OMS, Organisation mondiale de la santé, en 1996 ; HEI, Health Effects Institute, en 1995 ; INERIS, Institut national de l'environnement et des risques industriels, en 1993).

Depuis, les équipes de recherche ont poursuivi leurs études. 1000 publications sont recensées dans Toxline de 1996 à 2001.

Les thèmes suivants ont été abordés :

- effets allergiques et immunologiques,
- effets cardio-vasculaires,
- effets cancérogènes,
- effets neurotoxiques,
- effets sur la reproduction et le développement,
- biomarqueurs d'exposition.

Les études sur les effets allergiques et immunologiques de ces cinq dernières années montrent que les particules diesel semblent jouer un rôle dans les mécanismes allergiques en potentialisant la réponse aux allergènes.

Ceci pourrait être expliqué par le développement d'une réponse de type inflammatoire, ainsi que par une présentation au niveau pulmonaire d'allergènes qui seraient déposés sur les particules diesel. Toutes ces données sont concordantes, que ce soit chez l'homme, l'animal ou les modèles cellulaires. Il s'agit de l'axe de recherche majeur concernant les particules diesel depuis 5 ans.

Concernant les effets sur l'appareil cardio-vasculaire, les résultats des recherches ne permettent pas de conclure avec certitude sur un lien particules-pathologies cardio-vasculaires, mais ouvrent cependant un certain nombre de voies d'études dans ce sens. Les impacts sur le fibrinogène et sur la contractilité de certaines cellules sont des pistes de mécanismes à explorer.

Les effets cancérogènes ont fait l'objet de très nombreuses études épidémiologiques. En 1995, plusieurs synthèses internationales donnaient des résultats concordants avec une augmentation des cancers pulmonaires dans les populations professionnellement exposées aux émissions des moteurs (conducteurs de bus, cheminots, chauffeurs de poids lourds, dockers...). Le risque relatif était faible, généralement inférieur à 2. Le lien causal avec le diesel n'était cependant pas déterminé. Dans la majorité des études il existait des biais, une non prise en compte des facteurs d'exposition confondants tels que l'amiante, mais surtout une co-exposition fréquente avec les émissions des moteurs à essence. Le rôle du tabac avait cependant pu être écarté dans quelques études.

Depuis cette époque, le nombre d'études épidémiologiques spécifiques au diesel a nettement diminué, de même que les études expérimentales.

Ces études concordent cependant pour confirmer le risque de cancer pulmonaire pour les populations pro-

fessionnellement exposées aux émissions automobiles. Le facteur étiologique fait encore l'objet de discussions, mais les particules diesel sont toujours fortement mises en cause, seules ou comme co-facteur.

Les effets des émissions diesel sur le système nerveux central avaient fait l'objet de quelques études expérimentales au début des années 80. Des études sur le rat avaient montré des difficultés d'apprentissage et des troubles locomoteurs. Les doses utilisées étaient cependant extrêmement importantes. Depuis, la recherche a peu investi ce domaine.

Vis-à-vis de l'impact sur les fonctions des glandes endocrines, des études ont montré que certains HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) pouvaient intervenir sur l'expression de certains gènes codant pour des récepteurs œstrogéniques. L'impact des émissions diesel sur les récepteurs œstrogéniques a ainsi été posé. Les publications d'études sur ce thème sont cependant encore rares.

Concernant les effets sur la reproduction, plusieurs études ont été publiées dans les années 80-90. Aucun effet n'avait alors été montré, que ce soit vis-à-vis de la tératogénicité, l'embryotoxicité, la fœtotoxicité ou la fertilité féminine. Seuls quelques effets sur des anomalies spermatiques étaient signalés, mais lors d'exposition à des concentrations importantes.

Ces impacts ont continué à être explorés depuis 1995. Des études semblent montrer des atteintes possibles au niveau de la spermatogenèse chez l'animal. D'autres études s'avèrent nécessaires afin de pouvoir apprécier l'impact sur l'homme.

La recherche sur des biomarqueurs permettant d'évaluer l'exposition aux particules diesel était assez peu active avant 1995. Depuis cette date, quelques équipes ont investi ce thème. L'une a tenté d'évaluer l'intérêt de cinq adduits des nitroHAP (nitro hydrocarbures aromatiques polycycliques) à l'hémoglobine en les dosant dans le sang de 29 mécaniciens de bus et de 34 témoins (20 travailleurs hospitaliers urbains, 14 travailleurs en milieu rural). Aucun marqueur pris individuellement ne montre de différences significatives entre les mécaniciens de bus et les témoins. En revanche, en additionnant les cinq adduits, une différence semble exister entre les travailleurs en milieu urbain et ceux en milieu rural.

Plusieurs auteurs ont tenté de chercher des marqueurs d'effets dans divers milieux biologiques (crachats, cellules buccales ou nasales, sang, urines). Les effets étudiés concernent essentiellement la mutagénicité (échange de chromatides sœurs, micro-noyaux), l'inflammation (macrophages...), des atteintes oxydatives de l'ADN (8-oxo-2'-desoxyguanosine). La plupart de ces effets ne sont pas spécifiques des particules diesel et ne permettent pas d'évaluer l'exposition à ces dernières. Actuellement, aucun marqueur n'est opéra-

tionnel et la plupart des pistes à l'étude concernent des marqueurs d'inflammation ou de mutagénicité, non spécifiques des particules diesel.

→ *S. Saretto (Archée, France)* a présenté les risques conjugués de l'aérosol tabagique et des polluants particulaires. Cet exposé a rappelé que si aujourd'hui 34 % des adultes français fument, le pourcentage de fumeurs n'est pas le même dans les différentes catégories socio-professionnelles : 48 % des ouvriers fument, par exemple. La majoration de ces risques par la présence d'autres agents nocifs qui interagissent avec les très nombreuses substances toxiques produites dans l'aérosol tabagique peut se faire de plusieurs manières : effet d'addition ou de multiplication, augmentation des doses des composés chimiques inhalés du fait de leur présence simultanée dans la fumée de tabac et dans l'air des lieux de travail, production de nouvelles substances nocives lors de la combustion de produits utilisés au travail et déposés sur le matériel du fumeur.

→ *M. Guindo-Nignan (Thomson CSF, France)* a présenté une étude sur la spéciation de l'arsenic et la prévention des cancers dans la microélectronique. Dans un laboratoire de recherche sur l'arséniure de gallium (GaAs) et les composés apparentés, de l'arsenic est utilisé provenant de différentes sources : As (solide), AsH₃ (gazeux) ou substituts (liquides) tels que tert-butyl-arsine (TBA) ou tridiméthylaminoarsine (DMMA). Pour prévenir le risque de cancer lié à l'arsenic, il faut réaliser une évaluation approfondie des risques. Pour cela, il faut mesurer précisément la pollution de l'air par l'arsenic (particules et gaz) et ensuite assurer un biomonitorage afin de déceler une éventuelle exposition.

Dans les deux cas, la spéciation est très utile pour définir la marche à suivre en terme de prévention, puisque toxicité et métabolisation dépendent de la molécule. Pour l'identification précise des molécules d'arsenic (opération délicate et fort peu courante), une méthode originale de prélèvement et d'analyse est actuellement à l'étude. Elle se fonde sur le cryoprélèvement, la chromatographie gazeuse et l'ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer : spectrométrie de masse quadripolaire à source plasma), avec spéciation de l'arsenic. Cette technique permet d'identifier dans l'air divers polluants à base d'As (hydrures, composés organométalliques, etc.), et dans certains cas des molécules inattendues (diméthylarsine ou triméthylarsine) ainsi que d'observer des espèces inconnues. Pour le biomonitorage, la spéciation est réalisée sur les urines ; on détermine par génération d'hydrure/piégeage cryogénique/absorption atomique, les trois métabolites :

As_{in} (arsenic inorganique), acide monométhylarsinique (Mma), acide diméthylarsinique (DMA).

RÉDUCTION DE L'EXPOSITION AUX POLLUANTS PARTICULAIRES EN MILIEU DE TRAVAIL

Ce colloque a été l'occasion de faire le point sur les derniers développements en matière de captage, de ventilation, d'organisation et de protection individuelle. Seules sont citées ici certaines communications qui relatent des progrès utilisables dans divers milieux professionnels.

→ *R. Accart (OPPBT, Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics, France)* a rapporté certaines règles simples à proposer aux entreprises du secteur de la charpente-menuiserie qui sont souvent de petites entreprises de moins de 5 salariés auxquels leurs capacités d'investissement ne permettent pas de s'équiper des matériels les plus performants. Il est possible pourtant pour ces entreprises d'améliorer les installations existantes avec des investissements limités, tout en obtenant une bonne efficacité d'aspiration.

Il faut pour cela respecter certaines règles simples :

- veiller au bon affûtage des outils,
- capter les poussières au plus près de leur source d'émission,
- estimer le débit nécessaire du ventilateur en fonction du nombre des machines utilisées simultanément,
- réduire les pertes de charge dans le réseau d'aspiration,
- transporter les poussières dans les gaines en évitant tout dépôt,
- asservir l'ouverture et la fermeture des buses de chaque machine à leur mise en marche ou à leur arrêt,
- implanter les machines demandant le plus grand débit au plus près des collecteurs principaux,
- placer le ventilateur et les sacs filtrants hors de l'atelier,
- changer certaines habitudes de travail,
- entretenir l'installation.

Ces différents principes peuvent être appliqués à une installation existante ou servir de base à un cahier des charges en vue d'une installation nouvelle.

Enfin, certains postes sont particulièrement générateurs de poussières, comme les ponceuses à bande ou les machines portatives, par exemple. Ces postes doivent être, dans la mesure du possible, isolés du reste de l'atelier et la protection individuelle sera alors l'ultime recours pour pallier ces inconvénients.

→ *C. Felten (Fahrzeughaltungen, Caisse d'assurance*

accidents des entreprises de transport, Allemagne) a présenté une nouvelle méthode de surveillance des moisissures dans l'air des lieux de travail par comptage en continu des particules selon leur fraction granulométrique ; cette méthode est applicable même pour des concentrations assez élevées. Cette méthode a été mise au point dans des centres de tri de déchets, milieu de travail où le risque pour la santé le plus fréquemment rencontré est l'exposition à des moisissures allergisantes et à leurs toxines. La réalisation conjointe de très nombreuses mesures des moisissures dans l'atmosphère à différents points d'installations de tri de déchets (58 centres de tri étudiés au total) et de mesures d'empoussièrement avec comptage des fractions granulométriques a permis d'établir des corrélations suffisamment fiables pour permettre de convertir directement le nombre de particules comptées en unités formant colonies (ufc). L'utilisation de cette méthode a permis d'élaborer un système de protection associant des mesures de ventilation, d'hygiène et d'organisation afin de réduire l'exposition aux moisissures des travailleurs des installations de tri des déchets et de contrôler l'efficacité de ces mesures. Ce système de protection, qui prend en compte à la fois les valeurs limites allemandes (50 000 à 100 000 UFC/m³) et l'état de l'art en matière de conception de la protection, a permis d'assurer globalement la sécurité de cette catégorie de travailleurs.

→ *D. Bemmer (INRS, centre de Lorraine)* a présenté une étude confrontant des mesures effectuées sur banc d'essai et sur le terrain afin d'évaluer les performances des installations de dépoussiérage industrielles.

Très répandue dans l'industrie et le secteur tertiaire, la filtration est un moyen d'élimination des polluants atmosphériques de nature particulaire. Les dispositifs de filtration sont des éléments constitutifs des équipements de protection collectifs et individuels dont il est nécessaire de connaître les performances. Un banc d'essai a été conçu afin de suivre l'évolution des performances d'un média plan de diamètre 130 mm soumis à des cycles de colmatage et de décolmatage, en termes d'efficacité de filtration et de perte de charge. Parallèlement, des mesures ont été effectuées sur un pilote de dépoussiéreur. Les tests réalisés en laboratoire à partir de médias filtrants plans permettent d'obtenir une assez bonne représentation des performances d'un dépoussiéreur industriel.

→ *E. Wahlmüller (Profactor GmbH, organisme de recherche international, siègeant en Autriche)* a présenté une communication sur les problèmes de maintenance des équipements de filtration lors du recyclage de l'air extrait après séparation des brouillards de fluides d'usinage. En effet, quatre-vingt dix pour cent des systèmes de ventilation installés recyclent l'air extrait dans les locaux de travail après séparation des brouillards d'hui-

le. Pour que ce processus ne devienne pas lui-même une source importante de contamination de l'air par les fluides d'usinage, il faut recourir à des systèmes de filtration à haute performance. Cette étude a montré que les meilleures performances sont réalisées par les précipitateurs électrostatiques, mais ceux-ci exigent des fréquences de maintenance élevées. Les séparateurs à fibres ont une efficacité médiocre si la périodicité de changement des filtres est faible. Les filtres à plaque frittée assurent la meilleure rétention des aérosols à la fin de l'intervalle entre deux interventions de maintenance. Outre le type de séparateur, ce sont le type de fluide d'usinage, la charge en particules liquides dans la gaine amont et la durée de fonctionnement de l'installation d'extraction qui ont été identifiés comme les paramètres les plus significatifs pour déterminer la fréquence de maintenance des équipements de filtration.

→ *A. Büsse (Caisse d'assurance accidents des industries papetières et graphiques, Allemagne)* a présenté une communication sur les mesures de prévention des risques pour la santé liés à l'utilisation de poudre antimaculage dans l'impression offset à feuille. Ces poudres sont utilisées, dans ce procédé, pour prévenir les problèmes liés à l'humidité de l'encre à la sortie des feuilles. Ces poudres sont constituées d'amidon, de carbonate de calcium ou de sucre, la taille médiane des particules variant entre 10 et 50 µm. Véhiculée par l'air de transport des feuilles, la poudre antimaculage est appliquée dans la presse, entre le dernier groupe d'impression et la sortie des feuilles. Différents facteurs peuvent conduire à ce que cette procédure entraîne un empoussièrement relativement important des postes de travail. Les particules fines, inférieures à 10 µm ne participent pas aux effets utiles de la poudre, elles sont pourtant pour une large part responsable de l'empoussièrement.

Les risques suivants peuvent en résulter :

- risque d'incendie et d'explosion, lorsque la poudre se dépose dans le local et sur la machine ;
- effets sur l'homme, en particulier du fait de l'action mécanique des particules déposées dans les alvéoles pulmonaires.

De plus, dans le cas des poudres constituées d'amidon, qui tient alors lieu de milieu nutritif, on peut observer des effets biologiques immuno-allergiques dus aux spores de moisissures (type fièvre des humidificateurs ou asthme du boulanger...).

Différentes mesures de prévention sont proposées. L'utilisation d'un procédé d'impression à base d'encres séchant aux rayons ultra-violet permet de renoncer totalement au poudrage et donc de supprimer le risque. A défaut, les mesures suivantes peuvent être proposées :

- réduction du pourcentage de particules fines (de taille inférieure à 10 µm) ;
- réduction de la quantité de poudre utilisée, par

optimisation des appareils de poudrage ;

- réduction des émissions de poudre , grâce à des systèmes de captage ;
- information et instruction des opérateurs.

Par ailleurs, le centre d'essai du comité technique des industries papetières et graphiques, en Allemagne, a établi des critères dont le respect permet la certification des machines comme faiblement polluantes.

PARTICULES ULTRAFINES ET POUSSIÈRES SPÉCIFIQUES

La quatrième partie du congrès était consacrée aux poussières ultrafines et aux poussières spécifiques.

→ G. Oberdörster (Université de Rochester, Etats-Unis) a présenté l'état des connaissances sur la toxicité des particules ultrafines au poste de travail et dans l'environnement.

Les premières études ont été effectuées par la NASA, National Aeronautic and Space Administration, qui s'est préoccupé de la santé des cosmonautes en cas d'exposition à des fumées de polymères. Ces dernières années, les spécialistes de la toxicologie environnementale se sont emparé de ce sujet du fait de la pollution urbaine par les particules diesel. Ces particules sont caractérisées par leur taille ($<0,1\mu\text{m}$), leur faible contribution à la masse particulaire, mais leur très grand nombre.

En milieu professionnel, les fumées générées par les procédés de soudage ou par les dégradations thermiques des polymères sont connues pour entraîner la fièvre des polymères ou des métaux.

Le polytetrafluoroéthylène (PTFE) a servi comme modèle pour étudier expérimentalement les effets toxiques de ces micro-particules. Il a été montré que les effets toxiques sur le poumon étaient principalement dus à leur présence, notamment lorsqu'elles étaient « fraîches », c'est-à-dire juste formées. En effet, les particules présentes dans l'air ont tendance à se coaguler, formant ainsi des particules de diamètre plus élevé. Ce phénomène se produit surtout aux fortes concentrations, lorsque le nombre des particules dépasse $10^8/\text{ml}$. A des concentrations plus faibles, sa survenue est plus lente.

Le rôle de la phase gazeuse est peu clair. Seule, elle n'entraîne pas de toxicité pulmonaire, mais il est possible qu'elle intervienne dans celle entraînée par les particules. Des études sont nécessaires pour élucider ce rôle.

Ces études ont permis d'établir la grande variabilité des effets des différentes particules ultrafines, ces effets pouvant être très toxiques, voire mortels, dans cer-

taines conditions d'exposition professionnelle, et relativement bénins lorsque les particules sont inhalées dans l'air ambiant. Toutefois, les populations exposées dans ces deux cas sont très différentes. Les travailleurs constituent un groupe en bonne santé de façon générale, tandis que la population générale inclut un nombre significatif de personnes âgées présentant des altérations du système cardiorespiratoire ou très jeunes. Il pourrait y avoir, pour ces sous-populations exposées aux particules ultra-fines en environnement urbain, un risque accru d'effets nocifs à des concentrations qui sont sans effet sur des sujets en bonne santé.

→ H. Fissan (Université Gerhard Mercator, Allemagne) a présenté un exposé sur le développement durable des nanotechnologies. Dans de nombreux domaines d'application, il se développe une nouvelle technologie dont l'une des caractéristiques est de faire appel aux nanoparticules : la nanotechnologie. Techniquement, l'intérêt des nanoparticules tient à leur surface importante, ainsi qu'aux effets quantiques qui leur sont associés. Des nanoparticules peuvent se former au cours des processus de transformation de gaz en particules.

→ G. Riediger (BIA, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit, Allemagne) a présenté des résultats de mesures de particules ultrafines aux postes de travail. Les répartitions granulométriques (ordre de grandeur : 10 à 500 nm) et les concentrations d'aérosols sont déterminées à l'aide d'un Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS). Des mesures ont été faites au niveau de postes de soudure, de découpage au jet à plasma, de fonderie, de traitement de bitume, de découpe au laser. Les résultats sont très hétérogènes.

→ B. Wehner (Institut für Troposphärenforschung, Institut de recherche sur la troposphère, en Allemagne) a présenté les résultats de mesures de particules fines effectuées sur un chantier naval en Allemagne, notamment au niveau de postes de soudage.

Les auteurs ont établi les distributions granulométriques en nombre entre 3 et 800 nm et prélevé des échantillons sur impacteur (5/12 étages). Ces échantillons ont été analysés : distribution granulométrique en masse totale, composition élémentaire distribuée selon la taille (analyse PIXE*), teneur en carbone élémentaire et organique. Les mesures ont été effectuées à différentes distances du soudeur au travail.

La plus forte concentration de particules, en masse, a été le plus souvent observée entre 142 et 420 nm. La différence entre le niveau de fond sur le chantier naval et les échantillons de fumées de soudage était de trois ordres de grandeur environ. Les éléments dominants étaient Fe, K, Mn et Zn, suivis par Ti, S et Cu. Leur concentration en masse, comme leur distribution

* PIXE : Particle Induced X-ray Emission, émission de rayons X induite par particules chargées

granulométrique en masse, varient avec la distance par rapport au soudeur. Le maximum de concentration en nombre a été observé pour un diamètre de 10 nm environ pendant les heures de la matinée alors que la plupart des soudeurs étaient simultanément au travail. Pendant les postes de nuit, où le nombre de salariés présent est plus restreint, les concentrations de particules étaient significativement plus faibles et le diamètre moyen variait entre 100 et 300 nm.

→ M. Guillemain (*European Coordination Working Group on Diesel Soot Exposure, Suisse*) a présenté les résultats d'une comparaison inter-laboratoires internationale sur la mesure du carbone dans les suies diesel.

Les données toxicologiques actuelles semblent accréditer l'utilisation des noyaux carbonés des particules diesel comme l'indice le plus approprié pour l'évaluation de l'exposition et des risques pour la santé des travailleurs. L'utilisation d'un tel indice d'exposition rend nécessaire l'existence d'une méthode d'échantillonnage et d'analyse capable de donner des résultats fiables et reproductibles susceptibles de mener à la détermination d'une relation dose-réponse. L'analyse du noyau carboné des particules diesel, appelé aussi carbone élémentaire (CE), est effectuée à l'aide d'un four où les composés organiques adsorbés en surface (CO) sont désorbés thermiquement sous atmosphère

inerte. Le CE est ensuite déterminé par combustion du résidu dans un gaz contenant de l'oxygène sous forme de CO₂ (ou de CH₄ après réduction). Une telle détermination est fortement dépendante de la méthode utilisée et de ses paramètres techniques (température et durée de désorption, charge des filtres...) d'autant plus que le CE n'est pas un composé chimiquement identifié mais un agrégat de composés non volatiles richement carbonés.

Depuis 1995 une série de comparaisons inter-laboratoires a été organisée afin d'étudier les paramètres influençant les dispersions inter- et intra-laboratoire. Plus de dix laboratoires de cinq pays européens ont participé à cinq comparaisons ces dernières années.

Les résultats montrent que les comparaisons inter-laboratoires sont relativement bonnes en regard de la norme européenne EN 482 (1994). Toutefois, en raison d'une très faible dispersion intra-laboratoire, les différences inter-laboratoires sont statistiquement significatives. Certains facteurs d'influence sur la dispersion ont été identifiés mais des recherches complémentaires devront être menées afin de mieux comprendre les différences observées.

Les actes du colloque seront disponibles à l'INRS (ED 4086).