

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses

Band: 126 (2000)

Heft: 18

Artikel: Impact du diesel sur la santé

Autor: Perret, Vincent

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-81515>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Impact du diesel sur la santé

(ENERGIE)

L'invention à laquelle Rudolph Diesel donna son nom a ouvert la voie à toute une famille de moteurs au principe de fonctionnement inchangé depuis leur création en à la fin du siècle dernier. De tous les moteurs à combustion interne, le diesel est celui qui présente le plus haut rendement. Il est toutefois relativement lourd et encombrant en raison de sa conception massive, destinée à résister aux fortes contraintes mécaniques et techniques auxquelles il est soumis durant son fonctionnement. Sa robustesse et son haut rendement lui ont finalement valu de s'imposer peu à peu dans les domaines où de grandes puissances étaient requises, domaines où il a progressivement, mais définitivement, supplanté la machine à vapeur, les moteurs à gaz et les moteurs à essence. Aujourd'hui, les transporteurs routiers, maritimes, ainsi que les machines de chantier sont dans leur quasi-totalité équipés de moteurs diesel. Quant à leur pénétration dans les secteurs où le poids et l'encombrement constituent des critères prépondérants (aviation, automobiles légères), elle est plus marginale.

Diesel ou essence, quelle différence ?

Bien qu'il fasse globalement appel au même principe - combustion d'un mélange air-carburant dans un système cylindre-piston - que son homologue à essence (ou moteur à allumage commandé), le moteur diesel diffère de celui-ci sur plusieurs points essentiels. Contrairement aux moteurs à allumage commandé, les diesel ne possèdent ni carburateur ni système d'allumage proprement dit. Sur le premier temps d'un cycle du moteur, soit durant l'admission, le cylindre aspire de l'air par la soupape (alors que c'est un mélange d'air et d'essence dans le moteur à allumage commandé). Sur le deuxième temps, ou compression, cet air est comprimé (taux de compression entre 15 et 20:1), ce qui a pour effet d'en éléver la température jusqu'à quelque 500°C. A la fin du temps de compression, le combustible vaporisé est injecté sous haute pression dans la chambre de combustion où il s'enflamme instantanément. Ainsi, à la différence du moteur à allumage commandé, le mélange gazeux s'enflamme tout seul, même si certains diesels sont dotés d'un système d'al-

lumage électrique auxiliaire pour enflammer le carburant au démarrage du moteur. Cette combustion, qui est le troisième temps du cycle, refoule le piston. Quant au quatrième temps, comme dans les moteurs à allumage commandé, c'est l'échappement. Cela dit, le cycle thermodynamique d'un moteur diesel se rapproche davantage du cycle du moteur thermique idéal décrit par Nicolas Carnot (1796-1832) que de celui du moteur à allumage commandé, et son rendement de transformation de l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique est supérieur (30 à 40% pour le diesel contre 25 à 30% pour le moteur à essence).

La faculté d'inflammation du carburant diesel (fractions de pétrole plus lourdes que l'essence) est indiquée par son indice de cétane, qui est un hydrocarbure particulièrement inflammable (indice 100). A l'autre bout de l'échelle, l'alphanaphthalène, très difficile à enflammer, porte l'indice 0. Le mélange de ces deux hydrocarbures permet d'obtenir une échelle d'indices de cétane variant de 0 à 100.

Les émissions rejetées par un moteur diesel sont un mélange de divers gaz de combustion, d'aérosols liquides et d'une certaine quantité de particules solides.

Emissions gazeuses et aérosols liquides

Comme pour tout autre processus de combustion incomplète d'hydrocarbures, les rejets contiennent du CO₂, du CO et de l'eau (H₂O). La présence de SO₂ dans les gaz est due à l'oxydation du soufre contenu dans l'huile diesel; alors que celle de composants azotés NO_x émane du N₂ généré lors d'un processus de combustion à hautes pression et température. Enfin, divers composés organiques, tels que les aldé-

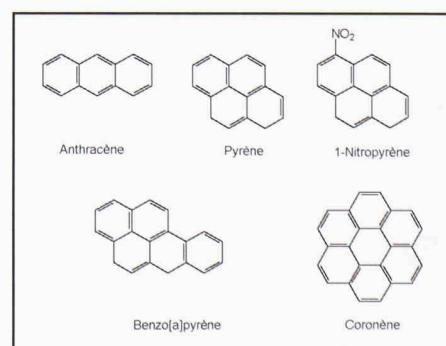


Fig. 1: Structure de quelques hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) présents dans les suies diesel (IURST)

Fig. 2: Schéma des trois secteurs pulmonaires et des mécanismes de déposition qui y sont associés (d'après L.J. CASARETT: «Essays in Toxicology», 1972, vol 3)

hydes et l'acroléine, sont responsables de l'odeur caractéristique des émissions diesel. La plupart de ces gaz ont un potentiel irritant ou asphyxiant.

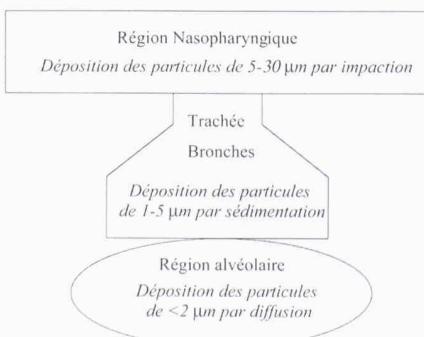
Quant aux aérosols liquides, ils sont principalement composés de résidus d'hydrocarbures non ou partiellement brûlés, ainsi que de lubrifiants. L'on y trouve également divers composés aromatiques polycycliques (HAP) légers (fig. 1). Les HAP, ainsi que leurs dérivés nitrés, revêtent une importance particulière au niveau toxicologique, car plusieurs d'entre eux ont un potentiel mutagène et cancérogène.

Emissions de particules

Une des spécificités du mode de combustion diesel est d'émettre de grandes quantités de particules fines de carbone - 95% des particules émises ont un diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$ ($= 10^{-6}\text{ m}$) - à la surface desquelles sont adsorbés divers composés organiques (hydrocarbures et HAP lourds ainsi que leurs dérivés). De par leur petite taille, ces particules ont la possibilité de pénétrer profondément le système respiratoire et de se déposer dans les alvéoles pulmonaires (fig. 2).

Elles agissent ainsi comme vecteur des divers composés adsorbés à leur surface tels que les HAP. De récentes études tendent à montrer des effets toxicologiques liés à la présence même de ces particules de carbone dans les alvéoles pulmonaires (voir le paragraphe suivant). Bien que le processus de formation de ces particules ne soit pas encore connu avec toute la précision voulue, l'on peut sommairement décrire deux mécanismes complémentaires.

Tout d'abord, lors de la combustion des hydrocarbures, l'oxygène réagit rapidement avec les hydrogènes favorisant ainsi la formation de structures en plaque du type graphite par les atomes de carbone. Le second mécanisme passerait par la formation de HAP se combinant par coalescence afin de donner des structures de plus en plus complexes jusqu'à la formation de particules primaires. L'inclusion de cycles à cinq noyaux induirait la formation de fullerènes, structures tridimensionnelles de carbone que l'on retrouve sous forme



Rudolf Diesel

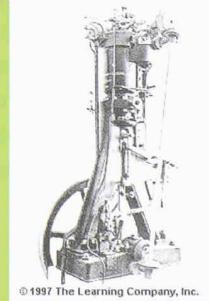
D'origine bavaroise, mais né à Paris en 1858, Rudolf Christian Karl Diesel [1,2]¹ est issu d'une famille d'artisans active dans le travail du cuir. Lors de la guerre franco-prussienne de 1870, il part pour Munich où il devient ingénieur en 1880. La légende veut que, durant ses études, il ait développé un petit briquet pneumatique, curiosité de laboratoire. Un piston comprime l'air contenu dans un tube en verre, provoquant un échauffement tel qu'il enflamme une mèche d'amadou. C'est le principe même de la phase d'ignition du moteur qu'il allait mettre au point quelques années plus tard. Jeune ingénieur, il est engagé par une société d'appareils réfrigérants fondée par son professeur de thermodynamique Carl Linde.

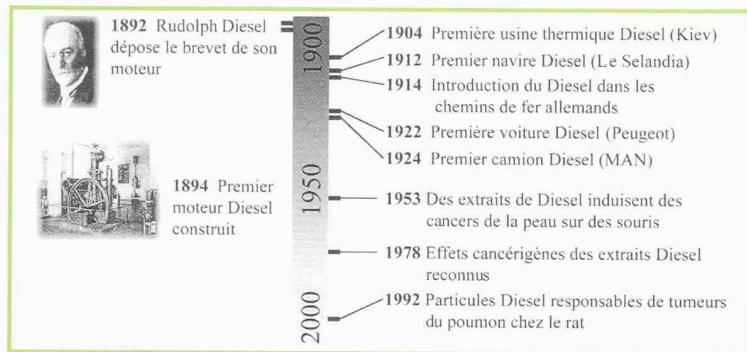
Rudolph Diesel disparaît dans la nuit du 29 au 30 septembre 1913 alors qu'il effectuait la traversée de la Manche à bord du vapeur allemand *Dresden*. Son corps sera retrouvé dix ans plus tard dans l'estuaire de la rivière Scheldt en Angleterre. L'identification une fois effectuée à l'aide des papiers et documents retrouvés dans les poches, la dépouille fut rendue à la mer. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer cette fin mystérieuse: une exécution par les services secrets allemands de peur qu'il ne dévoile aux Anglais le secret des sous-marins U-Boot (qui utilisaient alors le tout nouveau moteur Diesel) ou, ce qui est plus plausible, le suicide, car l'inventeur était au bord de la faillite et supportait de plus en plus mal les attaques de ses détracteurs.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient aux références en fin d'article

Développement du moteur diesel

En 1892, Rudolf Christian Karl Diesel dépose un brevet pour un moteur à combustion interne d'un nouveau type. L'année suivante, il publie un retentissant ouvrage «Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekannten Verbrennungsmotoren». C'est en 1893, que Rudolph Diesel s'attaque à la construction de son premier moteur à Augsburg (Allemagne) dans les ateliers d'une compagnie qui deviendra en 1908 la Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg, mieux connue sous son acronyme MAN. Le développement d'un prototype opérationnel lui demanda plus de quatre ans d'efforts: le premier (1893) n'arrivait en effet pas à comprimer l'air à une pression suffisante et le second (1894) ne fonctionna qu'une minute. Finalement, la troisième version (1897), un monocylindre de cinq tonnes et d'une puissance de 20 ch à 172 tr/min, s'avéra opérationnel. Avec un rendement de 26,2%, le moteur diesel dépassait de loin les meilleures machines thermiques de l'époque, qui pouvaient au mieux se prévaloir d'un rendement de 20%. Ce premier moteur diesel est actuellement conservé au Deutches Museum à Munich.





inachevée dans les suies diesel. Les sphérolites de carbone ainsi formées - particules primaires de la taille de 20 à 30 nm ($=10^{-9}$ m) - s'aggrèment ensuite de diverses façons, qui dépendent avant tout des conditions d'humidité et de température de l'air ambiant. Les agrégats formés se retrouvent principalement sous forme de chaînes, de sphères (fig. 3 et 4) ou encore de pétales (flakes).

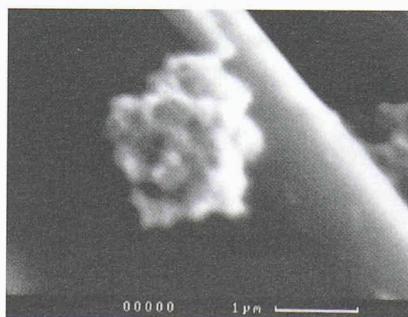
Processus d'atteinte à la santé

Dès le début des années 50, la découverte de HAP dans les fumées de diesel a posé la question des effets que ce type de rejets ont sur la santé. Ces dernières décennies, une multitude d'études sur l'animal et d'études épidémiologiques sur l'homme ont été conduites. Sur la base des résultats obtenus, l'Agence internationale de recherche sur le cancer à Lyon (IARC) a conclu, en 1989, que les émissions diesel sont «probablement cancérogènes pour l'homme». Si les effets sur l'animal semblent clairement démontrés, ceux sur l'homme demeurent difficiles à étudier. Les études épidémiologiques menées jusqu'alors sont limitées par l'influence d'autres

agents cancérogènes auxquels les populations étudiées sont exposées (fumée de cigarette, amiante, etc.). De plus, comme on le verra ci-après, il est difficile de déterminer l'exposition réelle au diesel, dans la mesure où il n'existe pas encore de traceur spécifique. De ce fait, aucun effet constaté ne peut être corrélé à une dose reçue (relation dose-effet non équivocable sur le patient), comme c'est le cas pour les essais menés en laboratoire sur l'animal. Nonobstant ces limites, les études épidémiologiques les plus récentes, qui corrigent au mieux les diverses influences dues notamment à la fumée de cigarette et à l'amiante, semblent toutes démontrer un effet faible, mais statistiquement significatif, imputable au diesel. La figure 5 présente les résultats de diverses études qui analysent l'influence de l'exposition professionnelle au diesel sur le taux de mortalité due à un cancer pulmonaire.

Ce sont principalement des études menées sur l'animal qui ont permis de commencer à comprendre les mécanismes d'atteinte à la santé relevant de l'exposition aux fumées de diesel. Deux voies semblent se présenter. Le premier processus identifié a été la voie «génotoxique»: il s'agit d'un mécanisme déclenché par la présence de certains composants organiques adsorbés sur les suies (HAP, nitro-HAP et dérivés) qui sont capables, via activation ou non, de produire des adduits avec l'ADN (inclusions sur l'ADN qui en perturbent le fonctionnement). Le second processus, ou voie «non-génotoxique», est induit par la présence même de la particule de diesel dans les poumons: l'interaction des particules avec les macrophages alvéolaires semble susceptible de déclencher toute une série de réactions en cascade pouvant finalement aboutir à la libération de divers radicaux libres, fortement irritants. La figure 6 illustre ces deux processus, ainsi que leurs imbrications.

3



4

Gaz, aérosols liquides

H₂O, CO₂,
CO, NO₂, NO, NH₃
Aldehydes
HAP légers (< 4 noyaux)
Hydrocarbures
SO₂, acide sulfureux etc ...

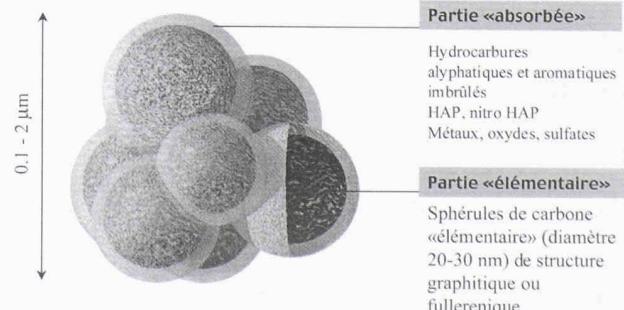


Fig. 3: Particule diesel prise en image SEI (Secondary Electron Image) par un microscope électronique à balayage. La structure d'agglomération des sphères primaires est ici bien visible. En arrière plan, on distingue une fibre quartz du filtre de prélèvement (Image réalisée à l'aide du MEB CamScan DV4 de l'Institut de géologie et paléontologie de l'Université de Lausanne. © IST 1998)

Fig. 4: Schéma représentant la structure d'une particule diesel «typique»

Fig. 5: Risques relatifs de décès par cancer pulmonaire en fonction de diverses activités professionnelles exposées aux fumées diesel. Les barres représentent l'intervalle de confiance à 95% du risque relatif. Ces données sont corrigées pour tenir compte des effets du tabac et de l'amiante. Le risque relatif de 1,00 est le risque de décéder d'un cancer pulmonaire après vingt ans de travail sans être exposé aux fumées diesel. Les risques relatifs pour les fumeurs et les personnes exposées à l'amiante se situent entre 7 et 10 (Réf. Bhatia et al., Epidemiology 1998, 9: 84-91)

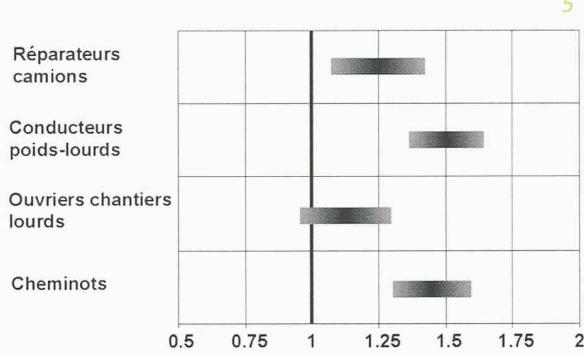
Fig. 6: Illustration des deux mécanismes présumés d'atteinte à la santé induits par les particules diesel (Réf. K.M.Nauss and the Health Effects Institute, diesel Working Group, April 1995)

Méthodes de mesure et incertitudes

La grande difficulté posée par la mesure de l'exposition aux fumées de diesel est due à leur composition complexe et hétérogène. A la fois mélange de gaz, d'aérosols liquides et de particules, les émissions diesel ne contiennent pas moins de deux mille composés différents. La proportion de ces substances varie en fonction du type de carburant utilisé, du moteur, des interférents présents dans l'air, de l'humidité, les émissions pouvant de surcroît varier considérablement pour un même moteur, en fonction de son régime et de sa charge. Face à la complexité de ce mélange, les traceurs actuellement disponibles souffrent encore de certaines limites.

Le carbone élémentaire

Le principal traceur aujourd'hui utilisé pour l'évaluation de l'exposition aux fumées de diesel est le carbone dit «élémentaire» (EC) qui compose le noyau des particules. La formation de particules ultrafines de carbone étant une émission relativement spécifique du diesel, l'analyse du carbone «élémentaire» peut raisonnablement être considérée comme un traceur adéquat sous certaines réserves. Dans des milieux professionnels ou environnementaux, où le diesel ne peut être considéré comme l'unique source d'aérosols, le prélèvement doit impérativement se faire à l'aide d'un échantillon-



neur à poussière fine (cyclone, impacteur, etc.), afin d'éviter tout prélèvement de particules carbonées de grande taille qui fausserait sensiblement l'analyse (pollens, éclats de carbonates, charbon et autres). L'analyse proprement dite de l'échantillon repose sur le principe de la thermodésorption. L'échantillon est placé sous atmosphère inerte (N_2 ou He) et chauffé à haute température (500 à 800°C suivant les protocoles), afin de désorber les composés organiques, appelés carbone organique (OC), adsorbés sur les particules diesel. Ces composés sont transformés catalytiquement en CO_2 ou en méthane et analysés par coulométrie (fig. 7) ou absorption infrarouge. Une fois la désorption achevée, l'échantillon

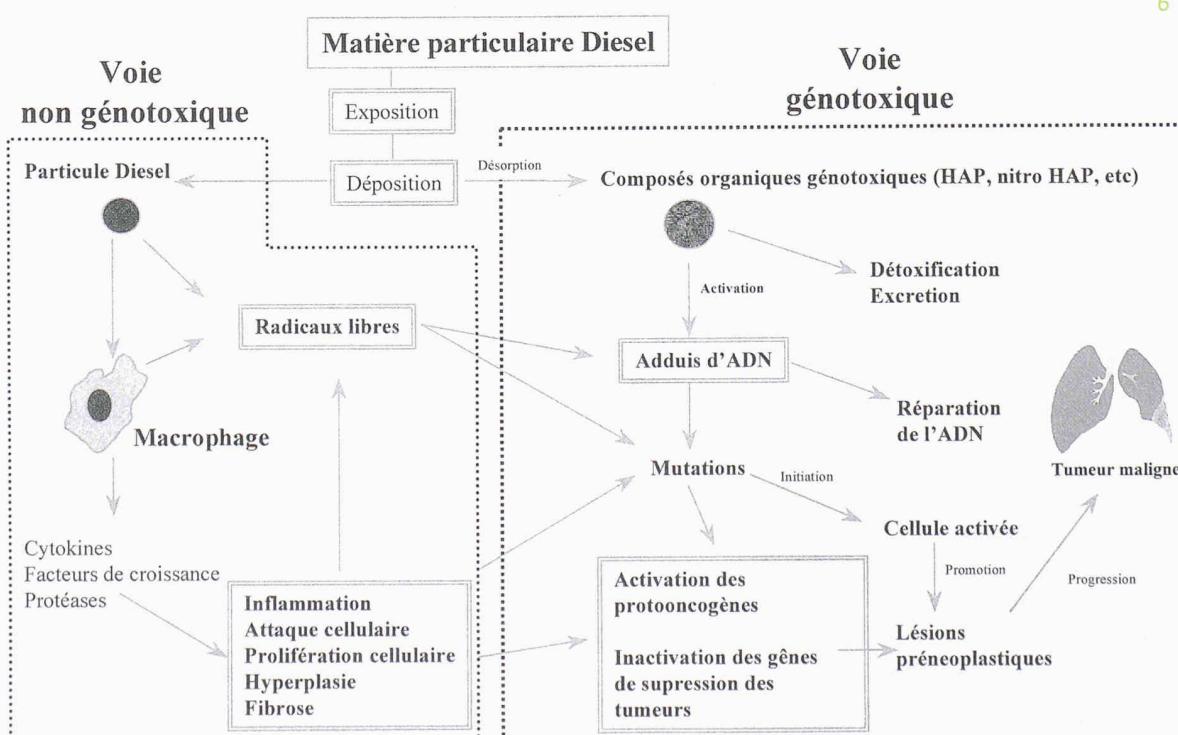


Fig. 7: Coulomat Ströhlein 702C utilisé à l'institut universitaire romand de santé au travail pour l'analyse du carbone élémentaire dans les suies diesel; à gauche: les différents cylindres de gaz nécessaires à l'analyse (O_2 , N_2), au milieu: la cellule de coulométrie, à droite: le tube de quartz de désorption et les fours de désorption et catalytiques (Photo IURST)

est oxydé sous atmosphère d'oxygène, entre 800 et 1000°C pour mesurer le carbone élémentaire restant. Le processus étant basé sur la détermination de la teneur en carbone de l'échantillon, toute présence de carbone inorganique fausserait les résultats. Ainsi, s'il y a suspicion de présence de carbonates ($CaCO_3$) ou autres, dans l'échantillon, le filtre est traité à l'acide phosphorique ou chlorhydrique afin d'éliminer toute interférence.

Les méthodes d'analyse du carbone élémentaire présent dans les suies diesel font l'objet de fréquentes comparaisons internationales entre laboratoires, dans le but d'harmoniser et d'optimiser les différents paramètres analytiques [3,4,5]. En Suisse, la valeur moyenne d'exposition au poste de travail pour le diesel est fixée à 0,2 mg/m³ de carbone total dans la poussière alvéolaire [8]. (Le carbone total équivaut au carbone élémentaire et organique)

Le 1-nitropyrène

Le 1-nitropyrène semble être un représentant relativement spécifique des composés organiques présents dans les suies diesel et, de ce fait, il est utilisé comme traceur d'exposition. Ce composé, formé directement lors de l'échappement par la réaction du pyrène avec le NO₂ présent dans la phase gazeuse est un représentant de la famille des nitro-HAP et témoigne d'une forte activité mutagène. Son analyse s'effectue par chromatographie et demande une préparation complexe de l'échantillon (extraction, séparation, dérivation). Des recherches sont actuellement en cours pour évaluer si l'analyse des métabolites du nitropyrène dans le sang ou les urines du travailleur exposé aux fumées diesel est fiable et si ce composant peut être utilisé comme marqueur. La méthode est rendue complexe en raison du nombre important de métabolites formés, ce qui diminue dans la même mesure leurs quantités respectives et pose donc des problèmes de limite de détection.



Recherche en cours à l'Institut universitaire romand de santé au travail

Les méthodes habituellement utilisées pour tenter de quantifier l'exposition professionnelle aux fumées de diesel reposent essentiellement sur des mesures d'immissions (poussières totales alvéolaires) et sur des analyses relativement peu spécifiques et robustes des poussières récoltées (gravimétrie, différenciation carbone élémentaire et organique). Trouver un traceur plus spécifique et plus proche de la réalité toxicologique permettrait une meilleure documentation des expositions au poste de travail, ce qui renforcerait notamment les analyses épidémiologiques en autorisant des études de relation dose-effet. Cette voie éliminerait par ailleurs les problèmes d'interférence qui limitent encore gravement les méthodes de mesure actuelles (pyrolyse des composés aromatiques, charbon, carbonates, etc.).

Or les recherches sur le diesel actuellement en cours à l'Institut universitaire romand de santé au travail portent précisément sur le développement et l'évaluation de divers traceurs d'exposition professionnelle aux fumées de diesel [7].

L'Institut fait partie du groupe européen de coordination sur la mesure d'exposition aux suies diesel (ECDSE), qui œuvre au développement d'une méthode d'analyse du carbone élémentaire dans les suies diesel pour le compte du Comité Européen de normalisation (CEN TC137, Working Group2).

Pour en savoir plus

<http://www.iurst.fr>
<http://www.psa.fr>
<http://comptons1.aol.com>
Sciences&Vie, Septembre 1993, Numéro 912
<http://www.dieselnet.com>

Références

- [1] LYNWOOD BRYANT, «The Development of the Diesel Engine», *Technology and Culture*, 1976, Vol 17, No 3, p.432-446
- [2] LYNWOOD BRYANT, «Rudolf Diesel and His Rational Engine», *Scientific American*, 1969, No 221, p.108-118
- [3] BIRCH,E., *Analyst*, 1998, 123, 851-857
- [4] BIRCH,E., DAHMANN,D., FRICKE,H.H., *J. Environ. Monit.*, 1999, 1, 541-544
- [5] GUILLEMIN,G., CACHER,H., CHINI,C., DABILL,D., DAHMANN,D., DIEBOLD,F., FISCHER,A.A., FRICKE,H.H., GROVES,J.A., HEBISCH,R., HOUPILLART,M., ISRAEL,G., MATTENKLOTT,M., MOLDENHAUER,W., SANDINO,J.P., SCHLUMS,C., SUTTER,E., TUCEK,E. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1997, 70, 161-172
- [6] IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol.46, «Diesel and Gasoline Exhausts and Some Nitroarenes». International Agency for Research on Cancer, Lyon, 1989.
- [7] PERRET,V., HUYNH,C.K., DROZ,P.-O., Vu DUC,T. and GUILLEMIN,M., *J. Environ. Monit.*, 1999, 1, 367-372
- [8] SUVA publication n°1903 : «Occupational Exposure Limits», 1999