

PARTICULES NE PROVENANT PAS DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT DANS L'ENVIRONNEMENT ROUTIER – UN APERÇU DE LA BIBLIOGRAPHIE

Mats Gustafsson

National Swedish Road and Transport Research Institute (VTI)
SE – 581 95 Linköping
Sweden

E-mail: mats.gustafsson@vti.se

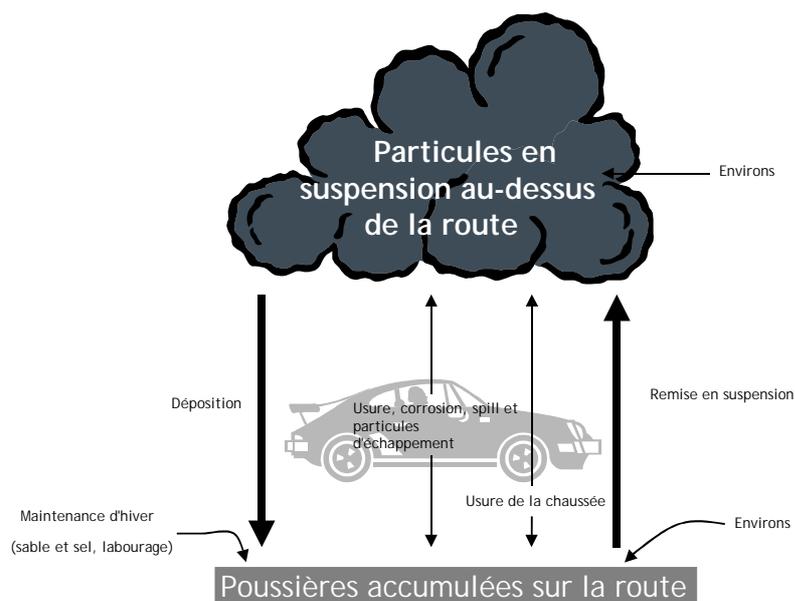
1. Synopsis

Les particules dans l'environnement routier non émises par les gaz d'échappement proviennent de l'usure du revêtement routier, notamment en raison des pneus cloutés, et de la corrosion des composants du véhicule, comme les pneus et les freins. Parmi les autres sources figurent l'entretien des routes, l'équipement des routes et les particules issues des environs de la route. Cette enquête bibliographique visent à donner un aperçu de l'état actuel de la connaissance sur les particules en suspension dans l'air provenant de ces différentes sources en termes de caractéristiques et d'émissions ainsi que d'effets sur la santé et l'environnement.

2. Introduction

Au cours de ces dernières décennies, les particules liées au trafic routier sont devenues un problème important au sein de la communauté scientifique. La raison en est que des indications récurrentes tendent à faire un lien entre les particules en suspension dans l'air et les effets sur la santé et l'environnement. Une étude publiée récemment montre que les particules liées au trafic routier sont responsables d'environ 3 % de la mortalité totale en France, en Autriche et en Suisse (Kunzli et al., 2000).

En raison de leur taille microscopique et de leur faculté à adsorber les composants toxiques des gaz d'échappement, les particules d'échappement font l'objet d'études et d'observations sérieuses. Cependant, dans l'environnement routier, il y a des particules d'autres origines. Les particules générées par l'usure des véhicules et du revêtement de la chaussée, ajoutées aux mesures de maintenance ou transportées dans l'environnement routier en provenance des environs, représentent une grande proportion de la poussière de la route. Toutes ces particules accumulées sur la surface de la route peuvent être remises en suspension dans l'air par le passage des véhicules (fig.1.).



III. 1. Représentation schématique des sources et flux de particules dans l'environnement routier.

La concentration des particules dans l'air se mesure généralement en termes de masse ou de nombre par volume d'air. La répartition de la masse, les propriétés chimiques et physiques sont également des aspects importants lors de la description des caractéristiques des particules. Lorsque l'importance de la taille des particules est devenue manifeste, une mesure standardisée pour les particules respirables, appelée PM_{10} , a été établie. Grossièrement, il s'agit de la fraction des particules plus petites que $10\ \mu\text{m}$ de diamètre. Ce standard est devenu courant dans le monde entier et également dans les quelques rares villes suédoises qui mesurent les particules de manière régulière. Et comme les recherches s'orientent de plus en plus vers les petites particules, ce standard s'est vu complété d'un autre standard, le $PM_{2,5}$, qui mesure les particules plus petites que $2,5\ \mu\text{m}$.

Cette enquête bibliographique a pour but de rassembler la connaissance actuelle des sources, émissions et effets sur la santé et l'environnement des particules ne provenant pas des gaz d'échappement dans l'environnement routier. Elles sont généralement plus grandes que les particules d'échappement, mais une proportion considérable entre dans la catégorie PM_{10} et également $PM_{2,5}$.

3. Origine des particules

Les particules d'usure dans l'environnement routier proviennent essentiellement de trois sources; les pneus, les freins et la chaussée, mais il y a aussi l'usure d'autres pièces mobiles des véhicules. En Suède, l'usure de la chaussée pendant les mois d'hiver est la principale source de production de particules d'usure, parce que les voitures sont montées sur des pneus cloutés.

3.1 Pneus

En fonction des exigences de qualité et du lieu d'utilisation, les pneus se composent d'une variété de mélanges de polymère de caoutchouc. Le latex ainsi que le caoutchouc synthétique, comme par ex. le caoutchouc d'isoprène, est utilisé pour obtenir les propriétés d'élasticité, la résistance à la chaleur et la friction désirées (Ahlbom and Duus, 1994). Les pneus de bus et de camion comprennent des quantités supérieures de latex en raison des exigences de friction plus sévères. Les mélanges de caoutchouc varient beaucoup entre fabricants et également entre les pneus été, hiver et cloutés, ce qui rend difficile la généralisation de la composition chimique des particules d'usure des pneus (Johansson, 2000).

Les pneus consistent également en un grand nombre de produits chimiques rajoutés pendant leur fabrication. Les renforçateurs, les vulcanisateurs, les accélérateurs, les activateurs, les pigments de couleur, les adoucisseurs, les agents dispersants, les anti-oxydants, les anti-ozonants, les stabilisants, et bien d'autres encore sont utilisés au cours du processus de production (Rogge et al., 1993). Dans la documentation littéraire, les pneus sont souvent considérés comme la source principale de zinc dans l'environnement routier (Rogge et al., 1993), et ce notamment en raison de la quantité relativement importante d'oxyde de zinc utilisée comme activateur pour rendre les accélérateurs plus efficaces pendant la fabrication.

De même, les PAH (ou hydrocarbures polycycliques aromatiques) sont présents en quantités relativement importantes dans les pneus. La littérature mentionne des informations divergentes concernant la concentration de PAH substitués et non substitués dans les pneus. (Ahlbom and Duus, 1994) rendent compte de $7000\ \mu\text{g g}^{-1}$, tandis que dans une étude suédoise, (Lindgren, 1998) a mesuré entre 33 et $93\ \mu\text{g g}^{-1}$ dans trois pneus ordinaires. Une mesure des particules d'usure effectuée par (Takada et al., 1991) fait état de $31-71\ \mu\text{g g}^{-1}$.

La répartition de la taille des particules d'usure des pneus est difficile à généraliser. (Kobriger and Geinopolos, 1984) et (Noll et al., 1987) revendiquent un diamètre moyen de $20-25\ \mu\text{m}$, tandis que (Kumata et al., 1997) rapporte une répartition bimodale avec des pointes à $0,4-0,5\ \mu\text{m}$ et $5-7\ \mu\text{m}$. Ces résultats laissent supposer une proportion considérable de particules d'usure portées par l'air et respirables.

Les pneus cloutés habituellement utilisés en Suède en hiver sont fabriqués à partir des mêmes types de mélanges de caoutchouc que les autres pneus. Initialement, les clous étaient en acier, mais en raison des dégâts importants qu'ils provoquaient à la chaussée, ils ont été remplacés par des métaux légers ou du plastique. Le nombre de clous et la force des clous ont également diminué (Jacobson and Hornvall, 1999a).

3.2 Plaquettes de frein

A l'instar des pneus, les plaquettes de frein sont très hétérogènes dans leur composition et dépendent du fabricant. Ces matériaux de friction contiennent des liants, des charges, des fibres de verre, du plastique, des matières organiques et inorganiques ou des métaux. Les métaux sont utilisés comme conducteurs de chaleur (Rogge et al., 1993). Le tableau X représente la teneur en métal de la plupart des plaquettes de frein courantes pour les voitures qui constituent environ 60% du parc automobile suédois (Westerlund, 1998).

Une caractéristique importante des particules des plaquettes de frein réside dans leur taille minuscule. A l'aide d'un dynamomètre pour frein, (Garg et al., 2000) ont montré que 63% des particules d'usure étaient plus petites que 2,5 μm ($\text{PM}_{2.5}$), c'est-à-dire respirables.

3.3 Chaussée

L'usure de la chaussée représente l'usure la plus importante associée à l'utilisation de pneus cloutés. Elle dépend du poids, du nombre et de la composition des clous, du flux, de la composition et de la vitesse du trafic, des conditions météorologiques, de la configuration de la route, de la composition de la chaussée pour ne citer que quelques facteurs. Le pourcentage et la qualité de la pierre ainsi que les propriétés de l'asphalte proprement dites sont d'une importance cruciale. En Suède, les chaussées de haute qualité qui contiennent un haut pourcentage de porphyre très dur et de quartzite (environ 95% de la surface) ont progressivement remplacé les chaussées affichant un matériau à base de roche locale résistante sur des routes à forte densité de trafic (Jacobson and Hornvall, 1999b).

Le coût élevé de la maintenance associée à l'usure de la chaussée a poussé de nombreux pays à interdire l'utilisation de pneus cloutés. Au Japon et en Norvège, la législation s'inspire également des aspects sanitaires des poussières de la route. Au Japon, les clous sont proscrits. Avant ces interdictions, la concentration de poussières en suspension dans l'air pouvait varier entre 30 $\mu\text{g m}^{-3}$ en été et 400 $\mu\text{g m}^{-3}$ en hiver (Takishima et al., 1987). Les interdictions actuelles sont remises en question cependant, étant donné que le climat de Hokkaido entraîne des routes verglacées, ce qui a affecté le nombre d'accidents (Norem, 1998). En Norvège, le "projet d'adhérence à la route" (Krokeborg, 1997; Larssen and Haugsbakk, 1996) a jusqu'à présent conduit à l'interdiction des pneus cloutés à Oslo.

Les particules libérées par l'usure de la chaussée traduisent la composition de l'asphalte. En Suède, 95% environ sont de la pierre et 5% du bitume. Les produits à base de pétrole incluent de l'asphaltène (5-25%), des saturés (5-20%), des compounds cycliques (45-60%) et des résines (15-25%) (Gonzales Arrojo, 2000). La teneur en PAH est très mince et n'est pas considérée comme une source principale de PAH dans l'environnement routier (Lindgren, 1998). La taille des particules d'usure de la chaussée varie, mais est généralement considérée comme étant relativement grande. Selon (Bækken, 1993), seulement environ 2% sont inférieurs à 36 μm . Des études japonaises, d'autre part, font état d'un intervalle de taille d'environ 5-50 μm (Amemiya et al., 1984). Cette taille de particule dépend essentiellement des propriétés de la pierre dans la chaussée, si bien qu'il faut s'attendre à une grande variation entre pays et régions.

3.4 Sel et sable

Environ 200.000 – 400.000 tonnes de sel de déneigement sont déversées sur les routes suédoises chaque année entre 1991/92 et 1995/96. Le sel est remis en suspension sous forme d'aérosol humide ou sec par les véhicules qui passent et peuvent être transportés à des centaines de mètres de la route. Les effets de ces gouttelettes de sel et de ces particules ont été décrits de manière exhaustive dans la littérature (Blomqvist, 1999), mais les informations concernant leurs caractéristiques sont malheureusement très rares.

3.5 La route comme source de PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$

De nombreuses études tentent à présent de faire la distinction entre les sources de particules, mais se concentrent sur la description des concentrations des fractions de PM_{10} et/ou de $\text{PM}_{2.5}$.

En Norvège, avant l'entrée en vigueur de la loi sur l'interdiction des pneus cloutés, (Larssen, 1987) a mesuré une concentration PM_{10} allant jusqu'à 55 $\mu\text{g m}^{-3}$ dans des conditions sèches et de 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ par temps humide, et en a par conséquent déduit que les particules d'usure de la route

représentaient $45 \mu\text{g m}^{-3}$ dans des conditions sèches. Dans une étude ultérieure, (Larssen and Haugsbakk, 1996) ont trouvé que dans des conditions sèches, le dépôt de poussières de la route ne s'accroît pas en raison d'un équilibre entre particules produites et particules remises en suspension. La contribution des poussières de la route dans les concentrations annuelles moyennes PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ dans les villes norvégiennes s'est avérée élevée le long des routes et des rues. La contribution dans la concentration diurne moyenne la plus élevée est importante, à la fois dans les centres urbains et le long des routes et rues (tab. X) (Larssen and Hagen, 1997).

Les résultats de pays où les pneus cloutés ne sont pas autorisés montrent que malgré cela, la poussière des routes contribue généralement dans une proportion substantielle des PM_{10} ou $\text{PM}_{2.5}$. (Schauer and Cass, 2000) ont déterminé la concentration des poussières de la chaussée à $0,5\text{-}1 \text{ g m}^{-3}$ lors de pics de pollution de l'air en Californie (Etats-Unis). Toujours aux Etats-Unis, (Noll et al., 1987) ont découvert que les particules de caoutchouc des pneus représentaient 35%, la chaux 54% et les silicates 10%, ces derniers étant des matériaux de construction de la route importants, dans la poussière de la route récoltée dans les districts commerciaux d'Argonne et de Chicago. (Chow et al., 1996) ont estimé que les poussières de la route contribuaient à 25-27% des concentrations PM_{10} urbaines, contre une contribution de 30-42% pour les particules d'échappement.

4. Emissions

4.1 Particules ne provenant pas des gaz d'échappement

Les facteurs d'émission pour les pneus dans la littérature vont de $0,006$ à $0,36 \text{ g km}^{-1}$. A l'aide d'un simulateur de route, (Rogge et al., 1993) ont estimé l'usure à $0,006\text{-}0,09 \text{ g km}^{-1}$ pour le pneu. Les recherches en Suède en collaboration avec la police, une entreprise de trafic locale et des fabricants de pneus ont donné des émissions allant jusqu'à $0,09 \text{ g km}^{-1}$ pour une voiture et $1,0 \text{ g km}^{-1}$ pour un bus (Tableau 1) (Lindström and Rossipal, 1987).

Tableau 1. Emissions des pneus (Lindström and Rossipal, 1987).

| <i>Composant</i> | <i>Voiture</i> | <i>Bus</i> |
|--|--------------------------|----------------------------|
| | <i>g km⁻¹</i> | <i>g pbkm⁻¹</i> |
| Caoutchouc | 0,05 | 0,7 |
| Noir de carbone | 0,03 | 0,3 |
| Produits chimiques industriels, activateurs, accélérateurs | 0,011 | 0,1 |
| Soufre | 0,002 | 0,02 |
| Total | 0,09 | 1,0 |

Les émissions totales de pneus en Suède ont été calculées par (Ahlbom and Duus, 1994), voir Tableau X). Ces chiffres ont été contestés par STRO (Scandinavian Tyre and Rim Organisation) qui prétend que les calculs ne tiennent pas compte de la sculpture du pneu et que par conséquent, les émissions sont surestimées (Johansson, 2000). (Ahlbom and Duus, 1994) ont également calculé les émissions de PAH associées à l'usure des pneus et en ont conclu que celles-ci, soit $28 \mu\text{g km}^{-1}$, sont environ six fois supérieures à la contribution des gaz d'échappement d'une voiture avec catalyseur, soit $5 \mu\text{g km}^{-1}$. Pour la Suède, la quantité totale s'élève à 14 tonnes de PAH par an. STRO d'autre part a calculé des émissions de $284\text{-}470 \text{ kg y}^{-1}$.

Tableau 2. Emissions des pneus (Ahlbom and Duus, 1994)

| <i>Composant</i> | <i>Emission annuelles totales en Suède (tonnes)</i> |
|------------------|---|
| Polymères | 5 000 |
| Noir de carbone | 2 500 |
| Huile | 2 000 |
| Oxyde de zinc | 150 |
| Acide stéarique | 70 |
| Soufre | 100 |
| Accélérateurs | 50 |
| Anti-oxydants | 100 |
| Autres | 30 |
| Total | 10 000 |

Dans une étude avec dynamomètre de frein publiée récemment (Garg et al., 2000), le calcul des émissions de plaquettes de frein a donné 3,2-8,8 mg km⁻¹. Des travaux antérieurs réalisés par (Cha et al., 1984) confirment ces chiffres. (Westerlund, 1998) a estimé la contribution de l'usure des plaquettes de frein parmi les métaux présents dans l'environnement de Stockholm et a décelé que 3.900 kg de cuivre, 900 kg de zinc, 560 kg de plomb ainsi que quelques kg de chrome et de nickel étaient rejetés chaque année par les voitures, les bus et les camions. Environ 80% de l'usure des plaquettes de frein peut être attribuée aux voitures.

Les émissions de particules respirables en suspension dans l'air provenant de la chaussée sont difficiles à traiter dans la littérature. La contribution de la chaussée est souvent cachée dans des termes comme "poussière de la route". Même en Norvège où de grands efforts sont entrepris pour mesurer les concentrations PM₁₀ à par ex. Oslo, les contributions du transport longue distance et de la combustion locale du bois trouble les possibilités de calculer les émissions issues de la chaussée (Larssen, 2000). L'usure de la chaussée provoquée par des pneus cloutés est passée en Suède d'environ 30 g vkm⁻¹ dans les années 80 à environ 10 g vkm⁻¹ aujourd'hui. Cela fait environ 110 000 tonnes chaque année.

4.2 Particules d'échappement

Les principales émissions de particules des gaz d'échappement proviennent des moteurs diesel. Etant donné que l'attention accordée aux effets sur la santé de ces particules a augmenté, le développement de moteurs diesel plus propres s'est accéléré. (Lenner and Karlsson, 1998) ont sorti des chiffres d'émission de particules de 19 différentes sources à utiliser dans un modèle quantitatif (Tableau 3). Les chiffres présentés ici peuvent par conséquent être légèrement dépassés en raison du développement des moteurs.

Tableau 3. Emissions de particules d'échappement (mg km⁻¹) (Lenner and Karlsson, 1998). W cat. = sans catalyseur (les chiffres entre parenthèses sont les écarts-types).

| <i>Voiture</i> | | | | <i>Gros camions</i> | | |
|----------------|-------------|-----------------|---------------|---------------------|------------------|------------|
| W cat. | Cat. | New cat. | Diesel | < 16 t | > 16 t | Bus |
| 16 (2) | 2,4 (0,5) | 1,4 (0,3) | 279 (56) | 630 (227) | 1080 (430) | 830 (274) |

5. Effets sur la santé et sur l'environnement

Une littérature très exhaustive traite des relations entre les concentrations de particules en suspension dans l'air et la santé publique. Cette étude se concentre essentiellement sur la littérature qui aborde la fraction la plus grossière des particules respirables (> 2,5 µm), mais certaines informations à propos de fractions plus petites ont été incluses à titre de comparaison. La fraction respirable est d'une importance particulière pour la santé de l'homme. Leur capacité à pénétrer plus ou moins loin dans le système respiratoire et leur faculté à adsorber les substances toxiques, comme les PAH et les métaux lourds, sur leur surface les rendent extrêmement intéressants pour les scientifiques de la santé.

A la fin des années 1990, des études américaines ont montré que les particules de latex provenant de l'usure des pneus contenaient des allergènes qui pouvaient s'associer au point d'accroître

considérablement le risque d'allergie au latex et d'asthme (Miguel et al., 1996; Williams et al., 1995). Ces études ont pour origine l'augmentation de l'hypersensibilité au latex dans la société, dont les causes ne sont pas encore claires. (Williams et al., 1995) ont trouvé que 53% des particules de latex décelées dans l'air de Denver étaient respirables et que leur taille moyenne était de 6-7 μm . Les analyses chimiques ont suggéré que les particules provenaient de l'usure des pneus. (Glovsky et al., 1997; Miguel et al., 1996) ont extrait les allergènes de latex des particules d'usure des pneus à Los Angeles et ont suggéré que les particules étaient un facteur potentiellement important de l'allergie au latex et des symptômes asthmatiformes liés à la pollution de l'air.

Les effets sur la santé des particules liées à l'utilisation de pneus cloutés ont essentiellement été étudiés au Japon. Dès le milieu des années 1980, (Morikawa, 1985) associait les concentrations de poussières de la route aux symptômes respiratoires des enfants asthmatiques et (Ikeda et al., 1986), à la fréquence des symptômes des voies respiratoires supérieures. (Watanabe et al., 1990) ont étudié la concentration des éléments dans les poumons de pigeons biset et ont trouvé des concentrations considérablement plus élevées de Si, Al, Pb et Ti dans les pigeons vivant en ville où les pneus cloutés étaient utilisés.

De nombreuses routes suédoises à haute résistance ont pour fondation des pierres contenant des concentrations élevées de quartz (notamment du quartzite et du porphyre). La poussière de quartz est bien connue pour avoir provoqué la silicose chez les mineurs par exemple, et le quartz est considéré comme l'un des minerais les plus toxiques. En Norvège, des recherches en cours sur les particules PM_{10} de tunnels routiers montrent que les particules contenant les minerais de quartz, de l'amphibole, du chlorite et de l'épidote entraînaient une production beaucoup plus importante d'interleukine 6 et 8 dans l'épithélium des poumons humains que les particules contenant du plagioclase (Hetland et al., 2000). (Murphy et al., 1998) ont comparé les particules de quartz microcristallin, de quartz amorphe, les particules provenant des gaz d'échappement de moteurs diesel et de noir de carbone ainsi que leur impact sur les poumons des rats. A la grande surprise de tous, il ont décelé plus de dégâts provenant du quartz microcristallin et du quartz amorphe que des particules de diesel ou de noir de carbone. Ceci laisse entendre une structure de surface ou un effet chimique. En revanche, de nombreuses études laissent suggérer un effet de la taille des particules, c'est-à-dire que la composition chimique ou la structure n'est pas importante (Camner, 2000).

Des études épidémiologiques associent les concentrations de particules à la mortalité, à la morbidité, au cancer des poumons, à l'asthme, aux symptômes respiratoires et aux toux, généralement dans les zones urbaines et dans une plus grande mesure, parmi les populations sensibles, comme les enfants, les asthmatiques et les personnes âgées. Des compilations extensives des connaissances actuelles ont été faites par (Vedal, 1997) et (Areskou, 2000) notamment.

Habituellement, la littérature suggère que les particules fines et ultra-fines ($< 1 \mu\text{m}$) affichent des relations plus fortes avec les effets sur la santé que les fractions plus grossières. L'augmentation de la mortalité est généralement de 0,5-1,0% par augmentation de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ de la concentration de PM_{10} . Les admissions à l'hôpital dues à une exposition à court terme augmentent de 0,5-3,0%, ce qui confirme un rapport avec la concentration de particules. La relation est souvent plus forte encore pour les symptômes des voies respiratoires inférieures plutôt que supérieures et également plus forte pour les personnes âgées, mais également pour les enfants (Areskou, 2000).

Malgré le fait que la plupart des études soulignent l'importance des fines fractions, un certain nombre d'exceptions existent. (Pekkanen et al., 1997) ont trouvé que les particules ultra-fines n'étaient pas plus fortement associées aux variations de pics de débits expiratoires (PEFR) que ne l'étaient les particules PM_{10} ou de fumées noires. Une étude réalisée dans la Coachella Valley aux Etats-Unis où les particules grossières d'origine géologique contribuent à une grande fraction des PM_{10} montre que PM_{10} était considérablement associé à toutes les mesures de mortalité utilisées (Ostro et al., 1999). D'autre part, (Schwartz et al., 1999) n'ont relevé aucun signe de ce type dans une étude similaire. A Mexico City, (Castillejos et al., 2000) ont trouvé que $\text{PM}_{10-2.5}$ avait un effet plus fort sur la mortalité (4,07% pour une augmentation de la concentration de $10 \mu\text{g m}^{-3}$) que PM_{10} (1,83%) et $\text{PM}_{2.5}$ (1,48%). Une explication plausible résiderait dans la présence de matériel biogénétique dans la fraction $\text{PM}_{10-2.5}$.

A l'exception des effets sur la santé, les particules non issues des gaz d'échappement affectent le confort du public en salissant les voitures, les trottoirs, les façades, les fenêtres et même l'intérieur des maisons.

La littérature portant sur les effets environnementaux des particules de poussière de route en tant que telles sont rares. La plupart traite de la route comme source de pollution pour l'environnement au bord de la route (Bækken, 1993; Bækken and Jörgensen, 1994; Bjelkås and Lindmark, 1994; Gjessing et al., 1984; Kobriger and Geinopolos, 1984; Lygren and Gjessing, 1984; Sansalone et al., 1995). Les particules provenant de l'usure de la chaussée contribuent à la structure et à la composition des sols du bord de la route. L'accumulation de matière peut s'élever jusqu'à $1,5 \text{ cm y}^{-1}$. Les sols au bord de la route divergent fortement des sols adjacents, à la fois en ce qui concerne la répartition en taille et les propriétés chimiques. Un pH élevé, une haute teneur en cations basiques et en métaux lourds sont des caractéristiques fréquentes de ces sols (Bækken, 1993).

Certaines études concernent les effets de particules sur la végétation. Les particules sur la surface des feuilles et des épines semblent provoquer un stress et par conséquent freinent la croissance en raison d'une température accrue, de la résistance stomatique bloquée et des propriétés hygroscopiques de certaines particules (Farmer, 1993; Flückiger et al., 1978). Les effets sur les systèmes limniques incluent des concentrations élevées et parfois toxiques de PAH et de métaux lourds dans les sédiments des lacs (Bækken and Jörgensen, 1994). Mais il y a également les premiers effets de rinçage, où le dépôt de particules accumulé sur la route provoque de hautes concentrations de composants toxiques dans les courants lorsqu'il pleut abondamment.

Le sel de déneigement, qui peut être transporté sur le côté de la route sous forme d'aérosol ou de poussière sèche, affecte également négativement la végétation, ce qui est un problème très manifeste en Suède, où les épicéas de Norvège et les pins écossais le long des routes salées deviennent souvent brunâtres au printemps à cause du sel (Blomqvist, 2001). Le sel déposé sur les feuilles et les épines provoque un stress osmotique entraînant la dessiccation. On a montré que le sel s'accumulait dans les réservoirs d'eau souterrains ayant un lien hydrologique avec les environs de la route (Thunqvist, 2000).

6. Débat

Les sources de particules ne provenant pas des gaz d'échappement, à en juger à partir de cette enquête bibliographique, sont nombreuses et leur interaction est compliquée. Nulle part dans la littérature, on ne donne d'informations concernant les émissions et les caractéristiques de sources plus diffuses, comme la corrosion et le matériel biogénique déposé sur la route.

Un rapport critique sur l'usure des pneus en Suède (Ahlbom and Duus, 1994) a entraîné un débat, dans lequel le STRO prétend que le rapport est incorrect et exagéré à bien des égards. Néanmoins, ces débats ont poussé de nombreux fabricants de pneus à développer des pneus hiver sans huiles HA, argument désormais utilisé dans les publicités. Dans les pneus été, les huiles HA sont plus difficiles à éliminer étant donné qu'elles sont responsables en grande partie des propriétés d'adhérence (Johansson, 2000). Des informations très divergentes sont rapportées à propos des propriétés des particules des pneus. Aussi bien des petites quantités de particules respirables que des proportions relativement grandes de particules respirables sont rapportées, ce qui peut être le fruit de la grande variation des matériaux, des conditions d'usure et des méthodes de mesure.

Les pneus cloutés et l'usure de la chaussée qui en découle sont la source de particules la plus étudiée dans les conditions similaires à celles de la Suède. En Norvège, les pneus cloutés ont fait l'objet de nombreux débats et de recherches intenses pendant deux décennies. Ils se concentraient tous sur les effets sur la santé et une enquête économique pendant le "Veggreppsprosjektet" (projet d'adhérence à la route) a montré que les interdictions dans les quatre plus grandes villes de Norvège étaient bénéfiques à la société (Krokeborg, 1997). Jusqu'à présent, seul Oslo a introduit les interdictions depuis 1999. L'utilisation de pneus cloutés est d'environ 30% aujourd'hui comparativement aux 70% avant les interdictions. En raison des grandes variations du climat saisonnier, il est trop tôt pour déterminer les éventuels effets sur les concentrations PM_{10} (Hagen and Haugsbakk, 2000).

Il existe quelques études sur les plaquettes de frein et leur contribution à la pollution. La plupart montre que les métaux lourds particuliers sont la cause principale de soucis. Un aspect important du

point de vue de la santé, c'est que les particules de plaquettes de frein sont très petites et par conséquent beaucoup plus dangereuses pour la santé.

Pour la Suède, les trois plus importantes sources d'émissions de particules ne provenant pas des gaz d'échappement sont, dans l'ordre de leur ampleur, l'usure de la chaussée (environ 110.000 tonnes), l'usure des pneus (environ 10.000 tonnes) et l'usure des plaquettes de frein (environ 1.000 tonnes). La quantité totale de ces particules émises pendant une année est dans le même ordre d'importance que celui des particules de gaz d'échappement, mais les effets saisonniers du climat, les sources locales, les actions de maintenance, etc. rendent les émissions très inégales, à la fois dans le temps et dans l'espace.

Les études sur la santé traitant des effets des particules sont courantes et reposent habituellement sur la mesure de PM₁₀ et/ou PM_{2,5}, qui sont des mesures produites dans ce but spécifique. Les résultats de ces études montrent une image relativement dispersée de la manière dont PM fait référence aux effets toxicologiques ou épidémiologiques. Il y a un consensus que la taille des particules a de l'importance et qu'il y a un effet spécifique des particules, mais ce que cet effet implique vraiment n'est toujours pas clair. Une partie du problème réside véritablement dans la méthodologie PM. PM₁₀ ou PM_{2,5} ne donne aucune indication sur la répartition de la taille en dessous de 10 ou 2.5 µm et rien à propos des propriétés chimiques ou physiques, c'est-à-dire la surface des particules. Selon (Camner, 2000), il y a un fossé entre la toxicologie et l'épidémiologie, étant donné que les effets mis en évidence dans les études épidémiologiques, où les effets sur les populations ont lieu à des concentrations PM relativement basses, ne peuvent pas être vérifiés dans des expériences toxicologiques où il faut des concentrations beaucoup plus élevées pour provoquer les mêmes symptômes médicaux. En ce qui concerne les effets environnementaux des particules, ils sont rarement associés aux particules en tant que telles, mais plutôt à la pollution de PAH ou de métaux lourds.

7. Conclusions et besoin de recherches

La littérature internationale sur les particules ne provenant pas des gaz d'échappement et sur leurs effets est très étendue. Les informations concernant les émissions de particules et les caractéristiques affichent cependant de grandes divergences, en fonction de la qualité, des méthodes et de l'étendue des recherches ainsi que des variations géographiques. Le matériel est souvent basé sur des mesures à court terme rarement valables pour d'autres emplacements géographiques ou pendant d'autres intervalles de temps. Pour la Suède, les approximations suivantes peuvent être prises en compte:

Usure

Total en Suède

- Chaussée 110 000 t y⁻¹
- Pneus 10 000 t y⁻¹
- Plaquettes de frein 1 000 t y⁻¹

Emissions

- Usure de la chaussée de l'utilisation de pneus cloutés <10 g km⁻¹
- Pneus voiture 0,006 - 0,36 g km⁻¹
camion, bus env. 1 g km⁻¹
- Usure des plaquettes de frein 0,0032 – 0,0088 g km⁻¹
- Remise en suspension 0,13 - 6 g km⁻¹
- Gaz d'échappement voitures avec catalyseur 0,0014 – 0,0024 g km⁻¹
voitures (diesel) 0,279 g km⁻¹
poids lourd (>16 tonnes, diesel) 1,08 g km⁻¹

Effets sur la santé

Aspects toxicologiques

- Pneus allergie et asthme des particules de latex?
teneur en PAH relativement élevée
pourcentage relativement élevé de PM₁₀
- Usure de la chaussée source importante de PM₁₀ dans l'environnement routier
composition minérale et propriétés de surface?
- Usure des plaquettes de frein
grand pourcentage de PM₁₀
particulièrement important dans les villes?

Aspects épidémiologiques

- Peu d'autres mesures que PM₁₀ et PM_{2,5} sont étudiées
- Particules d'usure essentiellement dans la fraction grossière PM_{10-2,5}
- De nombreuses études montrent une corrélation plus élevée des effets sur la santé avec PM_{2,5} mais il y a également des études indiquant une corrélation avec PM_{10-2,5}
- Pas seulement un effet des particules. La composition chimique et les propriétés de surface sont probablement tout aussi importantes.

Pour être en mesure d'étudier correctement les relations entre les particules non issues des gaz d'échappement et issues des gaz d'échappement et les effets sur la santé et l'environnement, il est essentiel d'effectuer des mesures PM avec des mesures qui donnent plus d'informations sur les caractéristiques chimiques, la répartition de la taille des particules et peut-être également les propriétés de surface. Il faudrait procéder à une interprétation à partir de particules spécifiques à une source pour être en mesure de faire des répartitions par source fiables lors des mesures sur le terrain ainsi qu'en matière d'évaluation des risques. Il faut plus de données sur le terrain couvrant une plus grande variation temporelle et spatiale pour améliorer les connaissances sur les variations des concentrations, de la composition et des caractéristiques des particules.

L'institut VTI (National Swedish Road and Transport Research Institute) engage de nombreux efforts afin de caractériser les particules provenant de l'usure de la chaussée et des pneus à l'aide d'un simulateur VTI. Le simulateur de route offre la possibilité d'étudier les particules d'usure "pures" étant donné qu'il est situé à l'intérieur d'un bâtiment. Les projets en cours traitent de facteurs d'émission pour les particules d'usure et remises en suspension respirables à utiliser dans des modèles d'émission et d'un inventaire de méthodes de nettoyage de la chaussée efficaces pour éliminer les particules. Les efforts futurs en matière de recherche sur les particules chez VTI prévoiront des variations spatiales et temporelles et des études de validation de modèles sur le terrain.

Références

- Ahlbom, J. & Duus, U.; Nya hjulspår - en produktstudie av gummidäck. 6/94, Kemikalieinspektionen, 1994.
- Amemiya, S., Tsurita, Y., Masuda, T., Asawa, A., Tanaka, K. & Katoh, T.; Investigation of environmental problems caused by studded tires of automobiles using PIXE. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B3: 516-521,1984.
- Areskoug, H.; Particles in the ambient atmosphere. Scandinavian Journal of Work, Environment and Health, 26 Suppl 1: 5-22,2000.
- Bækken, T.; Miljøvirkninger av vegtrafikkens asfalt og dekkslitasje. O-92090, NIVA, 1993.
- Bækken, T. & Jørgensen, T.; Vannförorensninger fra veg - langtidseffekter. 73, Statens vegvesen, 1994.
- Bjelkås, J. & Lindmark, P.; Förorensningar av mark och vägdagvatten på grund av trafik. 420, SGI, Linköping, 1994.
- Blomqvist, G.; Air-borne transport of de-icing salt and damage to pine and spruce trees in a roadside environment. Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1999.
- Blomqvist, G.; De-icing salt and the roadside environment: Air-borne exposure, damage to Norway spruce and system monitoring. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.
- Camner, P.; pers. com., Institute of Environmental Medicine, Karolinska institutet, 2000.
- Castillejos, M., Borja-Aburto, V.H., Dockery, D.W., Gold, D.R. & Loomis, D.; Airborne coarse particles and mortality. Inhalation Toxicology, 12 (Supplement 1): 61-72,2000.
- Cha, S., Carter, P. & Bradow, R.L.; Simulation of automobile brake wear dynamics and estimation of emissions. Society of Automotive Engineering, Inc., Technical paper: 3502-3522,1984.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Lowenthal, D.H. & Countess, R.J.; Sources and chemistry of PM10 aerosol in Santa Barbara County, Ca. Atmospheric Environment, 30(9): 1489-1499,1996.
- Farmer, A.M.; The Effects of Dust on Vegetation - A Review. Environmental Pollution, 79: 63-75,1993.
- Flückiger, W., Flückiger-Keller, H. & Oertli, J.J.; Der Einfluss von Strassenstaub auf den stomatären Diffusionswiderstand und die Blatt-Temperatur - ein antagonistischer Effekt. Staub - Reinhalt. Luft, 38(12): 502-505,1978.
- Garg, B.D., Cadle, S.H., Mulawa, P.A., Groblicki, P.J., Laroo, C. & Parr, G.A.; Brake wear particulate matter emissions. Environmental Science and Technology, 34(21): 4463-4469,2000.
- Gjessing, E., Lygren, E., Berglind, L., Gulbrandsen, T. & Skaane, R.; Effect of highway runoff on lake water quality. The Science of the Total Environment, 33: 245-257,1984.
- Glovsky, M.M., Miguel, A.G. & Cass, G.R.; Particulate air pollution: possible relevance in asthma. Allergy Asthma Proc, 18(3): 163-6,1997.
- González Arrojo, M.; Pavement wear caused by the use of studded tyres. 6A-2000, VTI, Linköping, 2000.
- Hagen, L.O. & Haugsbakk, I.; Måling av luftkvalitet ved sterkt trafikkerte veier i Oslo vinteren 1999/2000. OR 32/2000, NILU, 2000.
- Hetland, R.B., Refsnes, M., Myran, T., Johansen, B.V., Uthus, N. & Schwarze, P.E.; Mineral and/or metal content as critical determinants of particle-induced release of IL-6 and IL-8 from A549 cells. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 60: 47-65,2000.
- Ikedo, M., Watanabe, T., Hishamichi, S., Shimizu, H., Fujisaku, S., Ichinowatari, Y., Ida, Y., Suda, M. & Kato, K.; Upper respiratory symptoms presumably due to studded tire-generated dust. Environment International, 12: 505-511,1986.
- Jacobson, T. & Hornvall, F.; Dubbslitage på asfaltbeläggning. VTI meddelande 862, VTI, Linköping, 1999a.
- Jacobson, T. & Hornvall, F.; Polering av asfaltbeläggning: friktionsmätningar 1997-1998. VTI notat 6-1999, VTI, 1999b.
- Johansson, T.; pers. com. Scandinavian Tyre and Rim Organisation, 2000.
- Kobriger, N.P. & Geinopolos, A.; Volume III. Sources and migration of highway runoff pollutants - research report. FHWA/RD-84/059, Federal Highway Administration, Washington, DC, 1984.
- Krokeborg, J.; Veg-grepsprosjektet Delprosjekt 5.4: Vegstøv - helseskader og -kostander, Økonomiske konsekvenser av endret piggdekkbruk, helse og trivsel. 1990, Statens vegvesen, Vegdirektoratet, 1997.
- Kumata, H., Takada, H. & Ogura, N.; 2-(4-Morpholinyl)benzothiazole as an Indicator of Tire-Wear Particles and Road Dust in the Urban Environment. In: R.P. Eganhouse (Editor), Molecular Markers in Environmental Geochemistry. American Chem. cop., Washington, D.C., pp. 291-305, 1997.
- Kunzli, N. et al.; Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. Lancet, 356(9232): 795-801,2000.
- Larssen, S.; Støv fra asfaltveier, karakterisering av luftbåret veistøv. OR 53/87, NILU, 1987.
- Larssen, S.; pers. com. NILU, 2000.
- Larssen, S. & Hagen, L.O.; Partikkelforurensning fra piggdekk. OR 16/97, NILU, 1997.
- Larssen, S. & Haugsbakk, I.; Veg-grepsprosjektet, Delprosjekt 5.3: Vegstøv - sammansetning og effekt på fysisk miljø. Vejestøvdepot og svevestøvkonsentrasjon. Intern rapport nr. 1911, Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Veglaboratoriet, 1996.
- Lenner, M. & Karlsson, B.O.; Kvantitativ beräkningsmodell för trafikens utsläpp av cancerframkallande ämnen i svenska tätorter. VTI meddelande 847, Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping, 1998.
- Lindgren, Å.; Road Construction Materials as a Source of Pollutants. Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, 129 pp, 1998.
- Lindström, A. & Rossipal, B.; Emissioner från landsvägs- och järnvägstrafik. Trita-Kut 3039, Dept. of Land Improvement and Drainage, Stockholm, 1987.
- Lygren, E. & Gjessing, E.; Highway pollution in a Nordic climate. 0-79024, NIVA, 1984.
- Miguel, A.G., Cass, G.R., Weiss, J. & Glovsky, M.M.; Latex allergens in tire dust and airborne particles. Environ Health Perspect, 104(11): 1180-6,1996.

- Morikawa, T.; The influence of road dust on asthmatic children. *Japanese Journal of Allergology*, 34: 297-304,1985.
- Murphy, S., Bérubé, K.A., Pooley, F.D. & Richards, R.; The response of lung epithelium to well characterised fine particles. *Life Sciences*, 62(19): 1789-1799,1998.
- Noll, K.E., Draftz, R. & Fang, K.Y.P.; The composition of atmospheric coarse particles at an urban and non-urban site. *Atmospheric Environment*, 21(12): 2717-2721,1987.
- Norem, H.; Høy pris for forbud mot piggekk, *Våre Veger*, pp. 26-28, 1998.
- Ostro, B.D., Hurley, S. & Lipsett, M.J.; Air pollution and daily mortality in the Coachella Valley, California: a study of PM10 dominated by coarse particles. *Environmental Research*, 81(3): 231-8,1999.
- Pekkanen, J., Timonen, K.L., Ruuskanen, J., Reponen, A. & Mirme, A.; Effects of ultrafine and fine particles in urban air on peak expiratory flow among children with asthmatic symptoms. *Environ Res*, 74(1): 24-33,1997.
- Rogge, W.F., Hildemann, L.M., Mazurek, M.A. & Cass, G.R.; Sources of fine organic aerosol. 3. Road dust, tire debris and organometallic brake lining dust: Roads as sources and sinks. *Environmental Science and Technology*, 27: 1892-1904,1993.
- Sansalone, J.J., Buchberger, S.G. & Koechling, M.T.; Correlations Between Heavy Metals and Suspended Solids in Highway Runoff: Implications for Control Strategies. *Transportation research record*, 1483: 112-119,1995.
- Schauer, J.J. & Cass, G.R.; Source apportionment of wintertime gas-phase and particle-phase air pollutants using organic compounds as tracers. *Environmental Science and Technology*, 34: 1821-1832,2000.
- Schwartz, J., Norris, G., Larson, T., Sheppard, L., Claiborne, C. & Koenig, J.; Episodes of high coarse particle concentrations are not associated with increased mortality. *Environmental Health Perspectives*, 107(5): 339-42,1999.
- Takada, H., Onda, T., Harada, M. & Ogura, N.; Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust from the Tokyo Metropolitan area. *The Science of the Total Environment*, 107: 45-69,1991.
- Takishima, T., Nakamura, M., Sasaki, M., Miyano, M., Yamaya, M. & Sasaki, H.; Inhalation of road dust by human subjects. *American Review of Respiratory Disease*, 136: 1278-1280,1987.
- Thunqvist, E.-L.; Pollution of groundwater and surface water by roads - with emphasis on the use of deicing salt. Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000.
- Watanabe, T., Nakatsuta, H., Kasahara, M. & Ikeda, M.; Silica and aluminum in the lungs of feral pigeons and experimental rats exposed to studded tire-generated road dust. *Environmental International*, 16: 23-29,1990.
- Vedal, S.; Ambient particles and health: lines that divide. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 47: 551-581,1997.
- Westerlund, K.-G.; Metallemission från trafiken i Stockholm - slitage av bromsbelägg. 2:98, *Environment and Health Protection Administration*, Stockholms Luft- och Bulleranalys, Stockholm, 1998.
- Williams, P.B., Buhr, M.P., Weber, R.W., Volz, M.A., Koepke, J.W. & Selner, J.C.; Latex allergen in respirable particulate air pollution. *J Allergy Clin Immunol*, 95(1 Pt 1): 88-95,1995.