

Émissions des véhicules routiers

Avril
2022

Les particules hors échappement

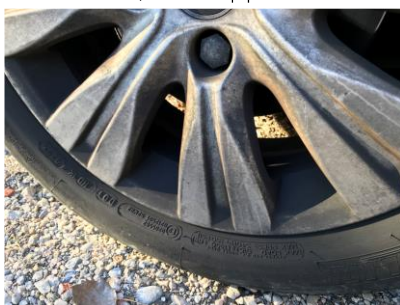
Alors que les émissions de particules à l'échappement ont très nettement baissé avec la généralisation des filtres à particules, celles hors échappement provenant de l'abrasion des freins, des pneumatiques et des chaussées deviennent prépondérantes et représentent en France en 2019 59 % des PM₁₀ et 45 % des PM_{2,5}.

La taille des particules de frein varie de 10 nm à 2 µm et celles issues du contact pneu-chaussée de 30 nm à 4 µm. Ces particules contiennent divers éléments métalliques (Fe, Cu, Zn, Al, Ba ...) et soufrés en plus du carbone très largement majoritaire. A cause de la présence de ces éléments métalliques, quelques études toxicologiques suggèrent que ces particules pourraient constituer un danger pour la santé.

Si les véhicules électriques, grâce au freinage régénératif, émettent moins de particules de frein que leurs équivalents thermiques, la tendance s'inverse pour les particules issues du contact pneu-chaussée et de la remise en suspension, du fait de leur plus grande taille de pneumatique due à leur masse véhicule supérieure. Ainsi on ne note pas un écart significatif d'émissions totales de particules entre les véhicules électriques à forte autonomie et les véhicules thermiques neufs actuels, qui n'émettent quasiment plus de particules à l'échappement.

En l'absence de réglementation actuellement sur les émissions de particules d'abrasion des freins ou des pneumatiques, très peu de solutions technologiques sont proposées pour les réduire. La possible prise en compte de ces particules dans la future norme Euro 7/VII pourrait faire évoluer la situation.

Afin de réduire la pollution par les particules liées au trafic routier, il est donc indispensable d'associer à l'électrification du parc, d'autres actions pouvant faciliter l'atteinte de la neutralité carbone ayant des co-bénéfices sur les PHE : allègement des véhicules, développement de l'éco-conduite et des modes actifs...



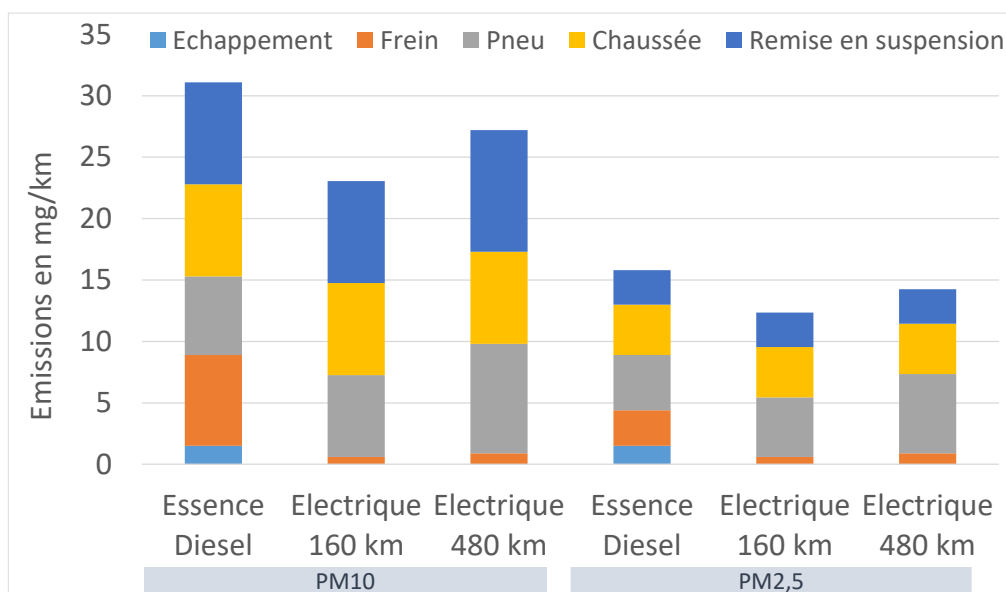
Cette note d'expertise présente un état des connaissances sur :

- Les particules d'abrasion des freins, des pneus et de la chaussée avec leurs caractéristiques, leurs compositions et les quantités émises
- Les solutions technologiques pour les réduire
- Leur impact sanitaire et environnemental
- Le volet réglementaire

1. Quantités de particules émises hors échappement

Les particules émises hors échappement par les systèmes de freinage, les pneumatiques ou les chaussées sont devenues largement prépondérantes par rapport aux émissions à l'échappement des véhicules essence et Diesel équipés d'un filtre à particules^{1, 2}. D'après le Joint Research Centre (JRC) de la Commission Européenne³, plus de la moitié des particules générées par le trafic routier en Europe ne proviennent pas des émissions à l'échappement. Les sources de ces particules hors échappement sont les freins (16 à 55 % de PM₁₀ selon les conditions de circulation), le contact pneu / chaussée (5 à 30 %) et la remise en suspension des particules (28 à 59 %). En France, la part des PM₁₀ du transport routier due à l'abrasion est passée de 15 % en 1990 à 59 % en 2019 et pour les PM_{2,5} respectivement de 9 à 45 %⁴ en raison principalement de la généralisation du filtre à particules sur les véhicules Diesel et la sortie progressive du parc des véhicules Diesel les plus anciens et à un degré moindre, l'augmentation de la masse des véhicules. Cette tendance va s'accroître et les émissions globales de particules ne baisseront plus si aucune réglementation sur les émissions de particules de frein ou de pneus n'est mise en place⁵.

Grâce au freinage régénératif, les véhicules électriques émettent moins de particules issues du système de freinage que les véhicules à motorisation thermique (respectivement 3 et 25 % des PHE PM₁₀). Néanmoins, leur masse étant supérieure à leur équivalent thermique et ceci est d'autant plus vrai que l'autonomie du véhicule électrique est importante, cela impacte la largeur des pneus et donc augmente les émissions de particules pneus / chaussée (61 et 47 % des PHE PM₁₀) et celles remises en suspension (36 et 28 % des PHE PM₁₀). Ainsi on ne note pas un écart significatif d'émissions totales de particules entre les véhicules électriques à forte autonomie et les véhicules thermiques neufs actuels qui n'émettent quasiment plus de particules à l'échappement^{1, 2}. Cependant, il ne faut pas oublier que les véhicules thermiques émettent des oxydes d'azote et des composés organiques volatils qui peuvent contribuer, suivant les conditions atmosphériques, à la formation de particules secondaires, ce qui n'est pas le cas des véhicules électriques.



¹ Timmers V.R.J.H., Achten P.A.J., Non exhaust PM emissions from electric vehicles, *Atm. Env.* 134, 10-17, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.017>

² OCDE, Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport : An Ignored Environmental Policy Challenge, Éditions OCDE, Paris, 2020, <https://doi.org/10.1787/4a4dc6ca-en>

³ JRC 2018 : <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/32164/attachments/3/translations/en/renditions/native>

⁴ CITEPA Secten 2021

⁵ Air Quality Expert Group to Defra, UK, Non-exhaust emissions from road traffic, 2019; https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat09/1907101151_20190709_Non_Exhaust_Emissions_typeset_Final.pdf

Les émissions de particules de frein semblent varier énormément d'une voiture à une autre : 4 à 43 mg/km (moyenne 20 mg/km) et pour un fourgon, elles seraient multipliées par deux s'il transporte 90 % de sa charge utile au lieu de 10%⁶.

Des microparticules de pneus se retrouveraient dans les océans⁷. 12 Mt de plastiques seraient rejetées par an dans les océans dont 1,5 Mt seraient des microparticules primaires de plastique de diamètre inférieur à 5 mm. 28 % proviendraient des pneus (du caoutchouc synthétique) ce qui en ferait la deuxième source après le lavage des textiles synthétiques.

2. Les particules de frein

2.1. Composition des disques et des plaquettes de frein^{8,9}

Les disques de frein standards sont en fonte. Ils sont constitués majoritairement de fer (90 %) et de carbone ainsi que de quelques éléments minoritaires comme le silicium et le manganèse.

Les constituants des plaquettes sont classés selon cinq catégories suivant leur rôle :

- les liants qui assurent le maintien de la structure de la plaquette,
- les fibres de renforcement qui fournissent la force mécanique,
- les abrasifs qui servent à accroître la friction,
- les charges lubrifiantes pour stabiliser les propriétés de friction en particulier à haute température,
- les charges diverses (barite, calcite ou mica).

Dans les plaquettes standards les éléments chimiques les plus abondants sont : le carbone (> 50 % en masse), le fer, le cuivre et le zinc. Les autres éléments présents généralement à moins de 5 % sont le magnésium, l'aluminium, le silicium, le soufre, le calcium, le chrome, l'antimoine et le baryum. Les plaquettes céramiques (haut de gamme) se caractérisent par la présence abondante de zirconium, cuivre, titane et carbone ainsi que de nombreux autres éléments comme pour les plaquettes standards. En revanche, le fer y est présent à moins de 1%. Notons que pour ces deux catégories de plaquettes de frein, leur composition en éléments chimiques peut être très variable selon le fabricant.

2.2. Caractéristiques des particules de frein^{8,9,10}

La distribution granulométrique en nombre des particules de frein est bimodale : (1) un mode ultrafin autour de 10 nm et (2) un mode fin autour de 200 nm. La distribution granulométrique en masse est également bimodale à environ 200 nm et 2 µm. Cette distribution bimodale est révélatrice des phénomènes physiques mis en jeu lors du freinage. Au début de la phase de freinage on observe un arrachement de particules fines (autour de 1 à 2 µm) puis avec l'augmentation de la force de freinage et l'élévation de la température, une formation importante de particules autour de 200 nm se produit par évaporation et condensation des composants carbonés des plaquettes de freins. Un freinage intensif caractérisé par une répétition de freinages et/ou une forte décélération (par exemple en cas de freinage d'urgence ou lors de l'arrivée à un péage d'autoroute) conduira à une élévation de la température des plaquettes plus importante provoquant, au-delà de 250 °C, l'émission de particules ultrafines autour de 10 nm.

⁶ Campagne de mesures de l'ACEA menée en 2021 :

https://wiki.unece.org/download/attachments/140712554/Agenda%20Item_3d%20ACEA%20Brake%20Wear%20OICA.pdf?api=v2

⁷ Microplastiques primaires dans les océans, IUCN 2017 et *Sources of microplastics relevant to marine protection in Germany*, UBA, Report N° (UBA-FB) 002147/E, 2015

⁸ Projet CORTEA 2015 – CAREPAF : Caractérisation des émissions de particules de frein. 2018. Partenaires : CERTAM, GPM, CCM. Contrat ADEME n°15.66.C0002. [Rapport final dans la Librairie ADEME](#)

⁹ Projet CORTEA 2015 – CAPTATUS : Caractérisations physico-chimiques des particules émises hors échappement par les véhicules routiers. 2018. Partenaires : IFSTTAR / EASE, ULCO / LPCA. Contrat ADEME 15.66.C0016. [Rapport final dans Librairie ADEME](#)

¹⁰ A. Beji, K. Deboudt, S. Khardi, B. Muresan, P. Flament, M. Fourmentin, L. Lumière, *Non-exhaust particle emissions under various driving conditions: Implications for sustainable mobility*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 81, 2020, 102290, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102290>

2.3. Composition des particules de frein^{8, 9, 10}

Les particules de frein collectées, puis analysées par spectroscopie à rayon X, sont généralement constituées de plusieurs éléments chimiques, avec majoritairement du carbone et du fer mais aussi des aluminosilicates, du silicate de zirconium, du silicium, du chrome, de l'aluminium, du baryum, du calcium, de l'antimoine, du soufre et du zinc. Les particules sont d'aspect sphériques ou angulaires, en flocons ou agglomérées. Généralement, les particules de frein ultrafines (< 100 nm; freinage intensif (cf. §2.2)) sont constituées de carbone avec majoritairement des composés soufrés et ont une forme sphérique. Les structures angulaires et en paillettes sont, à l'inverse, présentes dans une gamme de taille supérieure à 100 nm et inférieure à 1 µm. Elles sont souvent constituées d'un mélange de carbone avec le plus souvent des oxydes de fer.

2.4. Solutions de réduction des émissions des freins

2.4.1. Amélioration des systèmes de freinage actuels

En 2019, à l'issue du projet Européen H2020 LOWBRASYS¹¹, les équipementiers automobiles BREMBO et CONTINENTAL et leurs partenaires industriels et académiques ont réduit de 50 % le nombre de particules émises et de 10 à 15 % la masse des particules émises de diamètre inférieur à 10 µm (PM₁₀). Ces gains ont été obtenus en améliorant les matériaux des plaquettes et le traitement de surface des disques, en optimisant le contrôle du freinage et grâce à une meilleure compréhension de la formation et de la diffusion des particules.

L'accroissement du diamètre des disques de frein améliore la dissipation de chaleur lors des freinages et ainsi pourrait réduire les émissions de particules les plus fines.

Enfin, l'usage quelque peu abandonné des freins à tambour, lorsque cela est possible, permettrait de réduire les émissions de particules de frein étant donné que celles-ci restent confinées dans le système de freinage.

2.4.2. Pilotage du freinage pour soulager le freinage mécanique

Grâce au freinage régénératif¹² présent sur les véhicules hybrides et électriques, le freinage mécanique est moins sollicité, les plaquettes de frein s'usent moins vite et ces véhicules émettent donc moins de particules de freinage.

Pour les véhicules lourds et les engins non routiers, des ralentisseurs pneumatiques (Jacobs Vehicle Systems¹³), hydrauliques (Voith¹⁴, ZF¹⁵) ou électromagnétiques (Telma¹⁶) réduisent également la puissance du freinage mécanique, jusqu'à 90 %, en dissipant l'énergie de freinage respectivement par l'augmentation du frein moteur, l'entraînement d'une turbine freinée et la génération de courants de Foucault.

2.4.3. Solutions de captage et filtration :

Des solutions de captage des particules de frein à la source sont à l'étude avec des prototypes plus ou moins avancés, citons par exemple :

- Tallano Technologie¹⁷, en partenariat avec l'équipementier Akwel : l'aspiration des particules est réalisée avec un boîtier comprenant une turbine et un filtre (déporté du système de freinage) et optimisée en modifiant légèrement les plaquettes et l'étrier de frein avec la création d'un canal de captation.
- Mann + Hummel¹⁸ : un filtre passif constitué de fibres métalliques non tissées est monté sur l'étrier de frein et capte directement les particules émises.

¹¹ <http://www.lowbrasys.eu/en/>

¹² Le moteur électrique bascule en génératrice de courant

¹³ <https://www.jacobsvehiclesystems.com/technologies/high-power-density>

¹⁴ <https://voith.com/corp-en/braking-systems/retarders-trucks.html>

¹⁵ https://www.zf.com/products/en/cv/products_64209.html

¹⁶ <https://fr.telma.com/>

¹⁷ <https://www.tallano.eu/>

¹⁸ <https://oem.mann-hummel.com/en/insights/helping-to-reduce-fine-dust.html> ; ce système sera évalué au cours du projet AQACIA 2020 – D-BRAKE, 11/2021 -> 08/2025, financement ADEME n°2166D0017

3. Les particules issues du contact pneu - chaussée

3.1. Composition de la gomme des pneus

La gomme des pneus est généralement composée de¹⁹ :

- Elastomères : caoutchouc naturel et synthétique (40 à 50 % en masse),
- Charges de renforcement : noir de carbone, silice, carbonate de calcium (30 à 35 %),
- Adoucissants : huiles et résines (15 %),
- Agents de vulcanisation : soufre, oxyde de zinc (2 à 5 %),
- Additifs : cyanoalcanes halogénés, amines, phénols, oxydes de calcium, esters aromatiques et aliphatiques, huiles minérales, peptisants (5 à 10 %).

3.2. Caractéristiques des particules issues du contact pneu - chaussée

L'analyse^{9, 10} des particules collectées au plus près du pneu lors d'essais sur piste à vitesse constante comprise entre 50 et 90 km/h donne une distribution en nombre bimodale, avec un mode ultrafin majoritaire centré autour de 30 nm et un mode fin autour de 200 nm. La distribution en masse est également bimodale avec un pic autour de 300 nm et un mode majoritaire autour de 2 – 4 µm. Ces distributions en taille sont identiques quelle que soit la vitesse du véhicule. En revanche, le nombre de particules augmente légèrement avec la vitesse pour les particules submicroniques et beaucoup plus significativement (x2 entre 50 et 90 km/h) pour celles de taille comprise entre 1 et 10 µm.

Par ailleurs, plus les accélérations ou décélérations du véhicule et les vitesses en début de freinage sont élevées et plus le nombre de particules produites par le contact pneu-chaussée croît²⁰. Cependant, le rapport entre le nombre de particules sub et supermicroniques ne semble pas varier significativement avec les niveaux d'accélération ou de décélération du véhicule.

De plus, la distribution en taille et le nombre de ces particules sont très dépendants des micro et macro textures du revêtement routier ainsi que de son vieillissement²⁰.

3.3. Composition des particules de pneu

Les particules issues de l'usure des pneus sont majoritairement composées par ordre décroissant de carbone, silice, soufre et plusieurs métaux ou minéraux comme le fer, l'aluminium, le magnésium, le sodium, le calcium ou le potassium provenant probablement de particules présentes sur la chaussée venues se coller à la surface du pneu²¹.

3.4. Solutions pour réduire les émissions de particules issues du contact pneu - chaussée

D'après le Règlement (UE) 2020/740 du 25 mai 2020²², la durée de vie des pneus devrait, une fois la méthode d'essais mise au point, venir compléter les informations déjà présentes sur l'étiquette énergie des pneus. Par conséquent, afin d'être bien noté sur ce critère de durabilité, les fabricants de pneumatiques pourraient renforcer leurs travaux de recherche visant à abaisser le taux d'abrasion et ainsi réduire les émissions de particules de pneu.

Le choix de la texture du revêtement routier et son renouvellement lorsqu'il a trop vieilli ont une influence sur les émissions de particules issues du contact pneu – chaussée²⁰.

¹⁹ B. Baensch-Baltruschat, B. Kocher, F. Stock, G. Reifferscheid, *Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment*, Science of The Total Environment, Volume 733, 2020, 137823, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823>

²⁰ A. Beji, K. Deboudt, S. Khardi, B. Muresan, L. Lumière, Determinants of rear-of-wheel and tire-road wear particle emissions by light-duty vehicles using on-road and test track experiments, Atmospheric Pollution Research, Vol 12, Issue 3, 2021, Pages 278-291, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.12.014>

²¹ Asma Beji, 2020. Caractérisation physico-chimique des particules émises hors-échappement par le trafic routier (Thèse de doctorat) Université de Lyon

²² Règlement (UE) 2020/740 du Parlement européen et du Conseil du 25 mai 2020 sur l'étiquetage des pneumatiques en relation avec l'efficacité en carburant et d'autres paramètres, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0740&from=FR>

La startup The Tyre Collective²³ a prototypé un concept placé derrière chaque pneu collectant les particules grâce à des plaques électrostatiques et les stockant dans une cartouche filtrante. L'efficacité de captation annoncée est de 60 %.

4. Ensemble des particules en bord de route

4.1. Composition et caractéristiques

Les particules que l'on retrouve en bord de route proviennent majoritairement du trafic routier (échappement et hors échappement) et parfois d'autres sources notamment industrielles si elles sont situées à proximité. L'analyse^{21, 24, 25} de ces particules montre qu'elles contiennent divers éléments en plus du carbone très largement majoritaire :

- Zinc, élément lié au pneu, qui est surtout présent dans les particules < 2 µm
- Fer et cuivre qui sont des marqueurs des émissions de frein avec un très large spectre de tailles de particules de 0,1 à 8 µm
- Soufre, issu des plaquettes de frein et des pneus qui est principalement présent dans les particules < 0,5 µm
- Chlore et potassium qui proviennent du salage des routes que l'on retrouve dans les particules < 0,2 µm pour le chlore et toutes les tailles de particules pour le potassium
- Calcium qui a pour origine le revêtement routier et qui est très présent dans les particules > à 1 µm
- Titane qui est issu de la peinture blanche servant aux marquages au sol, présent dans les particules les plus petites de quelques dizaines de nm.

Dès que l'on s'éloigne de quelques mètres de la voie de circulation le niveau de concentration de particules est proche de celui du fond ambiant avec des variations en fonction des conditions météorologiques et de la turbulence générée par le trafic¹⁰.

4.2. Solutions pour réduire la remise en suspension

Si moins de particules sont déposées sur la chaussée, alors moins de particules seront remises en suspension lors du passage des véhicules. Ainsi, toutes les mesures visant à réduire les émissions de particules à la source contribueront à réduire le nombre de particules remises en suspension.

La micro et macro-texture du revêtement routier et son renouvellement lorsqu'il a trop vieilli ont une influence sur la remise en suspension des particules²⁰. Des travaux de recherche sont néanmoins encore nécessaires pour améliorer la compréhension des paramètres influençant ce phénomène et ainsi faire évoluer les pneus et/ou les revêtements routiers²⁶.

Par ailleurs, le lavage des chaussées ou la pluie réduisent fortement le nombre de particules pouvant être remises en suspension mais elles vont se retrouver dans d'autres écosystèmes comme les rivières, les fleuves, les mers et les océans⁷.

D'un point de vue solution technologique, Mann + Hummel a développé un système de captation des particules qui se place sur le toit ou en dessous du véhicule²⁷. Il est composé d'une membrane retenant l'eau, d'un filtre à air piégeant les particules et d'un ou deux ventilateurs aspirant l'air ambiant. Des prototypes sont en test.

D'autres technologies sont en test comme les pièges à particules TrapAparT²⁸ qui se placent le long des grands axes routiers urbains ou dans les gares souterraines ferroviaires.

²³ <https://www.thetyrecollective.com/>

²⁴ WBCSD – The Tire Industry Project (TIP) – Tires Road Wear Particles (TRWP) – Francis Peters – Mars 2015

²⁵ M. Kovichich, M. Liong, J. A. Parker, S. Cheun Oh, J. P. Lee, L. Xi, M. L. Kreider, K. M. Unice, Chemical mapping of tire and road wear particles for single particle analysis, Science of The Total Environment, Volume 757, 2021, 144085, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144085>

²⁶ Projet AQACIA 2020 – CEPARER, 01/2022 -> 07/2025, financement ADEME n°2166D0020

²⁷ <https://www.youtube.com/watch?v=V-ntUGxHFZg>

²⁸ <https://www.trapapart.fr/> ; ce système sera évalué pour l'application trafic routier au cours du projet AQACIA 2020 – AQA3P, 11/2021 -> 11/2023, financement ADEME n°2166D0018

5. Impact sanitaire et environnemental

L'impact sur la santé humaine des particules émises hors échappement par les systèmes de freinage ou le contact pneu – chaussée a fait l'objet d'un nombre d'études toxicologiques et épidémiologiques assez limité^{29, 30, 31}. Si des études épidémiologiques montrent clairement que des effets néfastes sur la santé sont associés à la proximité du trafic, à l'intensité du trafic ou aux concentrations de polluants atmosphériques liés au trafic, il n'est pour le moment pas très clair de savoir dans quelle mesure les particules hors échappement contribuent à ces associations. Quelques études toxicologiques suggèrent que ces particules pourraient constituer un danger pour la santé notamment à cause de leurs teneurs en éléments métalliques comme le cuivre, le baryum, le zinc ou le fer. Toutefois, il n'est pas certain que les concentrations réelles de particules hors échappement aient des effets significatifs, ni que leur nuisance soit similaire à celle des autres polluants issus des gaz d'échappement des véhicules²⁹ même si des travaux récents semblent montrer que le potentiel oxydant des particules de frein serait supérieur à celui des particules Diesel^{29, 30, 32}.

Ainsi, il apparaît qu'une meilleure compréhension des risques sanitaires potentiels de ces particules est nécessaire via des études toxicologiques avec des concentrations représentatives de situations réelles et/ou épidémiologiques en distinguant les sources des particules.

Les eaux de pluie ou de lavage lessivent les surfaces asphaltées en zones urbaines. Elles entraînent ainsi dans les réseaux d'assainissement de l'eau chargée de microparticules de caoutchouc et d'éléments métalliques, chlorés et soufrés provenant notamment de l'abrasion des freins, des pneumatiques et de la chaussée qui peuvent perturber les traitements utilisés dans les stations d'épuration. Cette pollution est ensuite piégée dans le sol lorsque les boues d'épuration sont utilisées comme fertilisants. En zones non imperméabilisées ou rurales, cette pollution, via les eaux de ruissellement, atteint les sols, les nappes phréatiques et les cours d'eau voire les océans où l'on retrouve des microparticules de pneus⁷. Les effets à long terme sur les écosystèmes sont peu documentés et l'accumulation de cette pollution dans la chaîne alimentaire pose question.

6. Évolution réglementaire

6.1. Particules de frein

La réglementation Euro 7 / VII (2025 – 2026) va très certainement inclure un volet sur les émissions de particules de frein avec une première étape en phase de test et contrôle puis une deuxième étape avec des seuils d'émissions à ne pas dépasser. Un protocole de mesures a été défini avec notamment un cycle d'essai (*WLTP-Brake cycle*) au travers du projet européen LOWBRASYS et d'un groupe de travail de normalisation de l'UNECE³³. Dans un premier temps la réglementation sur les particules de frein ne devrait concerner que les véhicules légers.

6.2. Particules de pneu

Une réglementation sur les particules de pneu est peu probable pour Euro 7 / VII. En effet, des études sur la caractérisation et la distribution en taille de ces particules sont encore nécessaires de même que la définition d'une méthodologie de mesures robuste qui sera étudiée dans le projet H2020 LEON-T (2021 -> 2024)³⁴.

Par ailleurs, notons que dans le cadre des travaux européens portant sur l'information sur la durée de vie des pneus²², est en cours le développement d'une méthode « universelle » permettant de définir leur taux d'abrasion.

²⁹ Projet IMPACTS 2017 - ToxBrake : Évaluation de la toxicité des particules issues des dispositifs de freinage par friction. 2022. Partenaires : CERTAM, ABTE, GPM, CHU Rouen. Contrat ADEME n°18.66C0129. Rapport final dans la [Librairie ADEME](#)

³⁰ Projet IMPACTS 2017 – TOXinTRANSPORT : Caractérisations toxicologiques *in vitro*, chimiques et physiques de particules prélevées dans l'air d'habitacles de transport en roulage. 2022. Partenaires : INERIS, AEF, IGE, LSCE, DAVID, Unisanté. Contrats ADEME n°19.66.C0001-6. Rapport final dans [Librairie ADEME](#)

³¹ COMEAP, Statement on the evidence for health effects with exposure to non-exhaust particulate matter from road transport, 2020

³² Daellenbach, K.R., Uzu, G., Jiang, J. et al. Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe. *Nature* 587, 414–419, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2902-8>

³³ UNECE – GRPE PMP IWG ; <https://wiki.unece.org/display/trans/PMP+Workshop+on+Brake+Emissions++Regulation>

³⁴ <https://cordis.europa.eu/project/id/955387>

7. Conclusion

La réduction des émissions de CO₂ pour atteindre la neutralité carbone en 2050 nécessite la mise en œuvre d'actions ou de changements de comportement qui vont également contribuer à réduire les émissions de particules de frein, pneu et chaussée :

- Allègement des véhicules -> pneu moins large
- Véhicules électriques -> freinage régénératif
- Éco-conduite -> accélération et décélération moins fortes
- Réduction des vitesses limites autorisées -> freinage moins fort
- Baisse des déplacements en véhicule individuel -> diminution globale de la circulation
- Privilégier les modes actifs -> rupture dans les émissions de particules d'abrasion

Ainsi, les synergies qui peuvent apparaître entre la réduction des émissions de polluants et de CO₂ des transports et celles des PHE, et la mise en place d'une réglementation sur les émissions de PHE, devraient permettre de voir dans le futur les émissions de particules hors échappement baisser.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.