

ABRASION DES PNEUS : DONNE-NOUS AUJOURD'HUI NOTRE POISON QUOTIDIEN

Les microplastiques et les additifs toxiques
issus de l'usure des pneus menacent notre
santé et notre environnement.

GREENPEACE

RÉSUMÉ

On trouve aujourd'hui des microplastiques partout dans la nature, même sur les glaciers¹. Jusqu'à 93 % des microplastiques libérés dans l'environnement en Suisse proviennent de l'abrasion des pneus. Ces fines particules se répandent dans l'air et les eaux de chaussée. Elles sont inhalées et polluent les aliments et les sols. Les pneus des véhicules ne sont composés qu'à 40 ou 50 % de polymères plastiques. Le reste est constitué d'additifs. Les scientifiques soupçonnent plusieurs de ces produits d'avoir un effet nocif sur la santé.

L'intérêt de la communauté scientifique pour ce sujet est plutôt récent. L'identification de l'origine des particules de plastique présentes dans l'environnement et la détection des additifs sont des démarches complexes. Par conséquent, on ne trouve que peu de littérature scientifique sur le sujet et la sensibilisation du grand public sur ce danger est inexistante. Cette fiche thématique fait un tour d'horizon des connaissances acquises au cours des dernières années.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	2
Table des matières	2
Introduction	3
Quelle est l'origine des poussières de pneus ?	3
Les nombreux composants entrant dans la composition des pneus	3
Poussière de pneus – diffusion dans l'environnement	4
Dans l'air	4
Dans l'eau	4
Conclusions intermédiaires	5
Des additifs toxiques dans les poussières de pneus	6
La 6PPD-quinone (6PPD-Q)	6
La diffusion des additifs dans l'environnement	6
Absorption et effets des additifs toxiques	7
Additifs toxiques dans les légumes-feuilles	7
Détection des additifs dans l'organisme	8
Effets de la 6PPD et de la 6PPD-Q sur la santé	8
Autres effets potentiels des poussières de pneus	8
Conclusion générale	10
Références	11
Impressum	12

INTRODUCTION

Pendant plus de vingt ans, les scientifiques ont été confrontés à une énigme. Les saumons argentés qui revenaient de la baie de la grande ville américaine de Seattle dans les ruisseaux et les rivières mouraient avant d'avoir pu pondre leurs œufs. La raison en était inconnue. Il semblait toutefois qu'elle était liée aux produits chimiques toxiques qui s'écoulaient des routes et des autoroutes et se retrouvaient ainsi dans les eaux. Ce n'est qu'en 2020 qu'un groupe de chercheur·ses a réussi à identifier le responsable de cette hécatombe: la 6PPD-quinone (6PPD-Q), une substance libérée par les pneus des voitures, qui se retrouve dans la poussière des routes et pollue l'eau.²

Depuis, les laboratoires environnementaux aux Etats-Unis, en Europe et en Asie analysent les rejets de poussières de pneus dans l'environnement, les substances toxiques qu'elles contiennent et leur impact sur la santé et la nature. Les données disponibles sont encore peu nombreuses. Mais les premières conclusions interpellent et démontrent que la problématique des poussières de pneus a été largement sous-estimée pendant des décennies.

Quelle est l'origine des poussières de pneus ?

Lorsque le pneu entre en contact avec la route, des particules se détachent. Celles-ci sont souvent composées d'un mélange de matériaux issus de la route comme du pneu. Les facteurs suivants influencent la quantité de poussières de pneus :

- les caractéristiques du pneu, comme la matière et la structure
- le poids du véhicule et le système de suspension des roues
- le type de chaussée et le profil de la route
- la vitesse et le style de conduite

Les nombreux composants entrant dans la composition des pneus

Les pneus de voiture ne sont composés qu'à 40-50% de caoutchouc. Aujourd'hui, celui-ci ne provient généralement plus de sources naturelles, mais d'un polymère synthétique composé de styrène-butadiène et de polybutadiène. Ce plastique se dégrade difficilement de manière naturelle et contribue particulièrement à la pollution aux microplastiques en Suisse comme à l'étranger. On estime que jusqu'à 93% des microplastiques libérés dans l'environnement en Suisse proviennent de l'abrasion des pneus.^{3,4} En raison de l'absence de méthodologie de mesure standardisée, il est néanmoins compliqué de déterminer leur origine.



POUSSIÈRE DE PNEUS – DIFFUSION DANS L'ENVIRONNEMENT

En Suisse, la détermination de la quantité totale de poussières aboutit à des résultats différents selon la méthode utilisée. Les études les plus récentes l'estiment entre 13 500 et 21 200 tonnes par an, soit entre 1,6 à 2,5 kg par an et par habitant.⁵

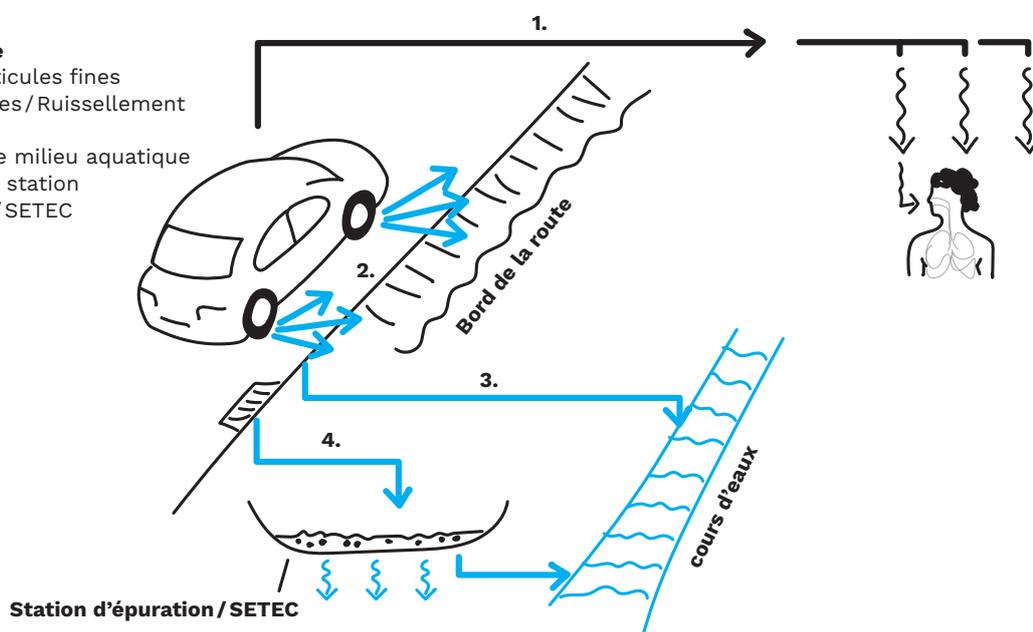
Les poussières de pneus pénètrent dans l'environnement de deux manières. Elles sont présentes dans les eaux usées des routes ou se retrouvent sous forme de particules de poussière dans l'air.

On estime qu'un peu plus de la moitié de l'usure des pneus reste sur le sol, souvent transportée par les projections d'eau à proximité immédiate des routes. Une part un peu plus faible se retrouve dans les eaux de surface ou est retenue par les stations d'épuration ou lors du traitement des eaux de chaussée. Plus les particules sont petites, plus il est difficile de les retenir par sédimentation dans des bassins de décantation.⁶

Mécanismes de diffusion

Transportwege

1. Par l'air / Particules fines
2. Éclaboussures / Ruissellement vers le sol
3. Rejet dans le milieu aquatique
4. Filtration en station d'épuration / SETEC



Dans l'air

De nombreuses études attestent de la pollution de l'air ambiant par les poussières de pneus à proximité des routes. Alors que la concentration de particules issues des processus de combustion a diminué grâce à la modification des carburants et à l'amélioration du filtrage des gaz d'échappement, la pollution de l'air par les poussières de pneus est restée constante. Plus on s'éloigne des routes, plus la concentration de poussières de pneus diminue. Toutefois, les particules peuvent être transportées partout par le vent, y compris dans les lacs de montagne isolés (voir ci-dessous).

En 2020, une étude de l'OFEV a examiné de plus près deux sites fortement pollués (Bern Bollwerk et Zürich Kaserne) et a distingué trois tailles de particules : 1–2,5 microgrammes (μg), 2,5–10 μg et 10–80 μg . Plus les particules sont petites, plus elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons. C'est pourquoi une attention particulière est portée aux particules inférieures à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sur le site de Berne Bollwerk, dans le groupe de particules 2,5–10 μg , 23% ont pu être identifiés comme des pous-

sières de pneus. Pour 20% supplémentaires, il s'agit d'abrasion métallique provenant du trafic ferroviaire et également du trafic routier.⁷

Dans l'eau

La plus grande partie des poussières de pneus est transportée par l'eau avec la pluie et la neige.

Une partie est emportée par le ruissellement. Dans le cas où la route dispose d'un système de drainage, l'eau polluée y est déversée. De là, elle s'écoule dans le cours d'eau le plus proche ou peut être filtrée jusqu'à un certain point dans une station d'épuration ou une station de traitement des eaux de chaussée (SETEC). Plus les particules de pneus restent longtemps dans l'eau, plus les additifs peuvent s'y dissoudre.⁸ S'il n'existe pas de système de drainage, l'eau polluée s'écoule latéralement vers le bord de la route, où les poussières de pneus s'accumulent dans le sol.

Enfin, les poussières de pneus sont également balayées de la route par les projections d'eau et restent en grande partie sur le sol à proximité de la route.

CONCLUSIONS INTERMÉDIAIRES

Les poussières de pneus sont présentes partout. Les concentrations les plus élevées se trouvent dans les sols situés à proximité immédiate des routes et dans les petits cours d'eau qui reçoivent les eaux de ruissellement non filtrées. Si des mesures telles que les puisards et les stations d'épuration permettent de filtrer les eaux de chaussée et de réduire ainsi l'apport de poussières de pneus dans l'environnement, elles restent largement insuffisantes. Il est également clair qu'une part non négligeable est transportée par l'air et peut ainsi contaminer les sols et les eaux loin des routes. Les poussières de pneus et leurs divers additifs font partie du cocktail de particules fines que la population respire quotidiennement.



Les poussières de pneus sont visibles dans la neige.

DES ADDITIFS TOXIQUES DANS LES POUSSIÈRES DE PNEUS

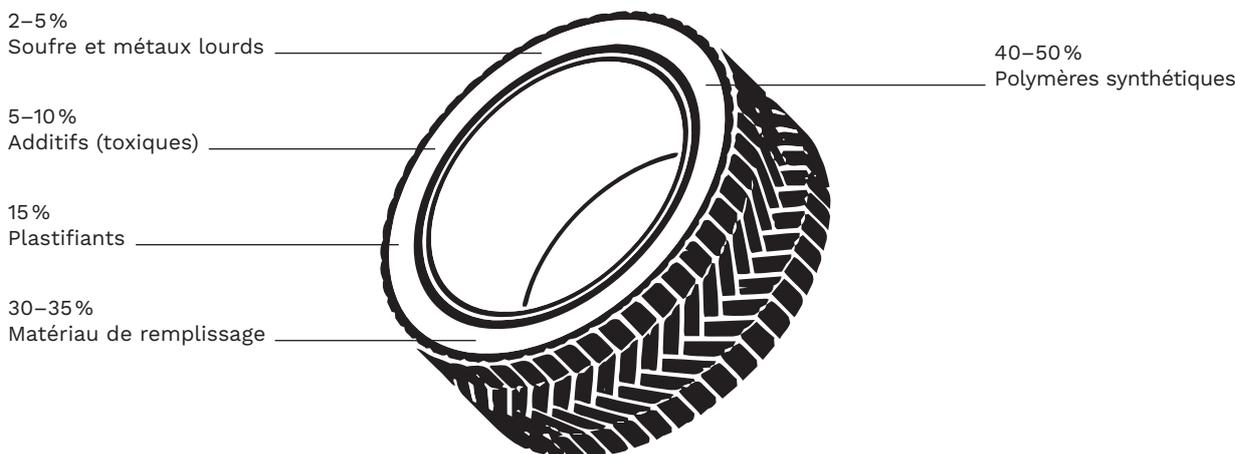
Outre les polymères synthétiques (40 à 50 %), les substances suivantes sont présentes dans les pneus :

- matériau de remplissage comme le noir de carbone, l'oxyde de silicium et le carbonate de calcium (30 à 35 %)
- plastifiants : diverses substances synthétiques issues de l'industrie pétrolière (15 %)
- soufre et métaux lourds comme le zinc, le cuivre, le plomb et le cadmium (2 à 5 %)
- autres additifs tels que des agents de protection, des inhibiteurs d'oxydation et des agents plastifiants (5 à 10 %)

Le noir de carbone contenu dans les poussières de pneus est une source d'émission de substances du groupe des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Il est prouvé que certains d'entre eux peuvent provoquer des cancers et être considérés comme mutagènes, reprotoxiques et toxiques pour le développement.⁹

D'autres composants synthétiques et métaux lourds sont notamment soupçonnés d'être également à l'origine de cancers ou de nuire au développement embryonnaire dans l'utérus.

Composition d'un pneu de voiture



La 6PPD-quinone (6PPD-Q)

La communauté scientifique se penche actuellement sur la 6PPD, un inhibiteur d'oxydation largement utilisé dans la fabrication de pneus, car il permet une prolongation de la durée de vie de ces derniers. Au contact de l'ozone, cette substance se transforme notamment en 6PPD-quinone (6PPD-Q). Il s'agit de la substance qui provoque la mort des saumons argentés dans la région de Seattle (voir plus haut). Cette transformation est favorisée par la lumière du soleil et les températures élevées, ce qui laisse supposer que la 6PPD-Q est présente en plus grande concentration pendant les mois d'été.¹⁰ La demi-vie de la

6PPD-Q dans l'environnement est estimée à environ un mois.¹¹ Outre la 6PPD-Q, plus de 30 autres produits de dégradation de la 6PPD ont été identifiés, dont les effets sur l'environnement sont peu connus.⁸

La diffusion des additifs dans l'environnement

Comme décrit plus haut, les poussières de pneus peuvent être transportées pratiquement partout. Par conséquent, les additifs se retrouvent également dans des endroits isolés, comme par exemple dans l'eau des lacs de montagne. Si, comme au lac de Joux, une route passe à côté du lac, la charge en polluants y est plus élevée.

Lac	Aniline	6PPD-Q	DPG	HMMM
Lac de Toma GR (alt. 2345 m.)	1.55	0.24	0.81	0.07
Lac Ritom TI (alt. 1850 m.)	2.09	-	1.77	0.07
Lac Obersee GL (alt. 982 m.)	2.69	0.17	2.03	0.07
Lac de Joux VD (alt. 1004 m.)	11.33	1.58	70.73	2.26

Concentration moyenne d'additifs issus des poussières de pneus dans l'eau des lacs, en nanogrammes (ng) par litre, à partir de trois mesures respectives (données mises à disposition par le Central Environmental Laboratory de l'EPFL).

ABSORPTION ET EFFETS DES ADDITIFS TOXIQUES

Les poussières de pneus et les additifs pénètrent dans le corps humain par différentes voies: par inhalation sous forme de poussières fines, par l'eau contaminée ou par les aliments qui ont poussé sur un sol contaminé. Il a été prouvé que les légumes à feuilles, comme la salade, sont capables d'absorber de grandes quantités de substances toxiques.^{12,13}

Additifs toxiques dans les légumes-feuilles

Seuls quelques laboratoires spécialisés sont actuellement en mesure de détecter des additifs dans les poussières de pneus. Par conséquent, les données

sont rares. Lorsque des chercheurs de l'université de Vienne ont cultivé des laitues dans de l'eau contaminée par des additifs, ils ont pu mesurer toutes les substances dans les plantes au bout de 14 jours.¹⁴ Par la suite, les chercheurs ont analysé des échantillons de laitues en Suisse pour le compte du magazine K-Tipp. Résultat: des substances toxiques provenant de pneus de voiture étaient également décelables dans presque tous les échantillons, à des concentrations très variables, aussi bien dans les produits cultivés de manière conventionnelle que dans les produits bio.¹⁵

Échantillon	Plante	DPG	5-MBTR	BTZ	6PPD	IPPD	CPPD
CH-01	Chicorée	0.4	–	–	–	–	–
CH-02	Rampon/ doucette	–	–	–	0.3	–	–
CH-03	Rampon/ doucette	–	–	–	0.2	–	–
CH-04	Laitue pommée	2.1	–	14.7	0.4	0.1	–
CH-05	Rampon/ doucette	–	–	18.2	0.3	–	–

Concentration moyenne de polluants dans les légumes-feuilles suisses en nanogrammes (ng) par gramme de matière sèche de trois échantillons chacun.¹³ Comme seule une partie des additifs a pu être extraite de la plante, les valeurs réelles sont probablement plus élevées que celles mesurées. Si la mention «–» apparaît, la concentration est inférieure à la limite de détection.

Pour l'échantillon CH-04, les auteurs de l'étude partent du principe que la laitue a été cultivée à proximité d'une usine de plastique dans la vallée du Rhin saint-galloise, ce qui pourrait expliquer la source de la concentration élevée de polluants. Mais comme le champ se trouve à proximité immédiate de l'autoroute A13, les poussières de pneus transportées par l'autoroute pourraient également expliquer la concentration élevée.

L'étude¹³ publiée par l'université de Vienne a examiné non seulement les légumes-feuilles suisses, mais aussi les légumes-feuilles étrangers vendus

dans les supermarchés suisses, dont la concentration en polluants est similaire à celle des légumes-feuilles cultivés en Suisse. Les auteurs ont ainsi estimé l'absorption moyenne et maximale par personne de cinq substances par la consommation de légumes-feuilles en Suisse. Ceux-ci représentent naturellement seulement une petite partie de l'alimentation totale.

Substance	DPG	BTZ	6PPD	IPPD	CPPD
moyenne	0.3	12	0.2	0.04	–
maximum	4.0	313	2.6	1.1	–

Estimation de la consommation quotidienne de cinq additifs issus des poussières de pneus via la consommation de légumes-feuilles (en ng/personne/jour)¹³

Détection des additifs dans l'organisme

Lorsque les poussières de pneus entrent en contact avec des fluides corporels tels que la salive, le suc gastrique, le liquide intestinal et la bile, on peut y détecter la 6PPD, la 6PPD-Q, la HMMM et divers autres hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).¹⁶ En 2022, la 6PPD et la 6PPD-Q ont été mesurées pour la première fois dans l'urine humaine. Les sujets ont été divisés en trois groupes différents :

les adultes, les femmes enceintes et les enfants. Dans l'étude menée en Chine, les deux substances ont été détectées chez 60 à 100 % des sujets selon le groupe, celui des femmes enceintes présentant les taux les plus élevés. En général, la concentration de 6PPD-Q était plus élevée que celle de 6PPD. Les chercheurs supposent que la 6PPD est rapidement transformée par le foie, tandis que la 6PPD-Q, plus dangereuse, est éliminée par l'urine.¹⁷

Abréviations utilisées lors des mesures :

5-MBTR: 5-méthyl-1H-Benzotriazol

6PPD: N-(1,3-diméthylbutyl)-N'-phényl-p-phénylènediamine

6PPD-Q: 6PPD-quinone / 2-((4-Méthylpentan-2-yl)amino)-5-(phényl amino)cyclohexa-2,5-diène-1,4-dione

BTZ: Benzothiazol

CPPD: N-phényl-N'-cyclohexyl-p-phénylènediamine

DPG: 1,3-Diphenylguanidin

HMMM: Hexa(méthoxyméthyl)mélamine

IPPD: N-isopropyl-N-phényl-4-phénylènediamine

Effets de la 6PPD et de la 6PPD-Q sur la santé

De manière générale, l'estimation de la toxicité des toxines environnementales sur les humains est rendue difficile par une multitude de facteurs. La relation entre la dose d'une toxine et son effet sur les personnes peut varier. Les enfants, les personnes âgées et les femmes enceintes peuvent être plus sensibles à certains produits chimiques.

La durée de l'exposition joue un rôle décisif et les êtres humains sont toujours exposés simultanément à un cocktail de produits chimiques qui peuvent s'influencer mutuellement. Les éventuelles expériences sur les animaux donnent seulement une idée limitée de ce qui se passe chez les humains, car les processus biologiques sont différents. Globalement, l'évaluation de la toxicité des polluants environnementaux sur le corps humain requiert une approche interdisciplinaire qui tient compte des facteurs toxicologiques, épidémiologiques, génétiques et environnementaux et fournit des résultats fiables uniquement sur de longues périodes.

Comme mentionné au début de cette fiche thématique, la recherche sur les poussières de pneus s'est intensifiée à partir de 2020 en raison de la forte diminution de la population de saumons argentés dans la région de Seattle.

Diverses études ont été menées sur des organismes aquatiques, notamment des poissons, et sur l'additif 6PPD-Q, considéré comme particulièrement préoccupant. Il a notamment été démontré que le 6PPD-Q a un effet sur la concentration de neurotransmetteurs dans le cerveau des poissons ainsi que sur l'expression de l'ARNm de gènes liés aux neurotransmetteurs.¹⁸

La même étude interpelle car elle a pu démontrer que le 6PPD-Q augmente la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique chez les cellules humaines.¹⁸ Les inflammations dans le tissu ner-

veux sont soupçonnées d'être, entre autres, un facteur de risque pour le trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH).²⁰ Une modification de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique est également associée à des maladies psychiques telles que la dépression et la schizophrénie.²¹ La découverte que le liquide céphalo-rachidien de patients atteints de la maladie de Parkinson présentait une concentration de 6PPD-Q environ deux fois plus élevée que celle d'un groupe de comparaison en bonne santé fournit une indication supplémentaire sur les risques potentiels de la 6PPD-Q pour le cerveau humain.²²

Des souris nourries quotidiennement avec de petites quantités de 6PPD-Q ont montré une perturbation de la barrière intestinale dans l'intestin grêle après seulement 21 jours. En tant qu'agoniste des récepteurs cannabinoïdes, le 6PPD-Q pourrait inhiber l'absorption de certains nutriments dans la digestion et provoquer une inflammation intestinale.²³

Autres effets potentiels des poussières de pneus

Des dommages à l'ADN et des effets inflammatoires ont été observés dans des cultures de cellules pulmonaires humaines et de macrophages humains (cellules immunitaires).²⁴ Une autre étude a également observé une augmentation significative de la mortalité cellulaire et des dommages à l'ADN lorsque des cellules pulmonaires humaines ont été exposées à des extraits de poussières de pneus.²⁵

Substance chimique	CAS No.	Phrases de risque associées																							
		H 301	H 302	H 311	H 312	H 314	H 315	H 317	H 318	H 319	H 320	H 331	H 332	H 335	H 341	H 351	H 360	H 361	H 372	H 400	H 410	H 411	H 412		
		Toxique en cas d'ingestion																							
		Nocif en cas d'ingestion																							
		Toxique par contact cutané																							
		Nocif par contact cutané																							
		Provoque des brûlures de la peau et de graves lésions des yeux																							
		Provoque une irritation cutanée																							
		Peut provoquer une allergie cutanée																							
		Provoque de graves lésions des yeux																							
		Provoque une grave irritation oculaire																							
		Provoque une irritation des yeux																							
		Toxique par inhalation																							
		Nocif par inhalation																							
		Peut irriter les voies respiratoires																							
		Susceptible d'induire des anomalies génétiques																							
		Susceptible de provoquer le cancer																							
		Peut nuire à la fertilité ou au fœtus																							
		Susceptible de nuire à la fertilité ou au fœtus																							
		Risque avéré d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée																							
		Très toxique pour les organismes aquatiques																							
		Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme																							
		Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme																							
		Nocif pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme																							
6PPD	793-24-8		x					x									x			x					
6PPD-Q	2754428-18-5		x																		x				
HMMM	3089-11-0									x															
DPG	102-06-7	x					x			x				x				x					x		
BTZ	95-16-9	x		x						x			x												
Anilin	62-53-3	x		x				x	x			x		x	x				x	x	x				
C-DMU	31468-12-9		x							x															
D-DPU	85-98-3		x																					x	
M-DCA	7560-83-0	x		x		x				x													x		
NCBA	28291-75-0		x				x			x						x									
24MoBT	4225-26-7	x			x		x			x			x		x										
2-ABT	136-95-8		x							x															
2-OHBT	934-34-9		x		x								x												
2-MTBT	615-22-5						x			x															
5-MBTR	136-85-6		x			x				x															
BTR	95-14-7		x							x														x	
2-MBT	149-30-4							x													x	x			
DCHA	101-83-7	x		x		x															x	x			
2-PBM	716-79-0		x				x			x						x									
IPPD	101-72-4		x							x											x	x			
77PD	3081-14-9		x							x											x	x			
DPPD	74-31-7									x															x
X44PD	101-96-2	x				x				x	x										x	x			
CPPD	101-87-1		x								x										x		x		
DNPD	93-46-9						x	x		x															
IPPD-Q	68054-73-9		x							x											x	x			
CPPD-Q	68054-78-4		x				x			x															

Liste incomplète des additifs connus provenant des poussières de pneus et phrases de risque associées, si elles sont connues.^{26,27} De nombreuses autres substances et produits de dégradation provenant des poussières de pneus ont été découverts, mais leur toxicité n'a pas été analysée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La recherche sur les additifs toxiques dans les poussières de pneus en est encore à ses débuts. La toxicologie environnementale est complexe et il faut souvent de nombreuses années avant de pouvoir démontrer le risque d'une seule substance ou l'interaction nocive de plusieurs substances. Pourtant, les connaissances actuelles mettent déjà en lumière des indices inquiétants. Non seulement le trafic routier provoque des accidents, du bruit, de grandes quantités de microplastiques et occupe environ 2% du sol suisse, mais on peut aussi supposer que diverses maladies psychiques, des inflammations du tube digestif et des organes respiratoires pourraient être aggravées directement ou indirectement par l'exposition chronique aux métaux lourds et aux additifs souvent toxiques contenus dans les poussières de pneus. Nous les respirons ou les ingérons via notre alimentation et il est en fait impossible de s'en protéger.

La bonne nouvelle est que nombre de ces additifs ont une demi-vie plutôt courte dans la nature. Une réduction du trafic routier et une diminution concomitante des émissions de poussières de pneus permettraient de réduire rapidement les nuisances pour les personnes et l'environnement. C'est une raison suffisante pour ne pas encourager davantage le trafic individuel motorisé par une nouvelle extension du réseau routier, mais pour miser systématiquement sur un réseau de transports publics attrayant.

RÉFÉRENCES

La dernière visite de ces liens remonte au 5 septembre 2024.

- 1 Ambrosini, Roberto, et al., 2019. First evidence of microplastic contamination in the supraglacial debris of an alpine glacier. *Environmental Pollution*, 2019, vol 253, p. 297–301.
- 2 Tian, Z., et al., 2021. A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science*, 2021, 371(6525), p. 185–189.
- 3 Sieber, Ramona, et al., 2020. Dynamic probabilistic material flow analysis of rubber release from tires into the environment. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 258.
- 4 <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-77082.html>
- 5 Dimopoulos Eggenschwiler, P., et al., 2022. Reifenabrieb als grösste Quelle von Mikroplastik – Massnahmen zur Verminderung. EMPA Grundlagenbericht.
- 6 VSS/ASTRA, 2021. Optimierung einer Nachrüsteinheit für Strassenabläufe (Schlammsammler). Forschungsprojekt VSS 2017/225 auf Antrag des Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).
- 7 Rausch, Juanita, et al., 2020. Charakterisierung und Herkunftsbestimmung von Grobstaubpartikeln im PM10, REM/EDX Einzelpartikelanalytik an den NABEL-Standorten Bern Bollwerk und Zürich Kaserne. BAFU Schlussbericht.
- 8 Seiwert, Bettina, et al., 2022. Abiotic oxidative transformation of 6-PPD and 6-PPD quinone from tires and occurrence of their products in snow from urban roads and in municipal wastewater. *Water Research*, 2022, vol 212.
- 9 OFAG, 2020. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Factsheet.
- 10 Huang, Wei, et al., 2021. Occurrence of Substituted p-Phenylenediamine Antioxidants in Dusts. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2021, 8, 5, 381–385.
- 11 Fohet, Loélia, et al., 2023. Time-concentration profiles of tire particle additives and transformation products under natural and artificial aging. *Science of The Total Environment*, 2023, vol 859, Part 1.
- 12 Ben Mordechay, Evyatar, et al., 2022. Fate of contaminants of emerging concern in the reclaimed wastewater-soil-plant continuum. *Science of The Total Environment*, vol 822, 2022.
- 13 Sherman, Anya, et. al., 2024. Uptake of tire-derived compounds in leafy vegetables and implications for human dietary exposure. *Front. Environ. Sci.*, 2024, vol 12.
- 14 Castan, Stephanie, et al., 2023. Uptake, Metabolism, and Accumulation of Tire Wear Particle-Derived Compounds in Lettuce. *Environ. Sci. Technol.*, 2023, 57, 168–178.
- 15 Schildknecht, Andreas, 2023. Test: Chemikalien aus Autopneus landen im Salat. K-Tipp 13/2023.
- 16 Armada, Daniel, et al., 2023. Assessment of the bioaccessibility of PAHs and other hazardous compounds present in recycled tire rubber employed in synthetic football fields. *Science of The Total Environment*, 2023, vol 857, Part 2.
- 17 Du, Bibai, et al., 2022. First Report on the Occurrence of N -(1,3-Dimethylbutyl)- N '-phenyl- p -phenylenediamine (6PPD) and 6PPD-Quinone as Pervasive Pollutants in Human Urine from South China. *Environmental Science & Technology Letters*, 2022, vol 9.
- 18 Liao, Xiao-Liang, et al., 2024. Neurological impairment is crucial for tire rubber-derived contaminant 6PPDQ-induced acute toxicity to rainbow trout. *Science Bulletin*, 2024, vol 69, Issue 5, p. 621–635.
- 19 Sweeney, Melanie D., et al., 2018. Blood–brain barrier breakdown in Alzheimer disease and other neurodegenerative disorders. *Nat Rev Neurol* 14, 2018, 133–150.
- 20 Dunn Geoffrey A., et al., 2019. Neuroinflammation as a risk factor for attention deficit hyperactivity disorder. *Pharmacol Biochem Behav.*, 2019, 182:22-34.
- 21 Binli Shang, Binli, et al., 2024. Higher Blood-brain barrier permeability in patients with major depressive disorder identified by DCE-MRI imaging. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 2024, vol 337.
- 22 Fang, Jiacheng, et al., 2024. 6PPD-quinone exposure induces neuronal mitochondrial dysfunction to exacerbate Lewy neurites formation induced by α -synuclein preformed fibrils seeding. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, vol 465.
- 23 Yan Yang, Yan, et al., 2024. Environmentally realistic dose of tire-derived metabolite 6PPD-Q exposure causes intestinal jejunum and ileum damage in mice via cannabinoid receptor-activated inflammation. *Science of The Total Environment*, 2024, vol 918.
- 24 Karlsson, Hanna L., et al., 2008. Mechanisms Related to the Genotoxicity of Particles in the Subway and from Other Sources. *Chem. Res. Toxicol.*, 2008, 21, 3, 726–731.
- 25 Gualtieri, Maurizio, et al., 2005. Toxicity of tire debris extracts on human lung cell line A549. *Toxicology in Vitro*, 2005, vol 19, Issue 7.
- 26 <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>
- 27 <https://www.sigmaldrich.com/CH/fr>



GREENPEACE

Impressum

Abrasion des pneus: donne-nous aujourd'hui notre poison quotidien
Greenpeace Suisse, septembre 2024

Auteur: Nathan Solothurnmann

Remerciements:

Florian Breider, CEL EPFL, Lausanne, CH
Kevin Bridgen & David Santillo, Greenpeace Science Unit, Exeter, UK
Andreas Schildknecht, K-Tipp, Zürich, CH

Traduction: Mathias Schlegel

Mise en page: Marjeta Morinc

Photos: © Shadrach Warid / Unsplash (Photo de couverture), © Timmitom (p.5),
© Shutterstock (p.12)

Greenpeace Suisse, Badenerstrasse 171, case postale, CH-8036 Zurich
suisse@greenpeace.org

Greenpeace finance son travail de défense de l'environnement uniquement
par des dons de particuliers et de fondations.
Compte pour les dons: IBAN CH07 0900 0000 8000 6222 8