

Analyse des mécanismes d'usure des pneus et d'émission de particules par instrumentation et modélisation du contact pneu/chaussée: Une approche tribologique pour optimiser la durabilité et réduire l'impact environnemental.

Analysis of Tire Wear and Emission Mechanisms through Instrumentation and Modeling of the Tire/Road Contact: A Tribological Approach to Optimizing Tire Durability and Reducing Environmental Impact.

Directeur de Thèse : Malal KANE
Co-directeur de Thèse : Bogdan MURESAN-PASLARU
Université Gustave Eiffel
Département/Laboratoire : AME/Ease

Mots-clés : Usure des pneus, Adhérence, Contact pneu/chaussée, Modélisation numérique, Tribologie, Émissions de particules

1. Contexte et enjeux

La sécurité routière et la performance des véhicules dépendent en grande partie de l'intégrité des pneus. Avec ~300 millions de pneus usés générés chaque année et une perte de masse de 1,0-1,5 kg au cours de leur vie [Grigoratos et al., 2018 ; EU, 2023], l'usure des pneus constitue non seulement un enjeu économique majeur, mais aussi une source significative de pollution et de risques pour la santé publique [Bouredji et al, 2023, 2024 ; Mayer et al., 2024]. En effet, lors du contact entre le pneu et la chaussée, le frottement induit une dégradation progressive des matériaux et la formation de gaz et de particules toxiques. Ces particules, avec des tailles qui varient de quelques nanomètres à plusieurs centaines de micromètres, contiennent des milliers de composés chimiques dont certains ont une toxicité avérée (hydrocarbures aromatiques polycycliques, benzothiazoles, métaux lourds tels que zinc et plomb, formaldéhydes...) et dont l'inhalation chronique induit des irritations respiratoires, des perturbations endocriniennes, des problèmes cardiaques, ainsi que des cancers [Baltruschat et al., 2020; EEA, 2022; WHO, 2011].

2. Interactions à l'interface pneu/chaussée

Le phénomène d'usure de ces pneus est étroitement lié aux interactions complexes à l'interface pneu/chaussée [Schallamach, 1958; Diani et al., 2009; Runge et al., 2021; Zhang et al., 2023]. La pression exercée par le pneu en mouvement sur la chaussée, combinée aux textures à leurs surfaces, engendre des zones de contact non uniformes qui subissent des déformations locales et des micro-frictions. Ces phénomènes mécaniques induisent à la fois de l'abrasion¹ et des phénomènes

¹ L'abrasion désigne l'usure d'une surface due à des frottements répétés ou à des contacts mécaniques avec une autre surface ou des particules. Dans le contexte des pneumatiques, l'abrasion se traduit par l'élimination progressive du caoutchouc lorsqu'il est en contact avec la chaussée, entraînant une dégradation du matériau. Ce phénomène est souvent accentué par la présence de particules tierces ou par des conditions de charge élevées.

d'adhérence². De plus, des variables dynamiques telles que la vitesse du véhicule, la contamination par les dépôts présents sur la chaussée ou générés en amont du contact, la fatigue mécanique et les variations de température superficielle influencent la viscosité et l'élasticité de la bande de roulement, modifiant ainsi la répartition des contraintes et le mode de génération des émissions. La texture de la chaussée joue à cet égard un rôle déterminant et dual. Ses micro-aspérités, indispensables pour assurer une adhérence optimale lors des phases de freinage ou de virage, intensifie également les contraintes locales, accélérant l'usure des pneus [Lowne et al., 1970 ; Flintsch et al., 2003]. Cette dualité, amplifiée par la présence éventuelle d'un « troisième corps » (particules tierces formées par l'interaction entre les émissions et les contaminants présents à l'interface pneu-chaussée et agissant comme lubrifiants ou abrasifs), souligne la nécessité d'une approche intégrée basée sur l'étude en laboratoires des mécanismes de contact et leur modélisation numérique [Fillot et al., 2007].

3. Problématique

Malgré les progrès réalisés par les études tribologiques, mécaniques et thermiques, la plupart des modèles existants abordent ces phénomènes de manière isolée [Tong et al., 2025 ; Jia et al., 2025]. Il persiste ainsi une lacune dans l'intégration globale des processus multi-échelles et multi-physiques qui régissent la dégradation réelle des pneumatiques et l'émission associée de composés gazeux ou particules de pneu. Les questions spécifiques à traiter sont les suivantes :

- **Mécanismes d'usure** : Quels processus (abrasion, déformation, fatigue, effets thermiques et photochimiques) interviennent, à la fois au niveau microscopique et macroscopique, pour conduire à l'usure des pneus et, au-delà, à l'émission de particules ?
- **Paramètres critiques** : Quels sont les facteurs clés (pression de contact, texture de la chaussée, vitesse, température) qui influencent à l'échelle microscopique la répartition des contraintes et la dégradation du caoutchouc ?
- **Modèles existants** : Quelles sont les limites des approches actuelles, notamment en termes d'intégration des effets dynamiques ?
- **Compromis adhérence/usure** : Comment développer un modèle prédictif intégré capable d'identifier un compromis optimal entre une adhérence suffisante pour la sécurité routière et la minimisation de l'usure, afin de réduire les émissions de particules polluantes ?

4. Objectifs de la recherche

L'objectif principal de la thèse est d'acquérir une compréhension approfondie des mécanismes fondamentaux responsables de l'usure et des émissions des pneus. Cette compréhension servira de socle expérimental à l'élaboration d'un modèle numérique prédictif de la qualité du contact pneu/chaussée et des propriétés physiques des émissions. Cette démarche multidisciplinaire vise à :

² L'adhérence fait référence à la capacité de deux surfaces en contact à rester collées ou à s'accrocher l'une à l'autre en raison des forces intermoléculaires (comme les forces de Van der Waals) ou des liaisons chimiques. Dans le cas du contact pneu/chaussée, l'adhérence est cruciale car elle permet d'assurer une bonne traction, indispensable pour la sécurité routière, notamment lors des phases de freinage et de virage. Une bonne adhérence favorise le grip, tandis qu'une adhérence excessive peut également augmenter l'usure par friction.

- **Analyser les mécanismes d'usure :** Étudier les processus de déformation, d'abrasion, ainsi que les effets thermiques qui conduisent à la dégradation des pneus.
- **Identifier les paramètres critiques :** Déterminer le rôle de la pression de contact, de la texture de la chaussée, de la vitesse, de la température et du troisième corps sur la répartition des contraintes.
- **Décrire leurs effets sur les émissions :** Analyser comment les mécanismes d'usure et les paramètres critiques modulent la quantité, la granulométrie et la composition des particules de pneu.
- **Développer et calibrer un modèle numérique :** Intégrer les phénomènes multi-échelles et multi-physiques dans un modèle capable de simuler les mécanismes d'usure ainsi que la génération et l'émission de particules.
- **Optimiser la texture de la chaussée :** Identifier, via le modèle, un compromis optimal garantissant une adhérence suffisante tout en limitant l'usure des pneus et les émissions particulaires.

5. Méthodologie

Pour atteindre cet objectif, la recherche combinera approches expérimentales et numériques :

- **Analyse expérimentale :**
 - Sélection et préparation d'échantillons de chaussées et de pneus représentatifs.
 - Réalisation d'essais tribologiques pour simuler le contact pneu/chaussée et mesurer les coefficients de frottement, les taux d'usure et suivre les émissions de particules et leur granulométrie.
 - Caractérisation des surfaces usées et des émissions par profilométrie, microscopie électronique à balayage (MEB) et analyse chimique (inorganiques (Zn, Ba, Hg,...), organiques (.
- **Modélisation numérique :**
 - Développement d'un modèle basé sur le Dynamic Friction Model (DFM) [Kane & Edmondson, 2022] pour simuler le contact, intégrant les propriétés non linéaires de la bande de roulement et la texture tridimensionnelle de la chaussée.
 - Intégration d'un module dédié à la simulation de l'usure de la bande de roulement, au détachement et à la circulation / rétention des fragments à l'interface pneu-chaussée.
 - Validation et ajustement du modèle par comparaison avec les données expérimentales.
 - Réalisation d'études paramétriques pour explorer l'influence des variables critiques et optimiser la texture de la chaussée.
- **Évaluation environnementale :**
 - Caractérisation physicochimique des particules générées lors des essais.
 - Analyse des mécanismes et des conditions de génération sur la nature, la taille et la composition chimique des émissions.

6. Perspectives et applications

Ce travail de recherche permettra non seulement de mieux comprendre les mécanismes d'usure des pneus et les émissions hors échappement, mais aussi d'ouvrir la voie à diverses applications concrètes :

- Optimisation de la conception des pneus et des chaussées pour améliorer la sécurité routière.

- Prolongation de la durée de vie des pneumatiques, avec une réduction des coûts de renouvellement.
- Réduction de l'impact environnemental en limitant la production de particules polluantes.
- Elaboration d'une banque d'échantillons de particules générées dans différentes conditions qui simulent différents types d'émissions : véhicules légers (thermiques ou électriques), de poids lourds, de mobilité douce.
- Les particules collectées pourront être exploitées dans divers projets de recherche pour évaluer : leur potentiel de dispersion (via l'évolution de leurs tailles et de leur densité), de stabilité/mobilité environnementale (via l'étude de leur (bio)dégradation ou du relargage d'adjuvants), d'effets sur la santé (au travers de la mise en contact avec des cellules du système respiratoire ou de différents organes), etc.

7. Profil du candidat

Pour mener à bien ce projet, le candidat devra présenter un profil multidisciplinaire incluant :

- **Compétences en ingénierie mécanique ou génie civil et environnement** avec une solide formation en tribologie et développement instrumental.
- **Expertise en modélisation numérique**, notamment via la méthode des différences finis ou d'autres techniques de simulation multi-échelle.
- **Sensibilité aux enjeux environnementaux**, avec une compréhension des problématiques liées aux émissions de particules et des outils pour les caractériser (comptage optique / par impaction, MEB, ICP, GC-MS, profilométrie...).
- **Aptitudes à la recherche multidisciplinaire** et à la collaboration avec des experts de domaines variés (mécanique, matériaux, environnement).

Références

- Baltruschat B.B., Kocher B., Stock F., Reifferscheid G., 2020. Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. STOTEN, 733: Article 137823. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823>
- Bouredji A., Pourchez J., Forest V., 2023 Biological effects of Tire and Road Wear Particles (TRWP) assessed by in vitro and in vivo studies – A systematic review. STOTEN, 894: Article 164989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164989>
- Bouredji A., Muresan B., Truong X.-T., Lumière L., Pourchez J., Forest V., 2024. An in vitro comparison of the toxicological profiles of ground tire particles (TP) and actual tire and road wear particles (TRWP) emissions. Environ. Int., 190: Article 108885. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108885>
- Diani J., Fayolle B., Gilormini P., 2009. A review on the Mullins effect. Eur. Polym. J., 45: 601-612. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.11.017>

- EU, 2023. LIFE project aims to revolutionise Europe's approach to recycling end-of-life tyres. ECI-EEA. Online publication. https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/life-project-aims-revolutionise-europes-approach-recycling-end-life-tyres-2023-12-14_en
- Fillot N., Iordanoff I., Berthier Y., 2007. Wear modeling and the third body concept. *Wear*, 262: 949–957. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.10.011>
- Flintsch G.W., de León E., McGhee K.K., Ai-Qadi I.L., 2003. Pavement surface macrotexture measurement and applications. *Transp. Res. Record*, 1860: 168-177. <https://doi.org/10.3141/1860-19>
- Grigoratos T., Gustafsson M., Eriksson O., Martini G., 2018. Experimental investigation of tread wear and particle emission from tyres with different treadwear marking. *Atmos. Environ.*, 182: 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.049>
- Jia Z., Yin J., Fang T., Jiang Z., Zhong C., Cao Z., Wu L., Wei N., Men Z., Yang L., Zhang Q., Mao H., 2025. Machine learning helps reveal key factors affecting tire wear particulate matter emissions. *Env. Int.*, 195 : Article 109224. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109224>
- Lowne R.W., 1970. The effect of road surface texture on tyre wear. *Wear*, 15: 57–70. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(70\)90186-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(70)90186-9)
- Manyo E.Y., 2019. Modélisation avancée du contact pneu-chaussée pour l'étude des dégradations des chaussées en surface. Thèse de doctorat, Université de Limoges. HAL ID : tel-02297090.
- Mathissen M., Scheer V., Vogt R., Benter T., 2011. Investigation on the potential generation of ul-trafine particles from the tire-road interface. *Atmos. Environ.*, 45: 6172-6179. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.032>
- Mayer P.M., Moran K.D., Miller E.L., Brander S.M., Harper S., Garcia-Jaramillo M., Carrasco-Navarro V., Ho K.T., Burgess R.M., Hampton L.M.T., Granek E.F., 2024. Where the rubber meets the road: Emerging environmental impacts of Tire Wear particles and their chemical cocktails. *STOTEN*, 927: Article 171153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171153>
- Runge S., Ignatyev P.A., Wangenheim M., Bederna C., Wies B., Wallaschek J., 2021. Transient abra-sion on a rubber sample due to highly dynamic contact conditions. *Wear*: Article 203848. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203848>
- Schallamach A., 1958. Friction and abrasion of rubber. *Rubber Chem. Technol.*, 31: 982-1014. <https://doi.org/10.5254/1.3542365>
- Tong Z., Cao Y., Wang R., Chen Y., Li Z., Lu J., Yang S., 2025. Machine learning-driven intelligent tire wear detection system. *Measurement*, 242: Article 115848. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115848>

- Zhang M., Yin H., Tan J., Wang X., Yang Z., Hao L., Du T., Niu Z., Ge Y., 2023. A comprehensive re-view of tyre wear particles: Formation, measurements, properties, and influencing factors. Atmos. Environ., 297: Article 119597. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119597>
- Kane, M., & Edmondson, V. (2022). Tire/road friction prediction: Introduction a simplified numerical tool based on contact modelling. Vehicle system dynamics, 60(3), 770-789.

Calendrier prévisionnel

Période / Mois	Activités principales
1 à 3	- Revue approfondie de la littérature sur l'usure des pneus et les émissions associées. - Identification des lacunes et formulation initiale de la problématique.
4 à 6	- Définition précise des objectifs de recherche. - Formulation des hypothèses. - Élaboration de la méthodologie expérimentale et numérique.
7 à 9	- Sélection des matériaux et préparation des échantillons (pneus et échantillons de chaussée et bande de roulement). - Mise en place des protocoles expérimentaux et des outils de modélisation.
10 à 12	- Réalisation des essais pilotes pour valider les protocoles. - Ajustement des paramètres expérimentaux et du modèle numérique en fonction des premiers résultats.
13 à 18	- Conduite des expériences principales en laboratoire. - Collecte de données sur l'usure et d'échantillons de particule générées et/ou émises en fonction des variations de texture, vitesse et température...
19 à 22	- Analyse des données et des échantillons particules d'usure : densité, granulométrie, forme, composition chimique,...
23 à 24	- Analyse approfondie des données expérimentales. - Validation ou ajustement des hypothèses initiales.
25 à 27	- Développement et calibration du modèle numérique prédictif (méthode des éléments finis ou approche multi-échelle). - Comparaison avec les résultats expérimentaux.
28 à 30	- Réalisation d'études paramétriques et simulations numériques pour explorer différents scénarios (effet des variables critiques sur l'usure et l'émission).
31 à 33	- Rédaction des chapitres de la thèse intégrant les résultats expérimentaux, les modélisations numériques et l'analyse environnementale.
Soutenance	

Analysis of Tire Wear and Emission Mechanisms through Instrumentation and Modeling of the Tire/Road Contact: A Tribological Approach to Optimizing Tire Durability and Reducing Environmental Impact.

Keywords: Tire wear, Adhesion, Tire/road contact, Numerical modeling, Tribology, Particle emissions

1. Context and Issues

Road safety and vehicle performance largely depend on tire integrity. With approximately 300 million worn tires generated each year and a mass loss of 1.0–1.5 kg over their lifetime [Grigoratos et al., 2018; EU, 2023], tire wear represents not only a major economic challenge but also a significant source of pollution and public health risk [Bouredji et al., 2023, 2024; Mayer et al., 2024]. Indeed, at the tire/road contact, friction induces a progressive degradation of materials and the formation of toxic gases and particles. These particles, ranging in size from a few nanometers to several hundred micrometers, contain thousands of chemical compounds—some of which are proven toxic (polycyclic aromatic hydrocarbons, benzothiazoles, heavy metals such as zinc and lead, formaldehyde, etc.)—and their chronic inhalation leads to respiratory irritations, endocrine disruptions, heart problems, and cancers [Baltruschat et al., 2020; EEA, 2022; WHO, 2011].

2. Interactions at the Tire/Road Interface

The wear phenomenon of tires is closely linked to the complex interactions at the tire/road interface [Schallamach, 1958; Diani et al., 2009; Runge et al., 2021; Zhang et al., 2023]. The pressure exerted by the moving tire on the road, combined with the surface textures, creates non-uniform contact zones that undergo local deformations and micro-friction. These mechanical phenomena induce both abrasion and adhesion effects. Moreover, dynamic variables such as vehicle speed, contamination from deposits on the road or generated upstream of the contact, mechanical fatigue, and variations in surface temperature influence the viscosity and elasticity of the tread, thereby modifying the stress distribution and the mode of emission generation. The road texture plays a decisive and dual role: its micro-roughness is essential for ensuring optimal adhesion during braking or turning, yet it also intensifies local stresses, accelerating tire wear [Lowne et al., 1970; Flintsch et al., 2003]. This duality, further amplified by the potential presence of a “third body” (secondary particles formed through the interaction between emissions and contaminants at the tire/road interface that act as lubricants or abrasives), highlights the need for an integrated approach based on laboratory studies of contact mechanisms and their numerical modeling [Fillot et al., 2007].

3. Problem Statement

Despite advances in tribological, mechanical, and thermal studies, most existing models address these phenomena in isolation [Tong et al., 2025; Jia et al., 2025]. There remains a gap in the overall integration

of multi-scale and multi-physical processes that govern the actual degradation of tires and the associated emission of gaseous compounds or tire particles. Specific questions to address include:

- **Wear mechanisms:** What processes (abrasion, deformation, fatigue, thermal, and photochemical effects) occur at both microscopic and macroscopic levels to lead to tire wear and, subsequently, to particle emission?
- **Critical parameters:** What are the key factors (contact pressure, road texture, speed, temperature) that influence the microscopic distribution of stresses and the degradation of rubber?
- **Existing models:** What are the limitations of current approaches, particularly regarding the integration of dynamic effects?
- **Adhesion/wear trade-off:** How can an integrated predictive model be developed to identify an optimal compromise between sufficient adhesion for road safety and the minimization of wear, thereby reducing the emission of pollutant particles?

4. Research Objectives

The main objective of the thesis is to acquire an in-depth understanding of the fundamental mechanisms responsible for tire wear and emissions. This understanding will form the experimental basis for developing a predictive numerical model of tire/road contact quality and the physical properties of emissions. This multidisciplinary approach aims to:

- **Analyze wear mechanisms:** Study the processes of deformation, abrasion, and thermal effects that lead to tire degradation.
- **Identify critical parameters:** Determine the role of contact pressure, road texture, speed, temperature, and the third body in stress distribution.
- **Describe their effects on emissions:** Analyze how wear mechanisms and critical parameters modulate the quantity, particle size distribution, and chemical composition of tire particles.
- **Develop and calibrate a numerical model:** Integrate multi-scale and multi-physical phenomena into a model capable of simulating both tire wear mechanisms and the generation and emission of particles.
- **Optimize road texture:** Identify, via the model, an optimal compromise that ensures sufficient adhesion while limiting tire wear and particulate emissions.

5. Methodology

To achieve these objectives, the research will combine experimental and numerical approaches:

- **Experimental Analysis:**
 - Selection and preparation: Choose representative samples of road surfaces and tires.
 - Tribological testing: Conduct experiments to simulate tire/road contact and measure friction coefficients, wear rates, and monitor particle emissions and their granulometry.

- Surface and emission characterization: Use profilometry, scanning electron microscopy (SEM), and chemical analyses (for inorganics such as Zn, Ba, Hg; organics, etc.).
- **Numerical Modeling:**
 - Model development: Develop a model based on the Dynamic Friction Model (DFM) [Kane & Edmondson, 2022] that simulates the contact by integrating the non-linear properties of the tread and the three-dimensional texture of the road.
 - Wear simulation module: Integrate a dedicated module for simulating tread wear, detachment, and the circulation/retention of fragments at the tire/road interface.
 - Validation and calibration: Validate and adjust the model by comparing with experimental data.
 - Parametric studies: Conduct studies to explore the influence of critical variables and optimize road texture.
- **Environmental Assessment:**
 - Physicochemical characterization: Analyze the particles generated during tests to assess their nature, size, and chemical composition.
 - Mechanism analysis: Examine the conditions and mechanisms leading to particle emission.

6. Perspectives and Applications

This research will not only improve the understanding of tire wear mechanisms and non-exhaust emissions but also pave the way for concrete applications:

- Optimization of tire and road design: Enhance road safety through better design of tires and road surfaces.
- Extended tire lifespan: Reduce replacement costs by prolonging tire life.
- Environmental impact reduction: Limit pollutant particle production.
- Database creation: Establish a comprehensive library of particles generated under various conditions simulating emissions from light vehicles (thermal or electric), heavy vehicles, and alternative mobility.
- Health and environmental studies: Use the collected particles for research on dispersion potential, environmental stability/mobility, and potential health effects.

7. Candidate Profile

To successfully carry out this project, the candidate should have a multidisciplinary background including:

- Engineering skills: A Master's degree in mechanical or civil/environmental engineering with a strong foundation in tribology and instrumentation.
- Numerical modeling expertise: Proficiency in numerical simulation methods (e.g., finite difference or multi-scale techniques).

- Environmental sensitivity: An understanding of issues related to particle emissions and experience with characterization tools (optical or impaction counting, SEM, ICP, GC-MS, profilometry).
- Collaborative aptitude: Ability to work in a multidisciplinary research environment, collaborating with experts in mechanics, materials science, and environmental studies.

References

- Baltruschat B.B., Kocher B., Stock F., Reifferscheid G., 2020. Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. *STOTEN*, 733: Article 137823. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823>
- Bouredji A., Pourchez J., Forest V., 2023 Biological effects of Tire and Road Wear Particles (TRWP) assessed by in vitro and in vivo studies – A systematic review. *STOTEN*, 894: Article 164989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164989>
- Bouredji A., Muresan B., Truong X.-T., Lumière L., Pourchez J., Forest V., 2024. An in vitro comparison of the toxicological profiles of ground tire particles (TP) and actual tire and road wear particles (TRWP) emissions. *Environ. Int.*, 190: Article 108885. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108885>
- Diani J., Fayolle B., Gilormini P., 2009. A review on the Mullins effect. *Eur. Polym. J.*, 45: 601-612. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.11.017>
- EU, 2023. LIFE project aims to revolutionise Europe's approach to recycling end-of-life tyres. ECI-EEA. Online publication. https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/life-project-aims-revolutionise-europes-approach-recycling-end-life-tyres-2023-12-14_en
- Fillot N., Iordanoff I., Berthier Y., 2007. Wear modeling and the third body concept. *Wear*, 262: 949–957. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.10.011>
- Flintsch G.W., de León E., McGhee K.K., Ai-Qadi I.L., 2003. Pavement surface macrotexture measurement and applications. *Transp. Res. Record*, 1860: 168-177. <https://doi.org/10.3141/1860-19>
- Grigoratos T., Gustafsson M., Eriksson O., Martini G., 2018. Experimental investigation of tread wear and particle emission from tyres with different treadwear marking. *Atmos. Environ.*, 182: 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.049>
- Jia Z., Yin J., Fang T., Jiang Z., Zhong C, Cao Z, Wu L., Wei N., Men Z., Yang L., Zhang Q., Mao H., 2025. Machine learning helps reveal key factors affecting tire wear particulate matter emissions. *Env. Int.*, 195 : Article 109224. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109224>
- Lowne R.W., 1970. The effect of road surface texture on tyre wear. *Wear*, 15: 57–70. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(70\)90186-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(70)90186-9)

- Manyo E.Y., 2019. Modélisation avancée du contact pneu-chaussée pour l'étude des dégradations des chaussées en surface. Thèse de doctorat, Université de Limoges. HAL ID : tel-02297090.
- Mathissen M., Scheer V., Vogt R., Benter T., 2011. Investigation on the potential generation of ul-trafine particles from the tire-road interface. *Atmos. Environ.*, 45: 6172-6179. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.032>
- Mayer P.M., Moran K.D., Miller E.L., Brander S.M., Harper S., Garcia-Jaramillo M., Carrasco-Navarro V., Ho K.T., Burgess R.M., Hampton L.M.T., Granek E.F., 2024. Where the rubber meets the road: Emerging environmental impacts of Tire Wear particles and their chemical cocktails. *STOTEN*, 927: Article 171153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171153>
- Runge S., Ignatyev P.A., Wangenheim M., Bederna C., Wies B., Wallaschek J., 2021. Transient abra-sion on a rubber sample due to highly dynamic contact conditions. *Wear*: Article 203848. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203848>
- Schallamach A., 1958. Friction and abrasion of rubber. *Rubber Chem. Technol.*, 31: 982-1014. <https://doi.org/10.5254/1.3542365>
- Tong Z, Cao Y., Wang R., Chen Y., Li Z., Lu J., Yang S., 2025. Machine learning-driven intelligent tire wear detection system. *Measurement*, 242: Article 115848. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115848>
- Zhang M., Yin H., Tan J., Wang X., Yang Z., Hao L., Du T., Niu Z., Ge Y., 2023. A comprehensive re-view of tyre wear particles: Formation, measurements, properties, and influencing factors. *Atmos. Environ.*, 297: Article 119597. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119597>
- Kane, M., & Edmondson, V. (2022). Tire/road friction prediction: Introduction a simplified numerical tool based on contact modelling. *Vehicle system dynamics*, 60(3), 770-789.