

Action minéralogie urbaine : les minéraux comme traceurs des activités urbaines. Le cas de l'amphibole en région parisienne

Pierre Le Pape¹, Guillaume Morin¹, Benoît Baptiste¹, Thierry Allard¹, Etienne Balan¹, Ludovic Delbes¹, Claire Carvallo¹, Clara Vaccaro¹, Maëva Philippe², Sophie Ayrault², Cécile Quantin³, Gaël Monvoisin³, et François Guyot¹

¹Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie (IMPMC), UMR 7590 CNRS-Sorbonne Université-IRD-MNHN, case 115, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 5, France

²Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE-IPSL), UMR 8212 (CEA/CNRS/UVSQ), Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

³Géosciences Paris-Saclay (GEOPS), UMR 8148 Université Paris-Saclay – CNRS, 91405, Orsay Cedex, France

* pierre.le_pape@cnrs.fr

Résumé

Ce rapport de synthèse présente le concept de minéralogie urbaine, action nouvellement intégrée dans le programme PIREN-Seine en phase 9, ainsi qu'un cas d'étude représentatif.

Dans un contexte où la concentration des activités et l'artificialisation des sols sont fortes, la minéralogie urbaine s'intéresse aux minéraux dont l'occurrence dans des échantillons de sédiments et/ou de poussières urbains est liée à des activités particulièrement développées en ville. Grâce à des mesures d'analyse des solides, nos recherches cherchent à relier la signature de certains minéraux spécifiques à des activités et donc à des filières qui contribuent fortement aux flux de matières dans les espaces urbains, et en aval hydrologique de la ville. Dans ce rapport, nous nous appuyons sur le cas de l'amphibole, dont la signature a été mise en évidence par nos mesures dans des échantillons urbains de diverses natures dans et autour de Paris : des poussières prélevées sur les infrastructures urbaines (routes, bâtiments...), des sédiments de bassins autoroutiers qui drainent les eaux de ruissellement des routes et des matières en suspension des rivières urbaines. Ces observations sont le support d'une discussion à propos des sources d'amphibole en milieu urbain, des modes de transport de ces particules, et des implications environnementales et sanitaires afférentes. Ainsi nous émettons l'hypothèse que ce traceur minéralogique, omniprésent dans l'espace parisien, résulte au moins en partie de l'érosion de granulats contenus dans la bande de roulement des routes. En l'absence de source géologique locale, le type d'amphibole présent dans les échantillons parisiens, l'actinolite, nous permet a minima d'identifier la contribution de l'activité de construction et de renouvellement des routes dans les flux de particules minérales en milieu urbain. Les observations de ces particules en microscopie montrent que, bien que la majorité des particules observées soient massives, il existe des processus de clivage émettant des particules allongées de petite taille, dont les risques concernant l'exposition publique ne sont pas connus. La signature d'amphibole est également détectée par diffraction des rayons X dans des matières en suspension des rivières en ville, ce qui implique un flux important de ces particules des zones urbaines vers l'aval. Nous proposons donc que ce minéral puisse être utilisé comme un indicateur de l'usure des surfaces urbaines en région parisienne.

Points clefs

✓ *Des minéraux de la famille des amphiboles sont observés dans des échantillons de*

poussières urbaines, bassins autoroutiers et matières en suspension de rivière en région parisienne

- ✓ *Une source est identifiée pour ces minéraux : les granulats intégrés dans la bande de roulement des routes*
- ✓ *L'observation des quantités émises et de la morphologie des particules pose des questions sur le plan des flux continentaux liés à l'urbain et sur les aspects sanitaires*

Abstract

This summary report presents the concept of urban mineralogy, a newly integrated initiative in the PIREN-Seine program phase 9, as well as a representative case study.

In the context of land artificialization, urban mineralogy focuses on minerals whose occurrence in urban sediment and/or dust samples is linked to particular urban-related activities. Using mineralogical analyses, our research seeks to link the signature of certain minerals to specific urban activities and therefore to sectors that contribute significantly to material flows in urban spaces, and downstream from the city. In this report, we will rely on the case of amphibole, whose signature was highlighted by our measurements in urban samples of various nature in and around Paris: dust collected on urban infrastructure surfaces (roads, buildings, etc.), sediments from motorway basins that drain road runoff, and suspended matter from urban rivers. These observations support a discussion about the sources of amphibole in urban environments, the modes of transport of these particles, and the related environmental and health implications. Thus, we hypothesize that this mineralogical tracer, omnipresent in the Parisian space, results at least in part from the erosion of aggregates contained in road tread. In the absence of a local geological source, this type of amphibole, actinolite, allows us to at least identify the contribution of road construction and renewal activity to the flow of mineral particles in urban environments. Microscopic observations of these particles show that, although the majority of the particles observed are massive, cleavage processes can occur, emitting small and elongated particles, the risks of which regarding public exposure are unknown. The amphibole signature is also detected by X-ray diffraction in suspended matter in urban rivers, which implies a significant flow of these particles from urban areas to downstream. We therefore propose that this mineral can be used as an indicator of urban surface wear in the Paris region.

Key points

- ✓ Minerals of the amphibole family are observed in samples of urban dust, motorway basins and suspended matter from rivers in the Paris region.
- ✓ A source is identified for these minerals: aggregates integrated into road treads
- ✓ The observation of the quantities emitted and the morphology of the particles raises questions about continental flows linked to urban areas and about health aspects

1. Introduction

Dans les milieux urbains, le fonctionnement des éco- et hydro-systèmes est fortement influencé par l'artificialisation des sols. Alors qu'il est établi que les zones urbanisées se développent de manière croissante dans le monde en termes de démographie et de surface au sol, il est d'une importance majeure de comprendre comment les processus d'artificialisation modifient progressivement la structure des flux de matières, c'est-à-dire la nature et les modes de transfert des particules minérales. En effet, le transport de matière sous forme particulaire contribue au cycle biogéochimique des nutriments essentiels et des contaminants de l'échelle locale à l'échelle régionale. En ville, les particules sont générées par des processus supergènes usuels tels que l'altération et l'érosion, qui affectent surtout des sols modifiés (technosols, remblais) et des sédiments provenant de l'amont du bassin versant. Elles sont également émises par d'autres sources anthropiques directes n'incluant pas seulement l'échappement des moteurs automobiles, mais aussi les incinérateurs de déchets, et/ou l'usure/érosion des matériaux manufacturés tels que les surfaces des bâtiments ou des routes. Ces particules d'origines diverses se mélangent pour former des poussières urbaines composites, transportées par l'air ou le ruissellement des eaux sur des surfaces imperméables, selon leur nature, leur taille ou leurs voies d'émission. Ensuite, les particules de poussières urbaines sont transportées par les eaux fluviales et se déposent dans des réservoirs sédimentaires où elles présentent une réactivité chimique particulière à leur interface avec la solution, exerçant localement un contrôle sur les réactions biogéochimiques.

L'influence de l'urbanisation sur la qualité des milieux est actuellement principalement mesurée à travers le prisme de la contamination, par exemple en surveillant des indicateurs chimiques tels que les éléments traces dans les eaux et les sédiments, les mesures de taille des aérosols de particules fines (PM) ou des particules de poussière de route et la géochimie des sédiments. D'autres travaux de recherche récents ciblent les contaminants dans des bio-indicateurs spécifiques tels que les lichens, les écorces d'arbres, les biofilms ou d'autres organismes vivants (par exemple Parzych et al., 2016 ; Catinon et al., 2009 ; Ancion et al., 2010 ; Bourgeault et al., 2010). Cependant, seules quelques approches basées sur l'étude des caractéristiques minéralogiques et cristallographiques de groupes sélectionnés de particules sont utilisées pour surveiller l'usure des matériaux urbains, en partie en raison de la difficulté de séparer les composants d'origine anthropique et géogène. Ainsi, des études qui s'intéressent à la composition minéralogique des poussières urbaines sont nécessaires pour comprendre quels matériaux et quelles activités sont les sources majeures de ces particules. Par exemple, on peut faire l'hypothèse que la signature de minéraux utilisés dans des types d'activités spécifiques tels que le béton, les matériaux de construction ou de voirie, ou les alliages métalliques à vocations spécifiques, devrait devenir de plus en plus visible dans l'ensemble des particules émises dans l'environnement en comparaison du fond géogène.

Une technique d'étude majeure pour étudier la minéralogie des particules environnementales, y compris celles présentes dans les zones urbaines, est la diffraction des rayons X sur poudre (DRX), qui indique les phases cristallisées majeures présentes dans un échantillon, avec une limite de détection de l'ordre de 1 % en masse, selon la cristallinité et la composition chimique des phases considérées. Les investigations par DRX peuvent être complétées par des analyses par microscopie électronique, pour mettre en évidence la présence de phases mineures, et/ou nanocristallines ou amorphes difficilement détectables par DRX. En effet, l'étude de la cristallographie et des caractéristiques morphologiques des particules minérales peut fournir des informations sur leur réactivité chimique ou leurs voies d'émission en milieu urbain. Ainsi, ces critères minéralogiques complètent avantageusement les mesures classiques de taille de particules et de chimie élémentaire, puisque la nature minéralogique d'une particule est une propriété cruciale définissant sa solubilité et sa réactivité physico-chimique à l'interface avec la matière organique, les contaminants et/ou les interfaces biologiques.

Dans la présente étude, nous avons rassemblé des échantillons de natures diverses, notamment des sédiments déposés aux bords des routes, des particules en suspension de rivières et des poussières urbaines prélevés en région parisienne au cours de la dernière décennie. Nous détectons, dans la plupart des échantillons, l'actinolite, un minéral appartenant au groupe des amphiboles, dont l'origine ne peut être associée à la géologie locale dans le contexte du bassin sédimentaire parisien. Nos analyses permettent de définir la nature exacte de ce minéral dans les échantillons où il est le plus abondant, d'émettre des hypothèses sur ses sources en milieu urbain, et de discuter les implications de ces observations sur le plan environnemental et sanitaire.

2. Méthodologie

2.1. Echantillons et protocoles d'échantillonnage

Les échantillons analysés dans cette étude comprennent des poussières urbaines, des échantillons de bassins de rétention d'eaux pluviales le long de routes à fort trafic, des granulats provenant de la bande de roulement de routes, et des particules en suspension de rivières (Tableau 1). La plupart de ces échantillons ont été collectés à Paris, dans des sites fortement artificialisés. Des matériaux géogènes pourraient également provenir de sols modifiés de type remblais dont l'origine ne peut être formellement sourcée. Le bassin parisien, dans la zone d'échantillonnage, est principalement constitué de dépôts tertiaires, en particulier de formations éocènes et oligocènes. Ces deux séries se composent généralement d'une alternance de sables, d'argiles, de calcaires et de marnes. La minéralogie résultante comprend ainsi une diversité de minéraux argileux, de quartz, de calcite, de dolomite, de feldspaths, d'oxydes de fer et de petites quantités de pyrite et de gypse. Des détails sur une partie des échantillons listés dans le tableau 1 sont disponibles dans des études antérieures :

- Pour les échantillons prélevés dans les bassins de rétention de routes, l'échantillonnage a été réalisé avec l'accord des gestionnaires de bassin, et la procédure d'échantillonnage est détaillée dans Philippe et al. (2023).
- Des échantillons de matériaux routiers (bitume, granulats) ont été prélevés sur la chaussée ou dans le caniveau, déjà détachés ou presque détachés de la bande de roulement (Le Pape et al. 2025 ; Figure 1).
- Les détails d'échantillonnage de particules en suspension (MES) sont présentés dans Le Pape et al. (2012) pour l'Orge et dans Priadi et al. (2011) pour la Seine.
- Les échantillons de poussières urbaines ont généralement été prélevés à l'aide d'une brosse propre et/ou d'une spatule en plastique (e.g. Figure 1).
- Les échantillons incrustés ont été grattés en surface à l'aide d'une spatule en plastique (Le Pape et al. 2025).
- L'un des échantillons de poussières urbaines (RDS-V3, sédiments routiers récupérés dans un caniveau) a été prélevé il y a dix ans pour une autre étude et conservé au sec et à température ambiante (Le Pape et al., 2012).
- Un prélèvement ponctuel de particules en suspension (MES) a été réalisé dans la Seine en mars 2022, correspondant à 20 L d'eau de Seine au site du « Quai Saint-Bernard ». L'eau a ensuite été filtrée sur des filtres de 0,22 µm, qui ont été grattés une fois séchés à l'aide d'une spatule en plastique afin de recueillir environ 20 mg de particules (Le Pape et al. 2025).

Tableau 1. Echantillons sur lesquels cette étude s'appuie. De nombreux détails additionnels sur les échantillons peuvent être trouvés dans les références mentionnées, et notamment dans Le Pape et al. (2025).

Type d'échantillon	nombre	references bibliographiques
Bassin autoroutier	n=10	Philippe et al., 2023; Le Pape et al., 2025
Roues de voiture et vélo	n=2	Le Pape et al., 2025
poussières urbaines	n=11	Le Pape et al., 2012; Le Pape et al., 2025
Agrégats de route	n=6	Le Pape et al., 2025
Matières en suspension de l'Orge et de la Seine	n=4	Priadi et al., 2011; Le Pape et al., 2012; Le Pape et al., 2025

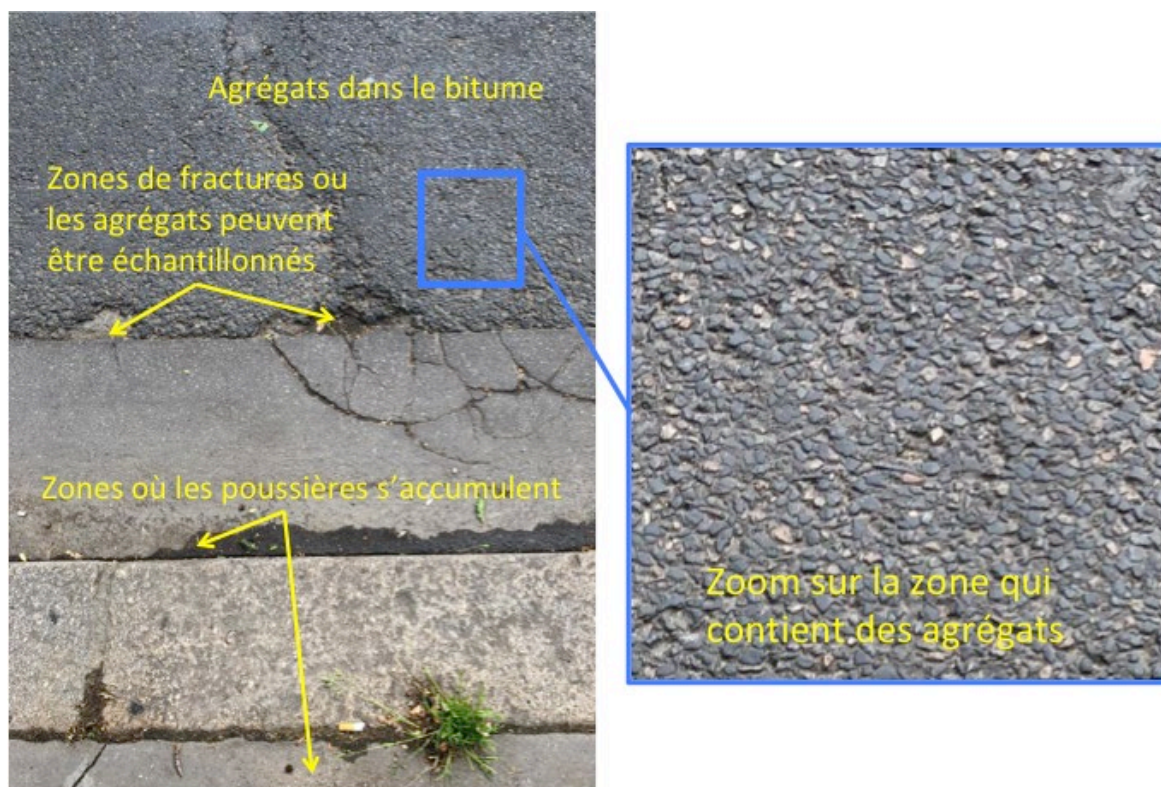


Figure 1. Exemple de zone de prélèvement pour les « agrégats de route » d'une part, et pour les « poussières urbaines » d'autre part.

2.2. Mesures

L'analyse par diffraction des rayons X sur poudre (DRX) a été réalisée sur un diffractomètre Panalytical™ Xpert-pro en géométrie Bragg-Brentano, utilisant le rayonnement Co K α . La diffraction des rayons X est une technique qui permet, sur des diffractogrammes (classiquement présentés comme l'intensité en fonction de l'angle de diffraction θ), d'associer des pics de diffraction mesurés en fonction de l'angle (2θ) via la loi de Bragg ($\lambda = 2d \sin(\theta)$) à des distances caractéristiques entre des plans d'atomes (dit plans inter-réticulaires) dans des minéraux (distance d généralement exprimée en Angströms (Å)). Ainsi, chaque minéral présente donc un profil distinct et a priori reconnaissable en DRX si il est cristallisé et qu'il est présent en quantité détectable.

Pour l'analyse, les échantillons ont été broyés dans un mortier d'agate et mesurés par pas de $0,017^\circ$ en 2θ , sur une durée totale de comptage comprise entre 6 et 12 h sur un intervalle de 2 à $100^\circ 2\theta$. Lorsque la quantité d'échantillon disponible était faible (< 1 g), les dépôts ont été réalisés sur des supports en silicium à faible bruit de fond. Pour les échantillons de matières en suspension de rivières (MES), l'analyse DRX par rayonnement synchrotron sur la ligne de lumière CRISTAL du synchrotron SOLEIL, avec un meilleur rapport signal sur bruit et une résolution angulaire supérieure, a permis la détection de l'amphibole. Dans certains échantillons, la quantification des phases minérales a été mise en œuvre par la méthode d'affinement Rietveld (Le Pape et al., 2025).

Des analyses par microscopie électronique à balayage (MEB) associées à une microanalyse des rayons X à dispersion d'énergie (EDXS) ont été réalisées sur échantillons concassés et non concassés, après dépôt sur des grilles de cuivre supportées par un film de carbone. Après localisation sur les grilles par MEB, des particules sélectionnées de minéraux amphiboles ont été observées par microscopie électronique à transmission (MET).

D'autres méthodes d'analyses incluant la spectroscopie de réflectance diffuse ou la mesure de courbes d'aimantation ont été utilisées sur certains échantillons sélectionnés. Des détails sur les protocoles de mesures et les mesures elles-mêmes peuvent être trouvés dans Le Pape et al. (2025).

3. Résultats

Tous les échantillons considérés dans cette étude, listés dans le tableau 1, ont été analysés par diffraction des rayons X sur poudre afin de déterminer les principales phases minérales qui les composent. La plupart d'entre eux contiennent du quartz, de la calcite, de la dolomite, des feldspaths ainsi que des phyllosilicates, ce qui reflète la minéralogie du bassin sédimentaire parisien. En effet, les principaux contributeurs sont les sols de surface et les sédiments du bassin versant de la Seine. De plus, certains de ces minéraux, tels que le quartz, les feldspaths et les chlorites, sont également utilisés dans des matériaux de construction (béton, remblais) et sols modifiés bien représentés dans l'agglomération parisienne. La figure 2 présente les diagrammes de DRX sur poudre sélectionnés pour chaque type d'échantillons de l'étude. Les échantillons prélevés dans les bassins de rétention autoroutiers (Fig. 2b) présentent la signature minéralogique principale des minéraux de surface cités précédemment, plus un pic supplémentaire aux bas angles (correspondant à une distance inter-réticulaire de 8,4 Å) visible dans l'encadré rouge de la figure 2. Ce pic est situé à une distance inter-réticulaire classique des minéraux de la famille des amphiboles. Dans les échantillons de poussières urbaines prélevés à Paris ou en proche banlieue (Fig. 2c), un pic à 8,4 Å est également détecté, attribué aux minéraux du groupe des amphiboles. Il est à noter qu'une seule réflexion de Bragg dans un diffractogramme sur poudre ne suffit généralement pas à identifier formellement un minéral. Cependant, aucun autre minéral que l'amphibole ne pourrait s'intégrer dans des échantillons et des contextes aussi différents. Cette réflexion de Bragg à 8,4 Å étant essentiellement détectée à proximité des routes, nous avons poursuivi l'étude en échantillonnant certains matériaux routiers, notamment des granulats routiers, c'est-à-dire des granulats initialement incorporés dans la bande de roulement et sa matrice bitumineuse associée, afin de rechercher ces minéraux.

Le diagramme de DRX sur poudre de l'échantillon de granulats routier « Road_Agg_Jussieu_Street » est présenté dans la figure 2a). Dans cet échantillon, un minéral du groupe des amphiboles, détecté à 8,4 Å, constitue un composant minéralogique majeur. L'analyse Rietveld du diffractogramme de cet échantillon riche en amphibole montre que ce minéral contribue à 17 (1) % en masse et présente des paramètres cristallographiques qui correspondent à ceux d'une amphibole riche en fer de type FeMg-actinolite (Le Pape et al., 2025). Une analyse par affinement Rietveld a été réalisée sur d'autres échantillons sélectionnés, représentatifs d'environnements routiers urbains, où l'espèce minéralogique était présente en quantité suffisante (Le Pape et al., 2025). Les paramètres cristallographiques associés montrent également une bonne concordance avec l'actinolite FeMg précédemment observée, renforçant ainsi l'hypothèse que ce minéral particulier pourrait être présent dans notre série d'échantillons.

Afin d'identifier le minéral à l'échelle des particules, nous avons poursuivi l'étude par une analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) associée à la microanalyse chimique. Des exemples de particules d'amphiboles sont présentés dans la figure 3. En général, les particules présentent différentes tailles et morphologies, allant d'amphiboles massives de plus de 100 µm à des amas de particules micrométriques allongées (Le Pape et al., 2025). Certaines observations montrent l'existence d'orientations de clivage préférentielles pour les particules massives, leur permettant de se subdiviser en particules allongées de tailles inférieures.

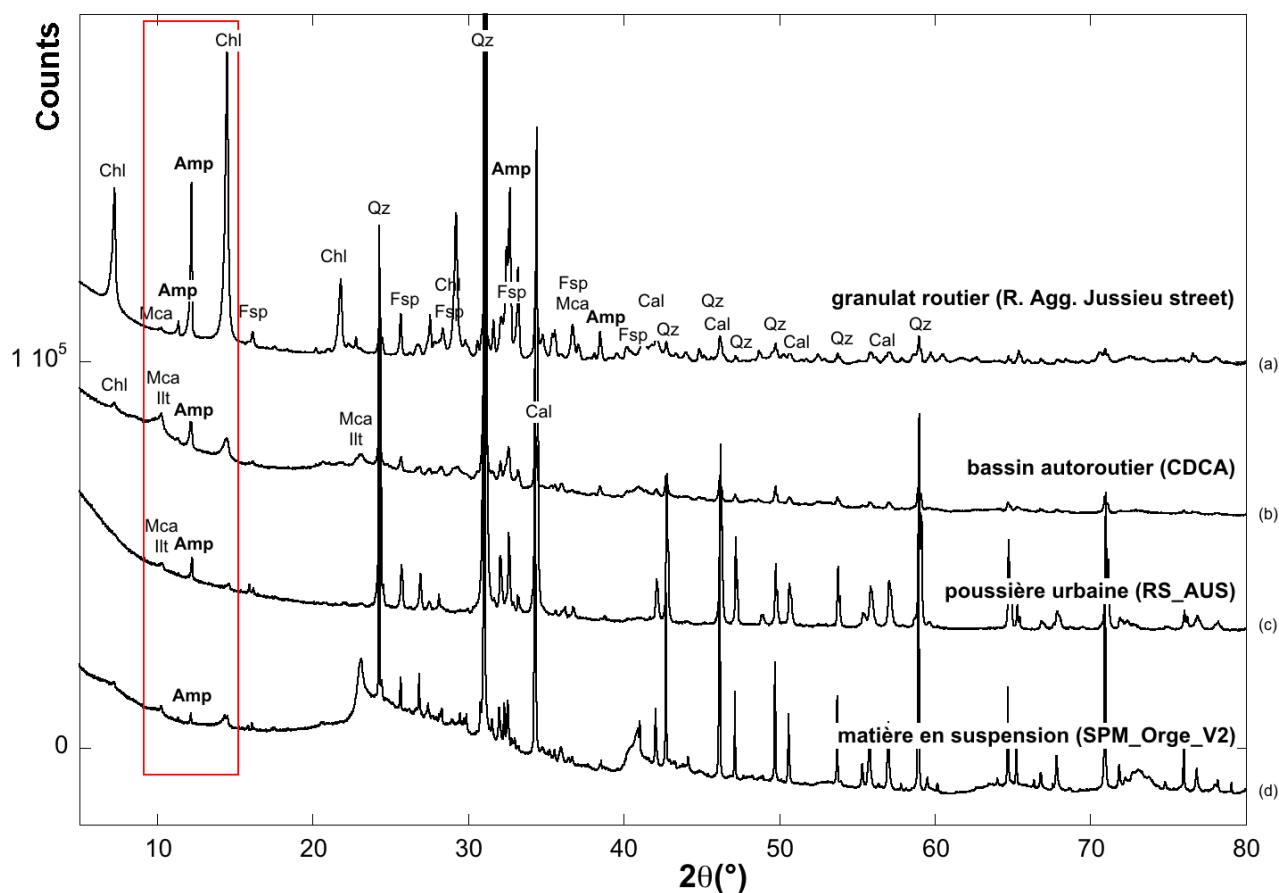


Figure 2. Diffractogrammes de rayons X sur poudre d'une sélection d'échantillons urbains issus de l'étude de Le Pape et al. (2025). Amp: amphibole ; Chl: Chlorite ; Mca: mica ; Illt: illite ; Fsp: feldspath ; Qz: quartz ; Cal: calcite.

Ces observations très fréquentes d'amphiboles par DRX dans des échantillons routiers et urbains de la région parisienne soulèvent des questions quant à leur possible contribution aux flux sédimentaires. Pour approfondir ce point, nous avons réalisé des analyses par diffraction des rayons X sur des échantillons de matières en suspension (MES) de rivières. La figure 2d présente l'analyse par DRX d'un échantillon de MES sélectionné, mesurée grâce au rayonnement synchrotron pour augmenter le rapport signal sur bruit. L'analyse montre clairement l'existence d'un pic à 8,4 Å, caractéristique des minéraux du groupe des amphiboles dans les échantillons de MES (Le Pape et al., 2025).

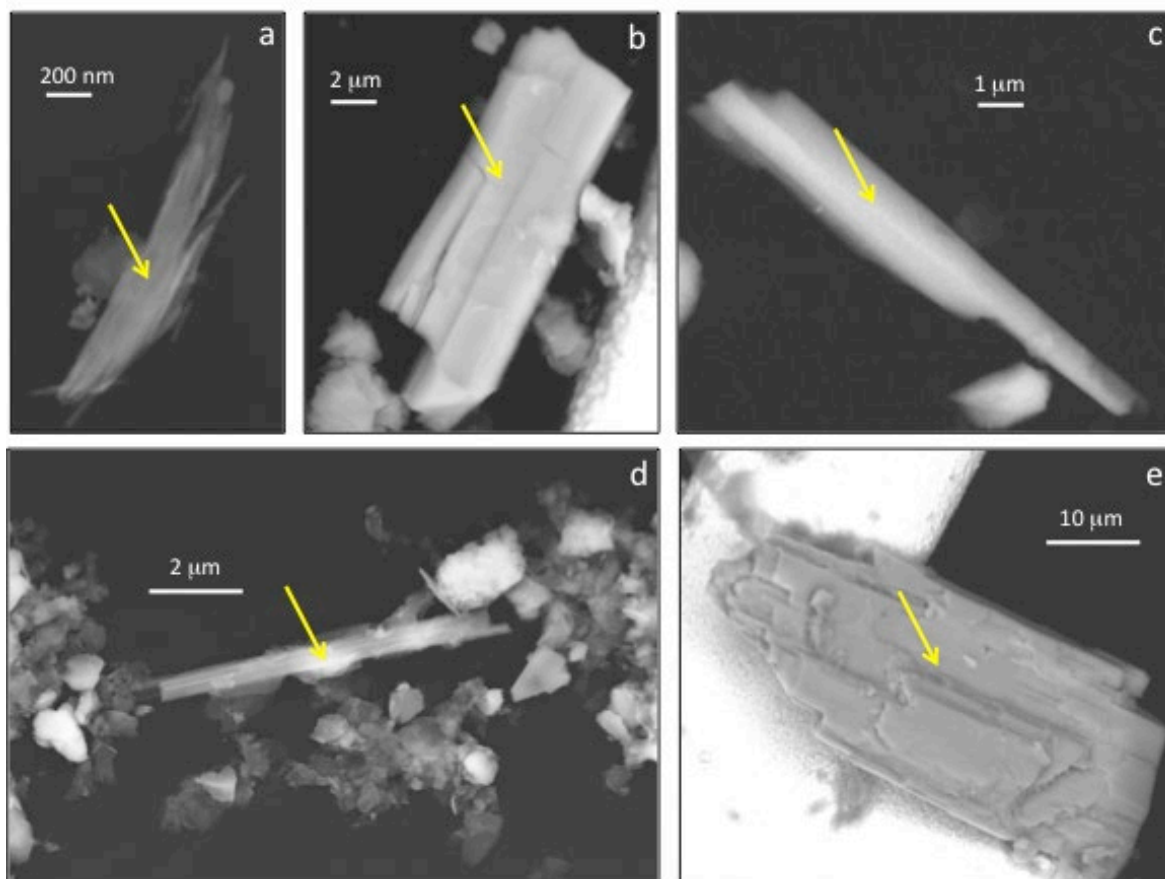


Figure 3. Images sélectionnées de particules d'actinolite en microscopie électronique à balayage pour des échantillons de bassins autoroutiers (a, c, et e), et pour des granulats de route (b, d). Plus de détails concernant la morphologie, la composition chimique et la structure des particules peuvent être trouvés dans Le Pape et al. (2025).

4. Discussion

4.1. Sources d'amphibole en milieu urbain

L'observation très fréquente de minéraux du groupe des amphiboles dans nos échantillons de poussières urbaines collectées à proximité des zones de circulation routière pose des questions sur l'origine exacte de ces particules. Notre étude montre que certains granulats routiers, issus des bandes de roulement de type enrobés routiers, sont fortement enrichis en ces minéraux, notamment en une amphibole de type FeMg-actinolite. Il est par ailleurs reconnu qu'une part importante des particules émises par le trafic routier provient directement de l'usure des routes (par exemple, Kupiainen et al., 2016 ; Amato et al., 2009). Nos observations suggèrent que l'usure des granulats contenus dans certaines bandes de roulement, probablement due au frottement des grains sous l'effet du trafic routier, pourrait être une source d'émission de poussières incluant ces particules d'amphiboles. En effet, ce phénomène a déjà été observé dans les pays d'Europe du Nord, notamment là où l'usure des routes est intense en raison de l'utilisation de pneus cloutés sur des routes soumises au verglas et à la neige (par exemple, Raisanen et al., 2005). De plus, la présence de minéraux amphiboles de type actinolite, dans le cadre de travaux routiers, a déjà été signalée (ANSES 2015). En France, cette présence a même été surveillée, par exemple sur les chantiers où les ouvriers sont particulièrement exposés aux poussières d'amphiboles, comme le rapportent des documents produits en dehors du domaine académique (Note DGT Amiante – PMAi). De plus, une enquête menée par l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'environnement (ANSES 2017) indique que des matériaux urbains couramment utilisés, tels que le béton, et d'autres matériaux de construction en général, pourraient également contenir des amphiboles. Ceci pourrait notamment être dû à la présence de ce type de minéraux en traces dans certaines carrières utilisées pour l'approvisionnement en matériaux routiers. En région parisienne, dont

le sous-sol est sédimentaire, l'amphibole n'appartient pas à la géologie locale. Nos résultats, qui suggèrent que la signature minéralogique provient de matériaux de construction, notamment des granulats routiers, indique que ces granulats pourraient venir de régions comprenant des roches ignées, dont les plus proches sont le massif armoricain, le massif central ou les Alpes.

La présence de cette signature minéralogique dans nos échantillons urbains, y compris à l'état de traces dans des échantillons représentatifs des flux de matière entre réservoirs sédimentaires tels que les matières en suspension (MES) des rivières, suggère qu'une quantité importante de ces minéraux est actuellement présente dans les routes et potentiellement dans d'autres matériaux de construction de la région parisienne, et/ou sous forme de poussières résiduelles dans les rues. Par exemple, certains de nos prélèvements indiquent que même si la bande de roulement récemment remplacée ne contient plus d'amphibole, un signal peut être mesuré dans les poussières alentour, comme par exemple sur les bâtiments à proximité (Le Pape et al., 2025). De plus, vu que les remblais de soubassement des routes peuvent être constitués d'autres matériaux de construction recyclés, y compris ceux de la route elle-même, la présence persistante d'amphiboles, potentiellement loin des zones d'origine des granulats, pourrait s'expliquer par de tels processus de sous-cyclage. En effet, la réutilisation et le recyclage des matériaux de construction anciens ou usagés sont pratiqués depuis longtemps dans le secteur du bâtiment afin d'éviter la production coûteuse de déchets et le transport de nouveaux matériaux sur site.

4.2. Modes de transport des amphiboles

Notre étude suggère que les matériaux routiers sont des sources d'amphiboles dans les milieux urbains, car les échantillons les plus enrichis observés sont des granulats routiers présents dans les chaussées. Ceci est corroboré par le fait que les échantillons des bassins de rétention autoroutiers, directement dédiés à la réception des eaux de ruissellement des routes et des particules de poussière associées, sont également particulièrement enrichis en amphiboles, y compris en zones périurbaines. Ceci suggère que les eaux de ruissellement constituent un vecteur important de transport des poussières contenant des amphiboles déposées et/ou produites par les matériaux routiers. Ceci concorde avec l'observation d'un signal d'amphiboles détectable par DRX dans les matières particulaires en suspension (MES) de l'Orge et de la Seine. En effet, les amphiboles mesurées dans les MES pourraient provenir (i) du ruissellement des eaux météoriques sur les surfaces routières et urbaines, puis de leur transfert vers la rivière après les pluies, et/ou (ii) de la remobilisation du stock déjà présent dans les sédiments de fond des rivières en fonction de l'hydrodynamisme. Par ailleurs, tous les types de véhicules circulant dans les espaces urbains s'avèrent aussi être des vecteurs de transport d'amphiboles via la collecte régulière de poussières sur les pneus ou la carrosserie, faisant de ces mêmes véhicules des pièges à particules urbaines, potentielles archives collectant en permanence des signaux minéralogiques. Ainsi, les véhicules peuvent accumuler des poussières routières/urbaines aux endroits riches en amphiboles et potentiellement les réémettre ailleurs, par exemple par lessivage par les eaux météoriques lors d'un épisode pluvieux, ce qui contribuerait également à diffuser à plus grande échelle cette signature minéralogique spécifique. Toutefois, à ce stade, des études complémentaires sont nécessaires pour élucider la dynamique spatio-temporelle de l'accumulation et de l'émission de poussières urbaines par les véhicules, ainsi que pour estimer l'importance de cette voie de transport à l'échelle globale. De plus, dans un échantillon, nous avons détecté des traces d'amphibole, bien que le point d'échantillonnage ne soit pas directement exposé au transport par ruissellement de route. Cet échantillon a été prélevé sous forme de croûte sèche sur un tuyau en aluminium, sur le toit d'un bâtiment de 30 m de hauteur (Le Pape et al., 2025). Cela indique que d'autres voies de transport sont possibles et que la possibilité d'un transport aérien devrait être étudiée plus en détail.

4.3. Implications environnementales : flux et exposition du public

L'observation fréquente de particules d'amphiboles dans les échantillons de poussière urbaine de cette étude menée en région parisienne, sans origine géologique locale identifiée, soulève la question du stock actuel de ces minéraux dans les milieux urbains parisiens, compte tenu à la fois des routes et autres matériaux de construction contenant des amphiboles, ainsi que de la somme des poussières et sédiments fluviaux déjà accumulés. En effet, les surfaces urbaines sont soumises à l'usure due aux intempéries et à l'érosion. En particulier, l'utilisation intensive des routes dans les grandes villes provoque une usure

importante, entraînant de fréquents travaux de réparation et de remplacement (Magalhaes et al., 2024). Ces processus d'usure sont logiquement amplifiés dans le contexte actuel de multiplication des événements climatiques extrêmes, tels que l'alternance de périodes de sécheresse et de fortes tempêtes, ces dernières contribuant aux inondations urbaines. La mesure de la présence d'amphibole par un prélèvement ponctuel de particules en suspension dans seulement 20 litres d'eau de la Seine (Le Pape et al., 2025) donne une idée des flux importants de ces minéraux susceptibles d'être produits par l'usure urbaine et exportés vers l'aval. Si l'on considère une valeur prudente et probablement sous-estimée de 0,1 % en masse de particules en suspension constituées d'amphibole, ainsi qu'un scénario de faible exportation, matérialisé par des conditions de faible débit lors d'une année hydrologique, cela entraînerait une émission de 25 t de ces minéraux par la Seine en aval de Paris par an. En considérant le scénario inverse surestimé, matérialisé par des conditions de fort débit, cela permettrait d'estimer une masse totale d'amphiboles exportées de 18 000 t par an en aval de la mégapole parisienne. Bien entendu, ces estimations simples d'exportations basses et élevées pourraient être fortement affinées, notamment en mesurant plus précisément les variations de masse d'amphibole dans les particules fines en fonction des conditions hydrologiques et en prenant en compte les fluctuations de débit solide entre basses et hautes eaux. Toutefois, étant donnés ces flux estimés, nous faisons l'hypothèse que ce marqueur minéralogique pourrait probablement être utilisé dans le cas présent pour mesurer l'intensité de l'usure urbaine et l'influence de l'urbanisation sur les flux de matière continentale. Ainsi, ces amphiboles pourraient constituer une quantité non négligeable et mesurable de minéraux dans les archives sédimentaires déposées en aval de la mégapole parisienne.

D'un point de vue sanitaire, et compte tenu de la problématique actuelle de la pollution atmosphérique par les aérosols dans les mégapoles urbaines, la présence de ces minéraux, de tailles et de morphologies multiples, pose la question des effets de l'exposition humaine aux poussières urbaines. Seules les amphiboles de type actinolite fibreuses font partie des minéraux officiellement répertoriés comme des amiantes, mais un débat persiste dans la littérature scientifique sur la question de savoir si les fragments de clivage micrométriques d'amphiboles massives de tailles proches de celles des fibres d'amiante doivent être considérés comme des particules potentiellement nocives (ANSES 2015, Durand et al. 2016, DGT 2018). Nos investigations en microscopie électronique montrent que les grains massifs d'amphibole peuvent se cliver selon les plans (001) et (110), produisant ainsi des particules de plus petite taille (Le Pape et al., 2025). Les particules micrométriques produites pourraient alors être considérées comme des « particules minérales allongées » avec leurs problématiques sanitaires afférentes. En France, le risque de production de fines particules d'actinolite potentiellement nocives par clivage de particules plus massives a été évoqué, notamment dans le domaine des travaux publics, ce qui a donné lieu à des enquêtes spécifiques de l'ANSES (ANSES 2015, 2017). Dans ces études, l'agence conclut qu'un effet nocif potentiel de ce type de particules fines ne peut être exclu (ANSES 2015, 2017, Durand et al. 2016). Par ailleurs, à ce jour et à notre connaissance, aucun risque d'exposition du public à ces particules n'a été envisagé par les pouvoirs publics. Les situations prises en compte sont limitées aux zones de travaux routiers, où les activités de forage et de concassage de la bande de roulement des routes notamment, impliquent un risque d'émission important pour les travailleurs présents. Nos observations fréquentes d'amphiboles dans les échantillons de poussières urbaines, notamment aux abords des routes, suggèrent que le grand public pourrait être exposé à ces particules, y compris aux particules micrométriques de clivage évoquées par les entreprises de construction. Des recherches supplémentaires seraient nécessaires pour évaluer les voies exactes de ces particules amphiboles en milieu urbain, ainsi que pour estimer quantitativement leurs tailles et morphologies de manière statistique. De plus, la recherche de particules d'amphiboles dans les aérosols serait pertinente pour documenter et quantifier les flux atmosphériques.

Bibliographie

Amato F., Querol X., Alastuey A., Pandolfi M., Moreno T., Gracia J., Rodriguez. P., Evaluating urban PM10 pollution benefit induced by street cleaning activities, *Atmospheric Environment*, Volume 43, Issue 29, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.037>.

Ancion, P.-Y., Lear, G., Lewis, G.D., 2010. Three common metal contaminants of urban runoff (Zn, Cu & Pb) accumulate in freshwater biofilm and modify embedded bacterial communities. *Environ. Pollut.* 158, 2738–2745.

ANSES (2015) Effets sanitaires et identification des fragments de clivage d'amphiboles issus des matériaux de carrière Avis de l'Anses Rapport d'expertise collective. Décembre 2015 Edition Scientifique. <https://www.anses.fr/fr/system/files?file=AIR2014sa0196Ra.pdf>

ANSES (2017) Particules minérales allongées. Avis de l'Anses Rapport d'expertise collective. Avril 2017 Edition Scientifique <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2016SA0034Ra.pdf>

Bourgeault, A., Gourlay-Francé, C., Vincent-Hubert, F., Palais, F., Geffard, A., Biagianti- Risbourg, S., Pain-Devin, S., Tusseau-Vuillemin, M.-H., 2010. Lessons from a transplantation of zebra mussels into a small urban river: an integrated ecotoxicological assessment. *Environ. Toxicol.* 25, 468–478.

Catinon, M., Ayrault, S., Clocchiatti, R., Boudouma, O., Asta, J., Tissut, M., Ravanel, P., 2009. The anthropogenic atmospheric elements fraction: a new interpretation of elemental deposits on tree barks. *Atmos. Environ.* 43, 1124–1130.

DGT Amiante PMAi/Note – Prévention BTP / OPPBTP
https://www.preventionbtp.fr/ressources/juridique/reglementation/note-dgt-amiante-pmai_9avCmeH27c3TeaEKN7GYs5

DGT (2018) Direction Générale du Travail, Ministère du Travail, https://travail-emploi.gouv.fr/sites/travail-emploi/files/files-spip/pdf/notedgt_9juillet2018_pmai.pdf

Durand E., Boulanger G., Paillat A., Brunet D., Billon-Galland M-A., Brochard P., Dion C., Eypert-Blaison C., Jaurand M-C., Lahondère D., Luce D., Martinon L., Michiels F., Fragments de clivage d'amphiboles: identification, effets sanitaires et impact sur la réglementation, 2016, Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement, 77(3), 530.<https://doi.org/10.1016/j.admp.2016.03.403>

Kupiainen K., Ritola R., Stojiljkovic A., Pirjola L., Malinen A., Niemi. J., Contribution of mineral dust sources to street side ambient and suspension PM10 samples. *Atmospheric Environment*, Volume 147, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.059>.

Magalhaes N., 2024, Accumuler du béton, tracer des routes. Une histoire environnementale des grandes infrastructures, Paris, La Fabrique éditions, 304 p.

Le Pape P., Morin G., Baptiste B., Allard T., Balan E., Delbes L., Carvallo C., Vaccaro C., Philippe M., Ayrault S., Quantin C., Monvoisin G., Guyot F., Widespread occurrence of amphibole minerals in Paris urban dust samples: a mineralogical tracer of urban wear?, *Applied Geochemistry*, Volume 190, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2025.106497>.

Le Pape P., Ayrault S., Quantin C., Trace element behavior and partition versus urbanization gradient in an urban river (Orge River, France), *Journal of Hydrology*, Volumes 472–473, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.042>.

Parzych, A., Astel, A., Zduńczyk, A., Surowiec, T., 2016. Evaluation of urban environment pollution based on the accumulation of macro- and trace elements in epiphytic lichens. *J. Environ. Sci. Health Part A* 51, 297–308.

Philippe M., Le Pape P., Resongles E., Landrot G., Freydier R., Bordier L, Baptiste B., Delbes L., Baya C., Casiot C., Ayrault S., Fate of antimony contamination generated by road traffic – A focus on Sb geochemistry and speciation in stormwater ponds, *Chemosphere*, Volume 313, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137368>.

Priadi C. R., Bourgeault A., Ayrault S., Gourlay-francé C., Bonté P., Spatio-Temporal Variability of Solid, Total Dissolved and Labile Metal: Passive vs. Discrete Sampling Evaluation in River Metal Monitoring. *J. Environ. Monit.* 2011, 13, 1470–1479. <https://doi.org/10.1039/c0em00713g>.

Räisänen M., Kupiainen K., Tervahattu H., The effect of mineralogy, texture and mechanical properties of anti-skid and asphalt aggregates on urban dust, stages II and III, 2005, Bull Eng Geol Environ 64, 247–256. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0267-0>

Pour retrouver les outils et données

Les données dont il est question dans ce rapport de recherche sont présentées en intégralité dans la publication suivante, mise en Open Access par accord entre Elsevier et le CNRS :

Pierre Le Pape, Guillaume Morin, Benoît Baptiste, Thierry Allard, Etienne Balan, Ludovic Delbes, Claire Carvallo, Clara Vaccaro, Maëva Philippe, Sophie Ayrault, Cécile Quantin, Gaël Monvoisin, François Guyot, Widespread occurrence of amphibole minerals in Paris urban dust samples: a mineralogical tracer of urban wear?, Applied Geochemistry, Volume 190, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2025.106497>.