



Impacts miniers sur la qualité de l'air dans la Ceinture du Cuivre et du Cobalt, République démocratique du Congo

**Première évaluation des particules en suspension et des métaux lourds
inhalables dans les communautés riveraines des sites miniers du Lualaba
• Campagne d'échantillonnage d'octobre 2025**

Province du Lualaba, RDC

Juin 2026

Version 1 • Publiée le 4 juin 2026

En cas de divergence ou de conflit entre la version française et la version anglaise, la version anglaise fait foi.

Résumé exécutif

La République démocratique du Congo (RDC) produit plus de 75 % du cobalt mondial, un minéral essentiel à la transition énergétique mondiale. Alors que la demande continue d'augmenter, le coût environnemental et sanitaire de l'extraction du cobalt pour les communautés voisines reste mal documenté et insuffisamment pris en compte.

En octobre 2025, Source International, en collaboration avec RAID, Afrewatch et l'Université de Lubumbashi, a mené une campagne d'échantillonnage à Kolwezi et dans les zones environnantes afin d'étudier les impacts environnementaux de l'exploitation du cobalt à grande échelle. L'échantillonnage a porté sur des communautés situées à proximité d'exploitations minières actives gérées par COMMUS (Kolwezi et Pierre Muteba II), MUMI (villages proches du lac Kando) et TFM (Fungurume). Ce rapport présente les résultats de notre évaluation de la qualité de l'air, axée sur les particules en suspension (PM_{2,5} et PM₁₀) et la teneur en métaux lourds des poussières inhalables.

Les mesures des particules en suspension ont révélé des **problèmes de qualité de l'air persistants et généralisés dans l'ensemble de la zone d'étude**. Les concentrations journalières de PM_{2,5} et de PM₁₀ dépassaient les lignes directrices de l'OMS de 2 à 6 fois et de 1,5 à 4 fois, respectivement, et étaient également, sur la plupart des sites, supérieures à plusieurs normes internationales de qualité de l'air. En particulier, **les normes sud-africaines** – le référentiel le plus fréquemment cité par les sociétés minières opérant en RDC – **étaient dépassées sur 7 des 8 sites**, tous situés à proximité de zones minières actives. Une fois traduites en indice de qualité de l'air, **6 des 8 sites ont été classés dans la catégorie « malsain pour les groupes sensibles »** et un site à Kolwezi, situé à moins de 500 m du dépôt de stériles miniers de COMMUS, était « malsain ». Les données horaires de PM ont confirmé que **les valeurs journalières reflétaient des concentrations de fond durablement élevées**, et non des événements isolés. Les sites situés à proximité des fosses à ciel ouvert et des dépôts de stériles miniers présentaient des pics supplémentaires en soirée, compatibles avec des émissions de poussières localisées liées à l'activité minière. La plupart des mesures ayant été réalisées après deux épisodes de fortes pluies, **la qualité de l'air dans des conditions typiques de saison sèche est probablement plus dégradée** que celle documentée ici. Le **lien entre la pollution par les particules en suspension et de graves impacts sanitaires**, notamment des maladies respiratoires et des effets défavorables sur la grossesse, entre autres, combiné à l'augmentation des problèmes respiratoires, des troubles de la reproduction et d'autres affections au cours des 5 à 10 dernières années, soulève des préoccupations importantes quant à la santé des communautés riveraines des sites miniers du Lualaba.

Plusieurs lignes de preuve indiquaient que **les poussières inhalables provenaient principalement de la remise en suspension de résidus miniers**. D'abord, tous les échantillons présentaient une empreinte métallique très cohérente, caractérisée par la présence omniprésente de cobalt, de cuivre et de manganèse. Ensuite, le cobalt et le cuivre étaient fortement enrichis par rapport au sol de surface naturel mais appauvris par rapport au minerai local non transformé. Puis, l'enrichissement par rapport au sol de surface était le plus élevé sur les sites les plus proches des dépôts de stériles

miniers ou des exploitations minières actives. Enfin, nous n'avons trouvé aucun marqueur de combustion de biomasse ou de charbon de bois, et seulement de faibles indices de sources additionnelles telles que le trafic routier ordinaire. **Le cobalt et le cuivre dépassaient également de manière constante des valeurs de criblage de précaution dérivées de référentiels de santé au travail.** Bien que ces valeurs de criblage ne soient qu'indicatives, l'inhalation de poussières et de fumées riches en cobalt constitue la principale voie d'exposition à ce métal, et les poussières et fumées riches en cobalt sont connues pour provoquer une irritation respiratoire et des lésions pulmonaires. Des études de biosurveillance réalisées précédemment dans la région ont également documenté des niveaux préoccupants de cobalt dans l'urine de communautés vivant à proximité d'exploitations minières et de fonderies, identifiant les poussières comme une voie d'exposition principale pour les enfants et les mineurs artisanaux.

Globalement, **Kolwezi est apparue comme le point le plus préoccupant en matière de pollution par les particules en suspension**, en particulier dans un rayon de 0,5 à 1 km autour des dépôts de stériles miniers et d'autres installations liées à l'activité minière. **Les résultats enregistrés à l'école Galaxy**, un établissement scolaire accueillant environ 1 700 élèves et situé immédiatement à côté de la fosse à ciel ouvert, du dépôt de stériles miniers et d'autres activités minières de COMMUS, **étaient particulièrement alarmants.** À partir des tendances spatiales observées dans notre jeu de données, il est probable que d'autres écoles situées à proximité d'exploitations minières connaissent des niveaux de pollution atmosphérique tout aussi élevés, voire potentiellement pires.

Bien que cette étude n'ait pas évalué directement les effets sanitaires, **les niveaux de pollution atmosphérique documentés sont globalement cohérents avec les résultats de biosurveillance et les dossiers sanitaires existants.** Nos conclusions soulignent le besoin urgent d'une étude épidémiologique formelle visant à relier l'exposition aux polluants à des effets sanitaires précis, ainsi que de l'introduction de normes nationales de qualité de l'air, d'une surveillance renforcée, d'un meilleur contrôle des émissions et de la mise en œuvre de mesures d'atténuation efficaces.

Table des matières

LISTE DES ABRÉVIATIONS	5
INTRODUCTION	6
LE CONTEXTE	6
CE RAPPORT	7
ÉTUDES ANTÉRIEURES	8
RÉFÉRENCES : LIGNES DIRECTRICES, NORMES ET AUTRES ÉLÉMENTS DE COMPARAISON	9
PARTICULES EN SUSPENSION	9
MÉTAUX LOURDS DANS LES POUSSIÈRES INHALABLES	11
SITES ET MÉTHODES D'ÉCHANTILLONNAGE	13
SITES D'ÉCHANTILLONNAGE	13
CARACTÉRISATION GÉNÉRALE DES SITES	14
MESURES DE PM EN TEMPS RÉEL	14
COLLECTE DE POUSSIÈRES INHALABLES	15
ANALYSES CHIMIQUES	16
ANALYSE DES DONNÉES	16
PARTICULES EN SUSPENSION	16
POUSSIÈRES INHALABLES	17
RÉSULTATS.....	18
APERÇU GÉNÉRAL	18
VALEURS JOURNALIÈRES DE PM ET INDICE DE QUALITÉ DE L'AIR (IQA)	18
VALEURS HORAIRES DE PM	19
MÉTAUX LOURDS DANS LES POUSSIÈRES INHALABLES	20
QUALITÉ DE L'AIR À KOLWEZI.....	23
QUALITÉ DE L'AIR À L'ÉCOLE GALAXY	25
QUALITÉ DE L'AIR À PIERRE MUTEBA II	28
QUALITÉ DE L'AIR À PROXIMITÉ DU LAC KANDO	29
QUALITÉ DE L'AIR À FUNGURUME	30
RÉSULTATS CLÉS	33
PARTICULES EN SUSPENSION	33
IMPACTS ATTENDUS SUR LA SANTÉ	33
POUSSIÈRES INHALABLES.....	34
IMPACTS ATTENDUS SUR LA SANTÉ	35
QUALITÉ DE L'AIR ET SANTÉ DANS LES COMMUNAUTÉS RIVERAINES DES SITES MINIERES DU LUALABA	35
RÉFÉRENCES	38
ANNEXE.....	42

Liste des abréviations

AQG	lignes directrices relatives à la qualité de l'air (<i>Air Quality Guidelines</i>), recommandations émanant d'institutions faisant autorité
AQS	normes de qualité de l'air (<i>Air Quality Standards</i>), réglementations juridiquement contraignantes établies par les différents États
ATSDR	Agence américaine pour les substances toxiques et le registre des maladies (<i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry</i>)
ECHA	Agence européenne des produits chimiques (<i>European Chemical Agency</i>)
EF	facteur d'enrichissement (<i>Enrichment Factor</i>), un paramètre qui aide à identifier l'origine des métaux dans les poussières inhalables
EPA	Agence de protection de l'environnement des États-Unis (<i>Environmental Protection Agency</i>)
É.-U. (ou US)	États-Unis
IQA	Indice de Qualité de l'Air, une mesure simple permettant d'exprimer et de communiquer les impacts sanitaires de la pollution atmosphérique
NIOSH	Institut national américain pour la sécurité et la santé au travail (<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>)
NO _x	oxydes d'azote, dont NO et NO ₂
OEL	limites d'exposition professionnelle (<i>Occupational Exposure Limits</i>)
OMS	Organisation mondiale de la Santé
PM	particules en suspension (<i>Particulate Matter</i>), dont PM _{2,5} et PM ₁₀
PM _{2,5}	particules en suspension d'un diamètre inférieur à 2,5 µm
PM ₁₀	particules en suspension d'un diamètre inférieur à 10 µm
RDC	République démocratique du Congo
SCOEL	Comité scientifique en matière de limites d'exposition professionnelle (<i>Scientific Committee on Occupational Exposure Limits</i>)
SO ₂	dioxyde de soufre
UE	Union européenne

Introduction

Le contexte

La ville de Kolwezi et les communautés environnantes se trouvent au cœur de la Ceinture du Cuivre et du Cobalt, dans le sud de la République démocratique du Congo (RDC). Cette région a attiré une attention internationale considérable ces dernières années en raison de ses vastes réserves minérales, stratégiques pour la transition mondiale vers les énergies et les technologies vertes. En effet, **la RDC est actuellement le premier producteur mondial de cobalt**, un composant essentiel des batteries lithium-ion utilisées dans les véhicules électriques et les appareils électroniques.¹ **En 2024, le pays a fourni 76 % du cobalt extrait à l'échelle mondiale**, principalement par le biais de grandes mines industrielles situées à Kolwezi et dans ses environs.^{1,2} Une faible part du cobalt de la RDC provient également de l'exploitation minière artisanale.²

Alors que la communauté internationale reconnaît l'urgence d'abandonner les combustibles fossiles, **les impacts environnementaux et en matière de droits humains de cette transition verte restent largement négligés**. Plusieurs minéraux stratégiques proviennent de pays où les droits humains fondamentaux sont fréquemment violés et où les réglementations environnementales sont faibles, absentes ou mal appliquées. Le cobalt est l'un de ces cas. Une étude récente menée par RAID et Afrewatch a documenté **de graves conséquences sanitaires et environnementales de l'extraction du cobalt dans la Ceinture du Cuivre et du Cobalt de la RDC**.³ À travers plus de 140 entretiens avec des résidents, l'étude a identifié des problèmes de santé généralisés, notamment, entre autres, des troubles respiratoires, des problèmes de santé



Figure 1. Vue aérienne de la fosse à ciel ouvert propriété de la société minière COMMUS située à proximité de la zone d'échantillonnage.

reproductive et des affections dermatologiques, ainsi qu'une dégradation générale des conditions de vie au cours de la dernière décennie.³ Des études scientifiques et des rapports de la société civile ont également signalé des dommages environnementaux étendus, en particulier une contamination des masses d'eau par les métaux lourds. Bien que les multinationales chinoises et européennes incluses dans l'étude reconnaissent ces risques dans leur Étude d'Impact Environnemental et Social, la pollution demeure omniprésente.³

Ce rapport

En 2025, Source International s'est jointe à [RAID](#), [Afrewatch](#) et l'Université de Lubumbashi afin de renforcer la base de données probantes sur la pollution environnementale et les atteintes aux droits humains dans la région de la Ceinture du Cuivre et du Cobalt de la RDC. La première campagne d'échantillonnage s'est déroulée en octobre 2025, à la fin de la saison sèche, dans le but d'évaluer la pollution par les particules en suspension (*particulate matter*, PM) et de soutenir les investigations scientifiques en cours sur la contamination de l'eau et des sédiments menées par l'Université de Lubumbashi.

Ce rapport présente notre évaluation de la qualité de l'air, qui comprend la **détection en temps réel des particules en suspension et l'analyse de la teneur en métaux lourds des poussières inhalables** à Kolwezi, Pierre Muteba II, dans les villages proches du lac Kando et à Fungurume. Les résultats de notre campagne de surveillance de l'eau et des sédiments sont présentés dans un rapport dédié.⁴

Les mesures des particules en suspension reposaient sur l'utilisation de moniteurs en temps réel, qui fournissaient des concentrations journalières et horaires de PM_{2,5} et de PM₁₀ – c'est-à-dire des particules d'un diamètre inférieur à 2,5 µm et à 10 µm, respectivement (Figure 2 ; détails supplémentaires dans la section [Sites et méthodes d'échantillonnage](#)). Nous avons également collecté des particules inhalables (particules d'un diamètre allant jusqu'à 100 µm, qui peuvent être inhalées par la bouche et le nez ; Figure 2) et les avons envoyées à un laboratoire accrédité pour des



Figure 2. Aperçu des paramètres surveillés dans cette étude. La définition de « PM_{2,5} » et « PM₁₀ » (en haut) repose sur la taille des particules, tandis que les termes « respirables » et « inhalables » (en bas) renvoient au comportement des particules dans le système respiratoire : la fraction inhalable n'atteint que la bouche et le nez, tandis que la fraction respirable pénètre profondément dans les poumons. Nous avons mesuré les PM₁₀ et les PM_{2,5} avec un appareil Aeroqual, tandis que les particules inhalables ont été collectées à l'aide d'un échantillonneur actif et envoyées à un laboratoire accrédité pour la quantification des métaux lourds (détails supplémentaires dans la section [Sites et méthodes d'échantillonnage](#)).

analyses de métaux lourds. À notre connaissance, **il s'agit de la première étude systématique portant sur la pollution par les particules en suspension liée aux activités minières dans les communautés riveraines des sites miniers de la Ceinture du Cuivre et du Cobalt de la RDC.**

Études antérieures

Les études académiques rigoureuses portant sur la qualité de l'air dans la région du Lualaba sont rares. Au moment de la rédaction, nous n'avons connaissance que de deux études, bien qu'elles ne couvrent pas les polluants ciblés par notre campagne. La première, de Martínez-Alonso et al.⁵, a utilisé des observations satellitaires pour évaluer la qualité de l'air au-dessus de la Ceinture du Cuivre et du Cobalt en RDC et en Zambie, en se concentrant sur les oxydes d'azote (NO_x) et le dioxyde de soufre (SO₂). Leur analyse a identifié des points chauds d'émissions de NO_x nettement marqués au-dessus de 4 grandes mines à ciel ouvert et de 2 villes, dont Kolwezi et Lubumbashi. À Kolwezi, les auteurs ont signalé une corrélation entre la production annuelle de cuivre et les émissions de NO_x, qu'ils ont attribuée à la combustion d'essence par les camions, les concasseurs et d'autres équipements miniers. En raison de limites méthodologiques inhérentes, l'investigation n'a pas permis de dégager de conclusions claires sur les émissions de SO₂.

La deuxième étude, de Banza et al.⁶, a examiné l'exposition aux métaux via les poussières minières chez les mineurs artisanaux de Kasulo, un quartier de Kolwezi où l'exploitation minière artisanale s'est répandue après la découverte de minerai riche en cobalt proche de la surface dans les arrières-cours de nombreux ménages. Les auteurs ont collecté des échantillons d'urine, de sang, d'eau potable et de poussières déposées dans les habitations des mineurs artisanaux, et les ont comparés à un groupe témoin issu d'une autre zone de la ville. Les poussières déposées à Kasulo contenaient des concentrations de cobalt nettement supérieures à celles de la zone témoin (205 à 8 140 µg/g contre 6 à 41 µg/g). Les résultats de la biosurveillance étaient cohérents avec ces observations, montrant des niveaux significativement plus élevés de cobalt dans l'urine comme dans le sang des résidents de Kasulo. Sur cette base, les auteurs ont émis l'hypothèse que les poussières riches en cobalt constituent une voie d'exposition principale à ce métal.

Un petit nombre d'études supplémentaires ont également examiné la pollution par les particules en suspension à Kolwezi, à Lubumbashi et dans les zones voisines.⁷⁻⁹ Toutefois, des limites méthodologiques et des problèmes de présentation des données ont restreint leur comparabilité et leur aptitude à servir de références.

En complément de la littérature académique, en mars 2026, l'Environmental Investigation Agency (EIA) US et Premi Congo ont publié une étude indépendante consacrée au SO₂ à Fungurume.¹⁰ Le rapport visait à établir un lien entre l'augmentation des problèmes de santé et la construction, en 2023, de l'usine de traitement de minerai mixte 30k de TFM. Face aux préoccupations croissantes au sein de la communauté locale, en 2024, TFM a commandé une étude sur la qualité de l'air à l'entreprise congolaise Skyside. À l'aide d'échantillonneurs passifs déployés sur plusieurs semaines, la campagne n'a révélé aucun dépassement des limites réglementaires congolaises pour le SO₂. À l'inverse, l'expert mandaté par l'EIA a enregistré de fréquents dépassements de la ligne directrice de

Tableau 1. Aperçu des références pertinentes pour l'évaluation de la qualité de l'air. Les références comprennent les lignes directrices relatives à la qualité de l'air (AQG, non juridiquement contraignantes), les normes de qualité de l'air (AQS, juridiquement contraignantes) et d'autres normes (détails dans le texte). Les liens vers les documents pertinents figurent dans le tableau (« n.d. » = non défini).^a À atteindre au plus tard le 01/01/2030.¹⁴ ^b À ramener à 25 µg/m³ au plus tard le 01/01/2030.¹⁵ ^c Valeurs pour la Classe 1 (régions spéciales, dont les parcs nationaux).¹⁶ ^d Probablement une coquille dans les unités de mesure (c'est-à-dire µg/m³, et non g/m³).

Pays / organisation	Type de référence	Valeurs journalières (moyenne sur 24 heures)	
		PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Organisation mondiale de la Santé ¹³	AQG	15	45
Union européenne ^{14,17}	AQS	n.d. (25 ^a)	50 (45 ^a)
Suisse ¹⁸	AQS	n.d.	50
États-Unis ¹⁹	AQS	35	150
Afrique du Sud ^{15,20}	AQS	40 ^b	75
Chine ²¹	AQS	75 (35 ^c)	150 (50 ^c)
République démocratique du Congo ²²	Max zone minière	n.d.	500 000 000 ^d

l'OMS sur 10 minutes de 0,2 ppm (500 µg/m³) en tous les points surveillés, avec des pics atteignant 0,6 à 0,8 ppm. Contrairement à Skyside, l'expert de l'EIA a employé un moniteur portable capable de capter les pics de courte durée de SO₂. Bien que TFM ait soulevé des préoccupations méthodologiques, l'étude a conduit la société minière à reconnaître sa responsabilité dans les pics d'émission de SO₂ en 2023-2024 et a abouti à l'annonce d'une inspection à venir menée par le gouvernement.¹¹

Références : lignes directrices, normes et autres éléments de comparaison

Afin de contextualiser nos résultats, nous nous référons aux lignes directrices relatives à la qualité de l'air de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), à la législation sur la qualité de l'air de certains pays, ainsi qu'à des mesures spécifiques émanant d'organismes scientifiques faisant autorité et de la littérature scientifique. Compte tenu de la disponibilité variable des paramètres et normes de référence, nous traitons séparément les particules en suspension globales (les PM_{2,5} et PM₁₀ ; première section) et les métaux lourds dans les poussières inhalables (deuxième section).

En ce qui concerne la législation, nous avons inclus des pays ayant des activités minières actives au Lualaba (par exemple la Suisse et la Chine), des pays dotés d'industries automobiles susceptibles d'utiliser des éléments extraits dans cette zone (par exemple l'Union européenne et les États-Unis), ainsi que l'Afrique du Sud, dont la législation environnementale est souvent prise comme référence par l'industrie minière congolaise. Lorsqu'elles étaient disponibles, nous avons également inclus les normes et réglementations de la RDC.

Particules en suspension

Valeurs journalières de PM. La pollution par les particules en suspension est le deuxième facteur de risque de décès au niveau mondial,¹² et elle est donc réglementée dans la plupart des pays. Nous

Tableau 2. Aperçu simplifié des catégories de l'Indice de Qualité de l'Air (IQA) des États-Unis. Le message sanitaire complet pour chaque catégorie est disponible à l'annexe B du document *Guidance for Inhalation Exposures to Particulate Matter*.²³

Catégorie de Indice de Qualité de l'Air	Plages journalières (moyenne sur 24 heures)	
	PM _{2,5} (µg/m³)	PM ₁₀ (µg/m³)
Bon	0–9	0–54
Modéré	9,1–35,4	55–154
Malsain pour les groupes sensibles	35,5–55,4	155–254
Malsain	55,5–125,4	255–354
Très malsain	125,5–225,4	355–424
Dangereux	>225,5	>425

avons considéré ici les lignes directrices les plus récentes relatives à la qualité de l'air (*Air Quality Guidelines*, AQG) de l'OMS¹³ ainsi qu'une sélection de normes internationales de qualité de l'air (*Air Quality Standards*, AQS). En 2021, l'OMS a mis à jour ses lignes directrices pour plusieurs polluants prioritaires, dont les PM_{2,5} et les PM₁₀. Les valeurs pour les moyennes journalières (c'est-à-dire sur 24 heures) sont de **15 µg/m³ pour les PM_{2,5}** et de **45 µg/m³ pour les PM₁₀** (Tableau 1).¹³

Les lignes directrices de l'OMS sont des recommandations qui privilégient la protection de la santé humaine et ne sont pas juridiquement contraignantes. Néanmoins, la plupart des pays ont utilisé ces lignes directrices pour établir leurs AQS, qui tiennent compte à la fois de la protection de la santé humaine et des intérêts économiques. Lorsqu'elles sont disponibles, les normes journalières de PM se situent entre **25 et 75 µg/m³ pour les PM_{2,5}** et entre **50 et 150 µg/m³ pour les PM₁₀** (Tableau 1). À notre connaissance, **la RDC ne dispose pas d'AQS exécutoires pour les particules en suspension**. Nous n'avons identifié qu'une valeur maximale de moyenne sur 24 heures pour les PM₁₀ à atteindre en dehors des zones minières (Règlement minier, Décret n° 038/2003²² ; Tableau 1). Cette valeur est supérieure de plusieurs ordres de grandeur aux AQS habituelles : ce qui, selon nous, résulte d'une erreur de rédaction dans les unités de mesure (c'est-à-dire 500 µg/m³, et non 500 g/m³). Pour cette raison, nous n'avons pas inclus cette valeur dans notre discussion. Nous relevons que **l'absence d'AQS nationales laisse les communautés de la Ceinture du Cuivre et du Cobalt dépendantes des cadres internationaux**. Compte tenu de l'ampleur et de l'intensité de l'activité industrielle dans la région, **il est urgent d'établir en RDC des normes nationales de qualité de l'air réalistes et exécutoires**.

Indice de Qualité de l'Air (IQA). Les moyennes journalières de PM peuvent également être utilisées pour calculer l'Indice de Qualité de l'Air (IQA), une mesure simple qui permet de **relier directement la concentration des polluants atmosphériques aux effets sanitaires**.^{24,25} Bien qu'il existe de nombreux IQA (voir l'*Air Quality Index Hub*²⁴ pour un aperçu), nous avons sélectionné l'IQA de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (*Environmental Protection Agency*, EPA), qui est reconnu à l'échelle internationale et est simple à calculer. Cette version inclut 5 polluants prioritaires, dont les PM_{2,5} et les PM₁₀, et classe les risques sanitaires en 6 catégories (Tableau 2). Chaque catégorie est associée à une couleur, à un message sanitaire et à des recommandations

pratiques.^{23,25,26} La section **Analyse des données** contient une explication plus détaillée de la manière dont nous avons dérivé l'IQA à partir des concentrations journalières de PM.

Valeurs horaires de PM. Les normes et lignes directrices relatives à la qualité de l'air se réfèrent toujours à un temps de moyennage précis : pour les PM, il s'agit toujours de 24 heures (moyenne journalière) ou de 365 jours (moyenne annuelle).^a Comme il n'existe aucune indication officielle pour des intervalles plus courts, l'*Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (ATSDR), une agence de santé publique des États-Unis, a reconnu la **possibilité de comparer des moyennes horaires aux AQG journalières pour les PM_{2,5} et les PM₁₀** à des fins de criblage et d'évaluation.²³ Ce raisonnement s'appuie sur l'*Integrated Science Assessment* de l'EPA (2019), qui a constaté des effets sanitaires néfastes au niveau ou en dessous des lignes directrices sur 24 heures pour les PM_{2,5} et les PM₁₀.^{23,27}

Métaux lourds dans les poussières inhalables

Législation. La plupart des pays, dont l'UE, la Suisse, les États-Unis, la Chine et l'Afrique du Sud, fixent dans leur législation sur la qualité de l'air des limites pour certains métaux lourds dans l'air. Toutefois, ces valeurs se réfèrent toujours à des concentrations annuelles dans les PM₁₀, que nous n'avons pas pu déterminer compte tenu de notre dispositif et du temps disponible. En outre, elles ne réglementent généralement que les métaux les plus préoccupants, à savoir l'arsenic, le cadmium, le chrome hexavalent, le mercure et le plomb. À notre connaissance, aucun des pays sélectionnés ne fixe d'AQS pour le cobalt, le cuivre et le manganèse dans les particules en suspension.

La législation sur l'exposition en milieu professionnel, qui vise à protéger les travailleurs sur une semaine de travail de 40 heures, est davantage comparable à notre dispositif de mesure.²⁸ Contrairement aux AQS, les limites d'exposition professionnelle (*Occupational Exposure Limits*, OEL) se réfèrent directement aux poussières respirables et inhalables sur 8 heures. Elles ne visent pas à protéger la population générale sur l'ensemble de sa vie : pour ces raisons, elles sont toujours sensiblement plus élevées que les AQS. Par exemple, les OEL pour le cobalt, le cuivre et le manganèse se situent entre 10 et 1 000 µg/m³ (Tableau 3).^{28,29} Dans les documents d'orientation qui servent de base à la législation de l'UE, le Comité scientifique en matière de limites d'exposition professionnelle (SCOEL)³⁰ a fourni des valeurs fondées sur des critères sanitaires de 1 µg/m³ pour le cobalt,³¹ 10 µg/m³ pour le cuivre,³² 2 000 µg/m³ pour le chrome,³³ 200 µg/m³ pour le manganèse³⁴ et 10 µg/m³ pour le nickel.³⁵ Le SCOEL n'a pas défini de valeurs pour l'étain.³⁶

Bien qu'à des fins de criblage uniquement, nous avons utilisé les recommandations du SCOEL pour dériver des **valeurs de criblage approximatives applicables à la population générale**. À l'aide d'un scénario de précaution détaillé dans la section **Analyse des données**, nous avons estimé des valeurs de criblage de 0,03 µg/m³ pour le cobalt, 0,3 µg/m³ pour le cuivre, 67 µg/m³ pour le chrome, 7 µg/m³ pour le manganèse et 0,3 µg/m³ pour le nickel dans les poussières inhalables.

^a Pour d'autres polluants, la période de moyenne peut être différente : par exemple, pour le SO₂, l'OMS définit des valeurs guides pour des moyennes sur 10 minutes et sur 24 heures.¹³

Tableau 3. Aperçu des limites d'exposition professionnelle et des recommandations fondées sur des critères sanitaires pour le cobalt, le cuivre et le manganèse (moyenne sur 8 heures). Les valeurs pour chaque pays sont issues de la base de données GESTIS,²⁹ et non de la législation d'origine (n.d. = non défini). Les recommandations fondées sur des critères sanitaires émanent du Comité scientifique en matière de limites d'exposition professionnelle (SCOEL) de l'UE.^{31,32,34} ^a Fraction inhalable. ^b Fraction respirable. ^c Moyenne sur 15 min. ^d OEL indicative.

Pays / organisation	Limite d'exposition professionnelle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, moyenne sur 8 heures)		
	Cobalt	Cuivre	Manganèse
Union européenne	10 ^a	n.d.	200 ^{a,d}
Suisse	50 ^a	100 ^{a,c}	200 ^a
États-Unis (NIOSH)	50	n.d.	1 000 ^c
Afrique du Sud	40 ^a	n.d.	200
Chine	50 ^c	n.d.	n.d.
RDC	n.d.	n.d.	n.d.
<i>Recommandations du SCOEL</i>	<i>1^a</i>	<i>10^b</i>	<i>200^a</i>

Facteur d'enrichissement. Nous avons également interprété nos résultats en termes de facteurs d'enrichissement (*Enrichment Factors*, EF), un paramètre couramment employé dans la littérature scientifique pour identifier l'origine de métaux spécifiques dans les particules en suspension.^{37,38} En général, si les EF sont proches de 1 (entre 0,1 et 10), les concentrations des éléments sont proches de leur abondance naturelle. En revanche, des EF nettement supérieurs à 10 ou inférieurs à 0,1 indiquent des éléments respectivement enrichis ou appauvris par rapport aux conditions naturelles ; ils mettent ainsi en évidence une perturbation anthropique. Comme référence, nous avons utilisé 2 lignes de base différentes : la composition médiane du sol de surface au Katanga issue d'une base de données récemment publiée³⁹ et la composition chimique médiane de l'hétérogénite, le minerai le plus abondant à Kolwezi.^{6,40}

Sites et méthodes d'échantillonnage

Sites d'échantillonnage

Entre le 10 et le 20 octobre 2025, nous avons échantillonné l'air, l'eau et les sédiments à Kolwezi, Pierre Muteba II, dans 2 villages proches du lac Kando et à Fungurume (Figure 3). Pour la qualité de l'air, nous avons obtenu 16 séries de données en temps réel sur les particules en suspension (8 d'une durée ≥ 24 heures) et collecté 9 échantillons de poussières inhalables sur des sites identifiés en collaboration avec Afrewatch et ses points focaux locaux – dont plusieurs habitations privées, 2 centres de santé, une école et un hôtel (Tableau A1). L'échantillonnage de l'eau et des sédiments est détaillé dans un rapport dédié.⁴

Les sites ont été sélectionnés en fonction de leur proximité avec des sources potentielles liées à l'activité minière et des préoccupations répétées concernant la qualité de l'air exprimées par les communautés locales. À Kolwezi (Figure 3A) et à Pierre Muteba II (Figure 3B), nous avons échantillonné 10 sites (dont 3 à deux reprises) à proximité de dépôts de stériles miniers, de fosses à

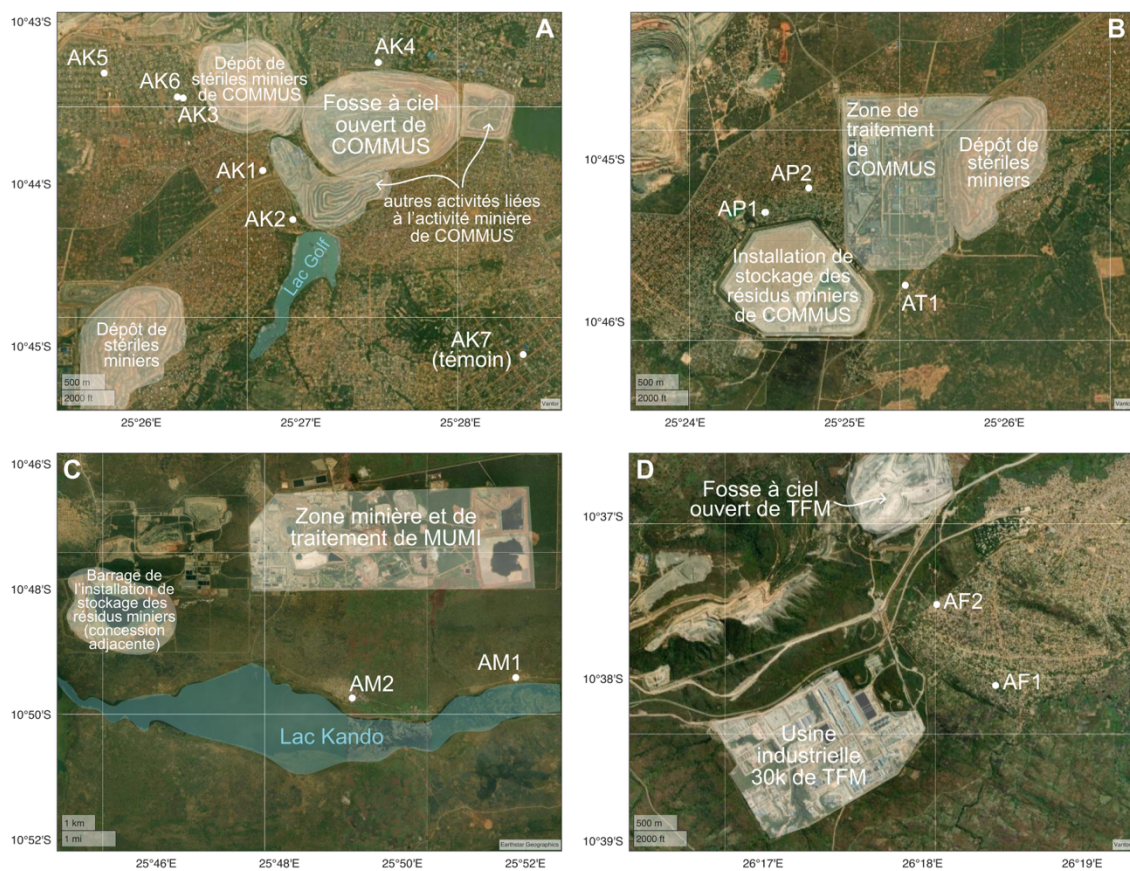


Figure 3. Aperçu des sites d'échantillonnage à Kolwezi (A), Pierre Muteba II et Tshizuzu (B), lac Kando et ses environs (C), et Fungurume (D). Les sociétés opérant dans ces zones comprennent COMMUS (A–B), MUMI (C) et TFM (D), entre autres. Les images satellites ont été tracées avec Matlab et ne reflètent pas nécessairement la situation au sol au moment de l'échantillonnage. Nous avons principalement fondé notre attribution des zones et installations minières sur les données d'OpenStreetMap⁴¹ et du portail cartographique du Cadastre Minier de la RDC⁴².

ciel ouvert et d'autres activités liées à l'exploitation minière exploitées par la Compagnie Minière de Musonoie Global SAS (COMMUS) et d'autres sociétés, dont Glencore.³ À Mibanze et Rianda, à environ 5 km au sud de la concession de Mutanda Mining SARL (MUMI),³ nous avons échantillonné un site par village (Figure 3C). À Fungurume, nous avons surveillé 2 sites : l'un plus proche de l'usine 30k de Tenke Fungurume Mining (TFM) et l'autre plus proche de la fosse à ciel ouvert de TFM (Figure 3D).³ Les sites de Fungurume recoupent largement la zone que l'Environmental Investigation Agency a surveillée dans sa récente étude sur la pollution par le SO₂.¹⁰

La plupart des activités d'échantillonnage ont eu lieu après deux épisodes de fortes pluies survenus dans les après-midis et les nuits des 11 et 12 octobre 2025, qui pourraient avoir atténué la pollution atmosphérique pendant le reste de la campagne d'échantillonnage. Après le 12 octobre, les conditions météorologiques ont été ensoleillées à partiellement ensoleillées, avec des vents généralement absents à modérés.

Caractérisation générale des sites

Sur chaque site, nous avons collecté des données générales de terrain à l'aide d'ODK Collect,⁴³ qui a servi à remplir un questionnaire préalablement configuré dans KoboToolbox.⁴⁴ Le questionnaire comprenait la date et l'heure, l'identifiant de l'échantillon, la localisation GPS et l'altitude, les paramètres mesurés sur le site, l'identifiant des instruments, les sources de pollution connues, les conditions météorologiques et des preuves photographiques. Pour les mesures de PM, nous avons également rempli un questionnaire de contrôle à la fin du déploiement, en consignant l'identifiant de l'échantillon et l'heure de la collecte.

Mesures de PM en temps réel

Nous avons obtenu des données de PM_{2,5} et de PM₁₀ à l'aide de 3 instruments Aeroqual S500 équipés d'une tête de mesure des particules en suspension. Ces capteurs enregistrent les concentrations de PM_{2,5} et de PM₁₀ en temps réel, à une fréquence d'une minute et en unités de mg/m³, et ont été réétalonnés périodiquement par le fabricant. L'erreur fondée sur la précision de l'étalonnage en usine était de 5 µg/m³ + 15 % de la valeur mesurée.⁴⁵ Des tests de validation internes ont confirmé la cohérence de performances de tous les instruments dans la plage de précision attendue. Par ailleurs, ces capteurs ont systématiquement *sous-estimé* les mesures de PM_{2,5} et de PM₁₀ obtenues à l'aide d'un instrument de référence exploité par l'Agence italienne pour la protection de l'environnement. Sur cette base, nous sommes convaincus que l'incertitude de mesure inhérente à ces instruments n'affecte pas les conclusions générales de l'étude.

Chaque jour, nous déployions 2 ou 3 instruments pendant plusieurs heures, idéalement au moins 24, sur des sites préalablement identifiés par Afreewatch et ses points focaux. La plupart des sites étant dépourvus d'électricité continue, chaque Aeroqual était alimenté par une source d'énergie autonome fournie par un panneau solaire de 40 ou 60 W relié à une batterie externe via un régulateur de charge solaire (Figure 4). Chaque instrument était également doté d'un petit ordinateur (un

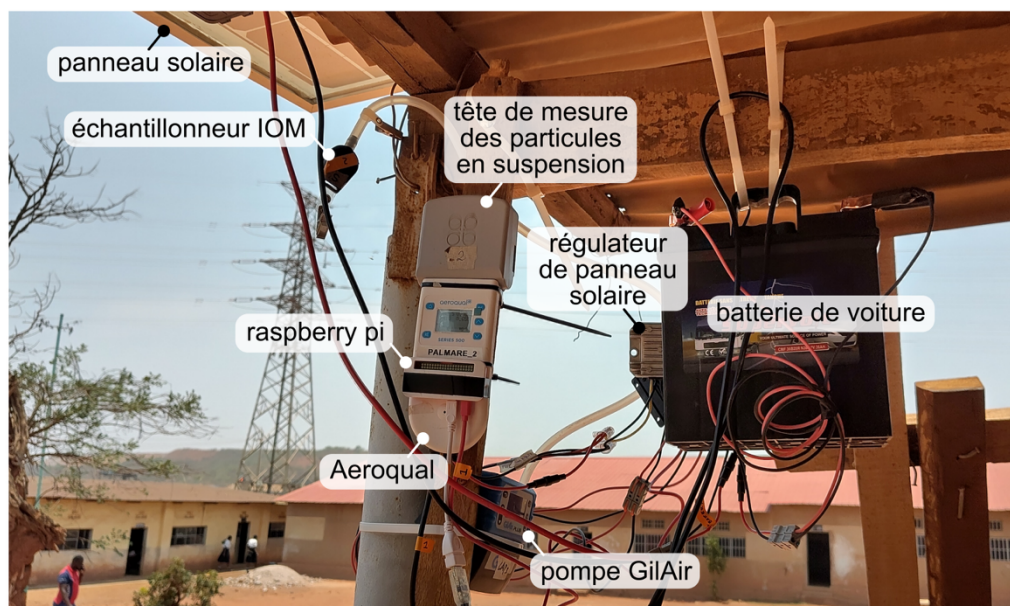


Figure 4. Configuration du système de mesure de la qualité de l'air, comprenant le détecteur de PM (Aeroqual + raspberry pi) et le collecteur de poussières inhalables (pompe GilAir + échantillonneur IOM ; détails à la Figure 5). Nous disposons également d'une batterie de voiture pour assurer l'autonomie énergétique sur tous les sites.

Raspberry pi) équipé d'une carte microSD et d'un programme conçu sur mesure afin d'augmenter sa capacité de stockage et de permettre le téléchargement sans fil des données. Les instruments étaient toujours placés à 2-2,5 m du sol, dans un endroit abrité (généralement sous un toit), à l'écart des émissions directes de PM telles que le trafic et les feux de cuisine.

Collecte de poussières inhalables

Sur la plupart des sites, nous avons également collecté des poussières inhalables pour des analyses de métaux lourds. Le dispositif comprenait une petite pompe (GilAir Plus) équipée d'un échantillonneur IOM (Figure 4 et Figure 5). Avant le déploiement, nous chargeons un filtre pré-pesé (esters de cellulose mixtes, 25 mm de diamètre) dans l'échantillonneur IOM à l'aide d'une pince métallique propre. Cette étape était toujours réalisée dans un espace clos et protégé. Nous plaçons ensuite l'échantillonneur à l'extérieur et réglons la pompe à 2,5 L/min en mode débit constant. Nous laissons la pompe fonctionner jusqu'à ce que le filtre se colmate, ce qui survenait généralement après 7 à 23 heures de déploiement, selon le site. À la fin de la mesure journalière de PM, nous récupérons l'Aeroqual, la pompe et l'échantillonneur, consignons le volume total pompé et replaçons le filtre dans sa boîte de Petri en plastique. La boîte de Petri était étiquetée, fermée avec du ruban adhésif et conservée à l'abri de la lumière jusqu'à l'expédition. Avant d'éteindre la pompe, nous notons le volume total pompé et la durée de l'échantillonnage.



Figure 5. Détails de l'échantillonneur IOM pour la collecte des poussières inhalables. Nous plaçons l'échantillonneur contenant un filtre propre face aux sources potentielles de poussières (A). Après la collecte, nous le récupérons (B) et en extrayons le filtre, qui était toujours nettement plus foncé qu'avant la collecte (C).

Analyses chimiques

La teneur en métaux lourds des poussières inhalables a été déterminée par un laboratoire italien accrédité par ACCREDIA. La procédure comprenait la pesée des filtres pour obtenir la masse inhalable totale au moyen de la méthode officielle italienne (M.U.) 1998:13. Le filtre était ensuite soumis à une digestion acide (M.U. 723:1986) et la solution obtenue était analysée par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (méthode EPA 6020B 2014). Les résultats étaient convertis en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en divisant les concentrations aqueuses par le volume total pompé. Les résultats du laboratoire pour les 21 éléments figurent au [Tableau A2](#).

Analyse des données

Particules en suspension

Toutes les données ont été analysées avec Matlab (R2021b) et Excel. Nous avons utilisé les données Aeroqual pour obtenir les valeurs journalières et horaires de $\text{PM}_{2,5}$ et de PM_{10} et pour calculer les IQA. Pour les valeurs journalières de PM, nous avons exclu les 7 à 10 premiers points de données (afin de tenir compte du temps de préchauffage de l'instrument), calculé la moyenne des 1 440 données suivantes et multiplié la valeur obtenue par 1 000, ce qui a donné des valeurs journalières de $\text{PM}_{2,5}$ et de PM_{10} en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ([Tableau A2](#)). Pour calculer l'IQA de chaque site, nous avons utilisé le calculateur en ligne officiel de l'EPA⁴⁶ afin d'obtenir un IQA individuel pour chaque polluant, puis sélectionné la valeur la plus élevée pour obtenir l'IQA global ([Tableau A2](#)).²⁶

Pour les moyennes horaires de $\text{PM}_{2,5}$ et de PM_{10} , nous avons utilisé uniquement les points de données depuis la première heure pleine disponible jusqu'à la dernière heure complète (par

exemple, de 12:00 à 16:59). Dans un cas (site AP1-bis), nous avons écarté la série de données en raison de l'interférence manifeste de la pluie. Nous avons exécuté un script Matlab calculant la moyenne de groupes de 60 points de données successifs. Les résultats étaient multipliés par 1 000 et exprimés en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Comme nous avons observé une corrélation significative entre les $\text{PM}_{2,5}$ et les PM_{10} sur tous les sites (Figure A1), et comme la corrélation entre les impacts sanitaires aigus et subaigus est mieux établie pour les $\text{PM}_{2,5}$ que pour les PM_{10} ,²³ notre discussion des tendances horaires de PM se concentre sur les $\text{PM}_{2,5}$.

Poussières inhalables

Nous avons utilisé les concentrations de métaux dans les poussières inhalables pour calculer les facteurs d'enrichissement (EF ; Tableau A4). Pour chaque métal, nous avons obtenu son EF selon l'équation suivante.^{37,38}

$$\text{EF} = \frac{[\text{métal}]_{\text{poussière}}/[\text{aluminium}]_{\text{poussière}}}{[\text{métal}]_{\text{réf}}/[\text{aluminium}]_{\text{réf}}}$$

où $[\text{métal}]_{\text{poussière}}$ et $[\text{aluminium}]_{\text{poussière}}$ sont les concentrations dans l'échantillon de poussière, tandis que $[\text{métal}]_{\text{réf}}$ et $[\text{aluminium}]_{\text{réf}}$ sont les concentrations des mêmes éléments dans le milieu de référence, soit le sol de surface du Katanga³⁹ soit le minerai local⁴⁰ (détailles à la Section A1 de l'Annexe). Nous avons utilisé l'aluminium comme métal de référence en raison de son omniprésence et de son origine essentiellement naturelle.³⁸ Des calculs de contrôle utilisant le fer, autre référence courante,³⁷ ont fourni des résultats comparables.

En l'absence de paramètres internationaux appropriés pour la teneur en métaux lourds des poussières inhalables, nous avons utilisé les valeurs recommandées par le Comité scientifique en matière de limites d'exposition professionnelle de l'UE (SCOEL ; Tableau 3) afin d'obtenir une valeur de criblage indicative applicable à la population générale. Nous avons obtenu cette valeur en tenant compte d'abord de la différence de temps d'exposition entre les lieux de travail (c'est-à-dire 8 heures pendant 5 jours par semaine = 40 heures par semaine) et les ménages (c'est-à-dire 24 heures pendant 7 jours par semaine = 168 heures par semaine). Nous avons ensuite supposé que les personnes sensibles, comme les enfants, les personnes âgées et les personnes malades, sont 3 à 10 fois plus sensibles que la population générale,⁴⁷ aboutissant à un facteur de correction moyen d'environ 30. Enfin, nous avons divisé les valeurs recommandées par le SCOEL par 30, obtenant des valeurs de criblage applicables à l'ensemble de la population. Nous insistons sur le fait que ces chiffres doivent être considérés comme des *valeurs de précaution* destinées uniquement à des considérations préliminaires de criblage.

Résultats

Aperçu général

Valeurs journalières de PM et Indice de Qualité de l'Air (IQA)

L'ensemble des données journalières de particules en suspension dépassait les lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air d'un facteur d'environ 2 à 6 pour les $PM_{2,5}$ et de 1,5 à 4 pour les PM_{10} (Figure 6 et Tableau A2), soulignant un **problème critique de qualité de l'air dans l'ensemble de la zone d'étude**. Sur 7 des 8 sites de surveillance, les valeurs journalières de PM dépassaient également les normes sud-africaines de qualité de l'air, le cadre réglementaire le plus fréquemment cité par les sociétés minières opérant en RDC. En outre, tous les sites sauf un (AF1, à Fungurume) dépassaient l'AQS des États-Unis pour les $PM_{2,5}$, tandis que les valeurs journalières de PM_{10} étaient supérieures aux AQS suisse et européenne sur chaque site. En raison de limites sensiblement plus permissives, un seul site à Kolwezi (AK3, immédiatement à côté du dépôt de stériles miniers de COMMUS) dépassait la norme chinoise pour les deux polluants.

Une fois converties en valeurs d'IQA, **6 des 8 sites se sont révélés malsains pour les groupes sensibles** (IQA = 3), **un site était modéré** (IQA = 2 ; AF1, à Fungurume) **et un était malsain** (IQA = 4 ; AK3, à Kolwezi). Dans tous les cas, le classement était déterminé par les valeurs journalières de $PM_{2,5}$, et non de PM_{10} . Selon l'ATSDR,²³ un IQA de 3 est associé à une « probabilité accrue de symptômes

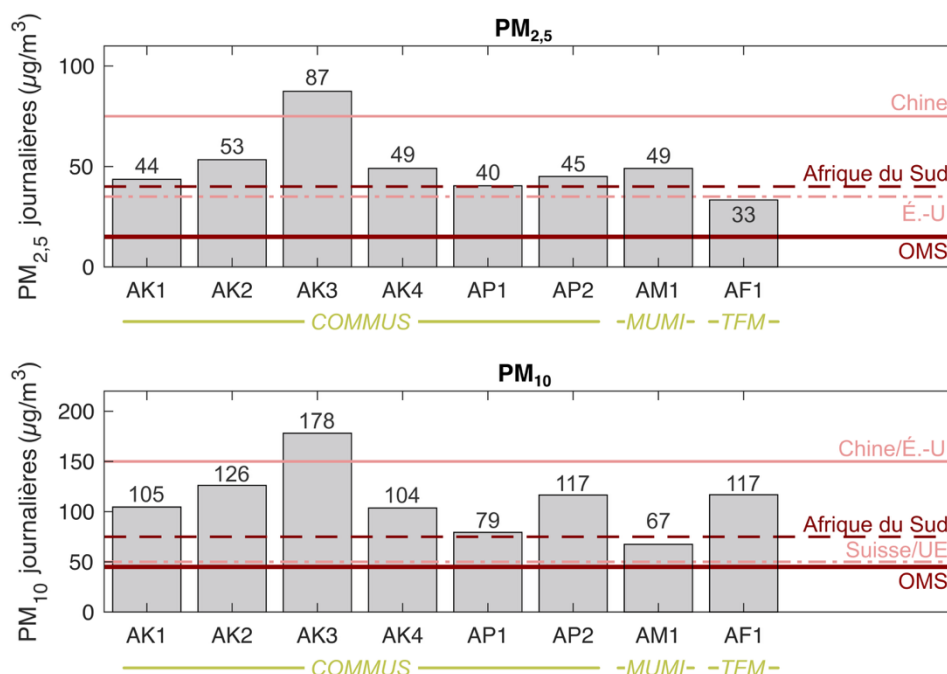


Figure 6. Valeurs journalières des particules en suspension sur une sélection de sites à Kolwezi (AK1 à AK4), Pierre Muteba II (AP1 et AP2), à proximité du lac Kando (AM1) et à Fungurume (AF1). Le texte en vert indique la concession minière pertinente pour chaque zone. Les moyennes journalières sont indiquées en haut de chaque barre et au Tableau A2. La ligne rouge continue désigne la Ligne directrice relative à la qualité de l'air de l'OMS, la ligne rouge en pointillés indique la norme sud-africaine de qualité de l'air, tandis que les lignes roses correspondent aux normes de qualité de l'air d'autres pays sélectionnés (Tableau 1).

respiratoires chez les groupes sensibles » (c'est-à-dire les femmes enceintes, les enfants et les personnes âgées) et à une « exacerbation des symptômes d'une maladie cardiopulmonaire préexistante, ou au décès consécutif à celle-ci ». Un IQA de 4 est en outre associé à une « probabilité accrue d'effets respiratoires pour la population générale ».

Valeurs horaires de PM

Sur l'ensemble des sites, 98 % des valeurs horaires de PM_{2,5} et 84 % des valeurs horaires de PM₁₀ étaient supérieures aux lignes directrices de l'OMS (Figure 7). Pour les PM_{2,5}, 18 % des données horaires dépassaient également 75 µg/m³ (c'est-à-dire 5 fois l'AQG de l'OMS) ; dans 1 % des cas, les valeurs dépassaient 150 µg/m³ (c'est-à-dire 10 fois l'AQG). De même, pour les PM₁₀, 8 % des données dépassaient 255 µg/m³ et seulement 1 % des données dépassaient 450 µg/m³ (c'est-à-dire respectivement 5 et 10 fois les lignes directrices de l'OMS). Ces observations indiquent que **les moyennes journalières ne sont pas déterminées par des pics de pollution isolés mais reflètent un fond de particules en suspension constamment élevé.**

Tous les sites présentaient des tendances diurnes similaires, sur lesquelles se superposaient des caractéristiques propres à chaque site. Ce comportement était particulièrement net pour les PM_{2,5}, qui présentaient toujours un pic tôt le matin (approximativement de 3:00 à 10:00) suivi d'un minimum qui persistait pendant plusieurs heures (Figure 7, en haut). Compte tenu de la régularité de ces caractéristiques entre les sites et les jours d'échantillonnage, nous estimons que cette tendance reflète largement un phénomène naturel local, très probablement une variation de

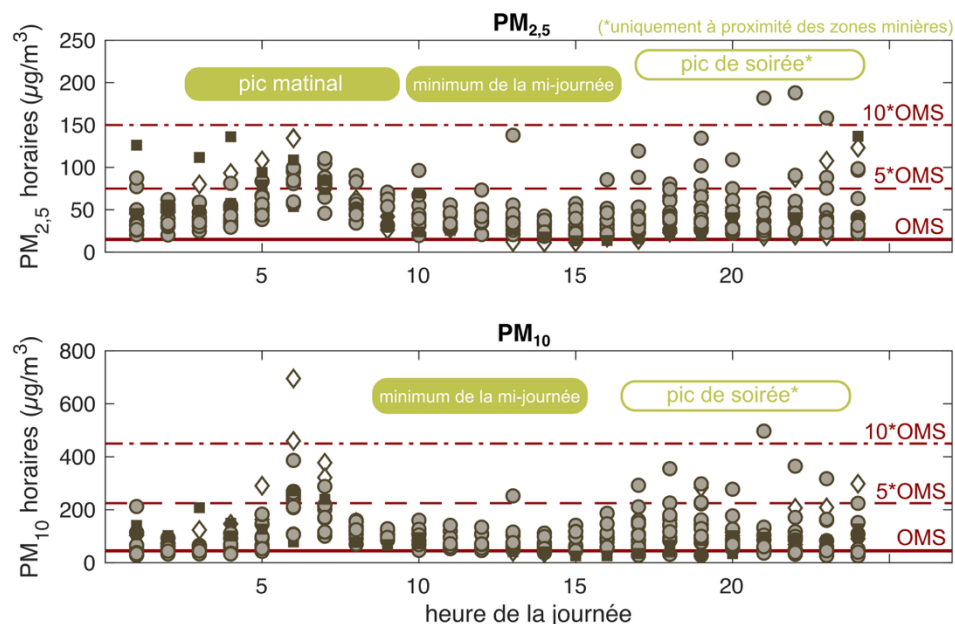


Figure 7. Tendances journalières des données horaires de PM à Kolwezi et Pierre Muteba II (cercles pleins ; à proximité de COMMUS) et à Fungurume (losanges vides ; à proximité de TFM). Les lignes rouges correspondent aux Lignes directrices relatives à la qualité de l'air de l'OMS (lignes continues en gras) et à des valeurs indicatives correspondant à 5 et 10 fois ces lignes directrices (lignes en trait mixte). Cette figure vise uniquement à mettre en évidence les similitudes et les différences entre les sites ; les tendances horaires de chaque zone sont examinées plus en détails dans les sections suivantes.

l'épaisseur de la couche limite causée par l'alternance jour-nuit.^b À cette caractéristique s'ajoutait le fait que les données de $PM_{2,5}$ enregistrées à proximité immédiate des dépôts de stériles miniers, des tas de stockage et des fosses à ciel ouvert présentaient un second pic en fin d'après-midi et en soirée (entre 17:00 et 24:00). Ce pic était absent en cas de pluie et n'a pas été observé à Pierre Muteba II ni sur un site témoin proche de l'aéroport de Kolwezi. Bien que nous ne disposions pas de suffisamment de données pour en déterminer précisément les causes, ces observations laissent entrevoir la présence d'une source de pollution très localisée (expliquée plus en détails dans la section **Qualité de l'air à Kolwezi**). Bien qu'avec des pics moins prononcés, les données horaires de PM_{10} présentaient globalement un comportement similaire à celui des $PM_{2,5}$ (Figure 7, en bas).

Alors que nous nous attendons à ce que la population générale soit la plus active entre 7:00 et 17:00, ce qui coïncide largement avec les minima de la mi-journée, les valeurs horaires enregistrées pendant ces minima dépassaient elles aussi systématiquement les lignes directrices de l'OMS, tant pour les $PM_{2,5}$ que pour les PM_{10} .

Métaux lourds dans les poussières inhalables

Les échantillons de poussières inhalables présentaient une composition métallique très homogène (Tableau A3). L'aluminium, le cobalt, le fer, le manganèse et le cuivre étaient les seuls éléments détectés dans 100 % des filtres au-dessus de leurs limites de détection, quel que soit le site d'échantillonnage. Le baryum a été détecté sur 7 sites (sur 9, soit 78 %), le chrome n'a été observé qu'à Fungurume (AF1 et AF2), tandis que le nickel et l'étain n'étaient au-dessus de leurs limites de détection que sur 1 site chacun (AF2 et AK6, respectivement). Globalement, ces métaux ne contribuaient qu'à une faible fraction de la masse totale collectée sur les filtres (3 à 10 %), ce qui concorde avec les observations habituelles pour les $PM_{2,5}$ et les PM_{10} .³⁷

Alors que l'aluminium et le fer ont des sources principalement naturelles, les autres métaux peuvent provenir, au moins en partie, de sources anthropiques (Tableau 4).^{37,38,48} Par exemple, le baryum et le manganèse peuvent avoir une origine à la fois naturelle et anthropique (par exemple le trafic et la combustion du charbon). De même, le cuivre, tout comme le baryum et le zinc, est courant dans les émissions des véhicules. En revanche, **le cobalt n'est pas couramment détecté dans les particules en suspension**.³⁷ Dans une étude sur les PM_{10} , Fomba et al.⁴⁸ ont attribué le cobalt particulaire à la remise en suspension de la poussière de route, car ce métal est souvent utilisé dans les additifs pour la peinture routière. Toutefois, les routes de notre zone d'étude étaient majoritairement non revêtues et, lorsqu'elles étaient asphaltées, elles ne comportaient généralement pas de peinture. Ainsi, la présence omniprésente du cobalt doit être liée à d'autres causes.

L'absence de marqueurs spécifiques de la biomasse suggère que la combustion du bois et du charbon de bois constitue une source mineure de métaux dans nos échantillons de poussière (Tableau 4). La combustion de biomasse émet généralement des particules riches en potassium, en

^b La couche limite est une portion de l'atmosphère en contact direct avec la surface terrestre. Son épaisseur augmente le jour et diminue la nuit en réponse aux variations de température. Une réduction de sa hauteur réduit le mélange vertical de l'air et concentre les polluants près de la surface, entraînant une augmentation des concentrations observées même en l'absence d'émissions actives.

Tableau 4. Aperçu simplifié des métaux typiquement associés aux particules en suspension. Cet aperçu non exhaustif s'appuie sur des articles évalués par des pairs portant sur les PM_{2,5} et les PM₁₀.^{37,38,48,49} Les éléments considérés comme des biomarqueurs établis sont mis en évidence. Les valeurs entre parenthèses ne sont signalées que par un seul auteur ou sont associées à des scénarios spécifiques (par exemple, le cobalt dans le trafic routier ; voir le texte). ^a K = potassium, Cd = cadmium, Ni = nickel, Pb = plomb, Se = sélénium, Rb = rubidium, V = vanadium

	Aluminium	Baryum	Cobalt	Chrome	Fer	Manganèse	Cuivre	Nickel	Étain	Zinc	Autres ^a
Croûte terrestre	x	x			x	x					
Combustion de biomasse										x	K, Rb
Combustion du charbon		(x)		x		x					As, Cd, Se, Pb
Trafic routier		(x)	(x)	x	(x)		x	x	x	x	As, Cd, Pb, Sb
Combustion de fioul						x	x	x		x	Pb, V
Activités industrielles				x	(x)	x		x		x	As, Cd, Pb
Observé	x	(x)	x	(x)	x	x	x	(x)	(x)		

rubidium et en zinc.^{37,48,49} Bien que le potassium et le rubidium n'aient pas été inclus dans notre analyse, le zinc figurait parmi les métaux constamment en dessous de la limite de détection. Une réserve concernant cette analyse tient au fait que la teneur en métaux varie selon la taille des particules en suspension.^{37,38,48} Ainsi, certains métaux ont probablement une distribution différente dans les poussières inhalables par rapport aux PM_{2,5} et aux PM₁₀. Toutefois, l'absence systématique de l'ensemble des métaux spécifiques de sources nous donne confiance dans nos conclusions.

Afin de mieux comprendre l'origine des poussières inhalables, nous avons calculé le facteur d'enrichissement (*Enrichment Factor*, EF) des métaux les plus courants au sein du jeu de données (Figure 8 et Tableau A4). Tout d'abord, nous avons utilisé comme référence la composition médiane du sol de surface au Katanga issue d'un jeu de données récemment publié.³⁹ Globalement, nous n'avons constaté aucun enrichissement ou un enrichissement minime pour le fer et le baryum, indicatif de sources principalement naturelles (EF médian de 1,2 et 2,0, respectivement). En revanche, le manganèse était légèrement enrichi (EF médian de 13), tandis que **le cuivre et le cobalt étaient fortement enrichis par rapport au sol de surface local** (EF médian de 108 et 126, respectivement). Les sites présentant les facteurs d'enrichissement les plus élevés étaient AK1, AK3 et AK4, tous situés à proximité de la fosse à ciel ouvert et du dépôt de stériles miniers de COMMUS (détails dans la section Qualité de l'air à Kolwezi). Nous avons ensuite effectué un second calcul en utilisant comme référence la composition médiane du minerai dans la Ceinture du Cuivre et du Cobalt du Katanga issue de Decrée et al.⁴⁰ et n'avons constaté pratiquement aucun enrichissement en fer (EF médian de 0,7) ainsi qu'un fort appauvrissement en cobalt, en cuivre et en manganèse (EF médian de 0,0003, 0,007 et 0,03, respectivement). Bien que la composition de l'hétérogénite puisse varier même dans un faible rayon,⁴⁰ ces éléments étaient fortement appauvris par rapport au minerai (c'est-à-dire de plus de 100 à 10 000 fois) : la différence de plusieurs ordres de grandeur conforte nos conclusions.

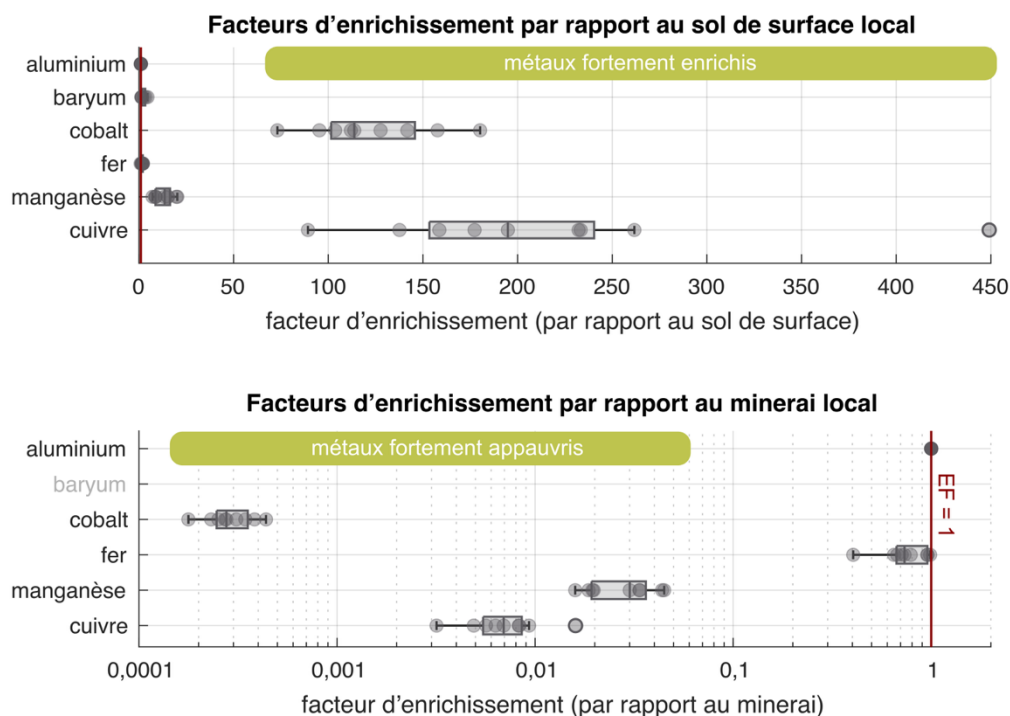


Figure 8. Aperçu des facteurs d'enrichissement des principaux métaux lourds dans les poussières inhalables collectées à Kolwezi, Pierre Muteba II et Fungurume. Des facteurs d'enrichissement avoisinant 1 (0,1 à 10, en rouge foncé) désignent des métaux dont les sources sont principalement naturelles, tandis que des facteurs supérieurs à 10 ou inférieurs à 0,1 indiquent des métaux respectivement enrichis ou appauvris d'au moins 10 fois par rapport à leur abondance naturelle ; ils sont ainsi indicatifs d'impacts anthropiques. Par souci de clarté, le graphique du bas est présenté en échelle logarithmique. Les données brutes figurent au [Tableau A4](#).

Pris ensemble, ces résultats suggèrent que **les poussières inhalables** sont fortement plus riches en cobalt, en cuivre et en manganèse que le sol de surface, mais contiennent moins de ces éléments que le minerai non transformé. Elles **proviennent donc très probablement de la remise en suspension de matériaux résiduels issus des activités minières, notamment des stériles, du minerai à faible teneur et des résidus de minerai transformé**, avec seulement des contributions additionnelles mineures et localisées (voir la section [Qualité de l'air à Fungurume](#)).

Bien qu'une comparaison directe avec des normes de qualité de l'air juridiquement contraignantes et des limites d'exposition professionnelle n'ait pas été possible, nous avons utilisé les valeurs d'exposition professionnelle du SCOEL ([Tableau 3](#)) pour dériver des valeurs de criblage approximatives susceptibles de protéger la population générale. Sur cette base, **les concentrations de cobalt et de cuivre apparaissent préoccupantes**. Les concentrations de cobalt variaient entre 0,05 et 0,32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dépassant systématiquement la valeur de criblage de 0,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De même, les concentrations de cuivre, comprises entre 0,2 et 1,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dépassaient le seuil de précaution de 0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans 8 des 9 échantillons. À l'inverse, le manganèse et le chrome demeuraient nettement en dessous de leurs valeurs de criblage estimées, respectivement de 7 et 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ([Tableau A3](#)). Bien que cette analyse ne doive pas être considérée comme une preuve définitive de nocivité, les dépassements systématiques observés pour le cuivre et le cobalt soulignent la nécessité d'une évaluation toxicologique approfondie dans la population générale.

Qualité de l'air à Kolwezi

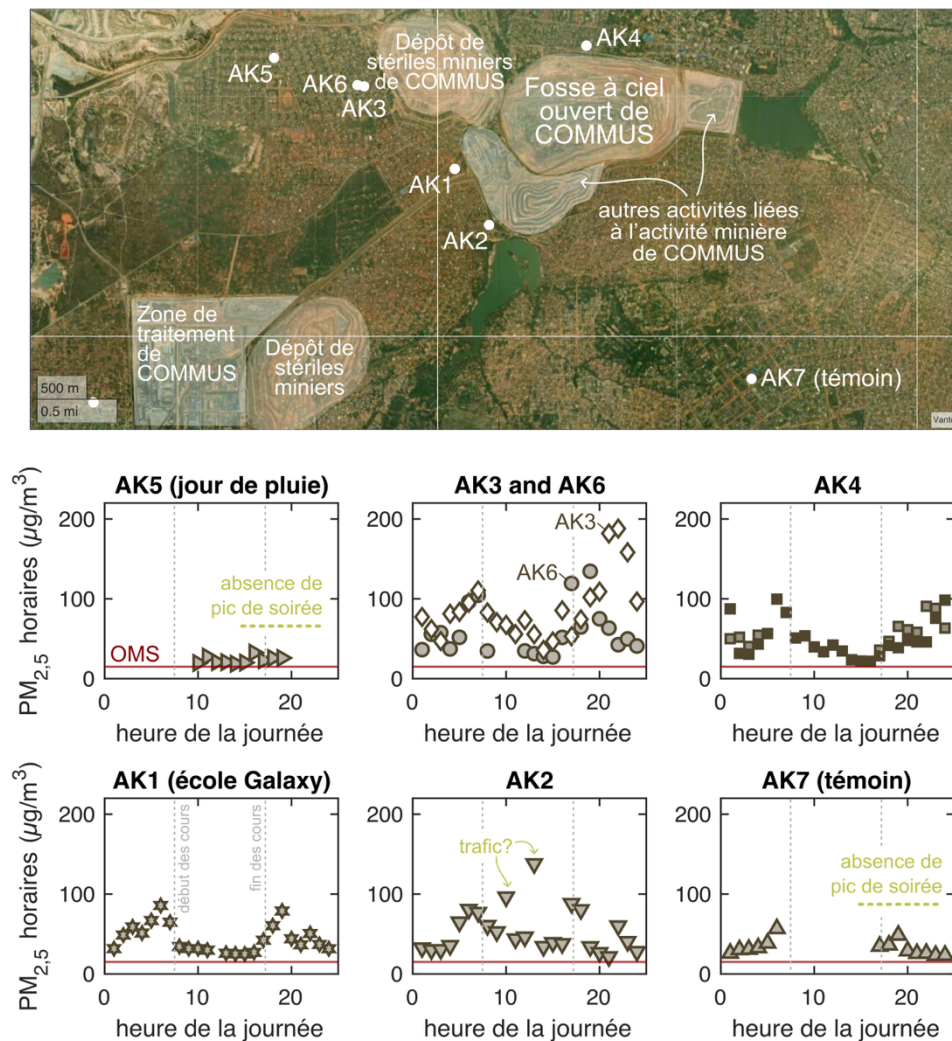
À Kolwezi, nous avons visité 7 sites, dont 6 situés à une distance comprise entre 100 m et 1,5 km de la fosse à ciel ouvert et du dépôt de stériles miniers de COMMUS, ainsi que d'autres activités directement ou indirectement associées à l'exploitation minière (Figure 9). Ceux-ci comprenaient l'école Galaxy (AK1 ; décrite plus en détails dans la section suivante) et un site échantillonné le 12 octobre 2025, pendant l'un des épisodes de pluie (AK5). Le septième site (AK7) servait de témoin, car il était situé à proximité de l'aéroport et du centre-ville de Kolwezi mais à au moins 5 km de toute source de pollution liée à l'activité minière.

Kolwezi était le site le plus pollué en matière de qualité de l'air ; la zone proche de la fosse à ciel ouvert et du dépôt de stériles miniers de COMMUS étant la plus critique (Figure 9). L'ensemble des données journalières de $PM_{2,5}$ et de PM_{10} dépassait les lignes directrices de l'OMS, les normes sud-africaines et au moins une autre norme internationale (Figure 6). Les valeurs les plus élevées, 87 et 178 $\mu g/m^3$ pour les $PM_{2,5}$ et les PM_{10} , respectivement, étaient toujours enregistrées au site AK3, dans un rayon de 500 mètres autour du dépôt de stériles miniers de COMMUS. Globalement, les 4 sites de Kolwezi disposant de valeurs journalières de PM avaient un indice de qualité de l'air compris entre 3 (« malsain pour les personnes sensibles ») et 4 (« malsain »).



Figure 9. Aperçu des sites les plus pollués à Kolwezi. Les sites AK3 (A), AK6 (C) et AK4 (D) se trouvaient dans diverses cellules du quartier Musonoie, à Kolwezi. L'école Galaxy (site AK1, voir aussi la Figure 12) se trouvait également à proximité. Tous les sites étaient situés à moins d'un kilomètre du grand dépôt de stériles miniers de COMMUS visible au panneau B. Le site AK4 (E) se trouvait dans le quartier Gécamines Kolwezi, à proximité de la fosse à ciel ouvert qui commence au bout de la route.

Les sites autour de la fosse à ciel ouvert et du dépôt de stériles miniers de COMMUS présentait également les valeurs les plus préoccupantes des $PM_{2,5}$ horaires, affichant les minima de la mi-journée les plus élevés et un pic récurrent en fin d'après-midi ou en soirée (Figure 10). Les sites AK3 et AK6, immédiatement adjacents au dépôt de stériles miniers, présentaient les pics de soirée les plus marqués de l'ensemble des données, atteignant des valeurs aussi élevées que $180 \mu g/m^3$. Suivaient AK4, près de la Gécamines, et AK1, l'école Galaxy. Le capteur installé au point AK2, proche du lac Golf et d'une route fréquentée, peut avoir détecté des émissions de PM combinées provenant d'activités liées à l'exploitation minière et du trafic : en particulier, nous soupçonnons que le trafic urbain est responsable des pics observés au milieu de la journée. Malheureusement, nous n'avons pas collecté de poussières inhalables sur ce site et ne sommes donc pas en mesure de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. Seuls 2 sites ne présentaient pas le pic de $PM_{2,5}$ en soirée. Le premier était AK5, relativement proche d'AK6 mais visité pendant l'épisode de pluie du 12 octobre 2025. La pluie est bien connue pour nettoyer l'atmosphère des particules : les



faibles niveaux de PM reflètent ce phénomène naturel. Le second était AK7, un site témoin proche de l'aéroport de Kolwezi et d'un trafic ordinaire mais à l'écart des principales activités liées à l'exploitation minière.

À Kolwezi, nous n'avons collecté de poussières inhalables que sur 4 sites – AK1, AK3, AK4 et AK6 – qui étaient tous situés autour de la fosse à ciel ouvert et du dépôt de stériles miniers de COMMUS. Il s'agissait également des sites les plus pollués d'après les données de PM (Figure 6 et Tableau A2). Tous les échantillons de poussières inhalables contenaient de l'aluminium, du cobalt, du fer, du manganèse et du cuivre. Un échantillon ne contenait pas de baryum (AK4), et un comportait 0,21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'étain (AK6 ; Tableau A3). Un test statistique (précisions dans la légende de la figure) a montré que les **poussières inhalables de Kolwezi étaient significativement enrichies en manganèse et en fer par rapport à Fungurume et Pierre Muteba II** (Figure 11). Bien que cela ne soit pas statistiquement significatif, le cuivre et le cobalt étaient également plus élevés à Kolwezi. Bien que fondé sur une petite série de données, ce résultat suggère que les poussières remises en suspension présentent une empreinte propre à chaque site, malgré l'origine commune liée aux activités minières.

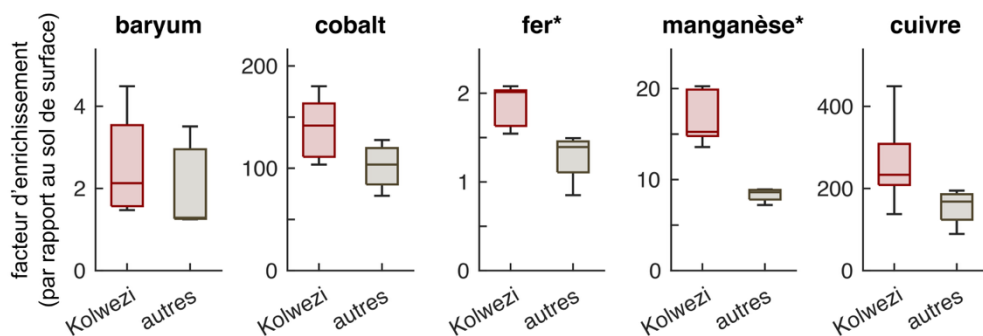


Figure 11. Comparaison entre les facteurs d'enrichissement à Kolwezi (boîte rouge) et les autres sites d'échantillonnage (Pierre Muteba II et Fungurume). Un test U de Mann-Whitney a montré que le fer et le manganèse différaient significativement entre les deux zones ($p = 0,016$ dans les deux cas), tandis que la différence pour le cuivre et le cobalt était plus faible ($p = 0,11$ dans les deux cas). Les données brutes figurent au Tableau A4.

Qualité de l'air à l'école Galaxy

Un site d'échantillonnage clé à Kolwezi était l'école Galaxy (AK1), qui accueille environ 1 700 élèves du primaire et du secondaire. L'école est située dans la cellule Kabila (Musonoie), à proximité de la fosse à ciel ouvert, du dépôt de stériles miniers et d'autres activités liées à l'exploitation minière de COMMUS (Figure 12). Selon les résidents, la zone est caractérisée par de fréquentes explosions et une circulation quasi constante de camions transportant du minerai et des résidus miniers, observations que nous avons confirmées lors de notre campagne. Ces activités génèrent un bruit considérable et mobilisent de grandes quantités de poussière, en particulier pendant la saison sèche. Bien qu'il s'agisse du seul établissement scolaire inclus dans la campagne d'octobre 2025, plusieurs autres établissements à Kolwezi se trouvaient dans un rayon de 0,5 à 1 km des opérations de COMMUS. D'après nos résultats, nous nous attendons à ce que ces établissements connaissent des problèmes de qualité de l'air comparables à ceux de l'école Galaxy, voire pires.



Figure 12. Vue aérienne du tas de stockage visible depuis la cour de l'école Galaxy. La carte en haut à droite montre l'emplacement de l'école (site AK1) par rapport aux activités pertinentes liées à l'exploitation minière. Le dépôt de stériles miniers est le même qu'à la Figure 9B.

Nous avons visité ce site à deux reprises. Le 14 octobre 2025, nous avons collecté un jeu de données complet de PM et un échantillon de poussières inhalables ; le 17 octobre, nous avons obtenu un second échantillon de poussières. Dans les deux cas, nous avons installé les instruments à l'intérieur de la cour de l'école, au-dessus de la salle des professeurs.

Le moniteur de PM a révélé un **niveau préoccupant de pollution par les particules en suspension**, cohérent avec les observations faites sur d'autres sites de Kolwezi situés à proximité d'exploitations minières. La concentration journalière de $PM_{2,5}$ était de $44 \mu g/m^3$, soit près de 3 fois la ligne directrice de l'OMS et supérieure aux normes juridiquement contraignantes d'Afrique du Sud et des États-Unis (Figure 6 et Tableau A2). De même, les PM_{10} journalières s'élevaient à $105 \mu g/m^3$, dépassant de plus d'un facteur 2 la ligne directrice de l'OMS ainsi que les AQS sud-africaine, européenne et suisse (Figure 6). Ces concentrations correspondaient à un **IQA de 3 (« malsain pour les groupes sensibles »)**, associé à une « probabilité accrue de symptômes respiratoires chez les groupes sensibles (par exemple les enfants), à une exacerbation des symptômes d'une maladie cardiopulmonaire préexistante, ou au décès consécutif à celle-ci ».²³

Les données horaires de PM indiquent en outre que **les enfants fréquentant cette école subissent une exposition aux PM plus élevée que les élèves d'établissements plus éloignés des activités liées à l'exploitation minière**. La Figure 13 révèle un net chevauchement entre les pics de PM du matin et du soir et les heures de début et de fin des cours de l'école. Alors que le pic matinal était observé dans l'ensemble de la zone d'étude, le pic de soirée se limitait aux sites situés dans un rayon de 0,5 à 1 km des dépôts de stériles miniers et d'autres activités liées à l'exploitation minière (Figure 7 et Figure 10). Notamment, nous n'avons détecté aucun pic de PM pendant les pauses scolaires (Figure 12), démontrant que les instruments détectaient une pollution ambiante plutôt que des particules mises en suspension par les mouvements des enfants.

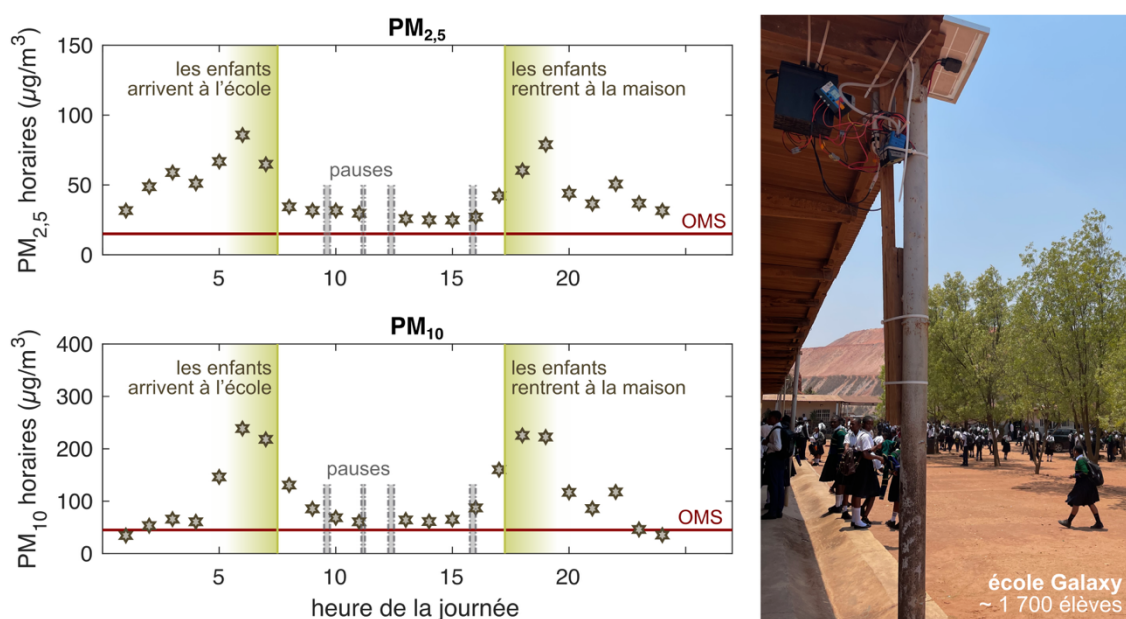


Figure 13. Tendances journalières des $PM_{2,5}$ et PM_{10} horaires à l'école Galaxy. Les zones grises au cours du minimum de la mi-journée correspondent aux temps de pause de l'école primaire. Les lignes rouges correspondent aux lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air. La photo de droite montre l'emplacement de notre dispositif de mesure pendant la pause déjeuner (vers 12:30), avec le tas de stockage visible à proximité.

Les 2 échantillons de poussière présentaient une composition chimique comparable, avec une empreinte caractéristique de matériaux résiduels issus des activités minières locales. Dans les deux échantillons, nous n'avons détecté que de l'aluminium, du baryum, du cobalt, du cuivre, du fer et du manganèse (Tableau A3). **Le cuivre et le cobalt** présentaient respectivement les deuxième et troisième concentrations les plus élevées de l'ensemble des données et **dépassaient la limite de précaution estimée d'un facteur supérieur à 4** (cuivre : 0,49-1,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ contre une limite de 0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; cobalt : 0,16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ contre une limite de 0,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Bien que ces limites soient indicatives, ce constat est préoccupant, en particulier lorsqu'il est mis en perspective avec des études de biosurveillance antérieures menées dans la zone, qui ont identifié les poussières contaminées comme une voie d'exposition principale au cobalt chez les enfants.^{6,50}

Conformément aux observations faites sur d'autres sites de Kolwezi, l'analyse des facteurs d'enrichissement a montré que les **poussières inhalables portent l'empreinte chimique de matériaux miniers résiduels, ce qui désigne le dépôt de stériles miniers voisin comme la source la plus probable.** En effet, les EF par rapport au sol de surface étaient de 142 à 158 pour le cobalt, de 262 à 449 pour le cuivre et de 14 à 20 pour le manganèse (Tableau A4), indiquant un enrichissement modéré à fort par rapport aux poussières générées par la remise en suspension du sol local. En revanche, les EF par rapport au minerai local non transformé étaient 100 à 10 000 fois inférieurs à 1, indiquant un appauvrissement significatif (Tableau A4). Comme sur les autres sites, **nous n'avons pas détecté de marqueurs chimiques de combustion de biomasse** (par exemple le zinc) ni d'autres sources anthropiques courantes (Tableau 4), ce qui indique fortement une contribution secondaire de ces sources aux concentrations des métaux détectés.

Qualité de l'air à Pierre Muteba II

À Pierre Muteba II, nous avons déployé nos instruments dans une habitation privée (AP1) et un centre de santé (AP2). La zone est située à l'ouest de l'usine de traitement de COMMUS, à proximité d'une grande installation de stockage des résidus miniers et près d'un second tas de stockage n'appartenant pas à COMMUS (Figure 14). Sur les deux sites, nous avons collecté au moins un jeu de données complet de PM et un échantillon de poussières inhalables.

La pollution par les particules en suspension à Pierre Muteba II était globalement plus faible qu'à Kolwezi, mais les niveaux de PM dépassaient tout de même plusieurs lignes directrices et normes internationales de qualité de l'air (Figure 6 et Tableau A2). Les concentrations journalières de $PM_{2,5}$ atteignaient 40 et 45 $\mu g/m^3$ à AP1 et AP2, respectivement, dépassant la ligne directrice de l'OMS ainsi que les AQS de l'Afrique du Sud et des États-Unis. De même, les PM_{10} journalières s'élevaient à 79 et 117 $\mu g/m^3$, supérieures à la ligne directrice de l'OMS et aux normes sud-africaine, européenne et suisse. Sur les deux sites, ces concentrations correspondaient à un **IQA de 3**, classé « malsain pour les groupes sensibles ».

Les tendances horaires de PM étaient dépourvues, de manière constante, du pic de soirée (Figure 14), à l'image des tendances enregistrées dans les zones de Kolwezi situées à plus de 1 km des dépôts de stériles miniers, des fosses et d'autres activités liées à l'exploitation minière. Le pic matinal caractéristique et le minimum de la mi-journée qui s'ensuivait étaient en revanche observés de manière constante sur les deux sites. À AP2, 43 heures de surveillance continue ont confirmé la

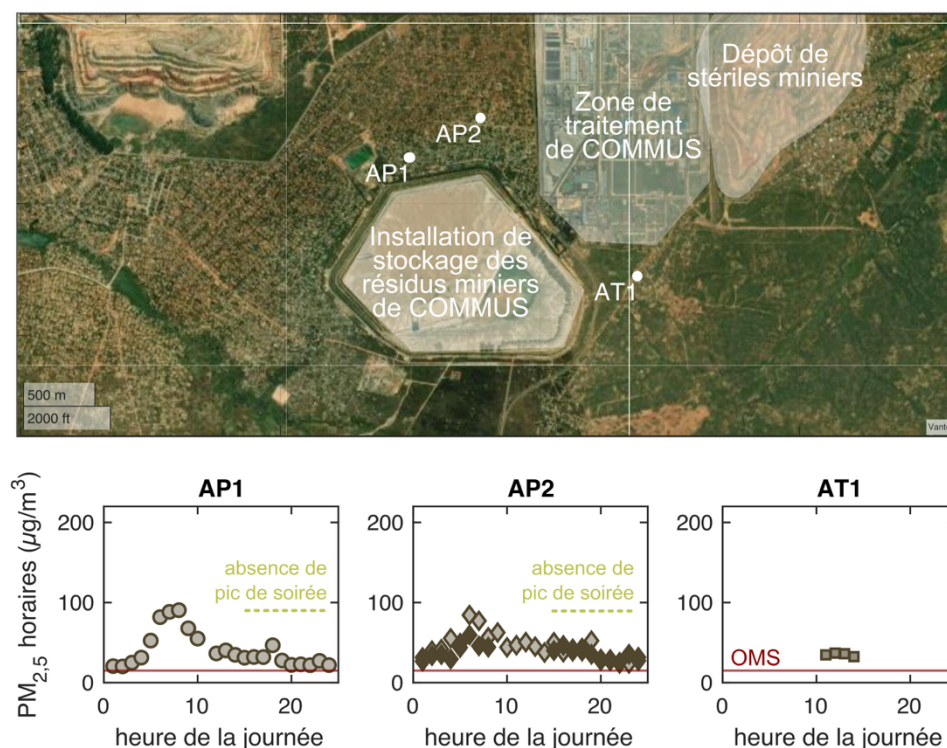


Figure 14. Détails des sites d'échantillonnage et tendances horaires de $PM_{2,5}$ à Pierre Muteba II. La ligne rouge dans chaque graphique indique la ligne directrice de l'OMS de 15 $\mu g/m^3$. Le site AP2 comprend des données horaires sur presque 2 jours. Le dépôt de stériles miniers situé sur le bord supérieur gauche de la carte n'appartient pas à COMMUS.

reproductibilité au quotidien de cette tendance. Un jeu de données incomplet supplémentaire collecté à Tshizuza (AT1), au sud-est de l'installation de stockage des résidus miniers et plus éloigné des dépôts de stériles miniers, a montré des concentrations horaires de $PM_{2,5}$ de 32 à 37 $\mu g/m^3$, dans la plage typique des valeurs minimales de la mi-journée observées sur l'ensemble des sites (Figure 14).

Les échantillons de poussières inhalables étaient qualitativement similaires à ceux collectés à Kolwezi mais contenaient des concentrations plus faibles de métaux, en particulier de cobalt, de cuivre et de baryum (ce dernier en dessous de la limite de détection à AP1 ; Tableau A3). Malgré ces concentrations plus faibles, **le cobalt et le cuivre dépassaient leur limite de précaution estimée** (cuivre : 0,49-0,73 $\mu g/m^3$ contre une limite de 0,30 $\mu g/m^3$; cobalt : 0,096-0,109 $\mu g/m^3$ contre une limite de 0,030 $\mu g/m^3$). **L'analyse des facteurs d'enrichissement a confirmé une contribution majeure de matériaux résiduels issus des activités minières locales**, bien que l'enrichissement relatif ait été plus faible qu'à Kolwezi (Figure 15 et Tableau A4) – reflétant peut-être la distance sensiblement plus grande par rapport aux principaux dépôts de stériles miniers. Ce comportement concorde avec ce qui est connu du comportement des particules dans l'atmosphère : plus le diamètre de la particule est grand, plus la distance qu'elle peut parcourir est faible.⁵¹

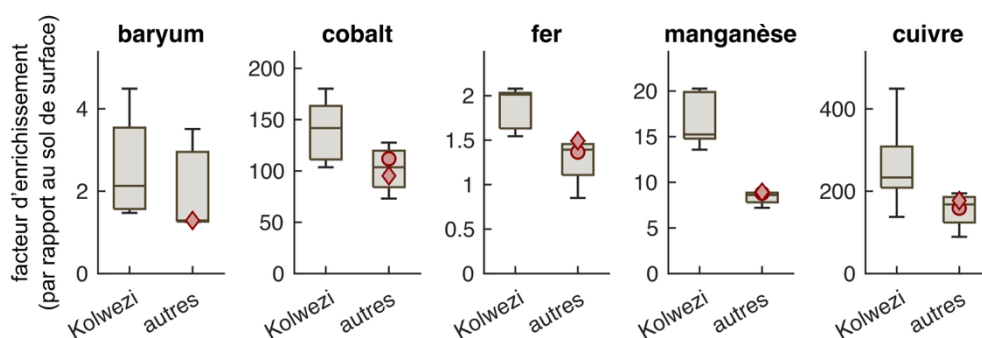


Figure 15. Facteurs d'enrichissement à Pierre Muteba II (symboles rouges ; cercle : AP1 ; losange : AP2) comparés aux autres sites d'échantillonnage. Les données brutes figurent au Tableau A4.

Qualité de l'air à proximité du lac Kando

Plus à l'est, dans le Territoire de Mutshatsha, nous avons visité Mibanze et Rianda, des villages ruraux situés sur les rives du lac Kando, au sud de la zone de concession de MUMI (Figure 16). Nous avons placé nos capteurs de PM dans 2 habitations privées mais n'avons pas pu collecter d'échantillons de poussières inhalables en raison de retards.

La pollution par les particules en suspension dans ces villages était globalement comparable au reste de la zone d'étude. À Mibanze (AM1), nous avons mesuré des valeurs journalières de $PM_{2,5}$ et de PM_{10} respectivement de 49 et 67 $\mu g/m^3$, dépassant les lignes directrices de l'OMS et plusieurs normes juridiquement contraignantes, dont celles d'Afrique du Sud (Figure 6 et Tableau A2). Ces valeurs se traduisaient par un **IQA de 3**, classé « malsain pour les groupes sensibles ».

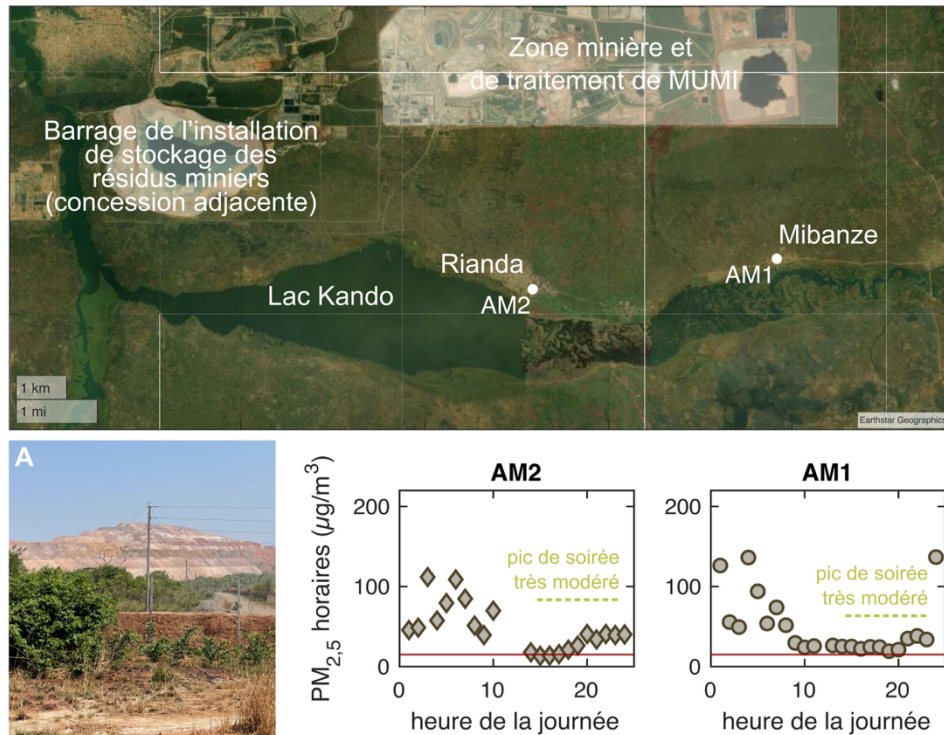


Figure 16. Détails des sites d'échantillonnage et tendances horaires de $PM_{2,5}$ à proximité du lac Kando. La ligne rouge dans chaque graphique indique la ligne directrice de l'OMS de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le panneau A montre le barrage de l'installation de stockage des résidus miniers visible depuis la route reliant Kisenda à Rianda et appartenant à la Société Minière de Deziwa SAS (attribution fondée sur OpenStreetMap⁴¹). Le site AM2 disposait d'un jeu de données incomplet.

Bien qu'à Rianda nous n'ayons collecté que 23 heures de données, **les tendances horaires des deux villages étaient parfaitement comparables**, montrant un pic matinal et un minimum de la mi-journée qui persistait jusqu'au soir, avec seulement une augmentation modérée au cours des dernières heures de la journée (Figure 16). Cette tendance reflétait bien les tendances observées à Pierre Muteba II et sur d'autres sites de Kolwezi situés à plus de 1 km des sources de poussières liées à l'exploitation minière (Figure 9 et Figure 14). En effet, les deux villages se trouvaient à au moins 5 km de la zone minière et de traitement active de MUMI et d'autres installations n'appartenant pas à MUMI. Pendant que nous conduisions à proximité du barrage de l'installation de stockage des résidus miniers (n'appartenant pas à MUMI ; Figure 16A), nous avons également remarqué des camions-citernes arrosant les rues, ce qui a probablement contribué à réduire la remise en suspension des poussières dans la zone.

Qualité de l'air à Fungurume

À Fungurume, nous avons collecté 2 jeux de données de particules en suspension et 2 échantillons de poussières inhalables dans des habitations privées situées au sud-est de la zone minière et de traitement de TFM. Ces mesures se distinguent du reste du jeu de données en ce qu'elles ont été collectées le 10 octobre, avant une perturbation de 2 jours qui a contribué à un assainissement atmosphérique au moins partiel.

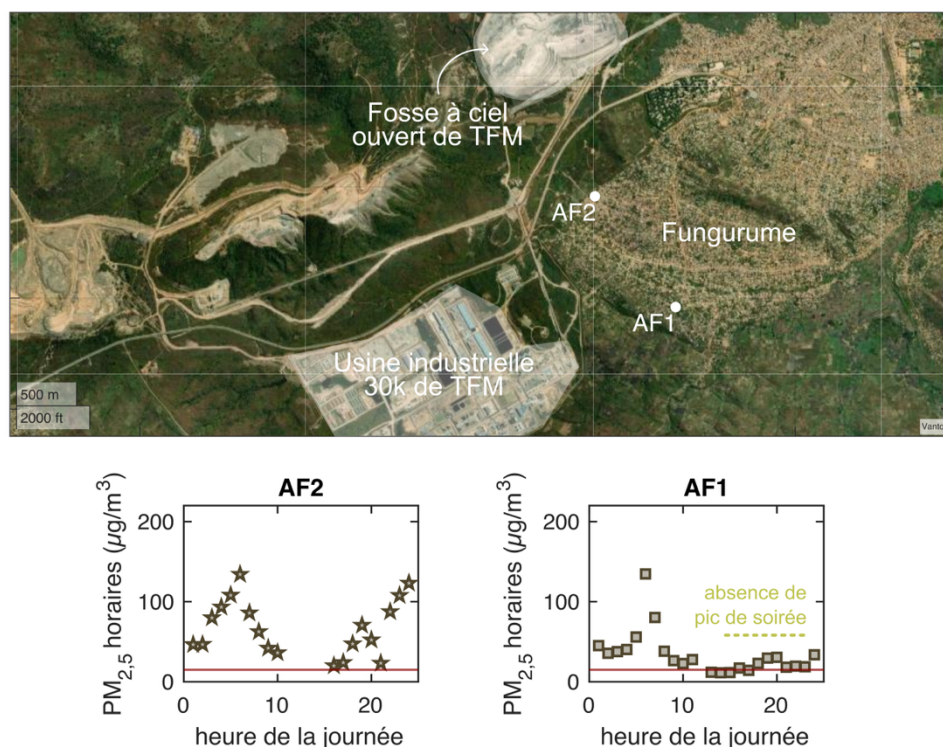


Figure 17. Détails des sites d'échantillonnage et tendances horaires de $PM_{2,5}$ à Fungurume. La ligne rouge dans chaque graphique indique la ligne directrice de l'OMS de $15 \mu g/m^3$. Le site AF2 disposait d'un jeu de données incomplet.

La pollution par les particules en suspension était globalement comparable aux autres sites de l'étude. À AF1, les $PM_{2,5}$ et les PM_{10} journalières s'élevaient respectivement à $33 \mu g/m^3$ et $117 \mu g/m^3$, dépassant de plus du double les lignes directrices de l'OMS et, pour les PM_{10} , les AQS européenne, suisse et sud-africaine. En raison de la valeur de $PM_{2,5}$ relativement faible, nous avons obtenu un **IQA de 2 (« modéré »)**, le plus bas du jeu de données. Une comparaison des tendances journalières laisse entrevoir que le site AF2 a connu une pollution par les particules en suspension plus forte qu'AF1, le plaçant plus près de la médiane de notre jeu de données. Bien que les deux sites aient présenté le pic matinal et le minimum de la mi-journée typiques, AF2 présentait une augmentation prononcée des $PM_{2,5}$ en soirée (Figure 17), à l'image des sites les plus pollués de Kolwezi. Notamment, AF2 était plus proche de la fosse à ciel ouvert de TFM qu'AF1, qui était quant à lui plus proche de l'usine industrielle 30k.

Le site AF2 est également apparu plus affecté en matière de teneur en métaux des poussières inhalables. Bien que les deux échantillons aient contenu de l'aluminium, du baryum, du cobalt, du chrome, du cuivre, du fer et du manganèse, les concentrations au site AF2 étaient sensiblement plus élevées qu'à AF1 (Tableau A3). Le cobalt ($0,091$ à AF1 contre $0,32 \mu g/m^3$ à AF2), le chrome ($0,018$ contre $0,29 \mu g/m^3$) et le cuivre ($0,4$ contre $1,7 \mu g/m^3$) étaient les métaux qui illustraient le mieux cette différence. AF2 était également le seul site où nous avons détecté du nickel ($0,4 \mu g/m^3$). Bien que les concentrations de chrome soient demeurées nettement en dessous de la valeur de criblage estimée ($0,02$ - $0,3 \mu g/m^3$ contre une valeur de référence de $67 \mu g/m^3$), **le cuivre, le cobalt et le nickel étaient**

proches de leurs valeurs de criblage de précaution (ou supérieures à celles-ci) – un constat qui justifie des investigations supplémentaires.

Les facteurs d'enrichissement indiquaient que l'aluminium, le baryum, le fer et le chrome étaient d'origine principalement naturelle, avec des abondances comparables au sol de surface régional (Tableau A4). Le cobalt, le cuivre et le manganèse étaient enrichis par rapport au sol de surface mais demeuraient dans la plage basse des EF de l'ensemble du jeu de données. À AF2, le nickel présentait un enrichissement par rapport au sol de surface (EF de 63) mais avait une abondance compatible avec le minerai *non transformé* (EF de 0,2 ; Tableau A4), suggérant que le traitement du minerai ne semble pas avoir d'incidence sur la concentration de cet élément dans les poussières inhalables. Bien que le nickel particulaire puisse également provenir du trafic routier, de la combustion de fioul ou d'activités industrielles (Tableau 4), la présence de faibles quantités de nickel dans le minerai local⁴⁰ et l'absence d'autres traceurs spécifiques de sources (c'est-à-dire le zinc, le plomb et le cadmium) suggèrent que ces contributions non minières, si elles existent, sont mineures. Pris ensemble, ces résultats indiquent qu'**à Fungurume les métaux présents dans les poussières inhalables proviennent principalement de matériaux résiduels issus des activités minières locales.**

Résultats clés

Particules en suspension

Les concentrations journalières de PM_{2,5} et de PM₁₀ mesurées sur plusieurs jours et sur plusieurs sites dépassaient systématiquement les lignes directrices de l'OMS ainsi que plusieurs normes de qualité de l'air juridiquement contraignantes (Figure 6 et Tableau A2). Notamment, 7 des 8 sites dépassaient les normes sud-africaines – le cadre normatif largement adopté par les sociétés minières opérant en RDC – tant pour les PM_{2,5} que pour les PM₁₀. **Les niveaux de PM les plus élevés étaient systématiquement enregistrés à Kolwezi**, à proximité du dépôt de stériles miniers, de la fosse à ciel ouvert et d'autres sources de poussières liées à l'exploitation minière de COMMUS.

En cohérence avec ces dépassements, **6 des 8 sites présentaient un Indice de Qualité de l'Air de 3**, correspondant à « malsain pour les groupes sensibles », **et un site présentait un IQA de 4** (« malsain » ; Tableau A2). Selon l'ATSDR,²³ un IQA de 3 est associé à une probabilité accrue de symptômes respiratoires chez les populations vulnérables (dont les enfants, les femmes enceintes et les personnes âgées) et à une exacerbation des maladies cardiopulmonaires, tandis qu'un IQA de 4 englobe en outre une probabilité accrue d'effets respiratoires pour la population générale.

Les données horaires de PM renforcent ce constat. Dans l'ensemble de la zone d'étude, les jours secs présentaient une tendance diurne reproductible caractérisée par un pic matinal et un minimum de la mi-journée (Figure 7), cohérente avec la dynamique atmosphérique typique des zones continentales. Superposés à ce fond, **les sites situés dans un rayon d'environ 0,5 à 1 km des dépôts de stériles miniers et/ou des exploitations minières actives présentaient des pics prononcés en fin d'après-midi ou en soirée**, atteignant dans certains cas des concentrations jusqu'à 10 fois supérieures aux lignes directrices de l'OMS (Figure 7). L'école Galaxy – le seul établissement scolaire inclus dans notre étude, bien qu'il ne soit pas le seul situé à proximité d'exploitations minières – figurait parmi les sites présentant ce pic de fin d'après-midi. Même en excluant ces extrêmes, **98 % des valeurs horaires de PM_{2,5} et 84 % des valeurs horaires de PM₁₀ dépassaient les lignes directrices de l'OMS**. Fait important, **la majeure partie de l'échantillonnage a été réalisée peu après deux épisodes de fortes pluies qui ont très probablement atténué les problèmes de qualité de l'air**. Ainsi, les conditions typiques de saison sèche sont probablement plus sévères que ce que révèlent nos mesures.

Impacts attendus sur la santé

Les implications sanitaires de ces résultats sont substantielles. **La pollution atmosphérique est actuellement le deuxième facteur de risque de mortalité à l'échelle mondiale** ; en 2021 seulement, elle a contribué à un nombre estimé de 8,1 millions de décès dans le monde, dont la **grande majorité** (c'est-à-dire 90 %) **est attribuable à l'exposition aux PM_{2,5}**.¹² Les PM_{2,5} comme les PM₁₀ sont associées à une augmentation de la mortalité toutes causes confondues, de la fréquence des maladies cardiovasculaires et respiratoires et des complications de grossesse, ainsi qu'à une

altération du développement neurologique chez les enfants.^{13,23,52} Le Centre international de recherche sur le cancer a en outre classé les particules en suspension présentes dans la pollution de l'air extérieur comme cancérigène du Groupe 1 (c'est-à-dire dont la cancérogénicité pour l'être humain est certaine).⁵³ Compte tenu de l'absence d'études sur la pollution par les PM dans la zone, ces résultats constituent une contribution importante à la base de données probantes, soulignant le **besoin urgent d'introduire des normes nationales de qualité de l'air et d'en assurer le respect, en particulier à proximité des zones minières.**

Poussières inhalables

Tous les échantillons de poussières inhalables présentaient une empreinte nette de matériaux résiduels issus des activités minières locales (Figure 8, Tableau A3 et Tableau A4). Bien que les différences mineures entre les sites reflètent probablement des variations des conditions météorologiques, de la géologie locale et des activités spécifiques liées à l'exploitation minière, la tendance globale était robuste. Le fort enrichissement en cobalt, en cuivre et en manganèse par rapport au sol de surface local, combiné à leur appauvrissement par rapport au minerai brut, suggère fortement que **les poussières inhalables provenaient principalement de la remise en suspension de matériaux issus de dépôts de stériles miniers nus, de stocks et de fosses à ciel ouvert** – comme l'avaient suggéré des travaux antérieurs.⁶ La présence omniprésente de cobalt, qui n'est pas associé à une perturbation anthropique courante (Tableau 4), et l'observation des facteurs d'enrichissement les plus élevés à proximité des dépôts de stériles miniers et des exploitations minières actives renforcent également cette hypothèse.

Nous n'avons détecté aucun marqueur chimique indicatif de la combustion de biomasse, suggérant de faibles contributions de la combustion du bois et du charbon de bois dans la zone d'étude (Tableau 4). En cohérence avec ce constat, la dynamique journalière des PM ne présentait pas de tendances caractéristiques de la cuisine ou d'autres activités domestiques de combustion (Figure 7) ; des tendances attribuables aux émissions du trafic n'ont été observées que sur un seul site immédiatement adjacent à une route principale (AK2 ; Figure 10). Pris ensemble, ces observations confortent l'idée que **la pollution particulaire dans la zone est déterminée – directement ou indirectement – par les activités minières plutôt que par l'usage de combustibles domestiques ou le trafic urbain général.**

Une évaluation préliminaire par ordre de grandeur suggère que les concentrations de cobalt et de cuivre dans les poussières inhalables représentent une préoccupation sanitaire pour les communautés locales (Tableau A3). Bien que l'absence de normes pour des comparaisons directes empêche une évaluation définitive des risques, le cobalt et le cuivre dépassaient leurs valeurs de criblage dans 88 à 100 % des échantillons (Tableau A3). Le cobalt fait depuis peu l'objet d'une attention accrue au niveau européen, car la transition verte est susceptible d'accroître l'exposition professionnelle alors que les données probantes toxicologiques et épidémiologiques restent limitées.⁵⁴ **L'inhalation de poussières et de fumées riches en cobalt constitue la principale voie d'exposition à ce métal en milieu professionnel.**³¹ Des investigations antérieures dans la Ceinture

du Cuivre et du Cobalt de la RDC ont mis au jour des niveaux significativement plus élevés de cobalt dans l'urine de communautés vivant à proximité de zones minières, les enfants étant affectés de manière disproportionnée par rapport aux adultes.^{6,50,55} Tandis que l'absorption alimentaire apparaissait prédominante dans la population adulte générale,⁵⁰ l'exposition aux poussières riches en cobalt a été identifiée comme la principale voie d'exposition pour les enfants et les mineurs artisanaux.^{6,55}

Impacts attendus sur la santé

Le cobalt est un oligo-élément essentiel (il est un composant de la vitamine B₁₂) mais l'inhalation de poussières et de fumées riches en ce métal peut avoir des effets sanitaires néfastes. La respiration de particules riches en cobalt peut provoquer une irritation respiratoire, une diminution de la fonction pulmonaire et une sensibilisation respiratoire, dont l'asthme.^{31,56} Des études animales ont montré une incidence accrue de tumeurs pulmonaires après inhalation, et plusieurs composés du cobalt sont classés comme cancérogènes ou cancérogènes suspectés.^{31,57} Une exposition orale élevée a également été associée à des effets néfastes sur le sang et la thyroïde.⁵⁶ Reflétant ces préoccupations, **l'ATSDR recommande que les enfants évitent de jouer dans des zones où des sols ou des poussières riches en cobalt peuvent être présents**⁵⁶ – une situation omniprésente dans notre zone d'étude, en particulier à l'école Galaxy et, potentiellement, dans d'autres établissements scolaires situés à moins d'un kilomètre des dépôts de stériles miniers, des fosses à ciel ouvert et d'autres activités minières génératrices de poussières.

Le cuivre est un autre élément essentiel qui peut devenir nocif à des niveaux d'exposition élevés. L'inhalation de poussières ou d'aérosols contenant du cuivre peut irriter le nez et la gorge et a été associée à des symptômes tels que des céphalées et des vertiges.⁵⁸ À fortes doses, l'ingestion de cuivre a, dans les cas graves, entraîné un empoisonnement sévère.⁵⁸ Comme pour le cobalt, l'exposition au cuivre se produit par plusieurs voies, notamment par l'eau et les aliments contaminés.^{50,58}

Qualité de l'air et santé dans les communautés riveraines des sites miniers du Lualaba

Les données présentées dans ce rapport fournissent des éléments probants importants pour contribuer à établir un lien entre la pollution liée à l'activité minière et les impacts sur la santé humaine dans la province du Lualaba.

La littérature grise a documenté une dégradation des conditions sanitaires dans la zone à la suite du récent essor minier. En 2024, RAID et Afrewatch ont interviewé des professionnels de santé à Kolwezi, qui ont signalé une **nette augmentation de certaines maladies au cours des 5 à 10 dernières années, coïncidant avec l'intensification de l'activité minière dans la région**.³ Les affections les plus fréquemment signalées comprenaient des problèmes de peau et des yeux, des troubles respiratoires et, chez les femmes, des problèmes gynécologiques et de reproduction, tels que des fausses couches et des malformations congénitales. Bien que nombre de ces effets aient été anecdotiquement reliés à une mauvaise qualité de l'eau,³ **plusieurs sont également globalement cohérents avec une exposition à la pollution atmosphérique**. Par exemple, les PM_{2,5} et les PM₁₀

ont été associées à une irritation oculaire, à des maladies respiratoires et à des complications de grossesse, entre autres.^{13,23,52,59} L'inhalation de particules riches en cobalt et en cuivre peut également provoquer des troubles respiratoires.^{31,56,58} Compte tenu de la complexité du contexte, il est peu probable qu'un seul polluant explique les tendances observées. Toutefois, **les niveaux constamment élevés de PM_{2,5}, de PM₁₀ et de certains métaux dans les poussières inhalables concordent, au moins en partie, avec l'éventail des affections signalées à Kolwezi et dans les communautés voisines.**

Des travaux récents de l'EIA US et de Premi Congo ont également identifié un lien entre le SO₂, un polluant atmosphérique non inclus dans notre étude, et le traitement du minerai à Fungurume.¹⁰ Les problèmes de santé qui ont fortement augmenté dans la zone depuis 2023 – année de construction de l'usine 30k⁶⁰ – comprenaient des saignements de nez, des crachats de sang, des infections respiratoires et des complications de grossesse. Bien que l'exposition à des niveaux élevés de SO₂ puisse se limiter aux abords immédiats des sites de traitement du minerai, ce constat renforce l'idée que **les communautés du Lualaba sont exposées à de multiples polluants par divers milieux environnementaux, ce qui peut entraîner des effets sanitaires cumulatifs** (voir par exemple aussi notre évaluation de la qualité de l'eau et des sédiments⁴).

Il existe également des données probantes solides montrant que **les communautés vivant à quelques kilomètres d'exploitations minières ou de fonderies** à Lubumbashi, à Likasi et dans les zones environnantes **présentent des concentrations de métaux lourds dans leur urine plus élevées que les populations témoins.**^{50,55} Des résultats similaires ont été signalés dans un quartier de Kolwezi connaissant une activité minière artisanale intense.⁶ En effet, Banza et al.⁵⁵ ont constaté que les communautés vivant dans un rayon de 3 km d'exploitations minières ou de fonderies présentaient les concentrations urinaires de cobalt les plus élevées jamais enregistrées au sein de la population générale (au moment de la rédaction), avec 87 % des enfants dépassant les seuils d'exposition *professionnelle* pour ce métal. À travers les différentes études, les enfants étaient systématiquement plus affectés que les adultes,^{6,50,55,61} reflétant une tendance bien établie de vulnérabilité accrue des jeunes aux polluants environnementaux.^{59,62} Cheyns et al.⁵⁰ ont en outre montré que les aliments constituaient la voie d'exposition prédominante au cobalt chez les adultes (voir notre rapport sur la qualité de l'eau et des sédiments⁴), tandis que les poussières contaminées prédominaient chez les enfants.

Malgré les réserves – ces études sont relativement anciennes, ne recoupent que partiellement notre zone d'échantillonnage et portaient sur les poussières *déposées* plutôt que *inhalables* –, **le mécanisme proposé pour l'exposition au cobalt chez les enfants est globalement cohérent avec nos résultats sur les poussières inhalables**, renforçant notre préoccupation pour la population d'âge scolaire. Bien que Cheyns et al.⁵⁰ se soient concentrés sur l'ingestion main-bouche de poussières *déposées* comme mécanisme possible d'exposition au cobalt, la littérature sur la santé au travail identifie l'inhalation comme la voie principale,³¹ laissant entrevoir que les deux peuvent être pertinentes.

Actuellement, l'absence d'une étude épidémiologique formelle reliant directement l'exposition aux polluants atmosphériques à des effets sanitaires précis au Lualaba représente une lacune critique que ce rapport ne peut combler à lui seul. Une évaluation sanitaire urgente et indépendante est donc bien justifiée.

Références

- (1) Cobalt Institute. Cobalt: Powering the Green Economy, 2025.
https://www.cobaltinstitute.org/wp-content/uploads/2025/07/Cobalt-Factsheet_July-2025.pdf.
- (2) Cobalt Institute. *Cobalt Market Report 2024*; 2025. <https://www.cobaltinstitute.org/wp-content/uploads/2025/05/Cobalt-Market-Report-2024.pdf>.
- (3) RAID. *Beneath the Green – A Critical Look at the Environmental and Human Costs of Industrial Cobalt Mining in DRC*; 2024. <https://raid-uk.org/wp-content/uploads/2024/03/Report-Beneath-the-Green-DRC-Pollution-March-2024.pdf>.
- (4) Source International. *Mining Impacts on Aquatic Environments in the Copper-Cobalt Belt, Democratic Republic of Congo – Assessment of Water and Sediment Quality in Frontline Communities of the Lualaba Province*; 2026.
- (5) Martínez-Alonso, S.; Veefkind, J. P.; Dix, B.; Gaubert, B.; Theys, N.; Granier, C.; Soulié, A.; Darras, S.; Eskes, H.; Tang, W.; Worden, H.; Gouw, J. de; Levelt, P. F. S-5P/TROPOMI-Derived NO_x Emissions From Copper/Cobalt Mining and Other Industrial Activities in the Copperbelt (Democratic Republic of Congo and Zambia). *Geophys. Res. Lett.* **2023**, 50 (19), e2023GL104109. <https://doi.org/10.1029/2023GL104109>.
- (6) Banza, C. L. N.; Casas, L.; Haufroid, V.; De Putter, T.; Saenen, N. D.; Kayembe-Kitenge, T.; Musa Obadia, P.; Kyanika Wa Mukoma, D.; Lunda Ilunga, J.-M.; Nawrot, T. S.; Luboya Numbi, O.; Smolders, E.; Nemery, B. Sustainability of Artisanal Mining of Cobalt in DR Congo. *Nat. Sustain.* **2018**, 1 (9), 495–504. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0139-4>.
- (7) Musibono, D. E.; Munkwomo, J. R. G.; Nsimnda, C. I.; Gizanga, R. V.; Biey, E. M.; Bondo, E. B.; Munduku, O. K. Chemical Pollution Assessment in the Katanga Copper Belt Mining Region and Effluents Characterization (DR Congo, Subsaharian Africa): An Introductory Paper. *Int. J. Sci. Acad. Res.* **2020**, 1 (2), 58–60.
- (8) Kumwimba, M.; Emongo, D.; Nkulu, S.; Zeka, L.; Lubaba, B.; Celestin, N.; Nonga, W. Contribution à l'étude de La Pollution Particulaire de l'air En Milieu Urbain: « Cas Des PM_{2,5} et PM₁₀ Le Long de La Route Kasapa, Dans La Ville de Lubumbashi, En R.D. Congo ». *South Fla. J. Dev.* **2021**, 2, 4130–4141. <https://doi.org/10.46932/sfjdv2n3-026>.
- (9) Leon-Kabamba, N.; Ngatu, N. R.; Muzembo, B. A.; Kakoma, S.; Michel-Kabamba, N.; Danuser, B.; Luboya, O.; Hirao, T. Air Quality in the Working Environment and Respiratory Health of Female Congolese Stone Quarry Workers. *Trop. Med. Infect. Dis.* **2020**, 5 (4), 171. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed5040171>.
- (10) Environmental Investigation Agency US; Premi Congo. *Toxic Transition – How the World's Largest Cobalt Producer Has Allegedly Poisoned Communities for Years*; 2026. <https://eia.org/wp-content/uploads/2026/03/Toxic-Transition-EIA-Investigation-into-Cobalt-Mining-in-DRC.pdf>.
- (11) *World's largest cobalt producer admits toxic emission spikes, DRC government announces an inspection*. EIA. <https://eia.org/press-releases/worlds-largest-cobalt-producer-admits-toxic-emissions-spikes-drc-government-announces-an-inspection/> (accessed 2026-05-05).
- (12) *Air pollution accounted for 8.1 million deaths globally in 2021, becoming the second leading risk factor for death, including for children under 5 years* | Institute for Health Metrics and Evaluation. <https://healthdata-digex.healthdata.org/news-events/newsroom/news-releases/air-pollution-accounted-81-million-deaths-globally-2021-becoming> (accessed 2025-11-14).

- (13) *WHO Global Air Quality Guidelines. Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide.*; World Health Organization: Geneva, 2021.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
- (14) *Directive 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe (Recast)*; 2024.
<http://data.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj> (accessed 2025-11-12).
- (15) *National Environmental Management: Air Quality Act, 2004 (Act No. 39 of 2004) – National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter with Aerodynamic Diameter Less than 2.5 Micron Metres (PM 2.5)*; 2012.
https://www.gov.za/sites/default/files/gcis_document/201409/35463gon486.pdf.
- (16) *China: Air Quality Standards.* Transport Policy.
<https://www.transportpolicy.net/standard/china-air-quality-standards/> (accessed 2025-11-12).
- (17) *Directive (EU) 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe*; 2008; Vol. 152.
<http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj> (accessed 2025-11-12).
- (18) *Ordinance of 16 December 1985 on Air Pollution Control (OAPC) 814.318.142.1*; 2025.
https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/en (accessed 2025-11-12).
- (19) US EPA, O. *Current NAAQS Table*. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table> (accessed 2025-11-12).
- (20) *National Environmental Management: Air Quality Act, 2004 (Act No. 39 of 2004) – National Ambient Air Quality Standards*; 2009.
https://www.gov.za/sites/default/files/gcis_document/201409/328161210.pdf.
- (21) *Ambient air quality standards.*
https://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air_Environment/quality_standard1/201605/t20160511_337502.shtml (accessed 2025-11-12).
- (22) *Règlement Minier – Decree No 038/2003 of 26 March 2003 Portant Règlement Minier Tel Que Modifié et Complété Par Le Décret N° 18/024 Du 08 Juin 2018*; 2003.
- (23) Agency for Toxic Substances and Disease Registry. *Guidance for Inhalation Exposures to Particulate Matter*, 2024. <https://www.atsdr.cdc.gov/pha-guidance/resources/ATSDR-Particulate-Matter-Guidance-508.pdf>.
- (24) *Air Quality Index Hub.* openaq. <https://aqihub.info/>.
- (25) *AQI Basics.* AirNow.gov. <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics> (accessed 2026-02-04).
- (26) *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)*; Environmental Protection Agency, 2018. <https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf>.
- (27) *Integrated Science Assessment for Particulate Matter*; EPA/600/R-19/188; Environmental Protection Agency, 2019. <https://assessments.epa.gov/risk/document/&deid=347534>.
- (28) Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. *Occupational exposure limit values (OELs): Foreign and EU limit values*. <https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/occupational-exposure-limit-values/foreign-and-eu-limit-values/index.jsp> (accessed 2026-02-06).
- (29) Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. *GESTIS - International limit values for chemical agents*. <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-internationale-grenzwerte-fuer-chemische-substanzen-limit-values-for-chemical-agents/index-2.jsp> (accessed 2026-02-05).
- (30) *Recommendations of the SCOEL*. ECHA. <https://echa.europa.eu/recommendations-of-the-scoel> (accessed 2026-02-23).
- (31) Committee on Risk Assessment. *Opinion on Scientific Evaluation of Occupational Exposure Limits for Cobalt and Inorganic Cobalt Compounds*; European Commission, 2022.
https://echa.europa.eu/documents/10162/7937606/final_rac_oel_opinion_cobalt_en.pdf/d96755b2-8bd0-afe7-ab94-0a2f263fc593?t=1675065309296.

- (32) SCOEL. *Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for Copper and Its Inorganic Compounds*; European Commission, 2014.
https://echa.europa.eu/documents/10162/35144386/174_copper_compounds_oel_en.pdf/e10fab3f-7618-eaeb-ab44-b05503acf07e?t=1691407205856.
- (33) SCOEL. *Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for Chromium Metal, Inorganic Chromium (II) Compounds, and Inorganic Chromium (III) Compounds*; European Commission, 2002.
https://echa.europa.eu/documents/10162/35144386/154_chromium_compounds_oel_en.pdf/52c4290e-042f-95c5-d704-6e7f356d801f?t=1691407195977.
- (34) SCOEL. *Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for Manganese and Inorganic Manganese Compounds*; European Commission, 2021.
https://echa.europa.eu/documents/10162/35144386/172_manganese_compounds_oel_en.pdf/f473e2595-7a67-0104-75dc-720f7c62c4c1?t=1691407204729.
- (35) SCOEL. *Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for Nickel and Inorganic Nickel Compounds*; European Commission, 2011.
https://echa.europa.eu/documents/10162/35144386/154_chromium_compounds_oel_en.pdf/52c4290e-042f-95c5-d704-6e7f356d801f?t=1691407195977.
- (36) SCOEL. *Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for Tin and Inorganic Tin Compounds*; European Commission, 2021.
https://echa.europa.eu/documents/10162/35144386/164_tin_compounds_oel_en.pdf/baf7cfb9-ea91-3f8d-1e72-95509baa59e8?t=1691407200143.
- (37) McNeill, J.; Snider, G.; Weagle, C. L.; Walsh, B.; Bissonnette, P.; Stone, E.; Abboud, I.; Akoshile, C.; Anh, N. X.; Balasubramanian, R.; Brook, J. R.; Coburn, C.; Cohen, A.; Dong, J.; Gagnon, G.; Garland, R. M.; He, K.; Holben, B. N.; Kahn, R.; Kim, J. S.; Lagrosas, N.; Lestari, P.; Liu, Y.; Jeba, F.; Joy, K. S.; Martins, J. V.; Misra, A.; Norford, L. K.; Quel, E. J.; Salam, A.; Schichtel, B.; Tripathi, S. N.; Wang, C.; Zhang, Q.; Brauer, M.; Gibson, M. D.; Rudich, Y.; Martin, R. V. Large Global Variations in Measured Airborne Metal Concentrations Driven by Anthropogenic Sources. *Sci. Rep.* **2020**, *10* (1), 21817. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78789-y>.
- (38) Mastin, J.; Saini, A.; Schuster, J. K.; Harner, T.; Dabek-Zlotorzynska, E.; Celo, V.; Gaga, E. O. Trace Metals in Global Air: First Results from the GAPS and GAPS Megacities Networks. *Environ. Sci. Technol.* **2023**, *57* (39), 14661–14673. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05733>.
- (39) Kidinda, L.; Bwanaching, E. I.; Le Grand de Mercey, V.; Mpinda Tushiminine, M. *Background Values of Trace Metals in the Soil of the Katangan Copperbelt, DR Congo*; Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, 2025. <https://doi.org/10.25928/5XN1-QQ47>.
- (40) Decrée, S.; Pourret, O.; Baele, J.-M. Rare Earth Element Fractionation in Heterogenite (CoOOH): Implication for Cobalt Oxidized Ore in the Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo). *J. Geochem. Explor.* **2015**, *159*, 290–301. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.10.005>.
- (41) *OpenStreetMap*. OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/> (accessed 2026-04-29).
- (42) *DRC Mining Cadastre Map Portal*. <https://drclicences.cami.cd/EN/> (accessed 2026-04-30).
- (43) *ODK Collect - App on Google Play*.
<https://play.google.com/store/apps/details?id=org.odk.collect.android&hl=it> (accessed 2025-12-05).
- (44) *KoboToolbox*. <https://eu.kobotoolbox.org> (accessed 2025-12-05).
- (45) Aeroqual. Portable and Fixed Monitor Sensor Specifications.
<https://aeroqual.imgix.net/assets/documents/Aeroqual-Portable-Fixed-Sensor-Specifications-v-12.pdf>.
- (46) *AQI Calculator Concentration | AirNow.gov*. <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-calculator-concentration> (accessed 2026-02-05).

- (47) Dankovic, D. A.; Naumann, B. D.; Maier, A.; Dourson, M. L.; Levy, L. S. The Scientific Basis of Uncertainty Factors Used in Setting Occupational Exposure Limits. *J. Occup. Environ. Hyg.* **2015**, 12 (sup1), S55–S68. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1060325>.
- (48) Fomba, K. W.; van Pinxteren, D.; Müller, K.; Spindler, G.; Herrmann, H. Assessment of Trace Metal Levels in Size-Resolved Particulate Matter in the Area of Leipzig. *Atmos. Environ.* **2018**, 176, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.12.024>.
- (49) Jahn, L. G.; Jahl, L. G.; Bland, G. D.; Bowers, B. B.; Monroe, L. W.; Sullivan, R. C. Metallic and Crustal Elements in Biomass-Burning Aerosol and Ash: Prevalence, Significance, and Similarity to Soil Particles. *ACS Earth Space Chem.* **2021**, 5 (1), 136–148. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00191>.
- (50) Cheyns, K.; Banza Lubaba Nkulu, C.; Ngombe, L. K.; Asosa, J. N.; Haufroid, V.; De Putter, T.; Nawrot, T.; Kimpanga, C. M.; Numbi, O. L.; Ilunga, B. K.; Nemery, B.; Smolders, E. Pathways of Human Exposure to Cobalt in Katanga, a Mining Area of the D.R. Congo. *Sci. Total Environ.* **2014**, 490, 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.014>.
- (51) Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N. Wet and Dry Deposition. In *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*; John Wiley & Sons, Incorporated: New York, UNITED STATES, 2016.
- (52) Johnson, N. M.; Hoffmann, A. R.; Behlen, J. C.; Lau, C.; Pendleton, D.; Harvey, N.; Shore, R.; Li, Y.; Chen, J.; Tian, Y.; Zhang, R. Air Pollution and Children’s Health—a Review of Adverse Effects Associated with Prenatal Exposure from Fine to Ultrafine Particulate Matter. *Environ. Health Prev. Med.* **2021**, 26 (1), 72. <https://doi.org/10.1186/s12199-021-00995-5>.
- (53) IARC. *Outdoor Air Pollution*; ARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans; Lyon, 2016.
- (54) Accompanying the Document Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 2004/37/EC as Regards the Addition of Substances and Setting Limit Values in Its Annexes I, III and IIIa, 2025. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-11823-2025-ADD-4/en/pdf>.
- (55) Banza, C. L. N.; Nawrot, T. S.; Haufroid, V.; Decrée, S.; De Putter, T.; Smolders, E.; Kabyla, B. I.; Luboya, O. N.; Ilunga, A. N.; Mutombo, A. M.; Nemery, B. High Human Exposure to Cobalt and Other Metals in Katanga, a Mining Area of the Democratic Republic of Congo. *Environ. Res.* **2009**, 109 (6), 745–752. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.04.012>.
- (56) Cobalt | ToxFAQs™ | ATSDR. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxFAQs/ToxFAQsDetails.aspx?faqid=372&toxid=64> (accessed 2026-02-16).
- (57) IARC. *Cobalt, Antimony Compounds, and Weapons-Grade Tungsten Alloy*; IARC Working Group on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans; 2023; Vol. 131.
- (58) Copper | ToxFAQs™ | ATSDR. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxFAQs/ToxFAQsDetails.aspx?faqid=205&toxid=37> (accessed 2026-02-16).
- (59) Lee, J.-T. Review of Epidemiological Studies on Air Pollution and Health Effects in Children. *Clin. Exp. Pediatr.* **2020**, 64 (1), 3–11. <https://doi.org/10.3345/cep.2019.00843>.
- (60) Our Story · Official website of Tenke Fungurume Mining (TFM). <https://tfmofficial.com/en/about/story> (accessed 2026-04-10).
- (61) Muimba-Kankolongo, A.; Banza Lubaba Nkulu, C.; Mwitwa, J.; Kampemba, F. M.; Mulele Nabuyanda, M. Impacts of Trace Metals Pollution of Water, Food Crops, and Ambient Air on Population Health in Zambia and the DR Congo. *J. Environ. Public Health* **2022**, 2022 (1), 4515115. <https://doi.org/10.1155/2022/4515115>.
- (62) *Air pollution and children’s health*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-pollution-and-childrens-health> (accessed 2026-05-06).

Annexe

Section A1 Valeurs de référence pour le calcul du facteur d'enrichissement.

Tableau A1 Aperçu des sites pour les mesures des particules en suspension et la collecte d'échantillons de poussières inhalables.

Tableau A2 Aperçu des valeurs journalières de $PM_{2,5}$, des valeurs journalières de PM_{10} et de l'Indice de Qualité de l'Air (IQA) de l'EPA, en comparaison avec les lignes directrices et normes internationales de qualité de l'air.

Tableau A3 Composition chimique des poussières inhalables en comparaison avec les références pertinentes.

Tableau A4 Facteurs d'enrichissement des métaux dans les poussières inhalables par rapport au sol de surface local et au minerai.

Figure A1 Corrélation entre les $PM_{2,5}$ horaires et les PM_{10} horaires sur l'ensemble du jeu de données.

Section A1. Valeurs de référence pour le calcul du facteur d'enrichissement.

Composition médiane du sol de surface au Katanga. Nous avons obtenu la composition médiane du sol de surface en prenant la médiane de toutes les valeurs disponibles de la base de données³⁹ ($N = 394$) pour les métaux d'intérêt (l'étain n'était pas disponible). Le calcul a donné des concentrations médianes du sol de surface de 59 450 ppm (5,9 %) pour l'aluminium, 190 ppm pour le baryum, 10 ppm pour le cobalt, 36 ppm pour le cuivre, 248 ppm pour le chrome, 50 350 ppm (5,0 %) pour le fer, 192 ppm pour le manganèse et 25 ppm pour le nickel.

Composition médiane du minerai au Katanga. Nous avons obtenu la composition médiane de l'hétérogénite dans la Ceinture du Cuivre et du Cobalt au Katanga en prenant la composition chimique médiane issue de Decrée et al.⁴⁰ (Tableau supplémentaire 2). L'étude rapporte la composition en pourcentage pondéral d'oxydes métalliques, que nous avons convertie en pourcentage pondéral de métaux à l'aide de simples facteurs de correction obtenus comme le rapport des masses moléculaires de l'oxyde et du métal seul. Par exemple, pour l'oxyde de cobalt (CoO), le facteur de correction était de 0,787, obtenu comme le rapport de la masse atomique du cobalt (58,93 g/mol) à celle de l'oxyde de cobalt (74,93 g/mol). Ainsi, le pourcentage pondéral médian d'oxyde de cobalt (32,6 %) correspondait à un pourcentage pondéral de 25,6 % de cobalt (c'est-à-dire $32,6 \% \times 0,787$). Suivant cette approche, nous avons obtenu une valeur médiane de 0,37 % pour l'aluminium, 0,66 % pour le fer, 0,54 % pour le manganèse, 25,6 % pour le cobalt et 6,3 % pour le cuivre. Le nickel était rapporté directement en ppm de métal ; nous avons calculé la médiane et l'avons convertie en pourcentage en divisant par 10 000, obtenant 0,046 %. Le baryum, le chrome et le nickel n'étaient pas inclus dans l'étude.

Tableau A1. Aperçu des sites pour les mesures des particules en suspension (PM) et la collecte des poussières inhalables. Nous avons écarté l'échantillon CKA05 car l'emplacement précis du moniteur de PM ne permettait pas de distinguer les particules des gouttelettes de pluie ; nous n'avons donc pas une confiance suffisante dans ces données pour les utiliser. L'heure initiale d'échantillonnage a été arrondie.

ID du rapport	ID de terrain	Début de l'échantillonnage	Zone / Ville	Concession pertinente la plus proche	Type de site	PM (* si < 24 h)	Poussières inhalables	Latitude	Longitude	Commentaires
AK1	CKA08	14/10/25 12:00	Kolwezi	COMMUS	École publique	Oui	Oui	-10,73192	25,44596	
AK1-bis	CKA13	17/10/25 09:10	Kolwezi	COMMUS	École publique	Non	Oui	-10,73194	25,44593	
AK2	CKA10	15/10/25 13:50	Kolwezi	COMMUS	Domicile privé	Oui	Non	-10,73697	25,44909	
AK3	CKA11	16/10/25 12:40	Kolwezi	COMMUS	Domicile privé	Oui	Oui	-10,72450	25,43764	
AK4	CKA17	19/10/25 10:10	Kolwezi	COMMUS	Domicile privé	Oui	Oui	-10,72085	25,45799	
AK4-bis	CKA12	16/10/25 16:40	Kolwezi	COMMUS	Domicile privé	Oui*	Non	-10,72083	25,45803	
AK5	CKA04	12/10/25 09:10	Kolwezi	COMMUS	Centre de santé	Oui*	Non	-10,72193	25,42938	Interrompu à cause de la pluie
AK6	CKA07	14/10/25 11:00	Kolwezi	COMMUS	Domicile privé	Oui*	Oui	-10,72438	25,43702	
AK7	CKA15	17/10/25 16:40	Kolwezi	COMMUS	Hôtel	Oui*	Non	-10,75082	25,47314	
AP1	CKA9	15/10/25 11:00	Pierre Muteba II	COMMUS	Domicile privé	Oui	Oui	-10,75542	25,40832	
AP1-bis	CKA05	12/10/25 12:30	Pierre Muteba II	COMMUS	Domicile privé	Oui*	Non	-10,75543	25,40825	Interrompu à cause de la pluie
AP2	CKA14	17/10/25 14:30	Pierre Muteba II	COMMUS	Centre de santé	Oui	Oui	-10,75293	25,41284	
AT1	CKA06	12/10/25 10:50	Tshizuza	COMMUS	Domicile privé	Oui*	Non	-10,76291	25,42291	Interrompu à cause de la pluie
AM1	CKA16	18/10/25 12:20	Mibanze	MUMI	Domicile privé	Oui	Non	-10,82345	25,86387	
AM2	CKA18	19/10/25 13:20	Rianda	MUMI	Domicile privé	Oui*	Non	-10,82889	25,81958	
AF1	CKA01	10/10/25 12:20	Fungurume	TFM	Domicile privé	Oui	Oui	-10,63401	26,30756	Avant la pluie
AF2	CKA02	10/10/25 15:10	Fungurume	TFM	Domicile privé	Oui*	Oui	-10,62570	26,30139	Avant la pluie

Tableau A2. Aperçu des valeurs journalières de PM_{2,5} et de PM₁₀, Indice de Qualité de l'Air (IQA) de l'EPA, et comparaison avec les lignes directrices (Air Quality Guidelines, AQG) et les normes internationales (Air Quality Standards, AQS) de qualité de l'air. Les échantillons dont les données de PM étaient incomplètes ou inexistantes ont été omis.

ID du rapport	Concession pertinente la plus proche	Zone / Ville	Type de site	Heure de début	PM _{2,5} journalières (µg/m ³)	PM ₁₀ journalières (µg/m ³)	IQA	Explication de l'IQA ²⁶	Autres commentaires
AK1	COMMUS	Kolwezi	École publique	14/10/25 12:10	44	105	3	Malsain pour les groupes sensibles	
AK2	COMMUS	Kolwezi	Domicile privé	15/10/25 14:00	53	126	3	Malsain pour les groupes sensibles	
AK3	COMMUS	Kolwezi	Domicile privé	16/10/25 12:40	87	178	4	Malsain	
AK4	COMMUS	Kolwezi	Domicile privé	19/10/25 10:00	49	104	3	Malsain pour les groupes sensibles	
AP1	COMMUS	Pierre Muteba II	Domicile privé	15/10/25 11:10	40	79	3	Malsain pour les groupes sensibles	
AP2	COMMUS	Pierre Muteba II	Centre de santé	17/10/25 14:30	45	117	3	Malsain pour les groupes sensibles	
AM1	MUMI	Mibanze	Domicile privé	18/10/25 12:15	49	67	3	Malsain pour les groupes sensibles	
AF1	TFM	Fungurume	Domicile privé	10/10/25 12:10	33	117	2	Modéré	Avant la pluie
AQG de l'OMS					15	45			
AQS de l'Afrique du Sud					40	75			
AQS de l'Union européenne et de la Suisse					n.a.	50			
AQS des États-Unis					35	150			
AQS de la Chine					75	150			

Tableau A3. Composition chimique des poussières inhalables en comparaison avec les références pertinentes. Toutes les concentrations sont exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les références au bas du tableau comprennent la plage des limites d'exposition professionnelle (*Occupational Exposure Limits*, OEL) pour certains pays (Tableau 3 ; les valeurs pour le chrome, le nickel et l'étain n'étaient pas incluses [non inclus, n.i.] et les valeurs de criblage estimées applicables à la population générale, obtenues comme décrit dans la section Analyse des données (la valeur pour l'étain n'a pas pu être calculée faute d'OEL). Les cellules surlignées en gris et en gras sont supérieures aux valeurs de criblage estimées pour la population générale. Les valeurs et éléments en texte gris étaient inférieurs à la limite de détection. La deuxième colonne, en rouge, indique la concession minière pertinente la plus proche (plus de détails dans le texte et dans le Tableau A1). * Le site AK1 est l'école Galaxy.

ID du rapport	Concession pertinente	Aluminium	Antimoine	Arsenic	Baryum	Béryllium	Bore	Cadmium	Cobalt	Chrome	Fer	Manganèse	Mercur	Molybdène	Nickel	Plomb	Cuivre	Sélénium	Étain	Thallium	Vanadium	Zinc
AK1*	COMMUS	6,0	<0,025	<0,05	0,050	<0,005	<1	<0,05	0,160	<0,025	5,9	0,145	<0,0049	<0,012	<0,025	<0,025	0,49	<0,025	<0,025	<0,012	<0,049	<0,12
AK1-bis*		6,5	<0,011	<0,021	0,0306	<0,021	<0,43	<0,021	0,155	<0,021	8,5	0,285	<0,0043	<0,011	<0,021	<0,021	1,03	<0,021	<0,021	<0,011	<0,043	<0,11
AK3		6,4	<0,010	<0,021	0,034	<0,021	<0,41	<0,021	0,194	<0,021	9,0	0,314	<0,0041	<0,010	<0,021	<0,021	0,90	<0,021	<0,021	<0,010	<0,041	<0,10
AK4		2,6	<0,012	<0,024	<0,024	<0,024	<0,49	<0,024	0,046	<0,024	4,5	0,130	<0,0049	<0,012	<0,024	<0,024	0,22	<0,024	<0,024	<0,012	<0,049	<0,12
AK6		4,6	<0,018	<0,035	0,066	<0,035	<0,71	<0,035	0,088	<0,035	8,1	0,301	<0,0070	<0,018	<0,035	<0,035	0,65	<0,035	0,213	<0,018	<0,070	<0,18
AP1		5,1	<0,012	<0,025	<0,025	<0,025	<0,49	<0,025	0,096	<0,025	5,9	0,145	<0,0049	<0,012	<0,025	<0,025	0,49	<0,025	<0,025	<0,012	<0,049	<0,12
AP2	TFM	6,8	<0,012	<0,025	0,028	<0,025	<0,50	<0,025	0,109	<0,025	8,6	0,196	<0,0050	<0,012	<0,025	<0,025	0,73	<0,025	<0,025	<0,012	<0,050	<0,12
AF1		7,4	<0,007	<0,014	0,083	<0,0014	<0,28	<0,014	0,091	0,018	8,9	0,201	<0,0028	<0,0070	<0,014	<0,014	0,40	<0,014	<0,014	<0,0070	<0,028	<0,070
AF2		15	<0,018	<0,035	0,060	<0,035	<0,71	<0,035	0,322	0,287	10,8	0,349	<0,0071	<0,018	0,4	<0,035	1,77	<0,035	<0,035	<0,018	<0,071	<0,18
Plage des OEL									1–50	n.i.		200–1000					10–100		n.i.			
Valeurs de criblage									0,03	67		7					0,3		n.d.			

Tableau A4. Facteurs d'enrichissement des métaux lourds dans les poussières inhalables par rapport au sol de surface local (à gauche) et au minerai (à droite). Pour certains éléments, nous n'avons pas calculé de facteurs d'enrichissement car ils n'étaient pas détectés dans les échantillons (n.d., non détecté) ou les valeurs de référence n'étaient pas disponibles (n.a., non disponible). L'étain a été détecté dans l'échantillon AK6 mais ne disposait de valeurs de référence ni pour le sol de surface ni pour le minerai.

ID du rapport	Concession pertinente la plus proche	Par rapport au sol de surface							Par rapport au minerai						
		Baryum	Cobalt	Cuivre	Chrome	Fer	Manganèse	Nickel	Baryum	Cobalt	Cuivre	Chrome	Fer	Manganèse	Nickel
AK1	COMMUS	3	158	449	n.d.	2,0	20	n.d.	n.a.	0,0004	0,016	n.d.	1,0	0,04	n.d.
AK1-bis	COMMUS	1	142	262	n.d.	1,5	14	n.d.	n.a.	0,0003	0,009	n.d.	0,7	0,03	n.d.
AK3	COMMUS	2	180	232	n.d.	1,7	15	n.d.	n.a.	0,0004	0,008	n.d.	0,8	0,03	n.d.
AK4	COMMUS	n.d.	104	138	n.d.	2,0	15	n.d.	n.d.	0,0003	0,005	n.d.	1,0	0,03	n.d.
AK6	COMMUS	4	114	233	n.d.	2,1	20	n.d.	n.a.	0,0003	0,008	n.d.	1,0	0,04	n.d.
AP1	COMMUS	n.d.	112	159	n.d.	1,4	9	n.d.	n.d.	0,0003	0,006	n.d.	0,6	0,02	n.d.
AP2	COMMUS	1	95	177	n.d.	1,5	9	n.d.	n.a.	0,0002	0,006	n.d.	0,7	0,02	n.d.
AF1	TFM	4	73	89	0.6	1,4	8	n.d.	n.a.	0,0002	0,003	n.a.	0,7	0,02	n.d.
AF2	TFM	1	128	195	4.6	0,9	7	63	n.a.	0,0003	0,007	n.a.	0,4	0,02	0,2

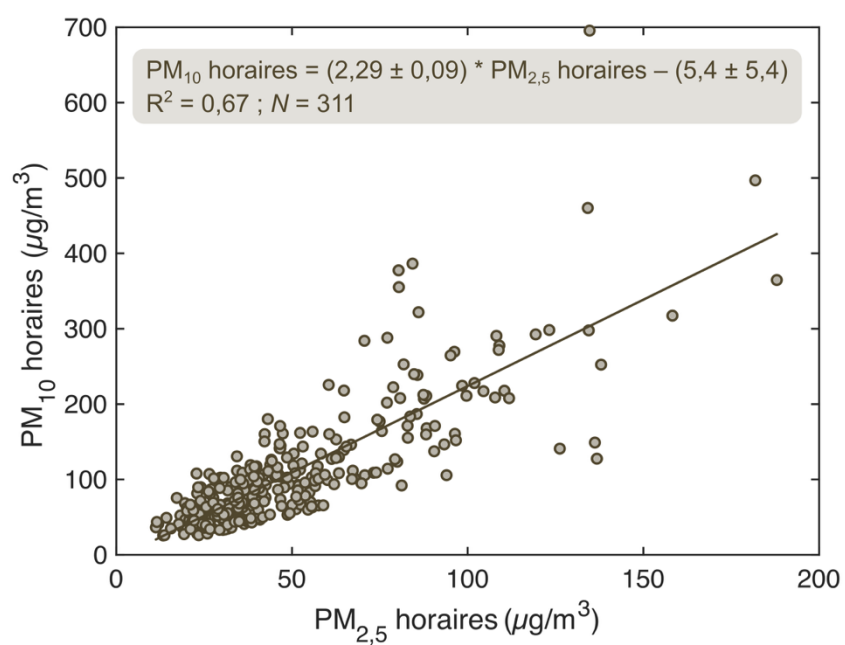


Figure A1. Corrélation entre les $PM_{2,5}$ horaires et les PM_{10} horaires sur l'ensemble des données (311 observations).