Le risque des poussières atmosphériques pour la santé humaine

Emmanouil Proestakis
Chercheur postdoctorant à l'unité de recherche Remote sensing of Aerosols, Clouds and Trace gases (ReACT) de l'Observatoire national d'Athènes (NOA) et chercheur postdoctorant du Fonds AXA pour la Recherche

Avril 2023, en Grèce, un impressionnant nuage de sable du Sahara envahit le ciel d'Athènes

Emmanouil Proestakis est chercheur postdoctorant à l'unité de recherche Remote sensing of Aerosols, Clouds and Trace gases (ReACT) de l'Observatoire national d'Athènes (NOA), ainsi que du Fonds AXA pour la recherche. Ses travaux portent sur les aérosols amphotères, notamment la composante poussière et ses effets, en s'appuyant sur des observations de télédétection avancées et des modèles théoriques. Ses travaux ont débouché sur la création d'un registre mondial pluriannuel de données climatiques sur la composante inhalable des poussières atmosphériques, offrant des informations sur l'effet de la poussière sur la santé, en vue de prendre des mesures d'adaptation, d'atténuation et de gestion des risques.

Quelle est la contribution de la composante inhalable des poussières atmosphériques à la charge totale des aérosols ? Quelle part se situe près de la surface de la Terre, où se déroule la majeure partie de l'activité humaine ? Dans quelle mesure a-t-elle évolué dans les zones très industrialisées et densément peuplées, comme les mégapoles, en vingt ans ? Dans quelles régions la concentration atmosphérique devrait-elle dépasser les lignes directrices de l'OMS en matière de qualité de l'air dans un futur proche ? Comment les émissions de poussières ont-elles évolué depuis l'ère préindustrielle et que disent les initiatives nationales et internationales sur la quantité de poussière qui résidera dans l'atmosphère d'ici la fin du siècle ? L'article examine les questions sociétales urgentes relatives au risque sanitaire posé par la composante inhalable de la poussière atmosphérique, rendues d'autant plus pressantes en raison du changement climatique. Des perspectives sont fournies à travers le prisme des initiatives internationales en cours, des progrès récents et des limites de nos capacités.

INTRODUCTION

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), l'intensification du changement climatique représente une menace majeure pour le bien-être et la santé des êtres humains, avec des répercussions socio-économiques négatives. Parmi les différentes sortes d'aérosols[1], les poussières minérales jouent un rôle clé dans le système climatique de la Terre, affectant les activités anthropiques et la santé humaine. Des études épidémiologiques récentes démontrent effectivement un lien étroit entre les poussières et des troubles de la santé, allant d'une légère irritation de la peau à des réactions allergiques, des maladies cardiovasculaires et respiratoires, des cancers et même des épidémies. Malgré les preuves que la poussière atmosphérique constitue un facteur de risque environnemental important et les efforts de collaboration internationale qui ont permis des avancées scientifiques sans précédent, les connaissances actuelles restent marquées par de grandes incertitudes. Il est donc difficile d'améliorer les produits et services existants pour évaluer les impacts négatifs de la poussière sur la santé humaine. Il convient aujourd'hui de renforcer les initiatives internationales et scientifiques, afin de mieux répondre aux défis posés par les poussières atmosphériques, en particulier dans le contexte du changement climatique.

1 Dispersion en particules très fines d'un liquide, d'une solution ou d'un solide dans un gaz (déf. Larousse).

LES POUSSIÈRES, UNE MENACE POUR LA SANTÉ

Selon Copernicus – le programme d'observation de la Terre de l'Union européenne – et l'OMS, une tempête de poussière massive a ravagé l'Irak en mai 2022, entraînant l'hospitalisation de 5000 personnes pour des problèmes respiratoires dus à la mauvaise qualité de l'air, dans la seule province de Bagdad. ***(Illustration 1)***. Or, si l'ampleur de cette tempête a été inhabituelle, les concentrations élevées d'aérosols de poussière sont la norme dans de nombreuses régions, qu'elles se situent à proximité des sources de poussière de la Terre, ou à des centaines, voire des milliers de kilomètres de celles-ci, représentant une menace significative pour la santé humaine.

Illustration 1 : Tempête de sable et de poussière en Irak, telle qu'observée par les systèmes satellites MODIS Aqua et Terra de la NASA entre le 15 et le 17 mai 2022

source : NASA Worldview

Au cours de l'année écoulée, selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le rapport annuel Airborne Dust Bulletin[2], plusieurs tempêtes de sable et de poussière (SDS) intenses ont touché de vastes régions du globe, par exemple le Maghreb, le Sahel et le golfe de Guinée en décembre 2023, et les Caraïbes orientales et le nord de l'Amérique du Sud entre décembre 2023 et avril 2024. En avril 2024, l'Europe du Sud (en particulier l'Italie et la Grèce) a été ensevelie par des vagues de poussière saharienne, avec des concentrations de particules à la surface (PM_{10}) atteignant jusqu'à 200 µgm^{-3} sur de longues périodes, comme l'a rapporté AtmoHub Copernicus[3] (CAMS) en Grèce. Or, ces niveaux de concentration de poussière, déjà élevés, ont été éclipsés par les niveaux de concentration extrêmes des tempêtes de poussière qui ont englouti la Mongolie et le nord de la Chine en mars 2023. Ces tempêtes ont provoqué une baisse spectaculaire de la qualité de l'air pendant plusieurs jours, avec des concentrations de PM_{10} dépassant 9 000 µgm^{-3}. À titre de comparaison, les lignes directrices de l'OMS sur la qualité de l'air[4], établies dans l'objectif d'une feuille de route mondiale de lutte contre les effets de la pollution atmosphérique sur la santé, proposent ***(Illustration 2)*** :

> *« Une tempête de poussière massive a ravagé l'Irak en mai 2022, entraînant l'hospitalisation de 5000 personnes pour des problèmes respiratoires dus à la mauvaise qualité de l'air, uniquement dans la province de Bagdad. »*

Illustration 2 : OMS – Directives sur la qualité de l'air

$PM_{2,5}$:	10 µg/m³ moy. annuelle
	25 µg/m³ moy. horaire sur 24h
PM_{10} :	20 µg/m³ moy. annuelle
	50 µg/m³ moy. horaire sur 24h

i. Pour l'exposition moyenne sur 24 heures aux particules, les seuils de sécurité supérieurs de 25 µgm^{-3} et 50 µgm^{-3} pour les $PM_{2,5}$ et les PM_{10}, respectivement (voir définition ci-dessous).

ii. Pour l'exposition moyenne annuelle, les seuils de sécurité supérieurs de 10 µgm^{-3} et 20 µgm^{-3} pour les $PM_{2,5}$ et les PM_{10}, respectivement.

Il semble que les épisodes de nuages de poussière, caractérisés par des concentrations exceptionnellement élevées de particules, puissent entraîner des conditions extrêmement dangereuses, constituant ainsi des défis considérables pour la vie publique et la santé humaine comme l'indiquent plusieurs études épidémiologiques[5]. Soulignons toutefois que toutes les particules composant les couches de poussière transportées par voie éolienne ne présentent pas les mêmes facteurs de risques pour l'environnement. L'un des points déterminants dans l'association entre les aérosols, la qualité de l'air et les maladies qui en découlent est la quantité de particules en suspension (PM) dans l'air ***(Illustration 3)***. En général, les PM se divisent en trois classes distinctes, (i) PM_{10} (grossières), (ii) $PM_{2,5}$ (fines) et (iii) UFP (ultrafines). Elles correspondent aux catégories de particules en suspension dans l'air ayant un diamètre aérodynamique respectivement de ≤10 µm, ≤2,5 µm et ≤0,1 µm. Concernant la poussière minérale, des campagnes expérimentales intensives à grande échelle utilisant des instruments aéroportés *in situ* (exemple, la campagne AER-D/CE-D en 2015) ont rapporté que la taille des particules de poussière dans les couches atmosphériques transportées par voie éolienne varie sur plus de trois ordres de grandeur, allant de moins de 0,1 µm (~de l'ordre du virus SARS-CoV-2) à plus de 100 µm (~de l'ordre d'un cheveu humain)[6]. En général, le risque sanitaire attribué aux plus grosses particules de poussière minérale est considéré comme faible, allant d'une légère irritation de la peau à des réactions allergiques, même quand la concentration est forte et l'exposition durable. En revanche, les particules $PM_{2,5}$ – en raison de leur petite taille – peuvent pénétrer profondément dans les poumons et les alvéoles, entraînant des réactions allergiques, des maladies cardiovasculaires et respiratoires, voire des cancers. Pour aller plus loin dans l'étude du danger que représente la poussière fine, la relation entre sa composante inhalable et les épidémies reste une question ouverte. En effet, le rôle des particules de poussière minérale éolienne en tant que vecteurs de bactéries, comme dans le cas des épidémies de méningite au Sahel pendant les saisons de l'Harmattan, n'est toujours pas certain.

2 World Meteorological Organization. (2024, July). WMO Airborne Dust Bulletin No. 8. [Bulletin de l'OMM sur les poussières en suspension]. https://library.wmo.int/records/item/68953-no-8-july-2024.

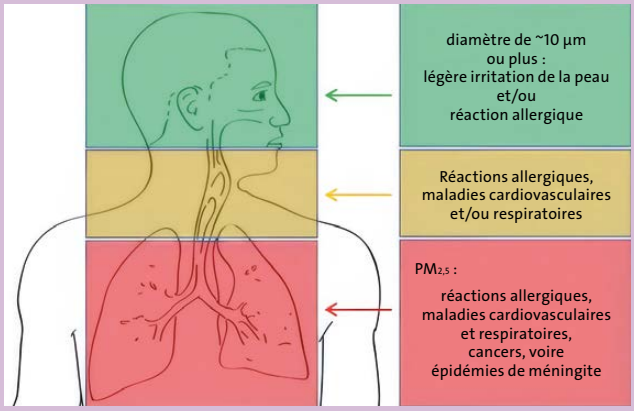
3 AtmoHUB - https://atmohub.gr/.

4 World Health Organization. (n.d.). Health impacts of climate change in the WHO European Region [Incidences du changement climatique sur la santé dans la Région européenne de l'OMS] (WHO-SDE-PHE-OEH-06-02). World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06-02.

5 Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders [Poussière du désert et troubles de la santé humaine]. Environment International, 63, 101–113. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011.

6 Ryder, C. L., Marenco, F., Brooke, J. K., Estelles, V., Cotton, R., Formenti, P., McQuaid, J. B., Price, H. C., Liu, D., Ausset, P., et al. (2018). Coarse-mode mineral dust size distributions, composition and optical properties from AER-D aircraft measurements over the tropical eastern Atlantic [Distribution granulométrique, composition et propriétés optiques des poussières minérales grossières d'après les mesures de l'avion AER-D au-dessus de l'Atlantique tropical oriental]. Atmospheric Chemistry and Physics, 18, 17225–17257. https://doi.org/10.5194/acp-18-17225-2018.

Illustration 3 : Dimension des particules de poussière et effets sur la santé humaine



Source : Emmanouil Proestakis

Pour mieux évaluer les effets négatifs des poussières sur la santé humaine, il est nécessaire d'améliorer nos connaissances fondamentales sur les particules fines inhalables ($PM_{2,5}$) et notamment sur le cycle de vie complexe et le trajet des poussières dans l'atmosphère. D'autant qu'en termes de masse totale, la poussière est l'un des aérosols les plus répandus dans l'atmosphère, juste après les émissions de sels marin. Une étude récente évalue à ~4680 Tg/an[7] la quantité totale de poussière émise par des sources naturelles (zones arides et semi-arides) dans l'atmosphère, soit plus de 463 000 fois le poids de la Tour Eiffel. Néanmoins, cette quantité de poussière ne représente qu'une fraction de la poussière atmosphérique totale. À l'échelle mondiale, les sources naturelles représentent environ 75 % des émissions de poussière, les 25 % restants étant attribués aux activités anthropiques[8], telles que les transports, les infrastructures, la construction de bâtiments et de routes, la détérioration des surfaces de sol, les changements dans l'utilisation des terres, la déforestation, le pâturage, l'urbanisation et l'agriculture. Une fois ces milliers de téragrammes de poussière libérés dans l'atmosphère, ils sont transportés par le vent sur de longues distances, avant d'être éliminés par dépôt humide ou sec. Ainsi, il n'est pas rare de constater une baisse spectaculaire de la qualité de l'air due à l'augmentation des niveaux de concentration de poussières sur de vastes zones situées parfois même à des milliers de kilomètres des sources d'émission. Les risques liés à la poussière passent alors d'une échelle locale à une échelle régionale, voire mondiale.

« Une étude récente évalue à ~4680 Tg/an la quantité totale de poussière émise par des sources naturelles (zones arides et semi-arides) dans l'atmosphère, soit plus de 463 000 fois le poids de la Tour Eiffel. »

COORDINATION SCIENTIFIQUE RÉGIONALE ET INTERNATIONALE FACE AUX POUSSIÈRES ATMOSPHÉRIQUES

Plusieurs initiatives nationales et internationales ont été lancées car les poussières atmosphériques représentent un danger non seulement pour la santé, mais aussi pour les biens, l'environnement et l'économie, et influencent également les systèmes météorologiques et climatiques. Citons par exemple le système d'alerte et d'évaluation des tempêtes de sable et de poussière de l'OMM (SDS-WAS), en partenariat avec la Veille de l'atmosphère globale (VAG), une coopération mondiale visant à améliorer les capacités de prévisions en matière de SDS. Le programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), à travers son *rapport Global Environment Outlook* (GEO), évalue l'état et l'orientation de l'environnement mondial, y compris les sources, les tendances et les effets de la poussière atmosphérique. L'initiative *Dust Alliance for North Americ*a (DANA) travaille à accélerer la transition de la recherche sur les poussières vers des solutions sociétales. L'Agence spatiale européenne (ESA), via l'initiative sur le changement climatique (CCI), fournit des enregistrements de données climatiques (CDR) à long terme et de haute qualité, dérivés d'observations par satellite, en vue de soutenir la recherche sur le climat et l'élaboration de politiques, comme le LIVAS CDR[9]. Parallèlement, le réseau européen de lidars pour la recherche sur les aérosols (EARLINET) exploite des stations de pointe en Europe – et au-delà – pour observer et analyser la distribution tridimensionnelle des aérosols dans l'atmosphère, y compris les poussières.

Ces initiatives mettent en évidence les actions coordonnées menées par les organisations internationales, les groupes régionaux et les centres de recherche, pour relever les défis multifactoriels posés par les poussières atmosphériques. Ces efforts de collaboration ont permis des avancées sans précédent des capacités d'observation et de modélisation des aérosols, avec un niveau de maturité suffisant pour déboucher sur des produits et services orientés vers l'utilisateur et contribuer, ainsi, à l'élaboration de politiques et de stratégies d'atténuation. Il reste toutefois des progrès à accomplir pour réduire les incertitudes scientifiques actuelles sur la composante fine inhalable de la poussière, progrès qui permettraient de disposer de produits et des services adaptés et de haute qualité pour évaluer les incidences négatives des poussières sur la santé humaine. Par exemple, la grande majorité des systèmes d'observation de la Terre (OT) par satellite aujourd'hui sont incapables de mesurer l'altitude et la dimension des couches d'aérosols dans l'atmosphère. Il est donc difficile de trouver des solutions pour remédier à la charge d'aérosols dans la couche limite planétaire, où se déroulent la plupart des activités anthropogéniques. En outre, les problèmes de santé liés à la poussière dépendent d'abord de la dimension des particules de poussière, et seulement dans un deuxième temps de la masse totale de poussière. Or, les observations de la Terre par satellite, sans l'application extensive d'hypothèses et de paramétrisations, n'ont pas la capacité de dissocier la composante aérosol de la poussière de la charge totale en aérosols. Il est donc très compliqué d'identifier la composante fine inhalable de la poussière. Enfin, les modèles d'aérosols atmosphériques les plus

7 Kok, J. F., Storelvmo, T., Karydis, V. A., Adebiyi, A. A., Mahowald, N. M., Evan, A. T., He, C., & Leung, D. M. (2023). Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change [Impacts des aérosols de poussières minérales sur le climat mondial et le changement climatique]. Nature Reviews Earth & Environment, 4, 71–86. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00379-5.

8 Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., & Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products [Attribution à l'échelle mondiale des sources de poussières anthropiques et naturelles et de leurs taux d'émission sur la base des produits aérosols MODIS Deep Blue]. Reviews of Geophysics, 50, RG3005. https://doi.org/10.1029/2012RG000388.

9 Amiridis, V., Marinou, E., Tsekeri, A., et al. (2015). LIVAS: A 3-D multi-wavelength aerosol/cloud database based on CALIPSO and EARLINET [Une base de données d'aérosols et de nuages en trois dimensions et à plusieurs longueurs d'onde basée sur CALIPSO et EARLINET]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15, 7127–7153. https://doi.org/10.5194/acp-15-7127-2015.

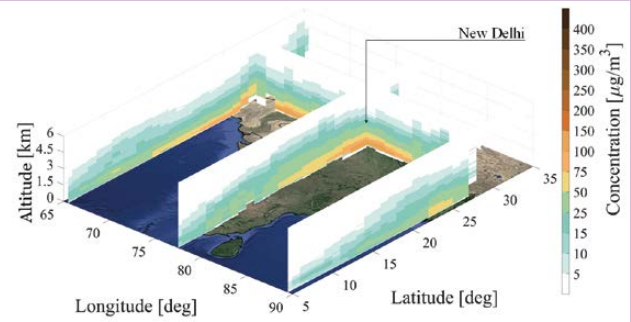
avancés aujourd'hui sont largement utilisés pour fournir des informations spatio-temporelles sur l'émission, le transport, le dépôt et la structure verticale des poussières. Mais ces modèles se fondent généralement sur des modèles statiques d'occupation des sols pour identifier les sources de poussière, comme les régions arides et semi-arides. Ceux-ci ne tiennent pas compte des évolutions au fil du temps, notamment des émissions de poussières anthropiques dans les régions fortement industrialisées et densément peuplées de la Terre ou induites par des activités telles que la déforestation (ex. forêt amazonienne). Ainsi, la quantité de poussière libérée dans l'atmosphère et largement sous-estimée, de même que l'évaluation des risques pour la santé environnementale.

RÉSULTATS ET LIMITES DES PRÉVISIONS EN MATIÈRE D'ÉMISSIONS DE POUSSIÈRE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Il convient de souligner que les avancées scientifiques actuelles seraient encore insuffisantes pour mettre en œuvre des stratégies d'adaptation et d'atténuation des risques efficaces face aux concentrations de poussières en suspension dans l'air, si elles ne prennent pas en compte l'un des défis les plus urgents de notre époque : le changement climatique. Plus précisément, on estime que la charge de masse mondiale de poussière atmosphérique dans le climat moderne (1981-2000) a augmenté d'environ 55 ± 30 %[10] depuis l'époque préindustrielle (1841-1860). Ce changement significatif serait principalement imputable aux changements d'utilisation des sols par les humains. C'est particulièrement le cas pour les vastes régions asiatiques, qui abritent des zones et mégapoles parmi les plus densément peuplées et industrialisées de la planète, à l'intérieur ou à proximité immédiate de la « ceinture de poussière » de la Terre. Une étude scientifique récente soutenue par le Fonds AXA pour la Recherche a quantifié la composante fine inhalable (PM_1) de la poussière au-dessus de New Delhi et au niveau du sol. Sur la base d'une quinzaine d'années d'observations terrestres par satellite, celle-ci s'élève à plus de 75 µgm^{-3}, soit sept fois plus que le seuil de sécurité moyen annuel pour les $PM_{2,5}$ préconisé par l'OMS dans le cadre de ses lignes directrices sur la qualité de l'air ***(Illustration 4)***[11]. En ce qui concerne les futures émissions de poussières, les projections sont très variables d'un modèle climatique à l'autre, avec des tendances à la hausse ou à la baisse. De nombreux facteurs contribuent dans différentes mesures aux divergences entre les modèles de prévision climatique, ayant comme principal moteur les scénarios des trajectoires socio-économiques partagées (SSP)[12]. En effet, la charge de poussière atmosphérique est ammenée à varier considérablement par rapport à aujourd'hui selon le paramétrage des modèles climatiques et selon les différentes trajectoires socio-économiques auxquelles l'humanité sera confrontée, tels qu'établis par la communauté des modèles d'évaluation intégrée (MEI) dans le cadre du GIEC au cours du cinquième rapport d'évaluation (AR5-2013).

Malgré les défis considérables auxquels elle fait face, la communauté scientifique mondiale continue de repousser les limites de la connaissance actuelle et de traduire les progrès de l'observation et de la modélisation en connaissances, en informations, en produits sur mesure et en services aux utilisateurs finaux. La coordination entre la communauté scientifique, la société et les autorités doit être renforcée. Il conviendrait d'améliorer les flux d'informations et de connaissances entre les communautés concernées et, pour cela, de dépasser la fragmentation des secteurs, des politiques et des cultures. Ainsi, ce flux soutiendra les décideurs politiques, les parties prenantes et les utilisateurs finaux avec des systèmes et des services avancés, permettant de soutenir des stratégies d'adaptation et d'atténuation efficaces, afin de préserver la santé humaine face au changement climatique.

Illustration 4 : Poussière atmosphérique - PM_1 (moy. annuelle : 2006-2022)



Poussières atmosphériques PM_1 sur le sous-continent indien, en particulier dans la mégapole de New Delhi.

Source : Proestakis et al., 2024[12]

CONCLUSION

Les couches de poussière atmosphérique, composées de particules minérales d'un diamètre situé entre -0,1 µm et +100 µm, jouent un rôle clé dans les systèmes météorologiques et climatiques de la Terre. Ces couches entraînent des conséquences majeures, tant pour le bien-être, la santé et la vie humaine que sur nos systèmes socio-économiques et sur notre environnement. Pour relever les nombreux défis posés par les poussières atmosphériques, plusieurs initiatives nationales et internationales ont été mises en place, avec des efforts de collaboration facilitant des avancées sans précédent dans les capacités d'observation et de modélisation des aérosols. Pourtant, même si les risques posés par la composante fine inhalable de la poussière ne fait plus de doute, les connaissances actuelles comportent de nombreuses lacunes, ce qui entrave nos possibilités de parvenir à des produits et services véritablement performants, orientés vers l'utilisateur et contribuant à élaborer des politiques et des stratégies d'atténuation. En l'état, tandis que les initiatives internationales s'efforcent de résoudre les problèmes posés par les émissions de poussières, nous pouvons prendre des mesures proactives à titre individuel afin de préserver notre santé. Les personnes souffrant de maladies préexistantes (cardiaques ou pulmonaires) peuvent notamment surveiller les indices de qualité de l'air afin d'adapter leurs activités quotidiennes, en sortant moins ou en évitant les efforts intenses quand les niveaux de particules sont élevés. En combinant les avancées scientifiques, les initiatives d'atténuation à grande échelle et les actions à titre individuel, nous pourrons construire des communautés plus résilientes et mieux préparées à relever les défis du changement climatique.

10 Indique la marge d'incertitude quant à l'augmentation estimée à 55 %. L'augmentation réelle de la charge de masse de poussière atmosphérique mondiale pourrait donc atteindre 85 % (55 % + 30 %) ou 25 % (55 % - 30 %).

11 Proestakis, E., Gkikas, A., Georgiou, T., Kampouri, A., Drakaki, E., Ryder, C. L., Marenco, F., Marinou, E., & Amiridis, V. (2024). A near-global multiyear climate data record of the fine-mode and coarse-mode components of atmospheric pure dust [Un enregistrement climatique pluriannuel quasi mondial des composantes en mode fin et en mode grossier des poussières atmosphériques pures]. Atmospheric Measurement Techniques, 17, 3625–3667. https://doi.org/10.5194/amt-17-3625-2024.

12 Scénarios des changements socio-économiques mondiaux induits par le changement climatique, projetés jusqu'en 2100, tels que définis en 2021 dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC sur le changement climatique.

13 Proestakis, E., Gkikas, A., Georgiou, T., Kampouri, A., Drakaki, E., Ryder, C. L., Marenco, F., Marinou, E., & Amiridis, V. (2024). A near-global multiyear climate data record of the fine-mode and coarse-mode components of atmospheric pure dust [Un enregistrement climatique pluriannuel quasi mondial des composantes en mode fin et en mode grossier des poussières atmosphériques pures]. Atmospheric Measurement Techniques, 17, 3625–3667. https://doi.org/10.5194/amt-17-3625-2024.