

LES AÉROSOLS COMME INDICATEUR DANS LES CAVITÉS KARSTIQUES

R. Losno^{1*}, F. Bourges², F. Girault¹, B. Lartiges³ et D. Genty⁴

¹Institut de Physique du Globe de Paris, Université Paris Cité, CNRS, Paris, France

²Géologie-Environnement-Conseil, Saint-Girons, France

³Géosciences Environnement-Toulouse, Université de Toulouse, IRD, UPS, CNRS, Toulouse, France

⁴EPOC, Université de Bordeaux, Pessac, France.

*losno@ipgp.fr

TITLE

Aerosols as an indicator in karst cavities

RÉSUMÉ

Des mesures de particules fines ont été réalisées dans des grottes touristiques pour rechercher les influences de l'air extérieur et évaluer l'impact des visites. Ces grottes hébergent un patrimoine naturel (paysages souterrains, speleothèmes) et culturel (vestiges préhistoriques) fragile. Les modifications volontaires ou involontaires de leur aéralique ainsi que le passage des visiteurs peuvent dégrader la qualité conservatoire de ces sites. Les aérosols se révèlent un paramètre pertinent du suivi conservatoire.

ABSTRACT

Fine particulate matter measurements were taken in caves open to the public to investigate the influence of outside air and assess the impact of visits. These caves house a fragile natural (underground landscapes, speleothems) and cultural (prehistoric remains) heritage. Intentional or unintentional changes to their airflow, as well as visitor traffic, can degrade the conservation status of these sites. Aerosols have proven to be a relevant parameter for conservation monitoring.

MOTS-CLÉS : Grotte, dépôt, pollution, héritage culturel / **KEYWORDS**: Cave, deposit, pollution, cultural heritage

1. INTRODUCTION

Des mesures de particules fines en suspension dans l'air ont été réalisées dans des grottes touristiques afin d'y étudier les influences de l'air extérieur et d'y évaluer l'impact des visites. Ces grottes sont protégées au titre des sites naturels pour les paysages souterrains et spéléothèmes remarquables ou au titre des monuments historiques en tant que grottes ornées préhistoriques. La découverte, la mise en valeur et l'exploitation touristique des sites ont le plus souvent modifié leur aéralique et impacté la conservation du patrimoine qu'elles recèlent. Un programme mené sur plusieurs années dans plusieurs sites a pour objet de mesurer les aérosols comme marqueurs de l'environnement naturel et de la dynamique interne des grottes. Très peu d'études ont pu être réalisées dans cet environnement particulièrement difficile à instrumenter en raison d'un taux d'humidité très proche de la saturation, d'écoulements d'eau intempestifs et d'une alimentation en électricité difficile à assurer; aucune ne contient des chroniques suffisamment longues pour couvrir la saisonnalité des phénomènes. Malgré un suivi restreint à des périodes courtes, beaucoup de ces études ont montré l'effet prépondérant de la fréquentation touristique (Christofou et al., 1996; Jeong et al. 2003; Grgić et al., 2014; Licbinsky et al., 2020; Martin-Pozas et al., 2024; Miler et al., 2024), parfois amplifié par la présence d'un chemin de fer souterrain (Muri et al., 2013). La ventilation forcée des cavités souterraines est aussi source d'apport de pollution extérieure comme le soulignent Christophou et al. (1996), Jeong et al. (2003), Dredge et al. (2013), Muri et al. (2013), Grgić et al. (2014), Kertész et al. (2000), Licbinsky et al. (2020) et Miler et al. (2024). Il est finalement avéré que l'afflux d'aérosol dans l'environnement intérieur des grottes provoque à terme des désordres pouvant devenir importants pour les spéléothèmes et le patrimoine culturel préhistorique (Christofou et al., 1996; Jeong et al., 2003; Dredge et al., 2013; Martin-Pozas et al., 2024; Miler et al., 2024). Cet article présente la mise en place et les premiers résultats d'une campagne multi-sites sur le long terme (trois à quatre ans) visant un suivi temporel à haute fréquence de la distribution granulométrique des aérosols présents dans l'air intérieur des grottes touristiques.

2. DESCRIPTION DES MESURES

2.1. Matériel de mesure

Toutes les mesures de concentration de particules et leur distribution en taille ont été réalisées à l'aide d'un compteur granulomètre laser MetOne 237 modifié pour pouvoir fonctionner en milieu souterrain humide. L'air à analyser est aspiré par pompage à travers une chambre optique dont l'entrée provoque une légère perte de charge et crée une détente. Cette détente provoque un refroidissement de l'air prélevé et la condensation sur les particules de la vapeur d'eau présente à quasi-saturation dans l'air l'ambient. Pour éviter un tel phénomène chaque compteur a été placé dans une boîte isolante en polystyrène fermée avec un évent

permettant une circulation d'air convective entre la boîte et l'extérieur. La chaleur dissipée par la pompe et l'électronique assure ainsi un échauffement de l'ensemble du système d'environ $+5^{\circ}\text{C}$ par rapport à la température ambiante. Cet apport de chaleur à l'instrument et aux parois de la chambre optique est suffisant pour éviter toute condensation dans le circuit aéraulique du compteur optique de particules, et ralentir la corrosion de l'appareil sur le long terme. On a pu observer que des aérosols déjà humides ne s'évaporent pas. L'interface avec l'air ambiant est assurée par une tête de prélèvement au diamètre de coupure de $10\text{ }\mu\text{m}$, obtenu par décantation de l'air aspiré dans un cylindre vertical (Figure 1).



Figure 1: Photographie du dispositif de mesure de la distribution granulométrique des aérosols. A gauche se trouve la tête de prélèvement, à droite le compteur optique de particules dans sa boîte isolante.

Les mesures sont effectuées toutes les 15 minutes pendant 20 secondes correspondant à environ un litre d'air analysé à chaque fois. La limite de détection de chaque mesure au pas du quart d'heure est donc d'une particule par litre soit 1000 particules par mètre cube. Pour une moyenne horaire, cette limite est divisée par quatre. Suivant le modèle de compteur optique, les canaux sont de $0.3, 0.5, 1, 5\text{ }\mu\text{m}$ ou $0.5, 0.7, 1, 5\text{ }\mu\text{m}$ pour les modèles B ou A respectivement.

2.2. Lieux d'implantation

Ces systèmes de mesure ont été installés dans cinq lieux touristiques: la grotte ornée du Pech Merle à Cabrerets (Lot), d'avril 2018 à juillet 2022, le gouffre d'Esparros (Hautes-Pyrénées) entre juin 2020 et octobre 2023, l'Aven d'Ornac (Ardèche) depuis octobre 2022, les grottes ornées de Gargas à Aventignan (Hautes-Pyrénées) depuis novembre 2022, et la grotte ornée de Villars (Dordogne) depuis juillet 2025. Ces appareils de mesures, qui nécessitent une alimentation électrique, ont été placés au niveau de la mesure réglementaire du dioxyde de carbone, à proximité du cheminement touristique.

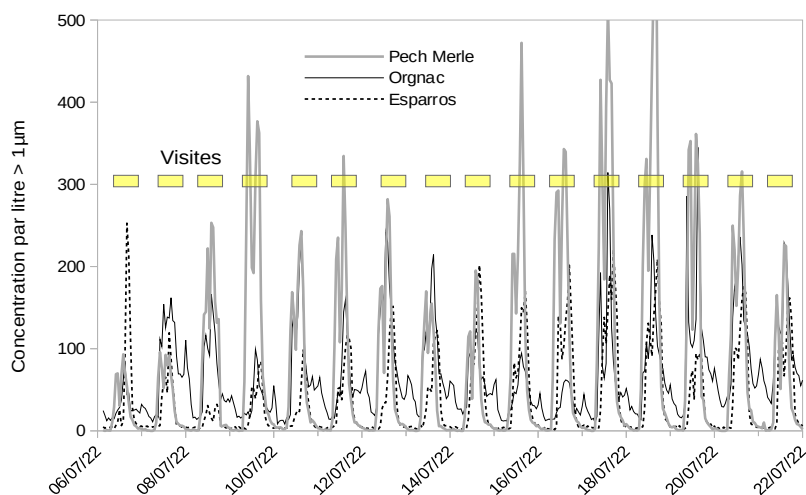


Figure 2: Variation du nombre de particules supérieures à $1\text{ }\mu\text{m}$ en fonction du temps en juillet 2022 pour trois sites: PechMerle, l'Aven d'Ornac et Esparros.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans chacun des sites instrumentés, l'atmosphère naturelle de la grotte est fortement perturbée par la circulation touristique avec une variation journalière très marquée entre les horaires de visite et les périodes sans visite (Figure 2). On peut observer sur cette figure qu'entre deux visites, la concentration en particules redescend beaucoup plus bas pour les grottes du Pech Merle et d'Esparros que pour l'Aven d'Ornac. Il y a donc dans ce dernier un apport de particules de taille supérieure à $1\text{ }\mu\text{m}$ qui ne dépend pas des visiteurs. L'Aven d'Ornac présente une ouverture naturelle par un puits vertical. La gestion des concentrations en dioxyde de carbone a imposé depuis 2016 une ventilation forcée par extraction activant la circulation aérologique en permanence.

Les grottes d'Esparros et du Pech Merle sont au contraire confinées sans relation aérologique directe avec l'extérieur (Bourges et al 2014). La quasi absence de particules et les compositions typiques en CO₂, O₂, humidité et ²²²Rn confirment que leur atmosphère souterraine est issue de circulations au travers du réseau de microfissures du karst qui débarrassent l'air qui y circule de ses particules.

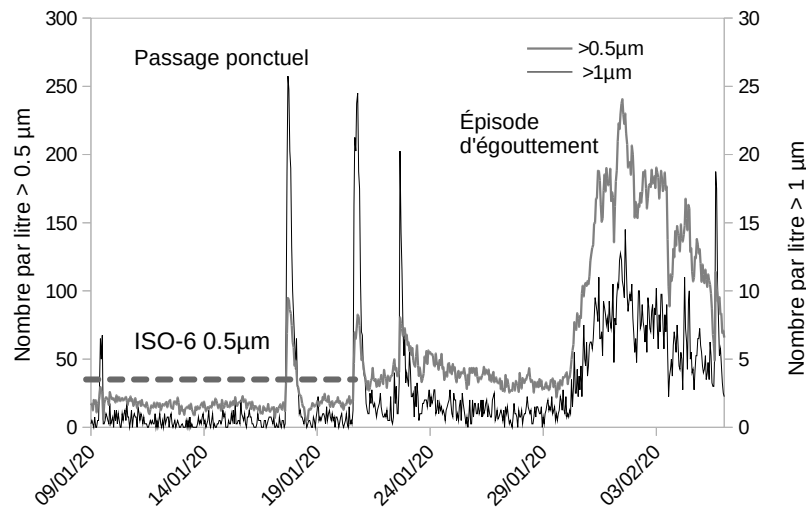


Figure 3: Concentration en particules de taille 0.5 µm et 1 µm en dehors de la période touristique à la grotte du Pech Merle. On voit sur cette figure la propreté de l'air de la cavité qui se trouve meilleure que la norme salle blanche ISO-6, et les perturbations apportées d'une part par des passages ponctuels de surveillance et d'autre part avec un évènement pluvieux assez fort pour provoquer des égouttements générateurs de particules.

Lorsque les grottes sont fermées au public hors période touristique, la charge en particules très faible et persistante tant qu'elle n'est pas perturbée par deux types d'évènements (Figure 3): le fond très bas, du niveau d'une salle blanche ISO-6 pour les particules de taille > 0.5 µm (Tableau 1), n'est perturbé entre le 19 et le 24 janvier que par trois passages d'un visiteur et, à partir du 31 janvier, par des égouttements faisant suite à un épisode pluvieux important. Les égouttements génèrent des embruns à chaque impact de goutte sur une surface, et ces embruns vont générer des aérosols de toutes tailles. Les perturbations ponctuelles causées par le bref passage d'un visiteur provoquent une contamination qui laisse le système se relaxer pendant plusieurs jours. Nous avons mis à profit cette relaxation libre pour calculer l'équation de disparition de la poussière générée par la première perturbation observée dans la Figure 3. On peut considérer alors une équation de diminution de concentration C en fonction du temps, par dépôt et/ou par dilution avec de l'air propre. Dans ces deux cas, nous avons:

$$\frac{dC}{dt} = -\alpha C \quad \text{soit: } \log(C) = -\alpha t + cst = -\frac{t}{\tau} + cst$$

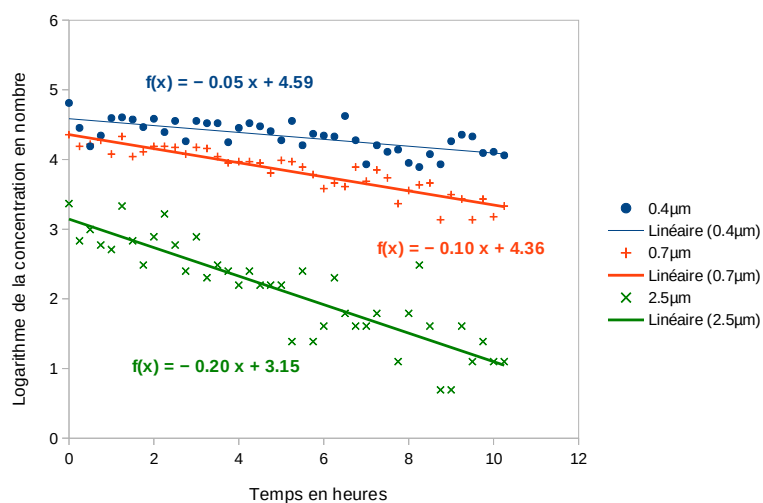


Figure 4: Tracé des droites de décroissance du logarithme de la concentration en particules au cours d'un évènement perturbateur dans la grotte du Pech Merle en janvier 2020.

Il est alors facile d'isoler dans la chronique la partie de relaxation du signal et de la tracer comme le logarithme des valeurs en fonction du temps. Une régression linéaire permet alors d'en déduire le temps

caractéristique de relaxation τ comme l'opposé de l'inverse de la pente de la droite. Ce calcul tracé dans la Figure 4 indique que pour les 3 classes de tailles de 0.4, 0.7 et 2.5 μm , les valeurs des constantes de temps sont respectivement égales à 20 h, 10 h et 5 h. Les différences observées entre ces trois classes de taille excluent une relaxation par simple dilution dans de l'air propre qui provoquerait une loi de diminution identique pour toutes les particules. C'est donc l'hypothèse d'une relaxation par dépôt qui est privilégiée dans ce cas. On peut donc en conclure que les aérosols mis en suspension par le passage des touristes se déposent sur toutes les parois et peuvent donc à terme recouvrir les expressions artistiques préhistoriques qui s'y trouvent ainsi que la surface des spéléothèmes.

4. CONCLUSION

Les cavités karstiques présentent naturellement un empoussièrément très faible. Dans les grottes ouvertes au public l'empoussièrément induit par les visiteurs représente un impact significatif par rapport à la situation naturelle. La mesure des aérosols dans les grottes constitue un marqueur très fin du fonctionnement naturel et des impacts anthropiques sur les sites souterrains. Les résultats montrent des bouffées de particules associées aux visites, à des phases d'activation des égouttements et à des événements aérauliques. La mesure des aérosols de grotte offre une vision nouvelle et complémentaire du suivi classique des mécanismes conservatoires des grottes ornées. Elle a toute sa place dans le suivi et la conservation des sites patrimoniaux souterrains.

5. RÉFÉRENCES ET REMERCIEMENTS

Ce travail est soutenu par l'ANR DECACLIM (2022-2026). et a bénéficié de l'aide de tout le personnel et de la direction des sites des grottes touristiques instrumentés que nous remercions.

Bourges F., Genthon P., Genty D., Lorblanchet M., Mauduit E., D'Hulst D. (2017), Conservation of prehistoric caves and stability of their inner climate: lessons from Chauvet and other French caves. *Science of the Total Environment*. Vol. 493, 79-91, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.137>

Christoforou, C. S., Salmon, L. G., Cass, G. R. (1996): Fate of Atmospheric Particles within the Buddhist Cave Temples at Yungang, China, *Environmental Science & Technology* 30(12), 3425–3434, <https://doi.org/10.1021/es950875r>

Dredge, J., Fairchild, I. J., Harrison, R. M., Fernandez-Cortes, A., Sanchez-Moral, S., Jurado, V., Gunn, J., Smith, A., Spötl, C., Mathey, D., Wynn, P. M., Grassineau, N. (2013): Cave aerosols: distribution and contribution to speleothem geochemistry, *Quaternary Science Reviews* 63, 23–41, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.016>.

Grgić, I., Iskra, I., Podkrajšek, B., Gerjevič, V. D. (2014): Measurements of aerosol particles in the Škocjan Caves, Slovenia, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 21(3), Springer Science and Business Media LLC, 1915–1923, <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2080-4>

Jeong, G. Y., Kim, S. J., Chang, S. J.: Black carbon pollution of speleothems by fine urban aerosols in tourist caves (2003): *American Mineralogist* 88(11-12), 1872–1878, 11, <https://doi.org/10.2138/am-2003-11-1230>

Kertész, Z., Borbély-Kiss, I., Rajta, I., Uzonyi, I., Kiss, A. (2000): Analysis of single aerosol particles collected in urban and cave environment by proton microprobe, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 161-163, 808–813, [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00938-6](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00938-6)

Licbinsky, R., Faimon, J., Tanda, S., Hegrova, J., Goessler, W., Uberhuberova, J. (2020): Changes in the elemental composition of particulate matter in a speleotherapeutic cave, *Atmospheric Pollution Research* 11(7), 1142–1154, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.04.008>

Martin-Pozas, T., Fernandez-Cortes, A., Cuezva, S., Jurado, V., Gonzalez-Pimentel, J. L., Hermosin, B., Ontañón, R., Arias, P., Cañaveras, J. C., Sanchez-Moral, S., Saiz-Jimenez, C. (2024): Microclimate, airborne particles, and microbiological monitoring protocol for conservation of rock-art caves: The case of the world-heritage site La Garma cave (Spain), *Journal of Environmental Management* 351, 119762, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119762>.

Miler, M., Zupančič, N., Šebela, S. S., Jarc (2024): Natural and anthropogenic impact on the microclimate and particulate matter in the UNESCO show cave, *Environ Sci Pollut Res Int* 35, 48313–48331, DOI: 10.1007/s11356-024-34366-8, <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34366-8>

Muri, G., Jovičić, A., Mihevc, A. (2013): Source assessment of deposited particles in a Slovenian show cave (Postojnska jama): evidence of long-lasting anthropogenic impact, *Int. J. Speleol.* 42, 225–233, <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.42.3.6>.

6. ANNEXE: NORME ISO 14644

Tableau 1: Extrait de la norme ISO 14644 concernant concentration en nombre de particules dans une salle blanche. Les valeurs correspondent aux valeurs maximales en nombre de particules par mètre cube.

| Taille (μm) | $\log_{10}N > 0.1$ | $\log_{10}N > 0.2$ | $\log_{10}N > 0.3$ | $\log_{10}N > 0.5$ | $\log_{10}N > 1$ | $\log_{10}N > 5$ |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|
| ISO-5 | 5.0 | 4.37 | 4.01 | 3.55 | 2.92 | < |
| ISO-6 | 6.0 | 5.37 | 5.01 | 4.55 | 3.92 | 2.47 |