



HAL
open science

**Dépôts massifs de poussières sahariennes sur le manteau
neigeux dans les Alpes et les Pyrénées du 5 au 7 février
2021 : Contexte, enjeux et résultats préliminaires
Version du 3 mai 2021**

Marion Réveillet, François Tuzet, Marie Dumont, Simon Gascoin, Laurent
Arnaud, Mylène Bonnefoy, Carlo Maria Carmagnola, Alexandre Deguine,
Olivier Evrard, Frédéric Flin, et al.

► **To cite this version:**

Marion Réveillet, François Tuzet, Marie Dumont, Simon Gascoin, Laurent Arnaud, et al.. Dépôts massifs de poussières sahariennes sur le manteau neigeux dans les Alpes et les Pyrénées du 5 au 7 février 2021 : Contexte, enjeux et résultats préliminaires Version du 3 mai 2021. [Rapport Technique] CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS. 2021. hal-03216273

HAL Id: hal-03216273

<https://hal.science/hal-03216273v1>

Submitted on 3 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Rapport technique

Dépôts massifs de poussières sahariennes sur le manteau neigeux dans les Alpes et les Pyrénées du 5 au 7 février 2021 :

Contexte, enjeux et résultats préliminaires

Version du 3 mai 2021

Marion Réveillet¹, François Tuzet¹, Marie Dumont¹, Simon Gascoïn², Laurent Arnaud⁶, Mylène Bonnefoy⁸, Carlo Carmagnola¹, Alexandre Deguine^{9,10}, Olivier Evrard³, Frédéric Flin¹, Firmin Fontaine⁸, Laure Gandois⁴, Pascal Hagenmuller¹, Hervé Herbin⁹, Béatrice Josse⁵, Matthieu Lafaysse¹, Gaël Le Roux⁴, Samuel Morin⁵, Pierre Nabat⁵, Denis Petitprez¹⁰, Ghislain Picard⁶, Alvaro Robledano^{6,1}, Martin Schneebeli⁷, Delphine Six⁶, Emmanuel Thibert⁸, Matthieu Vernay¹, Léo Viallon-Galinier¹, Céline Voiron⁶ et Didier Voisin⁶

1: Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige, 38000 Grenoble, France

2: CESBIO, Université de Toulouse, CNES/CNRS/INRA/IRD/UPS, Toulouse, France

3: LSCE - Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement [Gif-sur-Yvette], CEA, CNRS, UVSQ, Université Paris-Saclay, France

4: Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

5: Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Toulouse, France

6: Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, G-INP, IGE, Grenoble, France

7: WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Flüelastr. 11, 7260 Davos, Switzerland

8: Université Grenoble Alpes, INRAE, UR ETGR, Grenoble, France

9: Université de Lille, CNRS, UMR 8518 - LOA - Laboratoire d'Optique Atmosphérique, F-59000 Lille, France

10 : Université de Lille, CNRS, UMR 8522 - PC2A - Physicochimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère, F-59000 Lille, France

Contacts : marion.reveillet@meteo.fr , francois.tuzet@meteo.fr , marie.dumont@meteo.fr , simon.gascoin@cesbio.cnes.fr

En résumé

- Du 5 au 7 février 2021, un vaste panache de poussières d'origine saharienne s'est déposé sur l'Europe donnant une teinte orange spectaculaire au manteau neigeux dans les Alpes et les Pyrénées. Cet événement a été suivi d'autres dépôts courant février, mars et avril.
- Une campagne de science participative lancée dans l'urgence a permis de récolter **150 échantillons** dans les Alpes françaises et suisses, les Pyrénées françaises et espagnoles et le Jura, couvrant une gamme d'altitude de 1000 à 3000 m.
- 35 échantillons des Alpes françaises ont déjà été analysés et les masses déposées se situent entre **0.2 et 30 g m⁻²**. La valeur médiane des dépôts mesurés est de 9.3 g m⁻² ce qui représente entre **300 à 400 milliers de tonnes de sable** déposées sur les Alpes françaises.
- L'impact de ces événements varie fortement avec la localisation et l'altitude. D'après les résultats préliminaires, l'événement a eu le potentiel d'entraîner **un raccourcissement de la saison d'enneigement de plusieurs dizaines de jours** pour les zones les plus touchées.

INTRODUCTION

Les dépôts de particules colorées de diverses origines exercent une influence sur la vitesse d'évolution du manteau neigeux, en particulier sur sa fonte. Ceci est dû à l'assombrissement de la surface de la neige par le dépôt d'impuretés, qui réduisent son albédo (pouvoir réfléchissant vis-à-vis du rayonnement solaire) et augmentent l'absorption de rayonnement solaire dans la neige. De nombreux types d'impuretés peuvent être présentes dans la neige. Certaines peuvent même être vivantes, comme les algues. Les impuretés sont souvent présentes dans l'atmosphère et se déposent sur les surfaces, telles que les particules liées aux processus de combustion (carbone suie), les particules issues de transformations chimiques dans l'atmosphère, et celles qui sont émises par les surfaces, au premier rang desquelles figurent les particules de sel marin et les poussières terrigènes, notamment désertiques (Greilinger et al., 2021), ainsi que des débris végétaux.

Des travaux de recherche sont en cours pour mieux caractériser les mécanismes à l'œuvre dans l'atmosphère et après le dépôt sur la neige (Skiles et al., 2019). Ceci concerne à la fois l'impact des dépôts d'impuretés sur les transformations internes du manteau neigeux et la vitesse de fonte (Tuzet et al., 2017), y compris dans une perspective d'amélioration des outils de suivi et de prévision de l'état du manteau neigeux et de prévision en matière de ressources en eau et de risque d'avalanches (Dick et al., 2021). Des études sont aussi en cours au sujet de l'impact de ces dépôts sur l'évolution climatique de l'enneigement, notamment la forte baisse de l'enneigement à basse et moyenne altitude observée dans les massifs montagneux du monde, y compris dans les Alpes et les Pyrénées, qui est principalement due à l'accroissement de température et pour laquelle le rôle des dépôts d'impuretés et de ses possibles variations passées reste largement méconnu (Hock et al., sous presse ; Lopez-Moreno et al., 2020 ; Matiu et al., 2021).

L'événement majeur de dépôt de poussières désertiques d'origine saharienne qui s'est produit du 5 au 7 février 2021 dans toute l'Europe du Sud, suivi de plusieurs autres dépôts au cours de l'hiver et du printemps 2021, constitue une opportunité unique d'étudier ce phénomène en mobilisant des sources d'information et de collaboration dépassant le cadre des communautés de recherche précédemment constituées. Ce rapport technique rend compte des principaux axes d'investigation mis en œuvre depuis cet événement, en particulier les premiers résultats de la campagne de mesures participatives lancée au moment de ce dépôt sur les réseaux sociaux et relayée dans la presse régionale et nationale. Des travaux sont en cours pour rendre compte de façon plus détaillée des résultats de ces investigations, qui feront l'objet de publications scientifiques dans des revues à comité de lecture, conformément aux pratiques standard de la progression des connaissances scientifiques.

L'ÉVÉNEMENT



Twitter @ arriskeus



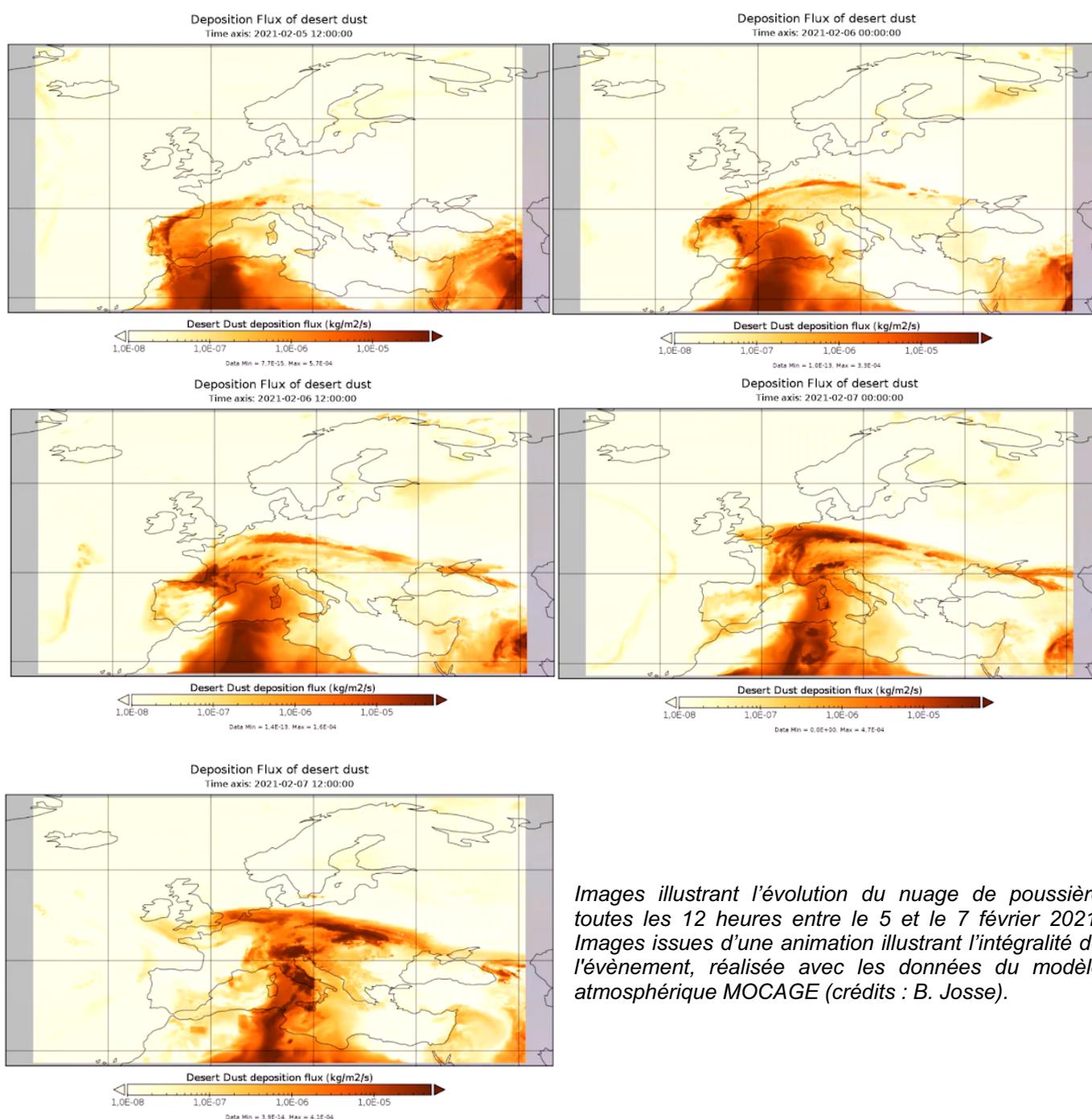
Twitter@Aymarfreeride

Photos illustrant le dépôt de sable dans les Pyrénées (crédits : Twitter Arriskeus & Aymarfreeride).

Les 06 et 07 Février 2021, un événement de dépôt de poussières minérales d'une intensité exceptionnelle a touché les Pyrénées et les Alpes. Cet événement a été suivi par d'autres dépôts fin février et début mars. Le dépôt de début février était majoritairement un dépôt sec (au moins dans les Alpes françaises) et était facilement visible sur le manteau neigeux. Même après avoir été recouvert par d'autres chutes de neige "propres", la couche de sable reste encore facilement identifiable dans le manteau neigeux.



Coupe du manteau neigeux dans les Hautes Alpes environ deux semaines après le dépôt (crédits : L. Denais)

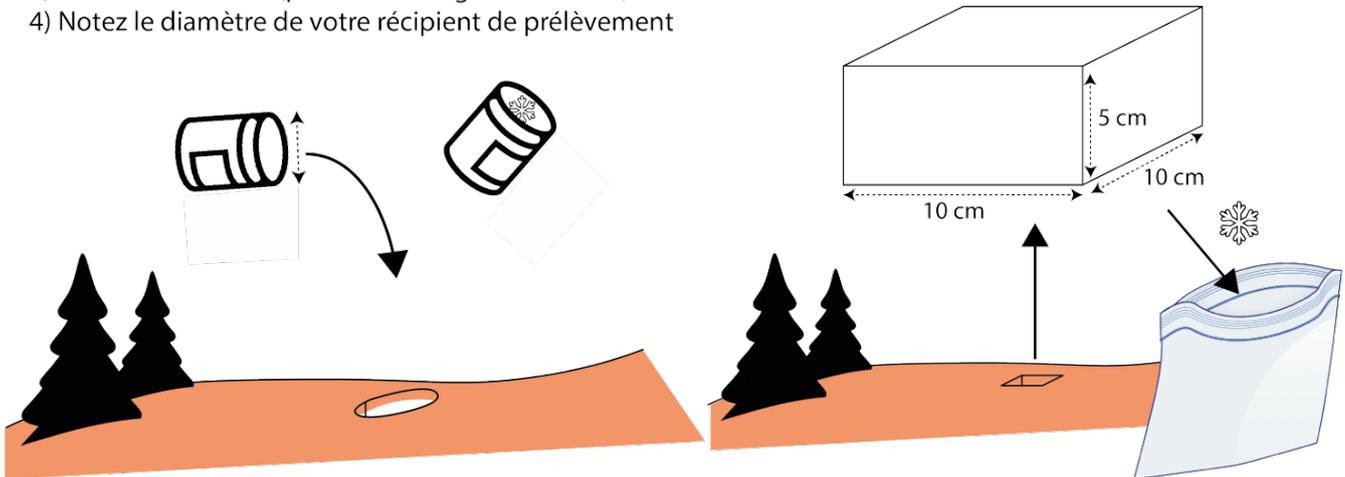


Images illustrant l'évolution du nuage de poussière toutes les 12 heures entre le 5 et le 7 février 2021. Images issues d'une animation illustrant l'intégralité de l'événement, réalisée avec les données du modèle atmosphérique MOCAGE (crédits : B. Josse).

LA CAMPAGNE DE SCIENCE PARTICIPATIVE

A la suite de ce dépôt, une campagne collaborative de mesure a été initiée dès le 6 février 2021 afin de quantifier les masses déposées en différents endroits des Alpes et des Pyrénées (<https://labo.obs-mip.fr/multitemp/aidez-nous-a-mesurer-la-neige-orange/>).

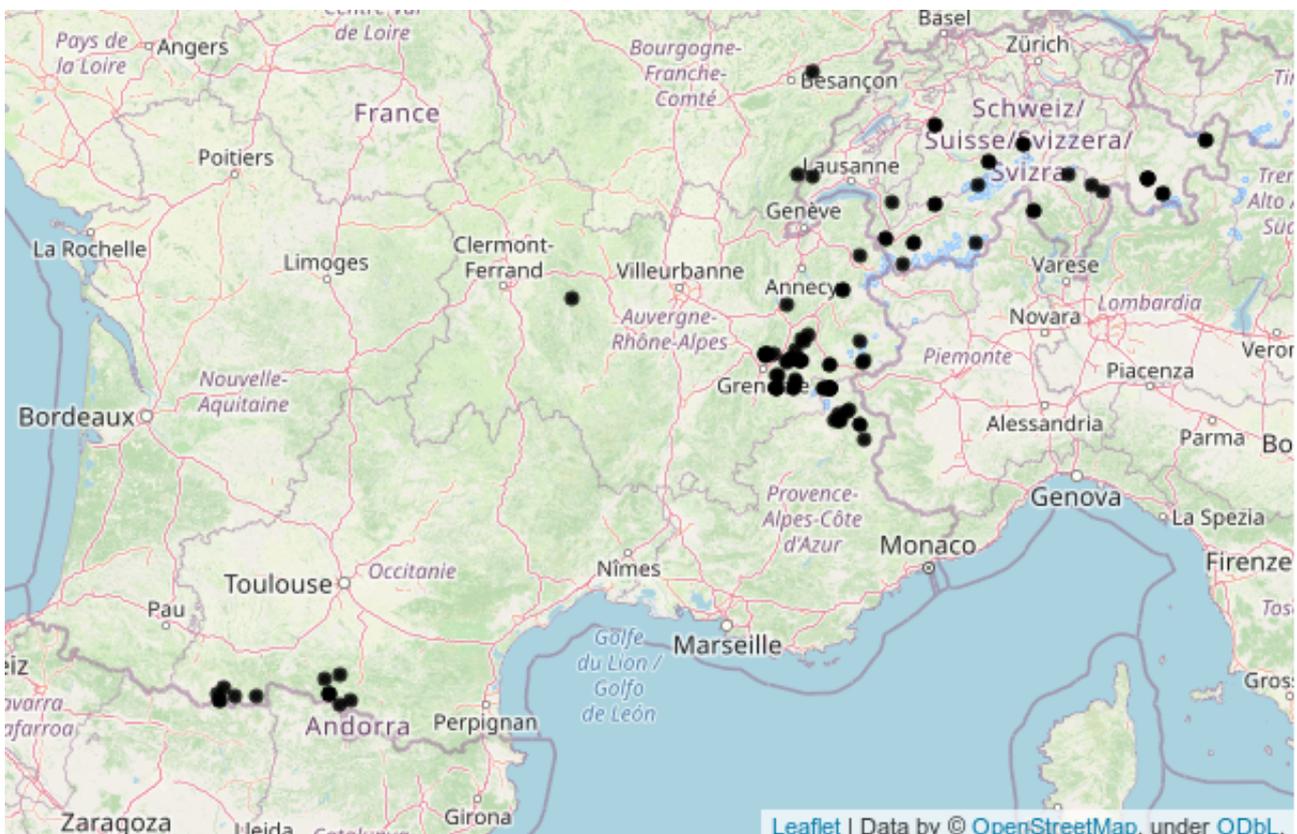
- 1) Prélevez l'intégralité de la couche de neige orange
- 2) Prendre une photo avec un smartphone (géolocalisé)
- 3) Stockez chez vous (pas besoin de garder au frais)
- 4) Notez le diamètre de votre récipient de prélèvement



Instructions de prélèvements.

<https://labo.obs-mip.fr/multitemp/aidez-nous-a-mesurer-la-neige-orange/>

Au total, cette campagne a permis de récolter 150 échantillons de la couche de neige sablée dont 86 dans les Alpes françaises, 8 dans le massif du Jura, 32 dans les Alpes suisses, 23 dans les Pyrénées et 1 dans le massif central.



Carte des échantillons prélevés (crédits F. Tuzet & M. Réveillet)

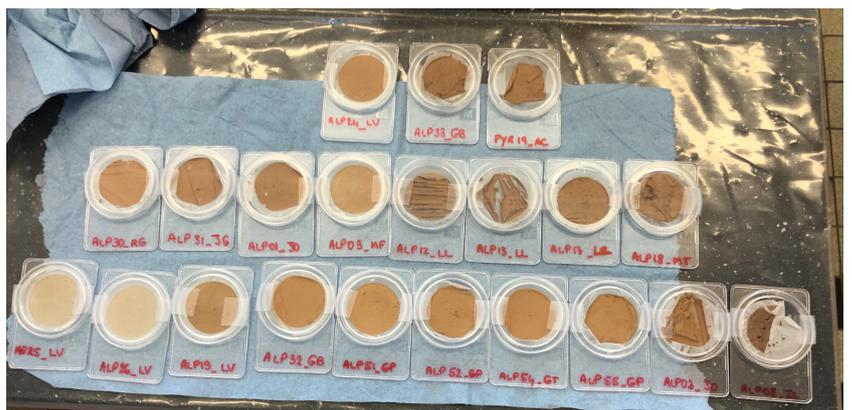
L'ÉTIQUETAGE DES ÉCHANTILLONS



Stockages des échantillons étiquetés en provenance de France (à gauche) et de Suisse (à droite) (crédits: M. Réveillet & M. Schneebeili)

L'ANALYSE DES ÉCHANTILLONS

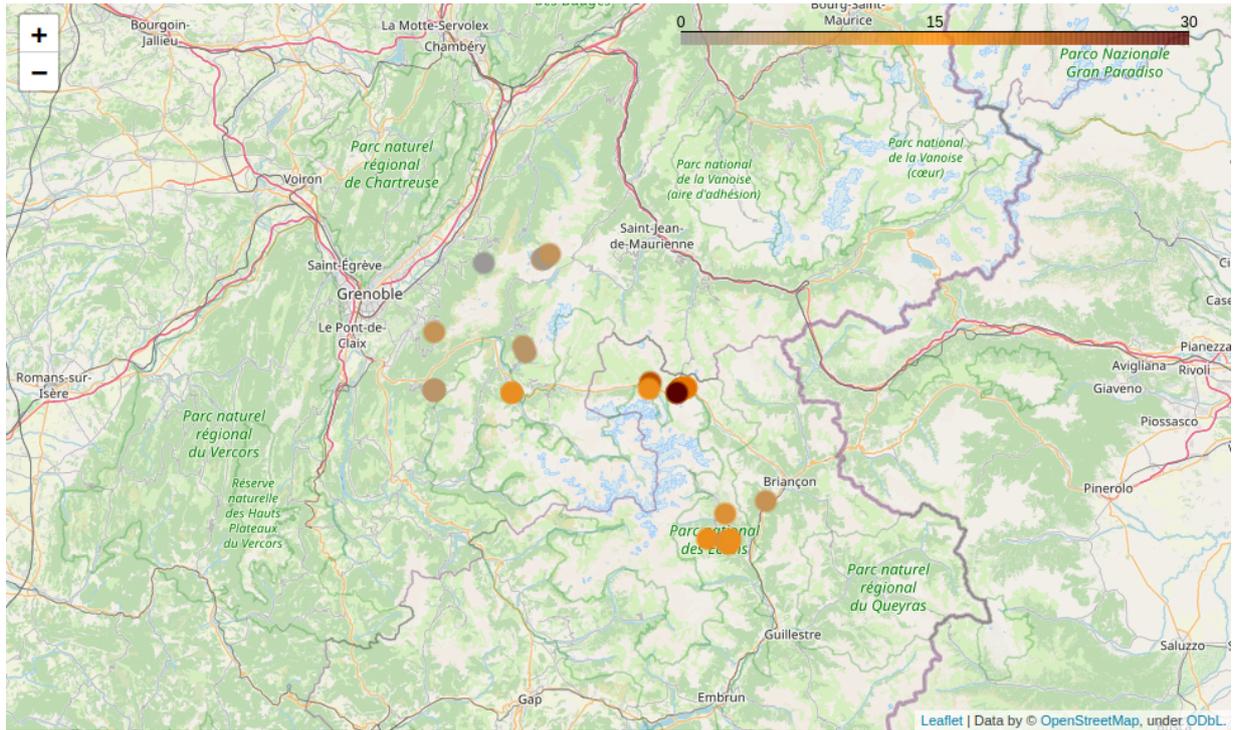
Une fois prélevés, les échantillons ont été fondus. Ils ont été homogénéisés et 5 mL ont été prélevés pour une analyse de la distribution de taille des poussières. Le reste a été filtré afin de connaître la masse sèche de poussières contenue. Les poussières sèches ont ensuite été envoyées dans d'autres laboratoires pour faire des analyses de concentration élémentaires (fluorescence des rayons X), des déterminations des propriétés optiques (LOA, PC2A), ainsi qu'une analyse ultérieure des activités en Césium 137 (LSCE), qui est un produit de fission émis lors des essais nucléaires atmosphériques des années 1960.



A gauche : Échantillons en cours de filtration. A droite : Quelques échantillons de poussières minérales après filtration (crédits : M. Dumont)

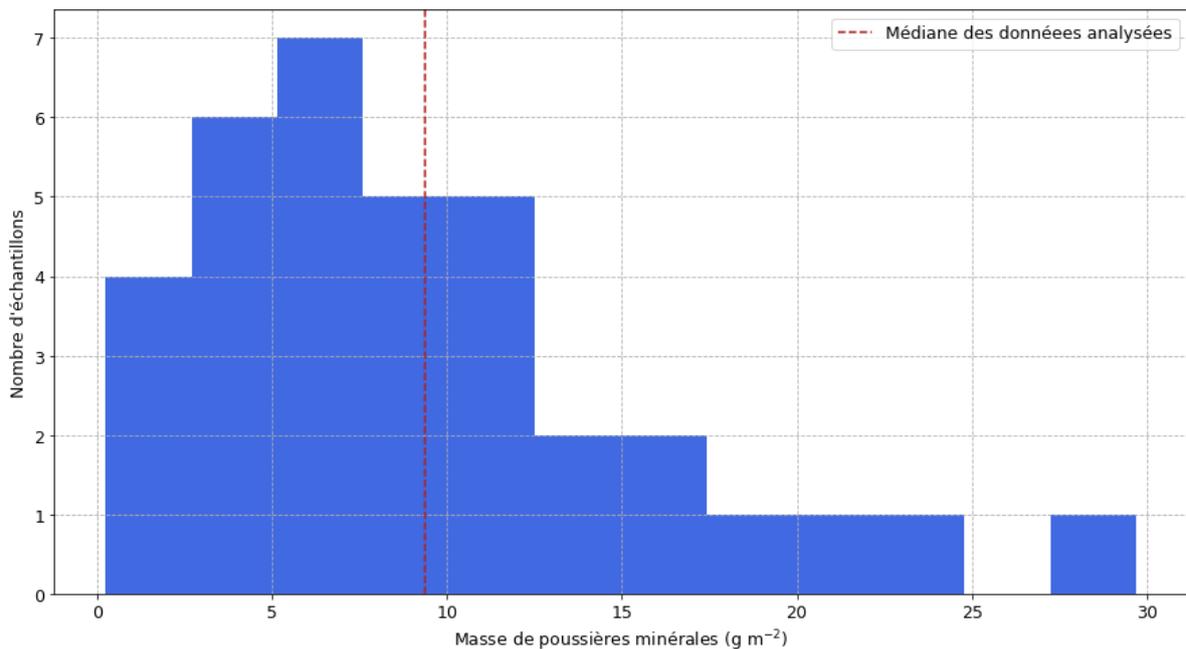
À l'heure actuelle, seule une partie des échantillons a été analysée par filtration à l'IGE. Chaque échantillon est filtré, puis séché et pesé. La durée de filtration varie entre quelques heures et plusieurs jours, en fonction de la concentration de poussière qu'il contient. A ce jour, 37 échantillons prélevés majoritairement dans les Alpes françaises ont été analysés.

RESULTATS PRELIMINAIRES



Carte des échantillons des Alpes françaises analysés à ce jour. La couleur des points correspond à la masse déposée en g m^{-2} (crédits : F. Tuzet)

Les résultats des analyses indiquent que la masse d'impureté déposée sur les Alpes françaises varie entre 0,2 et 30 g m^{-2} avec une valeur médiane de 9,4 g m^{-2} soit légèrement plus élevée que pour l'événement de dépôts enregistrés dans le Caucase en mars 2018 (Dumont et al., 2020). Sur l'ensemble des Alpes françaises, en utilisant cette valeur médiane comme référence, cela représente un total de 300 à 400 milliers de tonnes de sable déposées sur les Alpes françaises durant l'épisode (valeur calculée en prenant l'ensemble de la surface des Alpes françaises, surface enneigée ou non, 40 000 km^2). Deux échantillons pyrénéens ont pour l'instant été analysés avec des masses de 7,24 et 24,7 g m^{-2} . Il s'agit de résultats préliminaires, susceptibles d'évoluer suite à l'analyse en cours d'un ensemble plus grand d'échantillons.



Histogramme des masses de poussière déposées pour les échantillons analysés (crédits : F. Tuzet)

LES PREMIERES ETUDES D'IMPACT

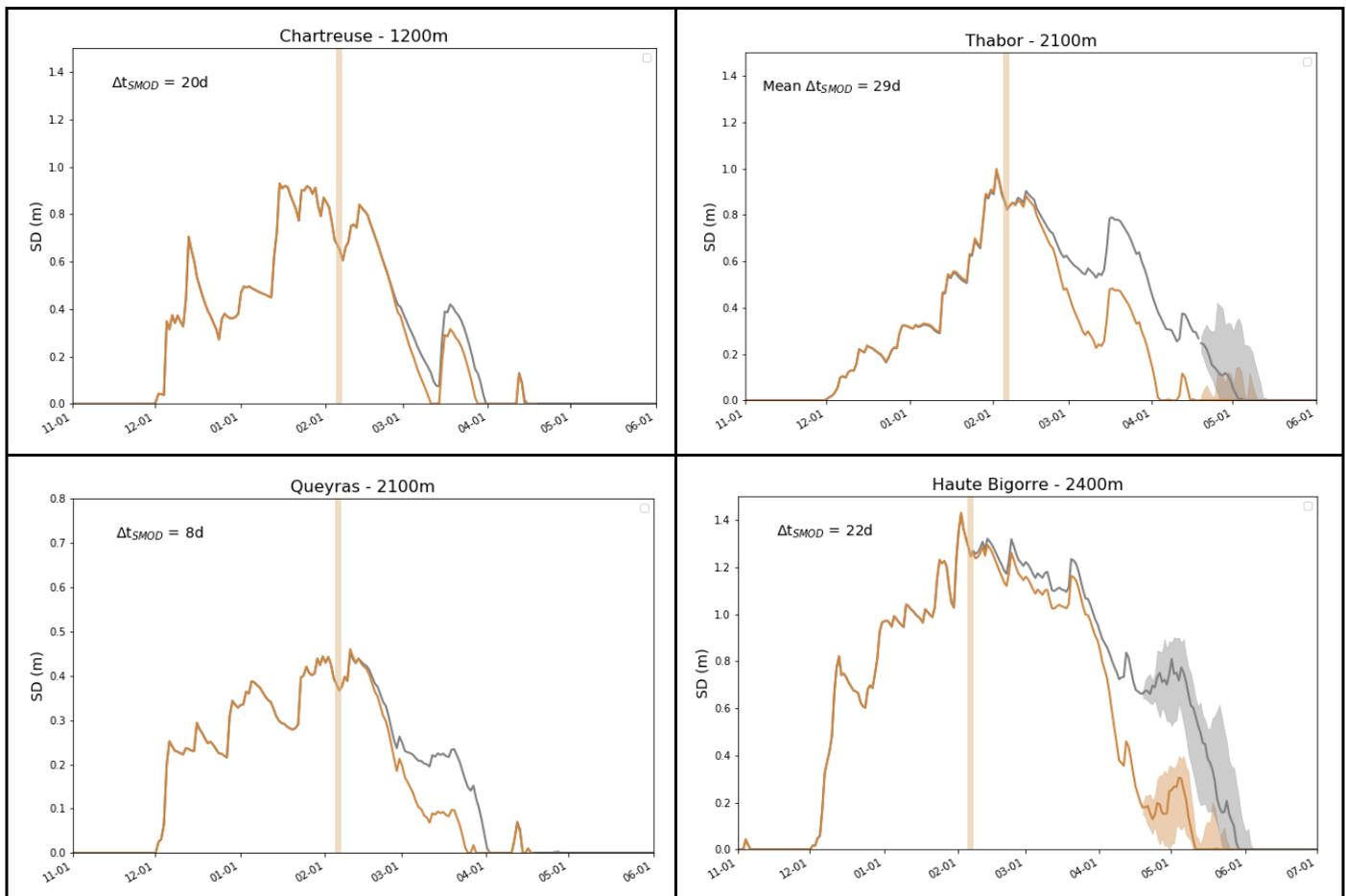
En se basant sur ces données, des simulations numériques ont été effectuées afin de quantifier l'impact d'un dépôt d'une telle ampleur sur l'évolution du manteau neigeux en fin de saison. Pour cela, le modèle de manteau neigeux Crocus a été forcé par les analyses SAFRAN opérationnelles permettant de simuler l'évolution du manteau neigeux d'après les données météorologiques observées depuis le début de la saison hivernale (i.e. jusqu'au 18 avril) (Tuzet et al., 2017, 2020 ; Dumont et al., 2020). Par la suite, comme les conditions météorologiques n'étaient pas encore connues, des ensembles de 30 simulations ont été réalisées en utilisant les conditions météorologiques des 30 dernières années entre le 18 avril 2021 et la fin de saison (1er août). Pour considérer l'événement de dépôt de poussières minérales, la quantité totale de dépôt a été prescrite à partir des observations au sol, et leur chronologie est issue du modèle de chimie atmosphérique MOCAGE (Josse et al., 2004).

Enfin, pour représenter la composante liée aux dépôts de carbone suie sur l'ensemble de la saison, les dépôts moyens des 10 dernières années ont été inclus dans la simulation.

Les simulations ont, dans un premier temps été réalisées en quatre points sélectionnés :

- un point du massif de la Chartreuse à 1200m (Alpes du Nord)
- un point dans le massif du Queyras à 2100m (Alpes du Sud)
- un point dans le massif de Haute Bigorre à 2400m (Pyrénées)
- un point dans le massif du Thabor à 2100 m (Alpes du Sud)

Les figures ci-dessous représentent l'évolution des hauteurs de neige simulées pour les points sélectionnés. Sur chaque figure, la courbe orange correspond à la simulation prenant en compte le dépôt du 5-7 Février (représenté par la ligne verticale orange) tandis que la courbe grise correspond à une simulation sans ce dépôt (autrement dit ne tenant compte que des dépôts de carbone suie). A la fin de la saison, l'enveloppe correspond au premier et derniers quartiles de l'ensemble des simulations correspondants aux différentes conditions météorologiques utilisées pour alimenter la simulation, et dont la médiane est représentée par le trait plein.



Hauteur de neige simulée par Crocus avec (orange) et sans (gris) le dépôt du 6-7 Février pour les 4 sites sélectionnés : En haut : Chartreuse, 1200 m (gauche), Thabor, 2100 m (droite). En bas: Queyras, 2100m (gauche) et Haute Bigorre 2400 m (droite). Les chiffres indiquent l'avancement de la date de fin de saison (SMOD) lorsque l'on prend en compte dans les simulations, les effets des poussières sahariennes (crédits : M. Réveillet)

Ces graphiques montrent un impact très variable selon la localisation et l'altitude. En Chartreuse, la projection moyenne d'avancement de la date de fonte par rapport à une situation d'absence totale de poussières sahariennes est de 20 jours à 1200 m, contre 8 jours pour le Queyras à 2100 m, 29 jours pour le Thabor à 2100 m et 22 pour la Haute-Bigorre à 2400 m. Cette avance de la date de fonte est susceptible d'avoir un impact sur la temporalité de la disponibilité des ressources en eau, ainsi que sur les conditions de viabilité des stations de sports d'hiver. De plus, une mise à nu précoce de la surface peut modifier l'état thermique du sol, qui est facteur important dans le fonctionnement des écosystèmes de montagne (Choler, 2018). On remarque également que l'impact sur le raccourcissement de la durée d'enneigement modélisé dépend fortement des conditions météorologiques de la fin de saison. En effet, la couche de sable n'a d'influence sur la vitesse de fonte que lorsqu'elle est en surface et exposée au rayonnement solaire. Ainsi, pour le Thabor, l'impact varie entre 19 et 53 jours (6 à 46 jours pour la Haute-Bigorre) selon l'année de référence utilisée pour la fin de la saison.

Pour mieux appréhender les impacts de ce dépôt et fournir une estimation plus précise du raccourcissement, il conviendra de mettre à jour les simulations avec les conditions météorologiques observées pour l'ensemble de la saison et l'intégralité de l'analyse des échantillons. Les analyses ainsi que la modélisation sont encore préliminaires et des recherches plus approfondies sont nécessaires pour bien caractériser l'impact de ce dépôt sur l'enneigement de nos massifs. Enfin ces dépôts peuvent aussi avoir un impact sur la stabilité du manteau neigeux (apparition d'une couche de neige humide, modification des gradients de températures, ...) et, de ce fait, de l'activité avalancheuse, ce qui fait l'objet de recherches complémentaires (Dick et al., 2021).

Remerciements

Un grand merci à toutes les personnes qui ont pris le temps d'effectuer ces prélèvements de neige et nous les ont fait parvenir ! Un grand merci également aux observateurs du réseau suisse des observateurs neige et avalanche pour le rassemblement des échantillons, Lukas Dürr (SLF) pour l'organisation. Nous remercions également les médias qui, en relayant l'information, ont nettement aidé à récolter un si grand nombre d'échantillons.

Financements

ANR JCJ EBONI et ERC IVORI (n° grant no. 16-CE01-0006, grant agreement No 94951)

Bibliographie

Choler P., *Winter soil temperature dependence of alpine plant distribution: Implications for anticipating vegetation changes under a warming climate*, *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 30, 2018, 6-15, <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2017.11.002>.

Dick, O., Viallon-Galinier, L., Hagenmuller, P., Fructus, M., Lafaysse, M., and Dumont, M.: *Can Saharan dust deposition impact snow stability in the French Alps?*, *EGU General Assembly 2021, online*, 19–30 Apr 2021, EGU21-6600, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6600>, 2021.

Dumont, M., Tuzet, F., Gascoïn, S., Picard, G., Kutuzov, S., Lafaysse, M., et al. (2020). *Accelerated snow melt in the Russian Caucasus mountains after the Saharan dust outbreak in March 2018*. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, e2020JF005641. <https://doi.org/10.1029/2020JF005641>

Greilinger, M., & Kasper-Giebl, A. (2021, April 26). *Saharan Dust Records and Its Impact in the European Alps*. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. Retrieved 3 May. 2021, <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.827>

Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Kääb, S. Kang, S. Kutuzov, Al. Milner, U. Molau, S. Morin, B. Orlove, and H. Steltzer, 2019 : *High Mountain Areas*. In : *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/06_SROCC_Ch02_FINAL.pdf, in press.

- Josse, B., Simon, P., and Peuch, V.-H.: Radon global simulations with the multiscale chemistry and transport model MOCAGE, *Tellus B.*, 56, 339–356, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2004.00112.x>, 2004.
- López-Moreno, J.I., Soubeyroux J.M., Gascoin, S., Durán-Gómez, N., Alonso-Gonzalez, Lafaysse, M., Vernay, M., Carmagnola, C., Morin, S., Long term trends (1958-2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees, *International Journal of Climatology*, 40, 6122 - 6136, <https://doi.org/10.1002/joc.6571>, 2020.
- Matiu, M., Crespi, A., Bertoldi, G., Carmagnola, C. M., Marty, C., Morin, S., Schöner, W., Cat Berro, D., Chiogna, G., De Gregorio, L., Kotlarski, S., Majone, B., Resch, G., Terzago, S., Valt, M., Beozzo, W., Cianfarra, P., Gouttevin, I., Marcolini, G., Notarnicola, C., Petitta, M., Scherrer, S. C., Strasser, U., Winkler, M., Zebisch, M., Cicogna, A., Cremonini, R., Debernardi, A., Faletto, M., Gaddo, M., Giovannini, L., Mercalli, L., Soubeyroux, J.-M., Sušnik, A., Trenti, A., Urbani, S., and Weilguni, V. : Observed snow depth trends in the European Alps : 1971 to 2019, *The Cryosphere*, 15, 1343–1382, <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>, 2021.
- Tuzet, F., Dumont, M., Lafaysse, M., Picard, G., Arnaud, L., Voisin, D., Lejeune, Y., Charrois, L., Nabat, P., and Morin, S.: A multilayer physically based snowpack model simulating direct and indirect radiative impacts of light-absorbing impurities in snow, *The Cryosphere*, 11, 2633–2653, <https://doi.org/10.5194/tc-11-2633-2017>, 2017.
- Tuzet, F., Dumont, M., Picard, G., Lamare, M., Voisin, D., Nabat, P., Lafaysse, M., Larue, F., Revuelto, J., and Arnaud, L.: Quantification of the radiative impact of light-absorbing particles during two contrasted snow seasons at Col du Lautaret (2058 m a.s.l., French Alps), *The Cryosphere*, 14, 4553–4579, <https://doi.org/10.5194/tc-14-4553-2020>, 2020.