

logues, les pétrographes et les chimistes doivent effectuer de difficiles analyses. Ils étudient la turbidité de la glace, recherchent des minéraux d'origine désertique par des analyses chimiques de divers éléments (calcium, sodium, etc.) et par des analyses isotopiques : ils cherchent notamment la proportion d'oxygène 18 (dont le noyau est composé de huit protons et de dix neutrons) par rapport à l'oxygène 16 (à huit protons et huit neutrons).

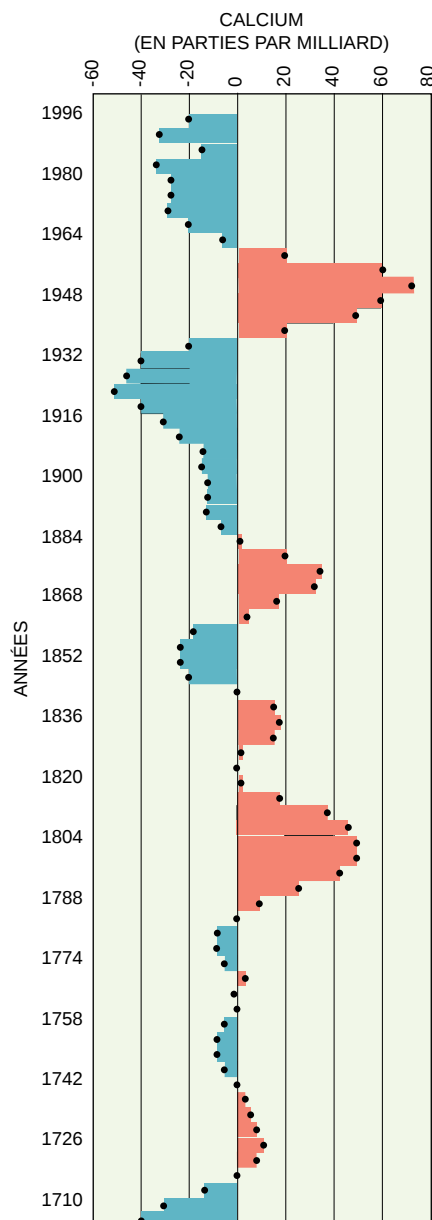
Des géochimistes allemands et italiens ont utilisé les méthodes mises au point dans l'étude des glaces du Groenland pour analyser des carottes de glace prélevées sur le mont Rosa dans les Alpes, à une altitude de 4 500 mètres. Les variations de la concentration en calcium ont révélé les «strates sahariennes» (voir la figure 7). Ils ont notamment observé que la quantité de poussières déposées dans la glace au cours des 300 dernières années n'a pas augmenté. En revanche, une oscillation cyclique a été décelée : les concentrations élevées en calcium coïncident avec une augmentation relative de l'oxygène 18 d'environ 2,3 pour 1 000 (correspondant à un échauffement de trois à cinq degrés). Ainsi, dans les Alpes, la quantité de poussières augmente avec la température.

Cependant, la température des Alpes n'est pas représentative des conditions globales, contrairement aux glaces des pôles. Or, les glaces des pôles montrent que la quantité de poussières contenues dans les glaces augmente lorsque la température diminue : durant les glaciations, les zones arides se sont agrandies et les conditions météorologiques ont changé.

Pour savoir si les variations climatiques laissent partout les mêmes traces, d'autres événements devront être enregistrés et étudiés, en particulier les événements violents. Au cours des 20 dernières années, moins d'une dizaine d'événements violents ont été enregistrés. Les changements climatiques globaux modifieront-ils la fréquence de ces phénomènes ? Si oui, dans quel sens ? Les tempêtes de sable pourraient avoir aussi contribué au rapide dégel des glaciers : une tempête importante, telle celle de mars 1991, qui a diminué l'albédo des glaciers des Alpes orientales (la proportion de lumière solaire réfléchie), a accéléré la fonte estivale des glaciers. Cette fonte a contribué à l'exposition d'Ötzy, l'homme des glaces,

âgé de 5 300 ans, trouvé dans le Parc naturel Gruppo di Tessa, à la frontière italo-autrichienne, à une altitude de 3 200 mètres.

Les climatologues, qui connaissent maintenant les effets des aérosols minéraux, cherchent à en tenir compte dans leurs modèles. De surcroît, une partie de ces poussières pro-



7. POUR MESURER les quantités de poussières désertiques déposées sur les Alpes, Dietmar Wagenbach, de l'Université d'Heidelberg, a mis au point une méthode d'identification des «strates sahariennes», fondée essentiellement sur la concentration en calcium et sur les variations du rapport isotopique entre l'oxygène 16 et l'oxygène 18. Le graphique indique les variations des concentrations en calcium (par rapport à la concentration moyenne) dans une carotte de glace prélevée dans les Alpes : ces mesures montrent le caractère cyclique du transport des poussières depuis 300 ans.

vient de sols «perturbés» par l'érosion, et par la surexploitation ou la déforestation, principalement dans des régions arides et semi-arides. La désertification est définie par l'Organisation des nations unies comme une «dégradation du terrain dans des zones arides, semi-arides et semi-humides, résultant de divers facteurs, y compris les variations climatiques et les activités humaines». Cette définition permet de comprendre que les phénomènes naturels sont associés à des phénomènes anthropiques, à tel point qu'il devient parfois impossible de les distinguer.

Toute dégradation des environnements à l'équilibre précaire, tels que le Sahara et le Sahel, menace tous les climats et toutes les régions. Comme la géologie et la morphologie du Sahara en font «un livre ouvert de l'histoire du monde», l'on peut penser que l'intensité et la fréquence du transport de poussières désertiques vers la Méditerranée est un «baromètre» qui nous indique de manière spectaculaire les changements climatiques en cours.

Stefano GUERZONI travaille au Département de géologie marine de Bologne. Emanuela MOLINAROLI travaille au Département de sciences de l'environnement de l'Université de Venise.

Alain BÜCHER, *Saharan Dust from Ancient Times until Present*, in *Journal of Arid Environment*, 1993.

Emanuela MOLINAROLI, Stefano GUERZONI et Giancarlo RAMPAZZO, *Contribution of Saharan Dust to the Central Mediterranean Basin*, in *Geological Society of America SP 284*, pp. 303-312, 1993.

D.A. MEESE et al., *The Accumulation Record from the GISP2 Core as an Indicator of Climate Change throughout the Holocene*, in *Science*, vol. 266, pp. 1680-1682, 9 décembre 1994.

François DULAC et al., *Quantitative Remote Sensing of African Dust Transport to the Mediterranean*, in *The Impact of Desert Dust across the Mediterranean*, sous la direction de S. Guerzoni et R. Chester, Kluwer Academic Publishers, pp. 25-49, 1996.

Dietmar WAGENBACH et al., *Northward Transport of Saharan Dust Recorded in Deep Alpine Ice Cores*, in *The Impact of Desert Dust across the Mediterranean*, sous la direction de S. Guerzoni et R. Chester, Kluwer Academic Publishers, pp. 291-300, 1996.

L'impact climatique des poussières d'Afrique

CYRIL MOULIN • CLAUDE LAMBERT

Les satellites mesurent les concentrations en poussières dans l'atmosphère terrestre. Contrairement à ce que les climatologues pensaient, ces poussières risquent de perturber le climat à court terme.

Chaque année, environ un milliard de tonnes de particules minérales est transporté dans l'atmosphère à partir des zones arides et semi-arides du Globe, principalement du Nord de l'Afrique. Au cours du temps, cette quantité a beaucoup varié : durant les derniers maxima glaciaires, il y a quelques dizaines de milliers d'années, il se déposait 30 fois plus de poussières dans les glaces de l'Antarctique qu'il ne s'en dépose aujourd'hui.

Les poussières dans l'atmosphère constituent un bon indicateur des variations climatiques passées : les changements de la circulation atmosphérique et l'extension des régions désertiques au cours des périodes froides ont considérablement accru la quantité de poussières transportées. Aux mêmes époques, la quantité de poussières a augmenté dans les sédiments marins du Pacifique Nord, de l'océan Indien et de l'Atlantique.

Si les modifications du climat influent ainsi sur la quantité de poussières désertiques mises en suspension, l'action des poussières sur le climat est également importante : avec l'ensemble des particules en suspension dans l'atmosphère (suies, embruns, etc.), les poussières interviennent dans le bilan radiatif, le bilan entre le flux d'énergie absorbé par la Terre et le flux réémis, qui commande le climat de la Terre.

Pourtant, jusqu'à une époque récente, les poussières des déserts préoccupaient peu les spécialistes des changements climatiques à court terme (100 ans), car elles étaient considérées comme des aérosols résultant d'un processus naturel d'érosion par le vent. À

ces échelles de temps, on estimait que le climat de la Terre était en équilibre si l'activité humaine ne le perturbait pas. Ainsi, seules les perturbations anthropiques directes, tels que les rejets supplémentaires de gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, chlorofluorocarbures) ou d'aérosols de pollution (sulfates, suies,...), étaient supposées suffisamment intenses pour influencer sur le climat à l'échelle de 100 ans.

Après avoir examiné pourquoi l'observation globale des poussières nécessite des satellites, nous détaillerons les observations de ces derniers. Les données collectées montrent que, depuis 30 ans, la quantité de poussières africaines transportée a beaucoup augmenté et que leur prise en compte dans les modèles climatiques est indispensable.

Couverture spatiale

Voici plus de dix ans, Joseph Prospero et ses collègues de l'Université de Miami avaient mis en évidence une augmentation de plus d'un facteur deux, entre 1965 et 1984, des quantités de poussières d'origine africaine déposées à la Barbade, aux Antilles. Cette variation est importante : depuis le début de l'ère préindustrielle (1750), on estime respectivement à 30 pour cent et à 145 pour cent l'augmentation des concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone et en méthane, les deux principaux gaz à effet de serre. C'était la première preuve que, localement, les concentrations en poussières variaient fortement en quelques décennies, de la même façon que les gaz à effet de serre et les aérosols de pollution.

Pourtant, les climatologues négligèrent longtemps cette augmentation. Puis, en 1996, Ina Tegen et ses collègues de l'Université Columbia suggérèrent que la quantité de poussières exportée d'Afrique est déterminée en grande partie par la désertification liée à une utilisation croissante des sols (agriculture, élevage, urbanisation, etc.) par les populations locales. Ainsi la désertification galopante de ces dernières années expliquerait l'augmentation des concentrations enregistrées à la Barbade. Après ces travaux, fondés sur des simulations effectuées à l'aide d'un modèle global de transport, les poussières africaines sont passées rapidement du statut d'indicateur des variations climatiques à long terme à celui d'acteur des changements climatiques rapides liés à l'activité humaine.

Malheureusement, les concentrations en poussières désertiques dans l'atmosphère sont difficiles à mesurer à partir du sol, et les relevés de la Barbade restent le seul enregistrement continu couvrant plus de dix ans. Pour prendre en compte ces poussières dans les modèles climatiques globaux, deux difficultés subsistaient. D'une part, on ne disposait que de mesures locales qu'on ne pouvait pas extrapoler : le climat de la Barbade diffère de celui de l'Atlantique tropical Nord, car de nombreux facteurs locaux, telle la météorologie de la mer des Caraïbes peuvent intervenir sur la tendance

1. TEMPÊTES DE SABLE au Niger (en haut) et dans le Sahara (en bas). Chaque année, un milliard de tonnes de poussières est transporté dans l'atmosphère.