

de tempêtes de sable. Pendant l'été, les poussières africaines atteignent les Antilles et l'Amérique centrale.

Sur l'océan Indien, les poussières ne sont notablement transportées que pendant l'été, mais le débit à cette période est supérieur à celui qui est mesuré au-dessus de l'océan Atlantique. Ce cycle saisonnier est imposé par celui de la mousson qui s'installe en été et engendre des vents violents de Sud-Ouest qui balaient l'Afrique de l'Est et la péninsule Arabique. Comme sur l'océan Atlantique, le transport des poussières est limité au Sud par les fortes pluies de la zone intertropicale, qui entraînent les particules vers le sol.

En Méditerranée, le transport des poussières est inférieur et, surtout, plus variable (voir *Le transport des poussières sahariennes*, par S. Guerzoni et E. Molinaroli, page 72). Sur cette zone, le transport est provoqué par les dépressions qui traversent occasionnellement le bassin, engendrant des vents violents en direction du Nord et du Nord-Est. L'extension vers l'Europe des panaches de poussières est limitée en raison de la plus grande fréquence des pluies à ces latitudes, qui «lessivent» l'atmosphère.

Couverture temporelle

Les cartes globales dressées par les satellites américains ne permettent cependant pas d'observer le transport de poussières sur une période suffisamment longue pour mettre en évidence une intensification du transport de poussières africaines. Les images du satellite météorologique européen *Meteosat* (voir la figure 3) étendent ce suivi spatial de plus d'une dizaine d'années.

Nous avons utilisé ces images *Meteosat* pour suivre les concentrations en poussières au-dessus du Nord-Est de l'Atlantique et de la Méditerranée entre juin 1983 et décembre 1994. Plus de 4 000 images ont ainsi été analysées, ce qui constitue la plus grande base de données disponibles pour l'étude des aérosols. Durant cette période, les variations annuelles de l'épaisseur optique dues aux poussières ont atteint 50 pour cent en Atlantique et 300 pour cent en Méditerranée. Dans ces deux régions, les années de transport important (1984, 1989, 1992 et 1993) et les années de transport réduit (entre 1985 et 1987) sont les mêmes, malgré les différences dans les modes de transport et dans les régions sources. Cette correspondance indique que l'in-

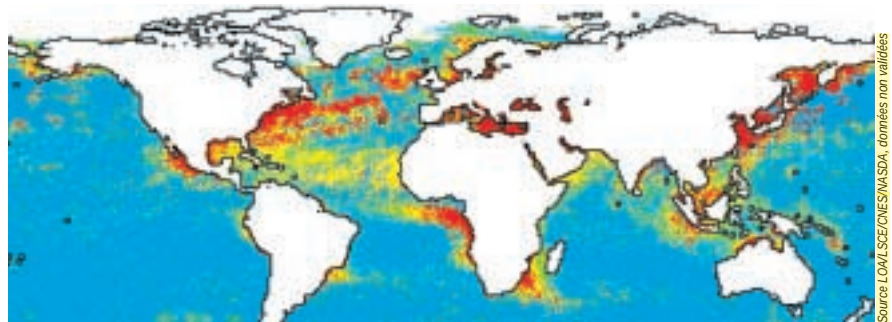
tensité du transport des poussières africaines vers le Nord et vers l'Ouest est commandée par un phénomène de grande échelle.

En combinant ces observations à des données météorologiques, nous avons montré qu'un des phénomènes atmosphériques majeurs de l'hémisphère Nord, l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA), commande le transport des poussières africaines. Ce phéno-

mène est caractérisé par une modification de l'intensité de la dépression d'Islande et de l'anticyclone des Açores. Les années où cette Oscillation Nord-Atlantique est très marquée (forte dépression sur l'Islande et anticyclone des Açores très étendu), les alizés se renforcent sur l'Afrique et l'Atlantique et les précipitations se décalent vers le Nord de l'Europe, ce qui provoque des sécheresses en Afrique du Nord



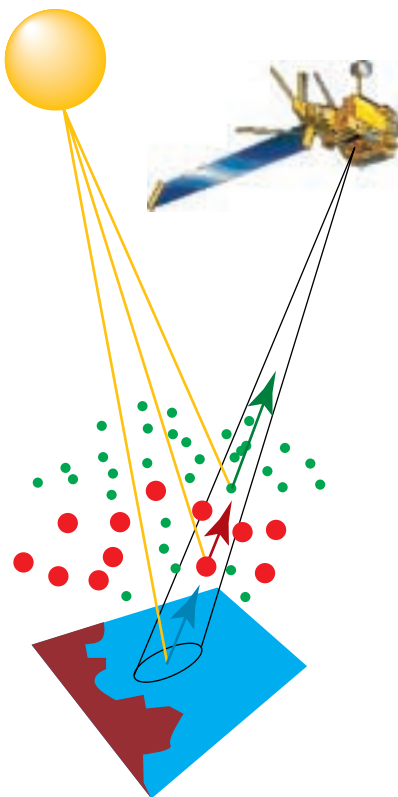
3. SUR CETTE IMAGE prise par le satellite *Meteosat* le 7 mars 1997, un panache de poussières sahariennes se dirige vers l'Amérique du Sud (en rouge, au-dessus de l'Atlantique). Les nuages apparaissent en blanc. Au-dessus des continents, plus le sol est aride, plus l'image est jaune.



4. CARTE MONDIALE des différents aérosols dans l'atmosphère, au-dessus de la mer, obtenue avec le capteur spatial français POLDER, en juin 1997. Les poussières désertiques apparaissent en jaune ; les aérosols émis par l'action de l'homme (sulfates de pollution et suies) sont représentés en rouge, tandis que les aérosols marins, qui occupent une vaste partie de l'atmosphère marine sont colorés en bleu. Les zones vertes correspondent à des zones de mélange entre deux types d'aérosols.

L'observation spatiale des poussières désertiques

Les satellites détectent les aérosols parce que ceux-ci réfléchissent une partie de la lumière solaire. En l'absence de nuages, la quantité de lumière que reçoit le capteur spa-



tial, à des longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,9 micromètre, provient principalement de la diffusion du rayonnement solaire incident par les molécules de gaz, les poussières et la surface (voir le schéma). Au-dessus de l'océan, dont la surface absorbe la plus grande partie du rayonnement solaire incident, les aérosols diffusent bien le rayonnement solaire, ce qui les rend nettement observables sur les images.

La quantité de lumière réfléchie par le sol ainsi que par les molécules de gaz est modélisée. En soustrayant ces deux contributions à la lumière totale reçue par le capteur, on obtient la quantité de lumière diffusée par les poussières. Moyennant quelques hypothèses sur la taille et sur la forme de ces aérosols, on déduit une concentration atmosphérique intégrée sur la verticale : c'est l'épaisseur optique. Cette méthode n'est pas applicable au-dessus de la Terre, car la contribution du sol à la lumière mesurée par le capteur spatial est si grande qu'elle masque celle des aérosols.

Le capteur nommé POLDER (POLARization and Directionality of the Earth's Reflectances, soit « anisotropie et polarisation des réflectances terrestres »), mis au point en France, contourne cette difficulté et per-

met l'observation des aérosols au-dessus des continents. Le premier exemplaire de cette série de capteurs spatiaux a été lancé en août 1996, à bord du satellite ADEOS.

Grâce à ces capteurs, on estime précisément les concentrations d'aérosols, non seulement au-dessus des océans, mais aussi, et pour la première fois, au-dessus des continents. Ces estimations sont fondées sur la mesure de la polarisation de la lumière diffusée par le système Terre-atmosphère. La polarisation est une caractéristique facilement mesurable de la lumière. Sur les continents, la polarisation du rayonnement solaire engendrée par la diffusion sur les aérosols ressort clairement par rapport à la diffusion due au sol, qui polarise moins le rayonnement.

De surcroît, les capteurs de type POLDER pouvant observer à plusieurs longueurs d'onde et dans plusieurs directions, ils permettent aussi de différencier les types d'aérosols présents dans l'atmosphère : les différents aérosols ne réfléchissent pas la lumière avec la même intensité aux différentes longueurs d'onde (voir la figure 4). Le suivi global de la concentration des poussières sera bientôt quotidienne.

Pour chaque élément de surface observé par le satellite, les molécules de gaz (en vert), les aérosols (en rouge) et la surface de la mer ou du sol réfléchissent une partie de la lumière solaire incidente vers le capteur. Ce dernier reçoit l'ensemble de ces contributions sous la forme d'une énergie que l'on attribue à l'élément de surface considéré.

et au Sud de l'Europe. Des quantités de poussières supérieures sont alors injectées dans l'atmosphère, car les sols s'érodent plus facilement ; le temps de résidence et la distance de transport de ces particules dans l'atmosphère augmente, puisque les vents sont plus intenses et le lessivage diminué.

En revanche, lorsque la dépression d'Islande et l'anticyclone des Açores sont faibles (Oscillation Nord-Atlantique faible), les vents chutent sur l'Atlantique et l'Afrique, et les pluies sont plus fréquentes aux latitudes correspondant à la Méditerranée et au Nord de l'Afrique, de sorte que les quantités de poussières transportées diminuent.

Les mesures de poussières au sol, notamment celles qui ont été enregistrées à la Barbade, sont en bon accord avec les résultats de *Meteosat* : les concentrations en poussières à la surface sont corrélées avec celles qui ont été obtenues avec *Meteosat* à l'échelle de l'Atlantique tropical Nord depuis 1983, et aussi avec les variations de l'Oscillation

Nord-Atlantique depuis 1965. Ainsi, les mesures de concentrations effectuées à la Barbade depuis 1965 sont représentatives de l'intensité des émissions de poussières à partir de l'Afrique.

Depuis un siècle, la surface des déserts et la circulation atmosphérique ont peu varié. Toutefois, les données globales indiquent que, depuis 30 ans, les quantités de poussières africaines transportées dans l'atmosphère ont beaucoup augmenté. Ainsi, de petits changements climatiques modifient beaucoup la quantité de poussières transportées. Par rétro-

action, ces poussières perturbent le bilan radiatif et, donc, le climat global. Saurait-on évaluer l'impact à court terme de cette intensification du transport de poussières sur le climat ?

Ces mêmes résultats atténuent les travaux qui concluaient à un lien direct entre désertification et quantité de poussières produites : bien qu'un lien reste possible, l'augmentation régulière des concentrations de poussières africaines sur l'Atlantique est principalement due à des phénomènes météorologiques de grande ampleur.

Cyril MOULIN et Claude LAMBERT travaillent au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) du CEA, à Saclay.

J.M. PROSPERO et R.T. NEES, *Impact of the North African Drought and El Niño on Mineral Dust in the Barbados Trade Wind*, in *Nature*, vol. 320, pp. 735-738, 1986.

J.R. PETIT, L. MOUNIER, J. JOUZEL, Y.S. KOROTKEVICH, V.I. KOTLYAKOV, C. LORIUS, *Palaeoclimatological and Chro-*

nological Implications of the Vostok Core Dust Record, in *Nature*, vol. 343, pp. 56-58, 1990.

I. TEGEN, A.A. LACIS et I. FUNG, *The Influence on Climate Forcing of Mineral Aerosols from Disturbed Soils*, in *Nature*, vol. 380, pp. 419-422, 1996.

C. MOULIN, C.E. LAMBERT, F. DULAC et U. DAYAN, *Control of Atmospheric Export of Dust from North Africa by the North Atlantic Oscillation*, in *Nature*, vol. 387, pp. 691-694, 1997.