

observée, au même titre que des phénomènes de grande ampleur, comme la sécheresse au Sahel ou l'intensification des alizés. D'autre part, les incertitudes liées à la modélisation du transport des poussières africaines sont telles, que la validation des modèles nécessite une confrontation minutieuse entre les résultats des simulations numériques et les observations globales.

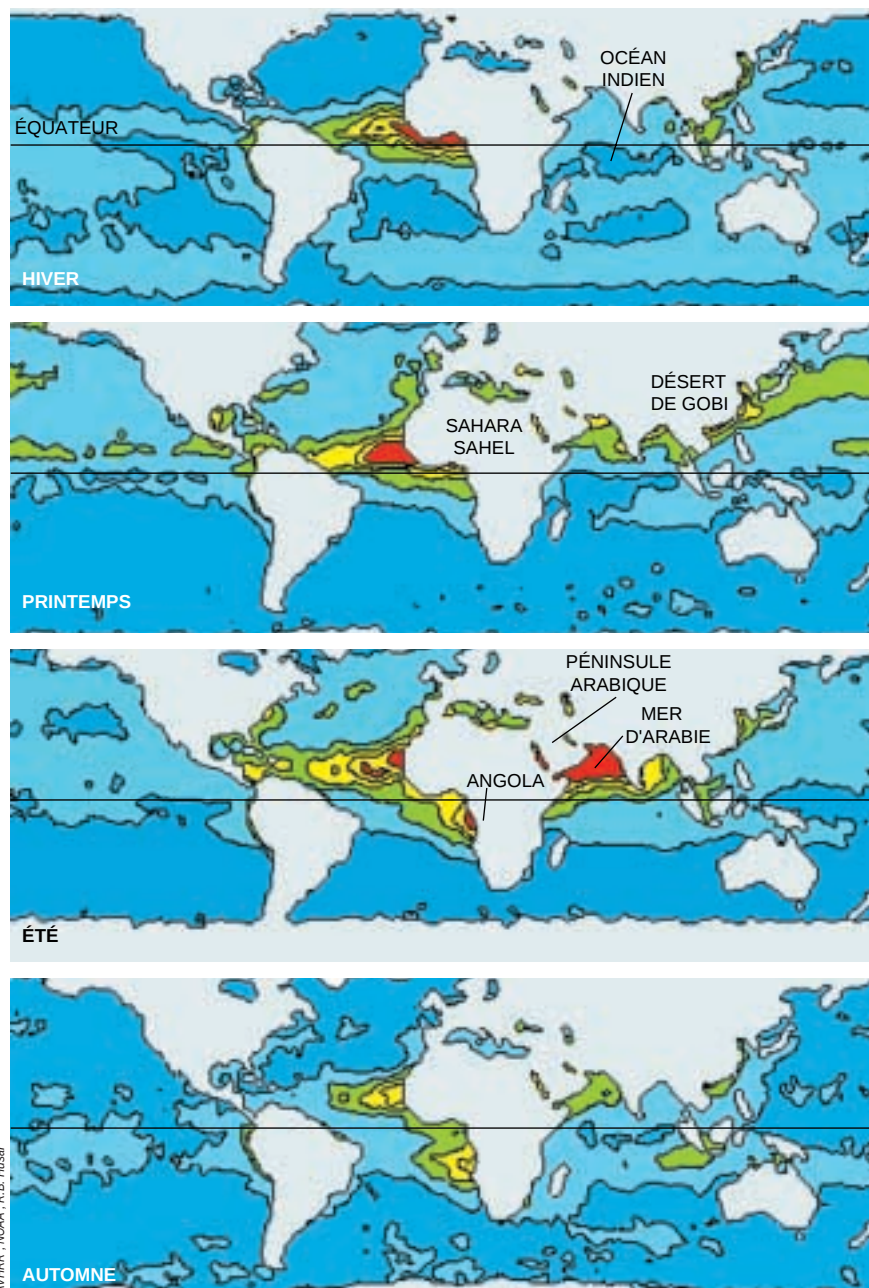
La télédétection spatiale résout ces problèmes : c'est aujourd'hui l'unique moyen d'estimer les concentrations en aérosols sur de grandes surfaces. Pour effectuer ces estimations, les capteurs des satellites mesurent la lumière réfléchie par l'atmosphère au-dessus des surfaces peu réfléchissantes telle celle de la mer : comme cette dernière est sombre, elle absorbe les rayonnements

visibles, à l'exception du bleu ; les poussières, au-dessus de la surface de l'océan, augmentent la quantité de lumière réfléchie. À partir de l'augmentation mesurée, on calcule l'épaisseur optique, qui caractérise la concentration en particules diffusantes dans l'atmosphère. L'épaisseur optique augmente avec la masse de poussières présente dans la colonne d'air située sous le satellite (voir l'encadré page 82). Ainsi, l'épaisseur optique est égale à 0,2, ce qui correspond à une «visibilité» de 30 kilomètres (la visibilité est la limite au-delà de laquelle on ne distingue plus nettement les contours d'un objet), quand la quantité de poussières au-dessus d'un kilomètre carré à la surface du Globe est égale à 300 kilogrammes ; une épaisseur optique de 0,8, soit une visibilité de cinq kilomètres, correspond à une quantité de poussières d'environ une tonne par kilomètre carré.

La première carte mondiale des épaisseurs optiques moyennes en aérosols dans l'atmosphère marine a été obtenue en 1997 à partir des images enregistrées pendant deux ans par le capteur météorologique américain AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*, soit «Radiomètre à très haute résolution») (voir la figure 2). On détermine la nature des aérosols détectés par les satellites à l'aide des observations au sol. Ainsi, à l'Ouest de l'Afrique, on sait que les aérosols sont presque exclusivement constitués de poussières sahariennes.

Les principales zones de transport de poussières africaines sont l'océan Atlantique tropical Nord, la mer d'Arabie et, dans une moindre mesure, la Méditerranée. Ces poussières sont originaires du Sahara et du Sahel pour l'océan Atlantique, de la péninsule Arabique et d'Afrique de l'Est pour la mer d'Arabie, du Sahara et du Maghreb pour la Méditerranée.

Sur l'Atlantique, les poussières sont transportées durant toute l'année. La zone de concentrations maximales se décale du Sud vers le Nord entre l'hiver et l'été, car le transport se fait dans les alizés, ces vents qui se décalent entre ces deux saisons de l'équateur à 15-20° de latitude Nord. En hiver, l'épaisseur optique est importante entre l'équateur et 5° de latitude Nord, et les poussières sont transportées vers les côtes de l'Amérique du Sud. L'intensité du transport est maximale pendant le printemps et l'été : plusieurs millions de tonnes de poussières sont exportées les jours



2. LA PREMIÈRE CARTE MONDIALE de la quantité d'aérosols dans l'atmosphère au-dessus de la mer a été obtenue en 1997, à partir d'images du satellite américain AVHRR. Cette quantité est comprise entre 0 (en bleu foncé) et 700 kilogrammes par kilomètre carré (en rouge). Les mesures ne permettent pas de distinguer les différents types d'aérosols, mais on peut attribuer certaines quantités élevées à des sources d'aérosols particulières. Les grandes taches rouge dans l'Atlantique et dans la mer d'Arabie correspondent aux poussières des déserts. Les aérosols carbonés provenant de la combustion de la végétation sortent d'Afrique par l'Angola, surtout en été. Sur le Pacifique Nord, les poussières du désert de Gobi s'ajoutent aux sulfates de pollution du Sud-Est asiatique.

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-

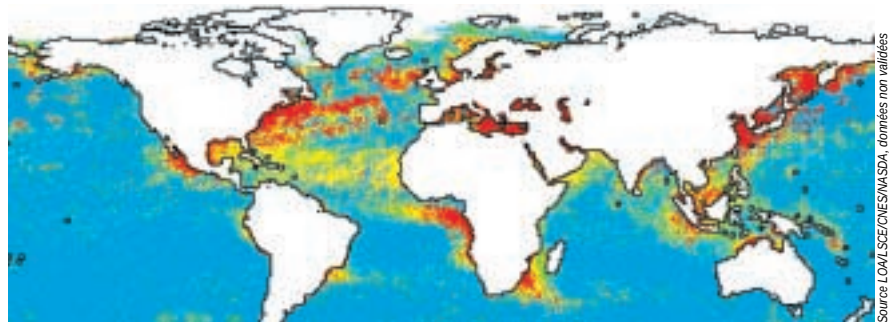
tensité du transport des poussières africaines vers le Nord et vers l'Ouest est commandée par un phénomène de grande échelle.

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.