

Les poussières sahariennes

STEFANO GUERZONI • EMANUELA MOLINAROLI

Des poussières du Sahara traversent la Méditerranée et retombent sur l'Europe, notamment sous la forme de «pluies rouges».

D'Europe, le désert du Sahara est lointain, et plus lointaine encore l'idée que le sable et la poussière provenant d'Afrique du Nord puissent se faire sentir dans tout le bassin méditerranéen et dans la majeure partie de l'Europe. Certains de ces effets sont pourtant manifestes : des pluies laissent des traces rouges sur les voitures, et les vents de sirocco violents apportent parfois du sable. D'autres conséquences sont

plus discrètes, mais tout aussi importantes : certains carbonates basiques des poussières réduisent l'acidité des pluies, et les poussières apportent des éléments nutritifs (des ions contenant du fer et du phosphore) qui favorisent la croissance des algues dans les eaux marines, habituellement pauvres en ces substances.

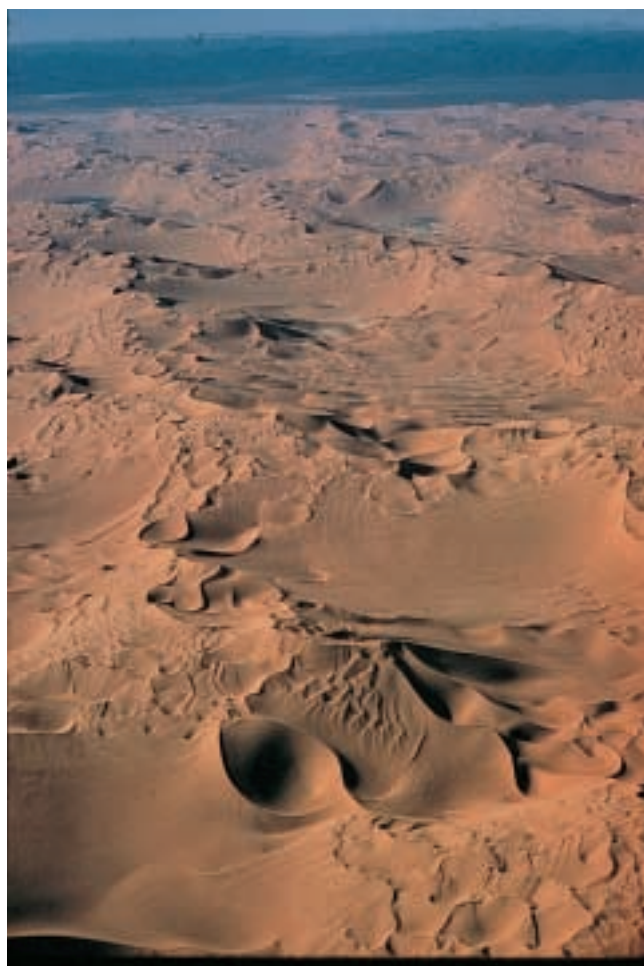
Ce transport des poussières est visible de l'espace : les astronautes à bord de la station *Skylab* ont observé

la trajectoire du sable du Sahara qui, soulevé par une tempête à l'Ouest du Sahara, traversait l'Atlantique et atteignait les Caraïbes. Chaque année, les vents transportent des centaines de milliers de tonnes de sable du Nord du Sahara vers l'Ouest et vers l'Europe. Sur les côtes méridionales de l'Europe, certains couchers de soleil ne sont pas rouges, mais d'un jaune d'or. Cette couleur est due à un voile de particules qui filtre la lumière

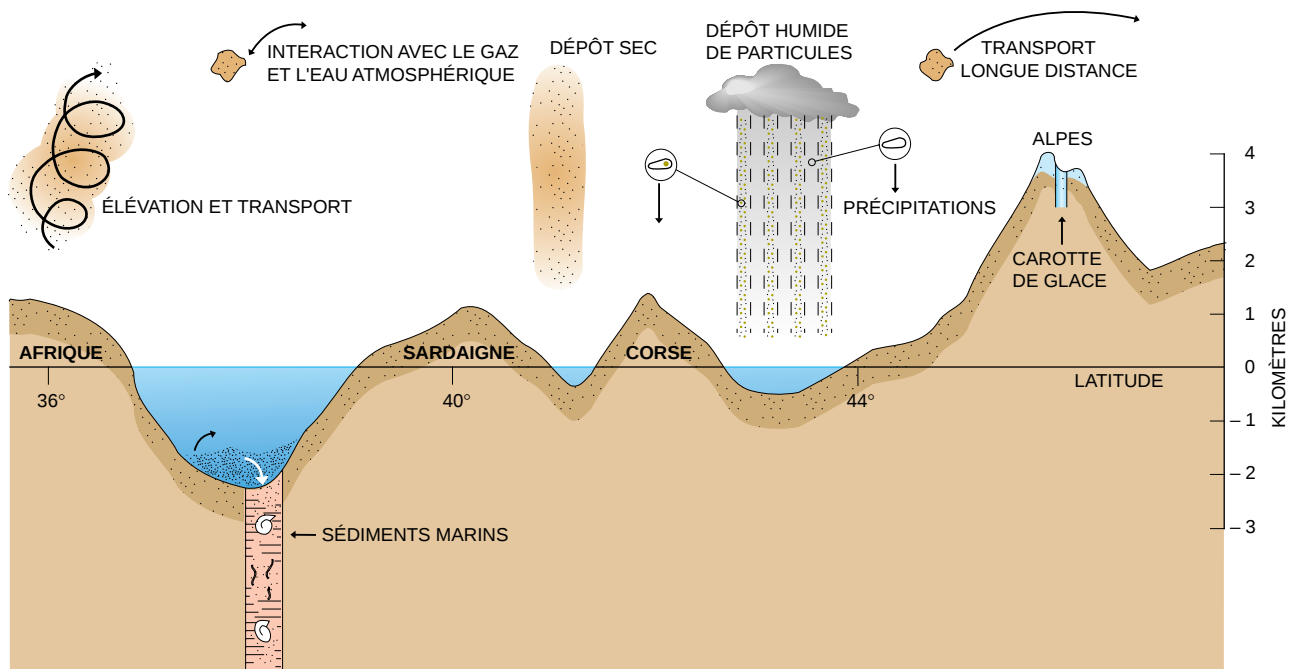


Pierre Boulet/Cosmos

1. LA COLORATION DORÉE de certains levers et couchers de soleil (à gauche), caractéristique du Sahara, résulte de la présence de poussières en suspension dans l'atmosphère. Ce spectacle



est parfois observable dans le Midi de la France. L'environnement saharien s'érode facilement, à l'image de la région de Tassili (à droite).



2. DESTINATIONS POSSIBLES des poussières sahariennes le long d'un profil Sud-Nord, de l'Afrique jusqu'aux Alpes. Les particules provenant du désert africain sont d'abord soulevées et transportées en altitude, où elles interagissent avec le gaz et l'eau. Elles sont ensuite déposées dans la mer et sur la terre, par l'intermédiaire de précipitations sèches ou humides. Dans la mer, cette

poussière reste dans la colonne d'eau ou sédimente sur le fond, avec les particules transportées par les fleuves, les glaciers et celles qui se forment aux dépens de substances dissoutes dans l'eau et par l'intervention d'organismes vivants. Sur la terre, les particules sont piégées dans les glaces, tant alpines que polaires.

solaire. Outre leur aspect esthétique, ces poussières modifient le bilan d'énergie de la Terre et perturbent le climat.

Grâce à un réseau de stations d'échantillonnage (en Sicile, en Sardaigne et en Corse), des géophysiciens ont estimé la quantité de matériaux déposés et ils ont élaboré un modèle du transport de ces particules africaines. Les concentrations moyennes en poussières sahariennes dans l'air diminuent de façon exponentielle lorsque la latitude augmente : d'environ 2 000 microgrammes par mètre cube dans les régions limitrophes au Sahara (35 degrés de latitude Nord), la concentration chute à moins d'un microgramme par mètre cube dans les Alpes et au-delà (entre 45 et 50 degrés de latitude). La quantité annuelle de poussières reçues par la terre et par la mer est ainsi comprise entre moins d'une tonne et plus de 100 tonnes par kilomètre carré.

L'apport n'est pas régulier, mais résulte principalement de quelques épisodes violents : les tempêtes de poussières. Les climato-

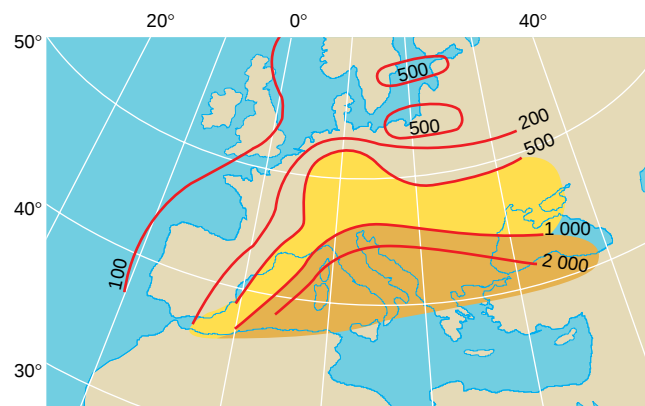
logues cherchent à prévoir l'impact climatique de ces poussières. Dans certains cas, l'impact est clair, comme pour l'éruption du Pinatubo, en 1991 : les poussières volcaniques ont été si abondantes (30 millions de tonnes) et projetées si haut (plus de 30 kilomètres) qu'elles sont restées dans l'atmosphère pendant plusieurs mois, diminuant la température moyenne du Globe de 0,5 °C.

Chaque grain de poussière parti d'Afrique interagit de façons variées avec l'air, le gaz et l'eau le long d'un

trajet qui atteint quelques centaines, voire quelques milliers de kilomètres. Ces longs transports ne se limitent pas uniquement au bassin méditerranéen et à l'Europe méridionale : les poussières sahariennes se déposent souvent dans toute la France, en Allemagne et, dans certains cas, à des latitudes supérieures (pays scandinaves et pôle Nord). Un événement important est survenu en mars 1991. Après l'avoir examiné, nous verrons comment l'analyse des poussières sahariennes qui arrivent aux pôles révèle les changements climatiques naturels. Puis nous examinerons les conséquences variées de ces épisodes de transport.

Une grande tempête de sable

Le 8 mars 1991, vers midi, le ciel au-dessus de la région de Sidi Bouzid, en Tunisie, fut obscurci par des nuages de poussières en provenance du désert. Simultanément, des vents chauds soufflèrent pendant plusieurs jours sur le Sahara ; la température enregistrée par de nombreuses stations météorolo-



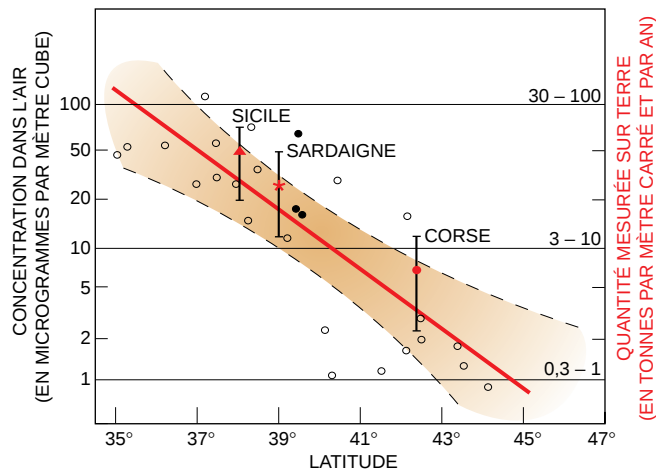
3. LE CONTINENT AFRICAIN enrichit l'atmosphère européenne en calcium. Les lignes rouges indiquent des zones de quantités égales de calcium (quantités annuelles moyennes relevées au niveau du sol, en milligramme par mètre carré). Cet enrichissement est lié à la dissolution partielle des carbonates présents dans les poussières désertiques transportées.

giques d'Afrique du Nord augmenta. Les vents très rapides et turbulents étaient dus à une différence de pression entre un anticyclone (hautes pres-

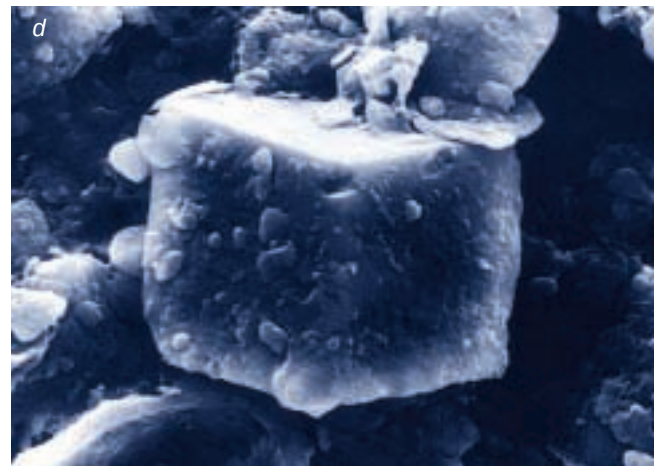
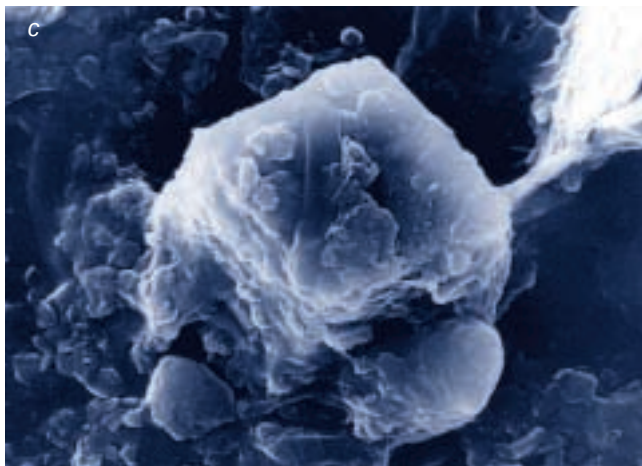
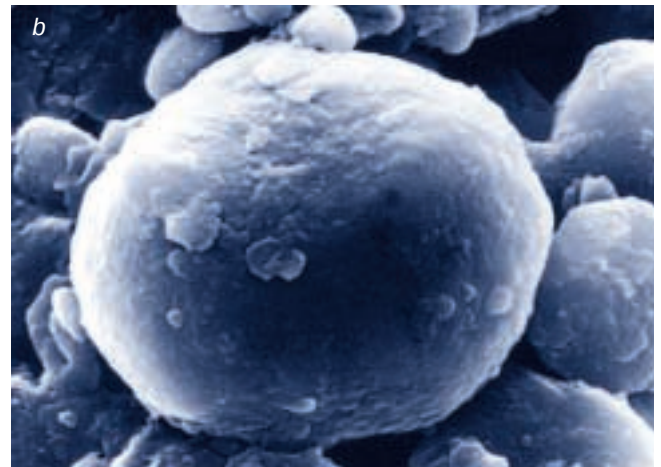
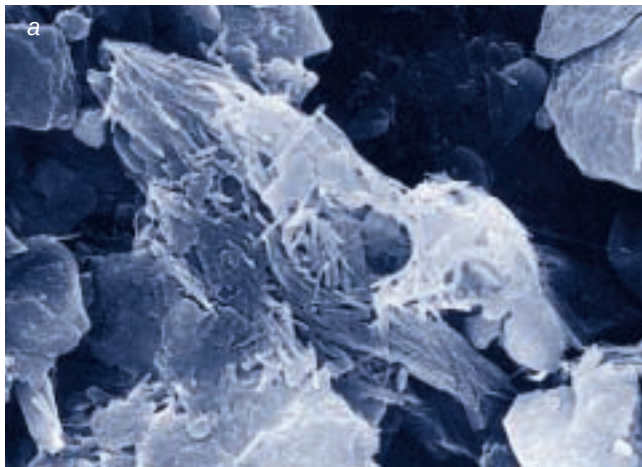
sions) situé au-dessus de l'Afrique orientale et une dépression située au-dessus de l'Atlas (voir la figure 6). Alors que l'anticyclone se déplaçait vers l'Est, la Tunisie fut balayée, le 8 mars, par des vents chauds dont la vitesse atteignait parfois 100 kilomètres par heure. L'après-midi de ce même jour, le trafic aérien fut bloqué à l'aéroport de Palerme en raison de nuages de poussières saha-

riennes qui provenaient du Sud. En Sardaigne, une station préleva des échantillons de poussière afin de les étudier et de les caractériser d'un point de vue physique (dimension des particules et composition minéralogique) et chimique (composition des particules elles-mêmes).

Ces analyses confirmèrent la provenance saharienne des poussières : elles comprenaient certains matériaux typiques des zones désertiques, tels la palygorskite (minéral feuilleté riche en magnésium), le quartz, la calcite



4. LA CONCENTRATION EN POUSSIÈRES dans l'air et leur transport vers la terre diminuent de manière exponentielle avec la latitude, du Sud vers le Nord. De 50 à 100 tonnes par kilomètre carré et par an à 10-20 degrés de latitude en Sicile et en Sardaigne, on passe à moins d'une tonne par kilomètre carré par an sur les Alpes. Sur ce graphique, on a reproduit deux types de mesures : les mesures satellitaires (cercles noirs, échelle à gauche) et les mesures au sol (formes rouges, échelle à droite).



5. CES MINÉRAUX, photographiés au microscope électronique, sont typiques des poussières désertiques. Ce sont de la palygorskite (a), un minéral argileux riche en magnésium ; du quartz (b), ou oxyde de silice ; de la calcite (c), ou carbonate de calcium, et de la dolomite (d), ou carbonate de calcium et de magnésium. Pour certains minéraux, tel le quartz, la morphologie

permet de reconnaître le transport éolien et la provenance désertique. La palygorskite est un minéral typique des sols arides et semi-arides dont les principales sources sont les alluvions des fleuves ou des lacs asséchés, ainsi que les lacs salés de l'Afrique Nord-occidentale. Les poussières sont souvent riches en carbonates qui réduisent l'acidité des pluies.

(carbonate de calcium) et la dolomite (carbonate de calcium et de magnésium). En France, cette tempête de poussières provoqua l'apparition de neige colorée dans les Pyrénées et de pluies rouges dans le Sud et dans le centre. Sur 150 000 kilomètres carrés, plus de 150 000 tonnes de poussières se déposèrent. Des dépôts de couleur ocre furent signalés en Angleterre le 7 et le 8 mars, au Nord de l'Allemagne le 8 et le 9 et en Belgique à l'aube du 9. Le 10 mars, presque 50 000 tonnes de poussière du désert avaient coloré la neige dans une vaste région située entre la Suède et la Finlande, proche du cercle polaire arctique. Le matériau déposé était composé de minuscules particules minérales (un à dix micromètres de diamètre) et de pollens d'aulne, de noisetier et d'armoise, qui avaient voyagé sur plus de 5 000 kilomètres.

Une pluie de sang

Le premier cas bien décrit de transport de ce type fut ce que l'on nomma la «pluie de sang», entre le 9 et le 12 mars 1901 : à cette occasion, des poussières furent retrouvées jusqu'au Nord de l'Allemagne.

L'intérêt porté à ces phénomènes et à leurs effets n'est pas nouveau. Déjà, Aristote notait : «Les pluies du Sud et les premières pluies d'automne recueillent sur les lieux qu'elles traversent une grande quantité d'exhalaisons sèches, et le vent du Sud mêle beaucoup de terre à la pluie qui tombe.»

Pourquoi et comment les poussières sahariennes sont-elles transportées vers l'Europe ? Souvent, le transport survient lorsqu'une dépression sur l'Espagne ou sur la France déplace un air chaud et sec de l'Afrique du Nord vers l'Europe. Dans certains cas, cette couche d'air «africain» voyage au niveau de la mer, à environ 1,5 kilomètre d'altitude. D'autres fois, lorsqu'une dépression forte est présente au-dessus du Sahara, l'air chaud et sec est aspiré à des altitudes importantes, et il voyage au-dessus de l'air plus humide et plus froid de la Méditerranée, à près de six kilomètres d'altitude. La poussière est alors transportée très loin, jusqu'au Nord de l'Europe. De surcroît, si un anticyclone est simultanément présent sur le centre de l'Afrique du Nord, la poussière ne s'étend pas vers l'Est mais est «canalisée» vers le Nord,

comme ce fut le cas en mars 1991 (voir la figure 6).

Aujourd'hui, ces transports sont étudiés et quantifiés grâce à des satellites et à un réseau de stations d'échantillonnage. François Dulac et ses collègues du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, à Saclay, ont ainsi utilisé le satellite météorologique *Meteosat* pour étudier quantitativement le transport saharien. Cette méthode se fonde sur la mesure de la «perturbation optique» due aux poussières : les capteurs du satellite mesurent la lumière solaire réfléchiée par le système Terre-atmosphère ; très réfléchissantes, les poussières augmentent la quantité de lumière réfléchiée.

Grâce à l'étude statistique des images quotidiennes prises par *Meteosat* entre 1984 et 1994, ils ont estimé la quantité de poussières transportées sur la Méditerranée et ont découvert un cycle saisonnier : durant le printemps et l'été, la quantité transportée est maximale.

Ces mesures par satellite ne correspondent que partiellement à celles rassemblées depuis dix ans par les stations en Corse et en Sardaigne. Pourquoi ces différences ? Parce que les satellites ne fournissent pas d'images utiles lorsque le ciel est nuageux, et que, dès lors, ils sous-estiment le transport en période hivernale. En outre, les stations au sol détectent à la fois les dépôts secs et les dépôts humides (par les précipitations), tandis que les satellites ne voient que les dépôts secs. Bien que le climat du bassin méditerranéen soit considéré comme sec, plus de la moitié des poussières désertiques qui touchent le sol tombent avec les pluies.

Les climatologues comparent également les données saisonnières ou annuelles moyennes avec celles d'autres archives naturelles, telles les glaces. Les glaces des calottes polaires et des glaciers emprisonnent les poussières, qui restent alors inaltérées



6. ENTRE LE 6 ET LE 10 MARS 1991, une tempête a emporté des poussières du Sahara vers l'Europe. La zone hachurée indique la zone d'érosion, dans le Sahara, d'où provenait cette poussière. Les zones colorées indiquent les zones où l'on a retrouvé les dépôts les plus importants de poussières. On note une zone étendue dans le Nord de la Suède et de la Finlande. Au Sud des Alpes, la poussière tombée sur la neige semble avoir contribué à la fonte rapide du glacier qui a permis la découverte de l'homme des glaces, le 19 septembre 1991.

durant des siècles. Leur étude renseigne sur la composition et la circulation passée des nuages de poussières. À l'aide de carottes de glace récoltées dans la banquise, on recon-

struit la composition de l'atmosphère au cours des 100 000 à 200 000 dernières années. Les glaciers alpins livrent également des informations comparables à celles fournies par les

glaces polaires, mais seulement pour quelques milliers d'années.

Pour identifier les poussières d'origine saharienne et étudier les climats du passé, les géologues, les glacio-

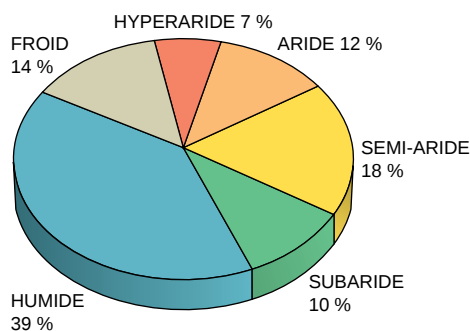
Le Sahara et la Méditerranée

Le Sahara est la plus grande étendue désertique de la planète : sa surface, quatre fois supérieure à celle de l'Union européenne, est supérieure à neuf millions de kilomètres carré et recouvre six pour cent des zones hyperarides et arides du Globe.

Au Nord et au Sud, le Sahara est respectivement bordé par des régions au climat méditerranéen et au climat tropical. Ces limites sont définies tant par des caractères climatologiques (précipitations annuelles inférieures à 200 millimètres, températures moyennes de 20 à 35 degrés) que par des caractéristiques biologiques (limite de maturation du fruit du palmier-dattier, le *Phoenix dactylifera*, entre 29 et 32 degrés de latitude environ, et disparition du had, *Cornulaca monacantha*, vers 15 à 18 degrés de latitude).

Pour analyser comment se répartissent les diverses zones arides, on utilise un indice d'aridité qui représente un manque d'humidité dans des conditions climatiques moyennes. Cet indice, noté IA, est défini comme le rapport entre les précipitations annuelles et la quantité d'eau évaporée chaque année. Les déserts sont des zones hyperarides naturelles ($IA < 0,05$, en rouge sur la figure) ; ils représentent sept pour cent de la surface des terres émergées du Globe. D'un point de vue climatique, les déserts se caractérisent par une quantité de pluie très réduite et hautement variable (variabilité inter-annuelle allant jusqu'à 100 pour cent) et par de fréquents intervalles de plusieurs années sans précipitations.

Les déserts chauds comprennent environ un tiers de toutes les terres émergées et sont localisés dans deux zones séparées de part et d'autre de l'équateur : sous le Tropique du Cancer et sous le Tropique du Capricorne. C'est là, entre 15 et 30 degrés de latitude, au Nord comme au Sud de l'équateur, que se trouvent les déserts de tous les continents, à l'exception de l'Europe, où les zones arides sont limitées au Sud de l'Espagne. Outre les déserts chauds, où la température diurne atteint parfois 58 °C, les déserts froids recouvrent environ 16 millions de kilomètres carrés dans les régions de l'Arctique et de l'Antarctique. Dans les déserts polaires, les températures sont rarement supérieures à 10 °C et descendent jusqu'à -70 °C.



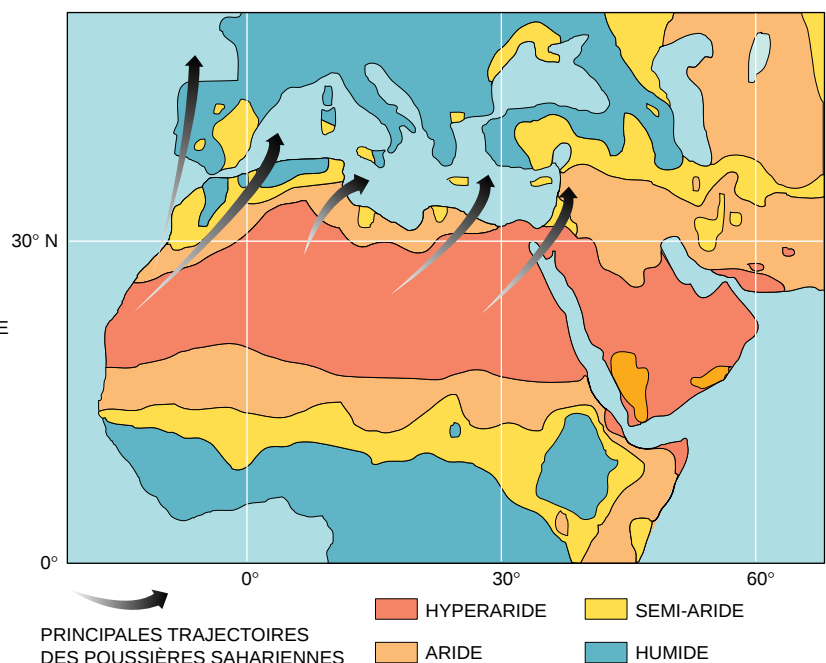
LES ZONES CLIMATIQUES (selon les Nations unies, 1992). Les flèches indiquent les trajectoires prédominantes des poussières des déserts vers la Méditerranée et l'Europe (à droite). Le graphique représente la répartition des terres émergées par zone d'aridité.

Les zones arides ($0,05 < IA < 0,20$, en orange sur la carte) représentent 12 pour cent de la totalité des terres émergées. Elles reçoivent 200 à 300 millimètres de pluie par an avec une forte variabilité inter-annuelle (entre 50 et 100 pour cent). Les zones semi-arides ($0,20 < IA < 0,50$, en jaune) représentent 18 pour cent de la totalité des terres émergées, avec des précipitations moyennes comprises entre 500 et 800 millimètres de pluie et une variabilité inter-annuelle modérée (25 à 100 pour cent).

Quelles sont les causes de ces déserts inhospitaliers ? Le sol devient désertique quand les pluies sont rares ou absentes. Même si les prévisions climatiques restent incertaines, on sait que le bassin méditerranéen serait bouleversé par les changements climatiques et, notamment, par les variations du régime des précipitations. Des variations, même minimes, de la disponibilité en eau auraient très probablement des conséquences graves sur la nature et sur les activités humaines.

Aujourd'hui, la Méditerranée reçoit dix pour cent des 200 millions de tonnes de poussières qui proviennent chaque année du Sahara. Ces 25 millions de tonnes ont pour origine principale les régions hyperarides et, en partie, les régions arides et semi-arides ; elles suivent principalement cinq types de trajectoire Sud-Nord indiquée par les flèches dans la figure ci-dessous.

Le Sahara s'étend : les particules les plus petites peuvent être emportées par le vent, tant à partir des roches qui se désagrègent qu'à partir des dépôts alluvionnaires ; transportés sur de longues distances, ils forment des champs de dunes mobiles. Le sable envahit le territoire avoisinant et conquiert le terrain, kilomètre après kilomètre. Dans de nombreuses régions, seule une mince bande cultivable subsiste entre la mer et le désert. Ce territoire devient de plus en plus peuplé, de sorte que l'environnement se dégrade et se désertifie encore.



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.

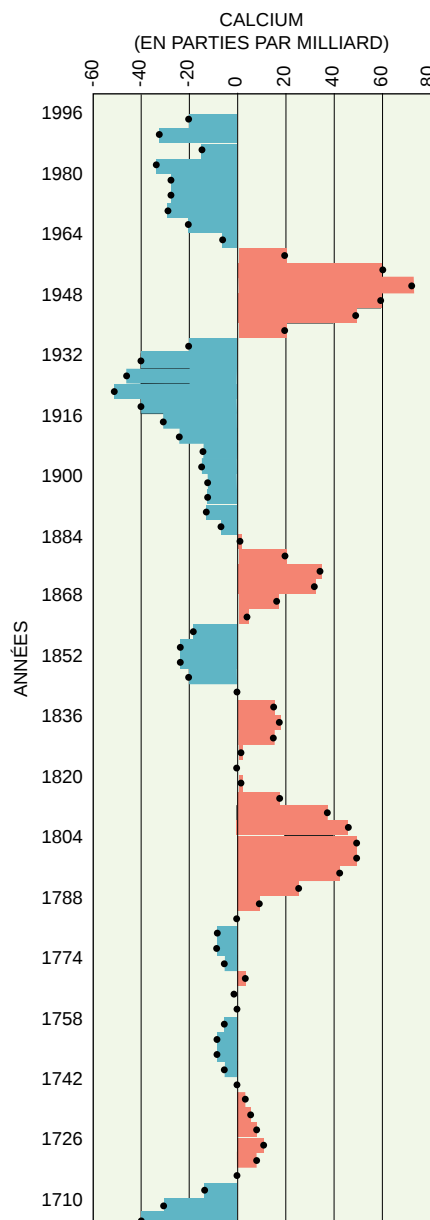
Pour savoir si les variations climatiques laissent partout les mêmes traces, d'autres événements devront être enregistrés et étudiés, en particulier les événements violents. Au cours des 20 dernières années, moins d'une dizaine d'événements violents ont été enregistrés. Les changements climatiques globaux 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-

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.



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.

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.



Hoquim, Renaudreau



Hoquim, Asani

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.

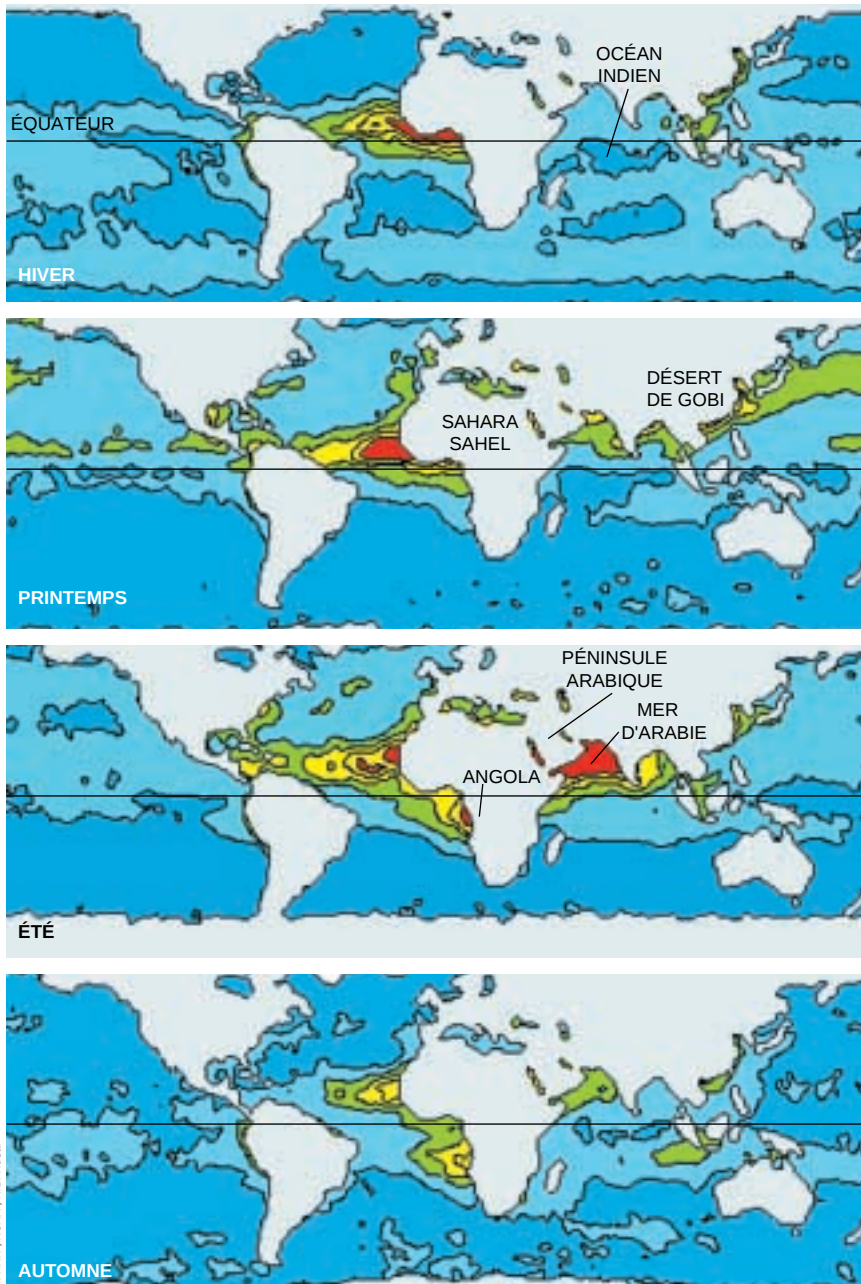
La télédétection spatiale résout ces problèmes : c'est aujourd'hui l'unique moyen d'estimer les concentrations en aérosols sur de grandes surfaces. Pour effectuer ces estimations, les capteurs des satellites mesurent la lumière réfléchie par l'atmosphère au-dessus des surfaces peu réfléchissantes telle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

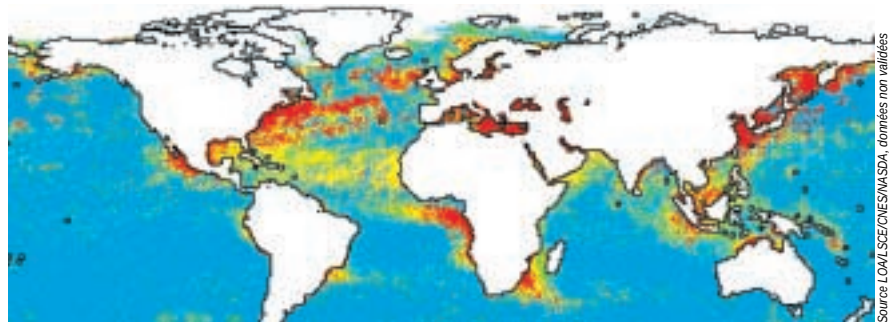
tensité du transport des poussières africaines vers le Nord et vers l'Ouest est commandée par un phénomène de grande échelle.

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



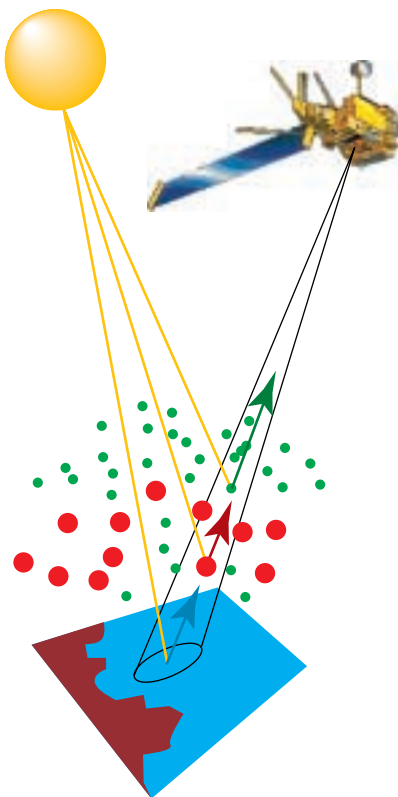
3. SUR CETTE IMAGE prise par le satellite *Meteosat* le 7 mars 1997, un panache de poussières sahariennes se dirige vers l'Amérique du Sud (en rouge, au-dessus de l'Atlantique). Les nuages apparaissent en blanc. Au-dessus des continents, plus le sol est aride, plus l'image est jaune.



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.

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.

Gâce 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. Saura-t-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. LORIS, *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.

