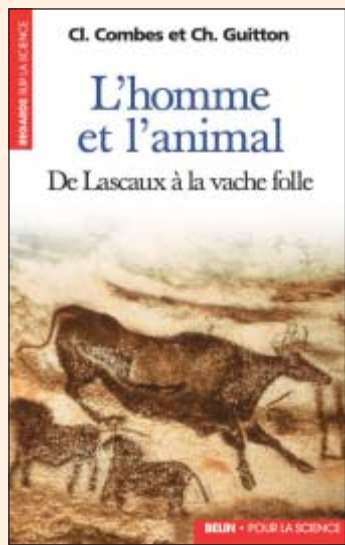




L'homme et l'animal

**Claude Combes,
Christophe Guittou**

«160 pages brillantes
d'érudition, de profondeur
et d'ouverture d'esprit.»

*Philippe Dorchies,
professeur de parasitologie,
La Dépêche vétérinaire*

...

«Une promenade plaisante,
claire et documentée, guidée
conjointement par un biologiste
et un vétérinaire.»

Eurêka

...

«Un livre riche et divertissant
alliant philosophie et sciences
grand public publié par deux
scientifiques de l'université
de Perpignan.»

Midi Libre

**Code 075012 • 95 F
160 pages**

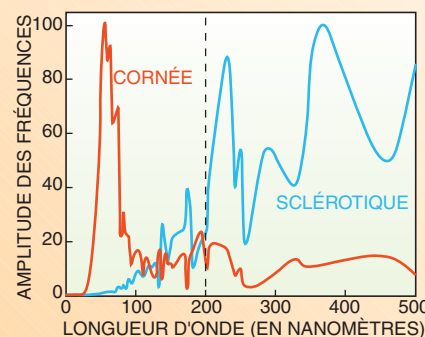
**Voir bon de commande
page 98**

BELIN • POUR LA SCIENCE

Pourquoi la cornée est-elle transparente ?

L'analyse de Fourier, qui détermine les fréquences prédominantes dans un ensemble d'ondes ou autres phénomènes périodiques, est utile pour étudier la transparence des animaux gélatineux, mais aussi de la cornée humaine. Comme le corps des animaux transparents, la cornée et le blanc de l'œil, nommé sclérotique, sont constitués de protéines fibreuses disposées périodiquement ou presque. Quand ces fibres sont régulièrement organisées et espacées d'une «longueur d'onde» inférieure à la moitié de la longueur d'onde la plus courte de la lumière visible, le tissu est quasi transparent. La lumière qui traverse directement le tissu se renforce, subissant des interférences constructives, tandis que la lumière diffusée par les côtés est éliminée par des interférences destructives.

Dans la cornée et dans la sclérotique, les fibres du tissu existent sous divers motifs répétitifs, qui ont tous des longueurs d'onde différentes. Sur le graphe, les longueurs d'onde sont indiquées en abscisse. En ordonnée, on a indiqué la prédominance des longueurs d'onde dans les deux tissus analysés. Dans la cornée, par exemple, les fibres qui se répètent avec une longueur d'onde d'environ 50 nanomètres sont les plus abondantes. Cette valeur est notablement inférieure à 200 nanomètres, approximativement la moitié de la longueur d'onde de la lumière violette, la plus courte que l'œil humain puisse observer. En revanche, les pics de la sclérotique sont supérieurs à 200 nanomètres, ce qui la rend opaque.



Laure Grace

taille serait proche de la longueur d'onde de la lumière. L'indice de réfraction de la graisse est peu important, et la forme des gouttelettes encore moins. Ainsi, on connaît les caractéristiques importantes que l'on doit rechercher quand on observe des animaux transparents au microscope.

Toutefois, des variations d'indices de réfraction n'engendrent pas toujours une diffusion. Quand l'amplitude des variations des indices de réfraction est inférieure à la moitié de la longueur d'onde de la lumière incidente, la lumière diffusée par toutes les variations est éliminée par des interférences destructives. Lors d'une interférence destructive, les ondes lumineuses s'annulent les unes les autres.

Par exemple, le blanc de l'œil (la sclérotique) et la cornée sont tous deux constitués de couches denses de fibres de collagène. Toutefois, dans la cornée, les fibres sont plus petites et arrangées plus régulièrement, de sorte que les variations de l'indice de réfraction sont toutes inférieures à la moitié de la longueur d'onde de la lumière. Il y a une forte interférence destructive, et l'organe est transparent. Sans cette interférence, la cornée serait opaque. La cataracte se produit chez les personnes âgées, lorsque cet assemblage uniforme de

fibres est perturbé, ce qui diminue l'interférence destructive.

La transparence est un extraordinaire exemple d'adaptation à des situations difficiles. Par des transformations ingénieuses de leur organes et de leurs cellules, ces fragiles animaux ont trouvé un moyen de survivre dans un milieu dangereux. Comme c'est souvent le cas, les solutions apparues naturellement rivalisent avec des découvertes techniques récentes, par exemple les fibres optiques ou les revêtements antireflets. Ces animaux, si courants et pourtant très mystérieux, ont des choses étonnantes à nous apprendre.

Sönke JOHNSEN travaille à l'Institut Océanographique de Cap Cod.

A.C. HARDY, *The Open Sea, Its Natural History : The World of Plankton*, Houghton Mifflin Company, 1956.

K. MADIN et D. KOVACS, *Beneath Blue Waters : Meeting with Remarkable Deep-Sea Creatures*, Viking Press, 1996.

S. JOHNSEN et E.A. WIDDER, *The Physical Basis of Transparency in Biological Tissue : Ultrastructure and the Minimization of Light Scattering*, in *Journal of Theoretical Biology*, vol. 199, n° 2, pp. 181-198, juillet 1999.

El Niño et la rotation de la Terre

RODRIGO ABARCA DEL RIO • DANIEL GAMBIS • DAVID SALSTEIN • BORIS DEWITTE

El Niño est un phénomène climatique qui se déclenche tous les deux à sept ans. Il naît dans le Pacifique tropical, mais modifie la circulation atmosphérique à l'échelle planétaire et même la vitesse de rotation de la Terre, que l'on étudie pour essayer de le prévoir.

Les conquistadores furent les premiers à rapporter l'existence du phénomène El Niño, il y a quatre siècles, sous le nom de «El Año de abundancia» (l'année de l'abondance). On dit même qu'El Niño aurait facilité la victoire de l'Espagnol Francisco Pizarro sur l'empire des Incas, en 1532, rendant le désert péruvien plus hospitalier pour son armée. El Niño, qui signifie «l'enfant Jésus» en espagnol, est synonyme de richesses : c'est un courant chaud qui coule dans le Pacifique le long de la côte Sud-américaine au moment de Noël, apportant avec lui des poissons exotiques et des pluies torrentielles (l'évaporation des eaux de surface s'intensifie et l'air se charge d'une humidité qui se condense et retombe sous forme de précipitations sur le continent) : une végétation florissante envahit des zones habituellement désertiques.

Aujourd'hui, on sait qu'El Niño se déclenche tous les deux à sept ans dans l'océan Pacifique tropical et qu'il modifie la circulation atmosphérique à l'échelle mondiale. Ses répercussions se font sentir aussi bien en Afrique, où il apporte la sécheresse à l'Ouest et d'abondantes précipitations à l'Est, qu'en Asie, où il perturbe le cycle de la mousson : en Inde, les précipitations diminuent en été. Les récoltes s'en ressentent, causant

de grandes famines, telle celle de 1900 qui tua plus de 450 000 personnes. Les conséquences socio-économiques d'El Niño sont si importantes que sa prévision est l'un des principaux enjeux de la climatologie. Les approches classiques semblent pour l'instant impuissantes à résoudre ce problème, mais l'étude de l'influence du phénomène El Niño sur la vitesse de rotation de la Terre est prometteuse. En mesurant la «longueur du jour» (la période de rotation de la Terre, inversement proportionnelle à sa vitesse), on constate qu'elle est maximale lors des événements El Niño. En combinant ces données, qui relèvent de la géodésie, avec celles de la météorologie et de la climatologie, on comprendra peut-être mieux le système Terre-atmosphère-océan, ce qui permettra de prévoir les épisodes El Niño.

El Niño commence dans l'océan

Le phénomène El Niño prend naissance dans le Pacifique tropical et il modifie aussi la circulation atmosphérique, à cause des interactions existant entre l'océan et l'atmosphère : la température des eaux de surface détermine l'intensité de l'évaporation (et l'humidité de l'air ou encore sa densité), dont

dépend la pression atmosphérique locale. Quand des différences de pression suffisantes engendrent des vents qui repoussent les eaux de surface par friction, les eaux profondes plus froides remontent. La température des eaux de surface diminue, et ces variations ont à leur tour des répercussions sur l'atmosphère, les déplacements des masses d'air, d'eau... Après avoir longtemps considéré l'océan comme un élément passif, les climatologues ont pris conscience de ce «couplage océan-atmosphère» et du rôle déterminant qu'il joue dans l'évolution du climat. Il est plus marqué dans les régions tropicales où la température de l'océan, chauffé par le Soleil, dépasse 28,5°C en surface : l'évaporation intense donne naissance à des pressions plus élevées que la normale en altitude et à des vents puissants qui agissent à leur tour sur l'océan. L'océan Pacifique est le plus vaste des océans tropicaux et le plus impliqué dans l'évolution du climat. Il est le berceau d'El Niño, à l'origine des plus grandes variations naturelles du système climatique.

Quelle est la cause d'un événement El Niño ? Dans les conditions normales (voir la figure 1, en haut), la température de surface de l'océan Pacifique dépend de la position de la thermocline, c'est-

à-dire de la frontière qui sépare les eaux chaudes, en surface, des eaux plus froides, en profondeur. Plus la thermocline est profonde, plus les eaux en surface sont chaudes. Dans le Pacifique Est, elle se situe de 50 à 80 mètres de la surface environ, alors que, dans le Pacifique Ouest, elle atteint 150 à 200 mètres de profondeur. Les vents parallèles à la côte Sud-américaine, notamment le long du Pérou, repoussent les eaux chaudes de surface, ce qui fait remonter les eaux froides, donc la thermocline. En se rapprochant de l'équateur, ces vents obliquent vers l'Ouest sous l'effet de la force de Coriolis, liée à la rotation de la Terre. Ils deviennent alors des alizés, vents d'Est dominants sous les tropiques. Les alizés poussent les eaux de surface vers l'Indonésie, de sorte que la surface de l'océan Pacifique est en pente vers l'Est (le dénivelé qu'ils induisent est de 80 centimètres environ entre l'Indonésie et l'Amérique du Sud). En revanche, la thermocline s'enfonce à l'Ouest et remonte à l'Est.

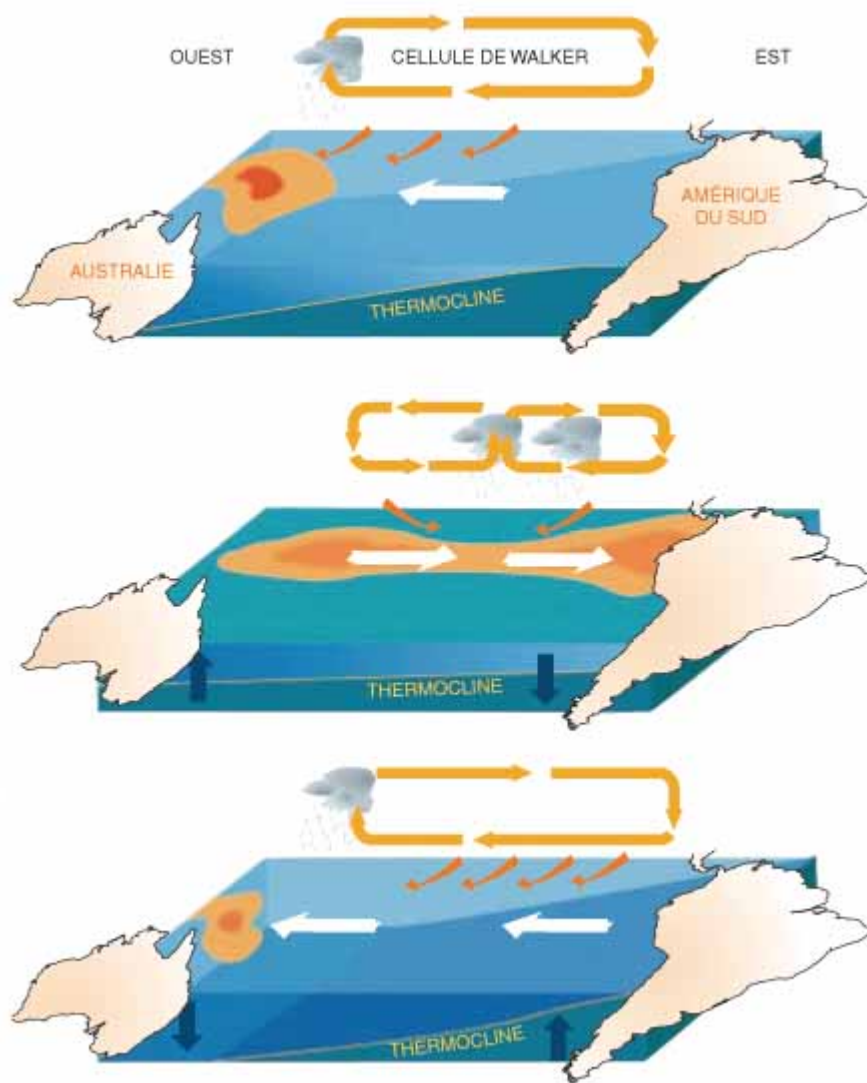
Un phénomène El Niño apparaît quand les alizés faiblissent et que la poussée qu'ils exercent sur la surface de l'océan n'est plus assez forte pour contrebalancer le poids des eaux accumulées à l'Ouest. Celles-ci se déversent vers l'Est, en une onde océanique dite de Kelvin, qui met environ deux mois à traverser l'océan Pacifique et à atteindre les côtes Sud-américaines. Ce reflux des eaux de surface vers l'Est entraîne l'abaissement de la thermocline à l'Est et sa remontée à l'Ouest, de sorte qu'elle se rapproche de l'horizontale (voir la figure 1, au milieu). Les eaux de surface, relativement froides à l'Est, se réchauffent, ce qui est caractéristique des événements El Niño.

Gilbert Walker, un météorologiste britannique envoyé en Inde en 1924 pour y étudier les moussons, fut le premier à remarquer cette modification de la circulation atmosphérique, qui s'étale sur plusieurs années. Il constata que lorsque la pression atmosphérique est supérieure à la normale dans le Pacifique tropical Ouest, elle diminue dans le Pacifique tropical central et que cette différence de pression est proportionnelle à l'intensité des phénomènes El Niño. Aujourd'hui, on utilise l'indice de l'oscillation australe (voir la figure 5), défini comme la différence de pression atmosphérique entre Tahiti, dans le Pacifique cen-

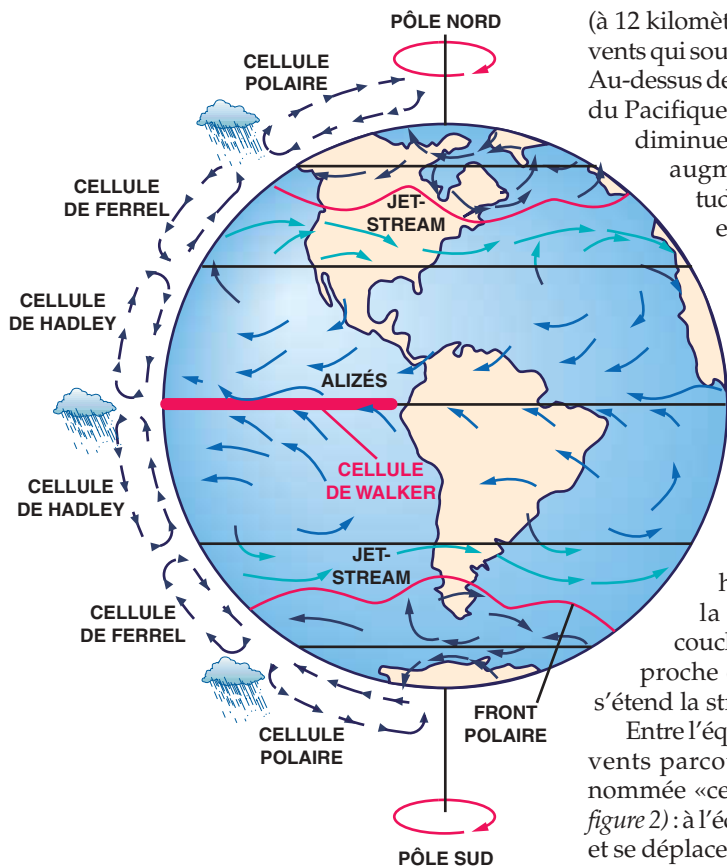
tral, et Darwin, en Australie. Les alizés soufflant des régions de fortes pressions vers les régions de basses pressions, cet indice mesure leur force. Ainsi une valeur négative de l'indice de l'oscillation australe correspond à une pression plus élevée que la normale dans le Pacifique Ouest, à un affaiblissement des alizés et à l'apparition d'un événement El Niño.

El Niño modifie la circulation atmosphérique

Comment un événement El Niño modifie-t-il la circulation atmosphérique ? Dans le Pacifique, les vents parcourent une boucle, nommée « cellule de Walker ». Elle est constituée en surface par les alizés (créés par la différence de pression entre l'Est et l'Ouest) et en altitude



1. DANS LE PACIFIQUE, les événements El Niño et La Niña modifient le système océan-atmosphère, agissant sur la thermocline (la frontière qui sépare les eaux chaudes, en surface, des eaux plus froides, en profondeur) et la cellule de Walker (la boucle formée par les alizés, qui circulent d'Est en Ouest à basse altitude, et les vents qui circulent en sens inverse à haute altitude). Dans les conditions normales (*en haut*), les alizés poussent les eaux chaudes de surface qui s'accumulent à l'Ouest, où les eaux froides s'enfoncent, abaissant la thermocline. Au-dessus des eaux chaudes de l'Ouest du Pacifique, l'air monte, diminue la pression en surface et augmente la pression en altitude, tandis qu'au-dessus des eaux froides de l'Est du Pacifique, la pression augmente en surface et diminue en altitude. Les vents se propagent des hautes vers les basses pressions (selon les flèches oranges). Lors d'un événement El Niño (*au milieu*), les alizés faiblissent et les eaux chaudes accumulées à l'Ouest se déversent vers l'Est (selon les flèches blanches), entraînant un réchauffement de la surface de l'océan au centre et à l'Est, l'abaissement de la thermocline à l'Est et sa remontée à l'Ouest, de sorte qu'elle se rapproche de l'horizontale. La cellule de Walker se déplace vers l'Est, suivant les eaux chaudes de surface, et se scinde parfois en deux. Lors d'un événement La Niña (*en bas*), les alizés se renforcent, déplaçant le réservoir d'eau chaude (selon les flèches blanches) plus à l'Ouest que dans les conditions normales, et entraînent la remontée des eaux froides et de la thermocline à l'Est.



(à 12 kilomètres de la surface) par des vents qui soufflent dans le sens inverse. Au-dessus des eaux chaudes de l'Ouest du Pacifique, l'air chaud, en montant, diminue la pression en surface et augmente la pression en altitude, tandis qu'au-dessus des eaux froides de l'Est du Pacifique, la pression augmente en surface et diminue en altitude. Pendant les événements El Niño, la cellule de Walker se déplace vers l'Est et se scinde parfois en deux (voir la figure 1, au milieu). Dans le Pacifique central, une zone de haute pression se crée dans la haute troposphère, la couche atmosphérique la plus proche de la surface (au-dessus s'étend la stratosphère).

Entre l'équateur et les tropiques, les vents parcourent une autre boucle, nommée « cellule de Hadley » (voir la figure 2) : à l'équateur, l'air chaud s'élève et se déplace vers les pôles (où la température et la pression sont moins élevées), mais la force de Coriolis les dévie de plus en plus vers l'Est, de sorte qu'ils deviennent parallèles aux cercles de latitude, formant les jet-streams subtropicaux, des courants rapides qui circulent dans la haute troposphère vers 12 kilomètres d'altitude (voir la figure 2). Pour compenser l'accumulation d'air due aux jet-streams, une partie de l'air de la haute troposphère redescend vers l'équateur, alimentant les alizés et bouclant la cellule de Hadley (l'autre par-

tie se dirige vers les pôles). Lors des événements El Niño, les jet-streams s'intensifient, car l'élévation de température du Pacifique central augmente la différence de pression entre l'équateur et les moyennes latitudes.

La modification des cellules de Walker et de Hadley perturbe l'ensemble du système climatique de la planète : d'autres cellules de Walker existent tout le long de l'équateur, de sorte que lorsque celle du Pacifique est modifiée, les autres le sont aussi. Il en va de même pour la cellule de Hadley, dont les modifications entraînent des changements dans d'autres cellules (la cellule de Ferrel et la cellule polaire) situées le long des méridiens (voir la figure 2).

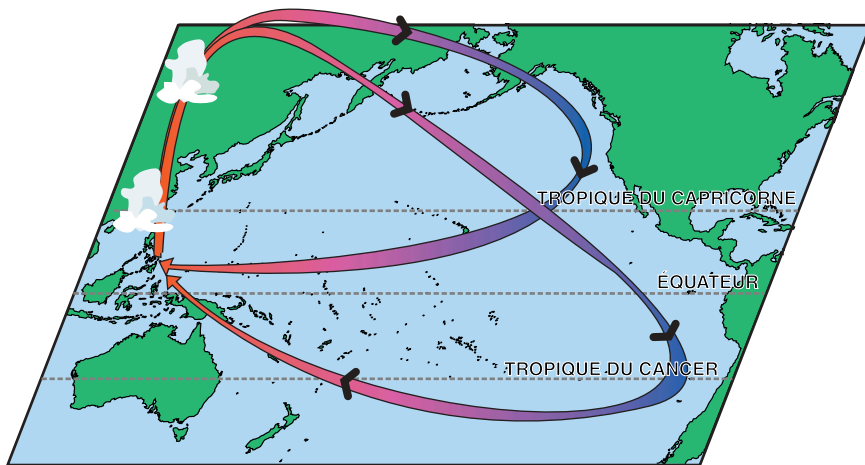
Après un événement El Niño dans le Pacifique, on constate souvent que, dans les autres régions tropicales, la température des océans augmente d'un degré en moyenne, ce qui perturbe la circulation atmosphérique locale. Statistiquement, les événements El Niño s'accompagnent de pluies diluviennes sur le Sud du Brésil, sur le Paraguay et sur le Nord de l'Argentine, de tempêtes plus fréquentes dans le golfe du Mexique, de sécheresses en Afrique de l'Ouest, en Australie, en Indonésie, de moussons moins humides que la normale en Inde...

2. LES JET-STREAMS SUBTROPICAUX qui circulent parallèlement aux latitudes (selon les flèches vertes) alimentent les alizés, qui reviennent vers l'équateur (selon les flèches bleues), bouclant la cellule de Hadley. Ils alimentent aussi des vents qui se dirigent vers les pôles et qui font partie de la cellule de Ferrel. La circulation atmosphérique globale comprend plusieurs « cellules » ou boucles de vent juxtaposées. Lors d'un événement El Niño, qui modifie la cellule de Walker (parallèle à l'équateur) et la cellule de Hadley, les cellules voisines sont également modifiées, ainsi que leurs voisines... ce qui explique pourquoi El Niño a des répercussions sur l'ensemble du globe.

Après El Niño, La Niña

Le phénomène El Niño perturbe la circulation atmosphérique de l'ensemble de la planète. Les vents anormaux qu'il crée, par rapport à la circulation atmosphérique moyenne, agissent à leur tour sur l'océan en amplifiant El Niño ou en s'opposant à lui. Ils déclenchent parfois La Niña, c'est-à-dire un renforcement des alizés (correspondant à une valeur positive de l'indice de l'oscillation australe), qui déplace le réservoir d'eau chaude plus à l'Ouest que la position qu'il occupe dans les conditions normales, apportant des pluies abondantes sur l'Indonésie. La remontée des eaux froides à l'Est provoque alors des sécheresses sur les côtes Ouest Sud-américaines (voir la figure 1, en bas).

La survenue de La Niña dépend de la réflexion des ondes océaniques sur les côtes indonésiennes ou Sud-Américaines. Si les ondes de Kelvin ont assez d'énergie lorsqu'elles atteignent les côtes de l'équateur, elles se réfléchissent en ondes dite de Rossby, qui se propagent vers l'Ouest, mais plus lentement que les ondes de Kelvin. Les ondes de Rossby



3. LA CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE TROPICALE est une combinaison de la cellule de Walker et de la cellule de Hadley : l'air chaud qui s'élève au dessus du Pacifique Ouest, au lieu de se répartir en sens inverse vers l'Est pour boucler la cellule de Walker, a tendance à se diriger vers les tropiques et à intégrer la cellule de Hadley. Ainsi, des changements dans la cellule de Walker initient des changements dans la cellule de Hadley.

peuvent aussi être créées par la poussée des vents d'Est. Elles se réfléchissent à leur tour sur les côtes indonésiennes en ondes de Kelvin. On obtient ainsi une combinaison d'ondes en phase ou en opposition de phase, selon leur vitesse de propagation et le pouvoir réflecteur des côtes. Cette combinaison détermine les variations de température de surface de l'océan. Par couplage, l'atmosphère tropicale réagit à ces variations océaniques, et, ce faisant, en provoque de nouvelles. On comprend ainsi pourquoi, une fois qu'El Niño s'est déclenché, il n'est pas toujours suivi de La Niña : ces événements dépendent de l'inertie du système oscillant formé par l'atmosphère et par l'océan. On comprend éga-

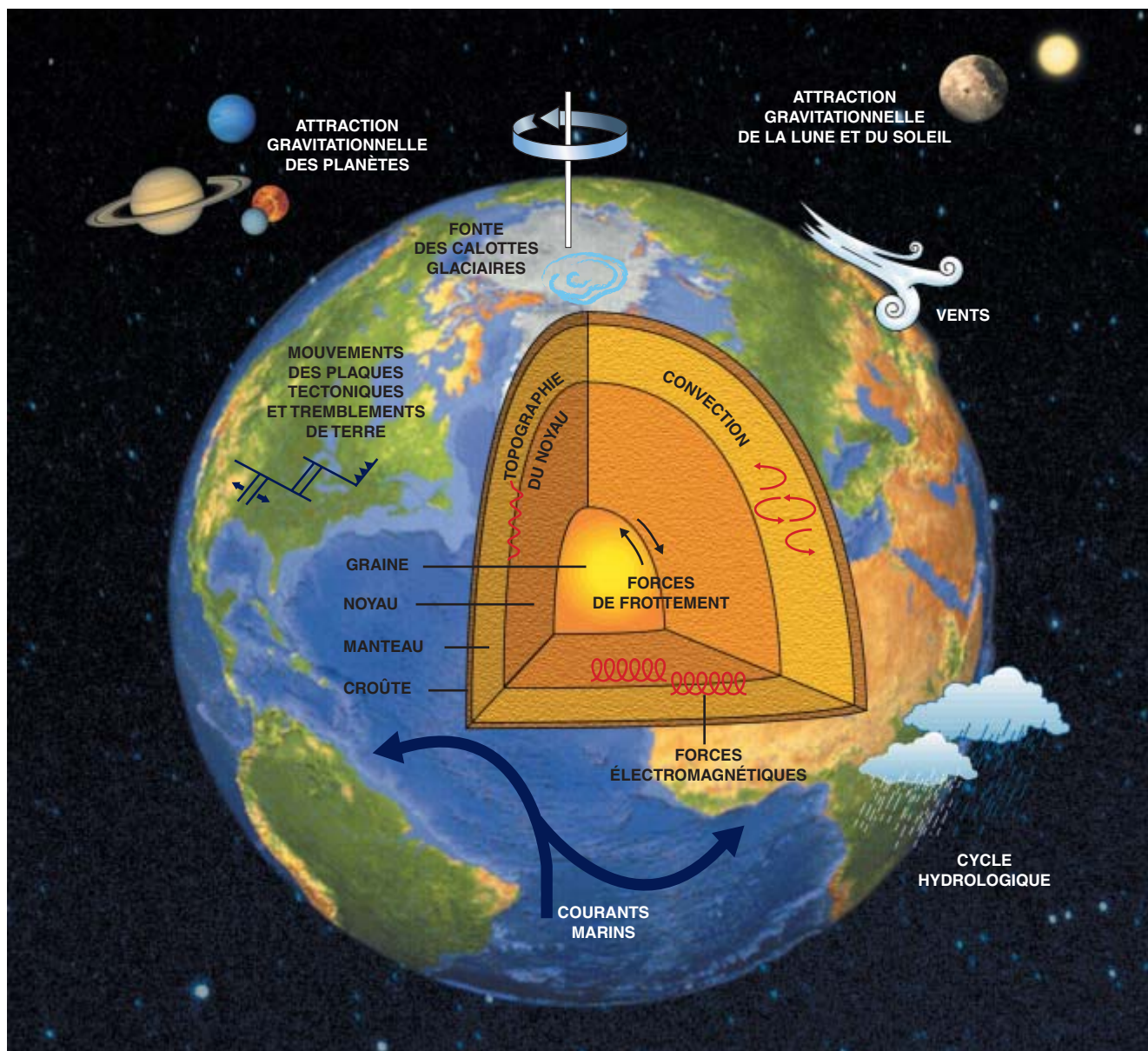
lement comment El Niño agit sur l'atmosphère à des échelles de temps qui vont de quelques mois à la décennie.

La rotation de la Terre et l'atmosphère

Dans ce système oscillant, les facteurs à prendre en compte et les interactions sont si nombreuses qu'aujourd'hui les climatologues essaient une nouvelle approche plus globale : ils s'intéressent à la vitesse de rotation de la Terre, dont on a découvert qu'elle diminue et passe par des minimums à chaque événement El Niño.

La Terre ne tourne pas toujours à la même vitesse. Au début du XVII^e

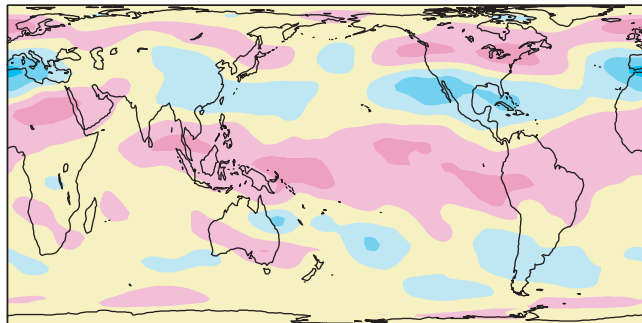
siècle, Kepler est le premier à soupçonner que sa rotation n'est pas uniforme (il fait allusion à cette possibilité dans divers passages de son œuvre), suivi par Newton, qui écrit : « Il est possible qu'il n'existe aucun mouvement uniforme par lequel le temps puisse être mesuré avec précision. » Edmund Halley, son contemporain et le découvreur de la comète qui porte son nom, remarque que la Lune est en avance par rapport à la position qu'elle devrait avoir selon les calculs de Ptolémée et selon ceux des Arabes, datant du IX^e siècle. Au XVIII^e siècle, Emmanuel Kant parle des marées et André Lalande de la circulation atmosphérique pour expliquer les variations de la longueur du



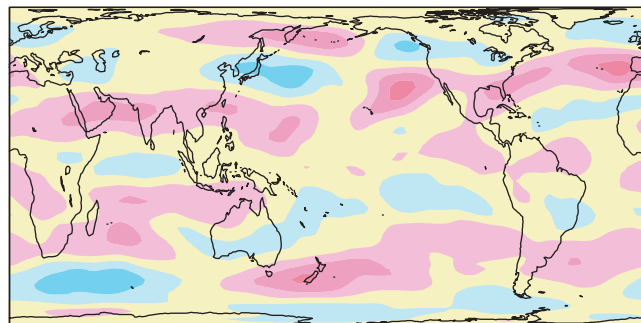
4. LA ROTATION DE LA TERRE n'est pas uniforme. Plusieurs phénomènes la font varier : l'attraction gravitationnelle de la Lune, du Soleil et des planètes, la circulation atmosphérique et océanique, le cycle

hydrologique et les phénomènes géophysiques internes (liés à la topographie, la convection et les forces électromagnétiques entre le manteau et le noyau).

MARS 1997



NOVEMBRE 1997



jour. En 1870, Simon Newcomb constate que les tables de la position de la Lune publiées en 1857 ne s'accordaient pas avec ses observations. Cependant, ses confrères sont à tel point persuadés de l'uniformité de la rotation de la Terre qu'ils n'acceptent pas immédiatement de la remettre en cause. À la fin du XIX^e siècle que George Darwin (le fils de Charles Darwin) démontre que, dans le passé, la Lune était plus proche de la Terre et que la durée du jour était plus courte. Enfin, en 1915, des mesures suffisamment précises le confirment.

Pourquoi n'est-elle pas uniforme ? Plusieurs phénomènes font varier la vitesse de rotation de la Terre (voir la figure 4), chacun agissant à des échelles

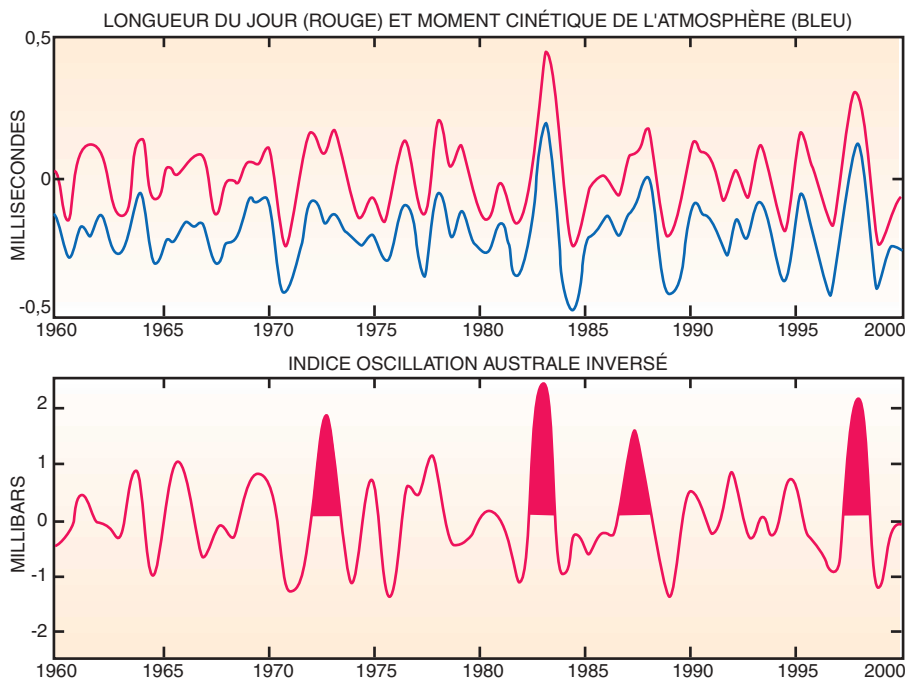
de temps différentes. La Lune et le Soleil sont responsables de variations séculaires de la vitesse de rotation de la Terre, sur laquelle elles exercent des forces de gravitation qui freinent son mouvement : la longueur du jour augmente d'environ deux millisecondes par siècle. Selon cette estimation, il y a 500 millions d'années, la Terre devait accomplir une rotation complète en 21 heures.

Ces variations n'interviennent pas dans le cadre de l'étude du phénomène El Niño, car elles concernent des échelles de temps beaucoup plus longues que celles qui nous intéressent. Dans la suite, nous ferons abstraction des forces extérieures qui s'exercent sur la Terre, que nous considérerons comme un système

isolé. Dans ces conditions, d'après les lois de la physique newtonienne, la «quantité de rotation» ou moment cinétique global de la Terre se conserve (le moment cinétique d'un corps en rotation autour d'un axe dépend de sa masse, de sa vitesse et de la distance qui le sépare de cet axe). Cependant, la Terre n'est pas une boule solide et homogène. Elle est constituée d'éléments solides (la graine, le manteau et la croûte terrestre) et de fluides (le noyau, l'hydrosphère et l'atmosphère) qui évoluent et interagissent : leur moment cinétique change. Or, la loi de conservation du moment cinétique global de la Terre impose que, si le moment cinétique de l'une de ses composantes varie, celui d'une ou de plusieurs autres de ses composantes varient en sens opposé. Notamment, le moment cinétique de ces composantes solides est modifié et, avec lui, la vitesse de rotation de la Terre.

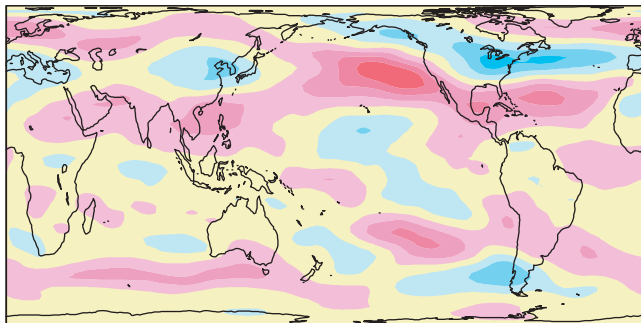
Les phénomènes géophysiques, tels la cristallisation de la graine liée au refroidissement progressif de la Terre depuis sa formation, les couplages électromagnétiques entre le noyau et le manteau ou les mouvements de convection au sein de ces deux éléments entraînent des variations décennales irrégulières de la longueur du jour. La période de ses variations est de 20 à 60 ans, et leur amplitude est de 3 à 4 millisecondes.

Les phénomènes qui perturbent la circulation atmosphérique sont les principaux responsables des variations journalières, saisonnières ou à l'échelle de quelques années. Ils déterminent la valeur du moment cinétique de l'atmosphère, qui se répercute sur le moment cinétique de la Terre. Pour accéder au moment cinétique global de l'atmosphère, on fait la moyenne des moments cinétiques locaux, calculés avec les données météorologiques recueillies par des ballons sondes et des satellites, telle la vitesse des vents le long des latitudes (ces vents sont ceux qui influencent le plus la rotation

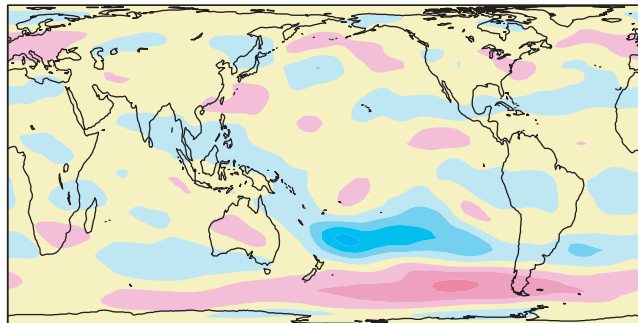


5. LA LONGUEUR DU JOUR, ou période de rotation de la Terre, varie en phase avec le moment cinétique atmosphérique, qui mesure la «quantité de rotation» de l'atmosphère et avec l'indice de l'oscillation australe inversé, c'est-à-dire la différence de pression entre Darwin, en Australie, et Tahiti, qui mesure l'intensité des événements El Niño (les pics en rouge correspondent aux plus intenses) : ces courbes qui représentent les variations à des échelles de temps comprises entre un et six ans (les autres, telles les variations saisonnières, étant filtrées) montrent que le phénomène El Niño influence le moment cinétique atmosphérique, qui influence la longueur du jour. Précisons que le moment cinétique atmosphérique est proportionnel à une quantité en millisecondes, représentée ici, à laquelle on a enlevé 2 millisecondes, pour pouvoir mieux comparer à la longueur du jour.

FÉVRIER 1998



JUILLET 1998



de la Terre, car ils sont perpendiculaires à l'axe de rotation). Lors des événements El Niño, sous l'effet de l'accélération des jet-streams, le moment cinétique global de l'atmosphère augmente, ce qui est contrebalancé par une baisse du moment cinétique de la Terre solide, donc un ralentissement de sa vitesse de rotation. À ces échelles de temps, la circulation océanique intervient aussi sur la rotation de la Terre, mais dans une bien moindre mesure.

D'autres phénomènes, telles les fluctuations du cycle hydrologique (surtout influencées par les pluies), font aussi varier la longueur du jour à des échelles de temps diverses, mais de façon négligeable.

En somme, bien que les causes des variations de la vitesse de rotation de la Terre soient nombreuses, la circulation atmosphérique en est la principale responsable aux échelles de temps inférieures à la décennie. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer les valeurs du moment cinétique atmosphérique à celles de la vitesse de rotation de la Terre (voir la figure 5). On ne calcule plus cette dernière en observant les étoiles, comme autrefois, mais avec des techniques modernes plus précises (voir l'encadré ci-contre). Depuis plusieurs décennies, les valeurs ainsi obtenues de la longueur du jour montrent qu'elle varie conjointement avec le moment cinétique atmosphérique, aussi bien à l'échelle de la journée que de plusieurs années (voir la figure 5).

Ainsi, à des échelles de temps inférieures à la décennie, la vitesse de rotation de la Terre (du domaine de la géodésie) dépend des variations du moment cinétique de l'atmosphère, qui sont elles-mêmes liées au phénomène El Niño (du domaine de la climatologie). La vitesse de rotation de la Terre pourrait donc être un indicateur des signes précurseurs des événements El Niño dans l'atmosphère et servir à mieux les com-

6. EN 1997-1998, LE MOMENT CINÉTIQUE ATMOSPHÉRIQUE, qui mesure la «quantité» de rotation de l'atmosphère, a évolué en phase avec l'événement El Niño (les régions où il est bas sont en bleu, tandis que celles où il est haut sont en rose) : il était anormalement élevé à l'équateur de mars à octobre 1997, au début d'El Niño, puis aux latitudes moyennes de novembre à janvier 1998, à l'apogée d'El Niño, et enfin aux hautes latitudes jusqu'en juillet 1998, où El Niño est dans sa phase décroissante et va bientôt laisser la place à La Niña.

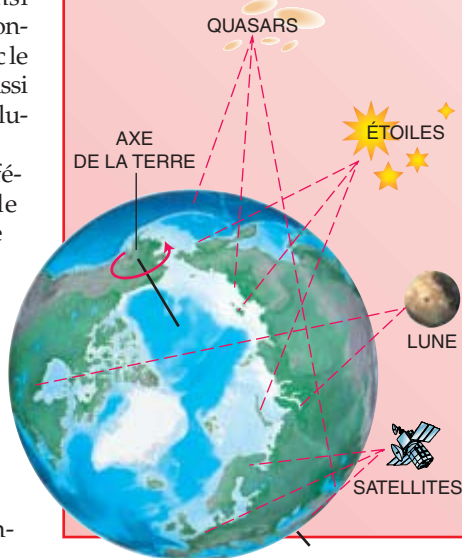
Les méthodes de mesure de la longueur du jour

Jusque dans les années 1970, on a observé les variations de la vitesse de rotation de la Terre à l'aide de lunettes et autres instruments optiques : on comparait l'heure de passage des étoiles en un point donné du ciel avec l'heure de passage théorique, donnée par des tables. Si l'étoile était en avance, cela signifiait que la Terre avait ralenti et si l'étoile était en retard, qu'elle avait accéléré. Cependant, cette méthode est imprécise, à cause de la déviation que subissent les rayons lumineux lorsqu'ils traversent l'atmosphère, que l'on ne sait pas calculer (elle dépend de l'état de l'atmosphère, que l'on ne connaît pas exactement).

Aujourd'hui, on utilise des techniques modernes plus précises. L'interférométrie à très longue base

consiste à observer simultanément en ondes radio une même source extragalactique (un quasar ou un noyau de galaxie) à l'aide de deux radiotélescopes distants de plusieurs milliers de kilomètres. Connaissant les coordonnées de la source (fixe), on calcule le décalage théorique entre les heures d'arrivée des ondes radio aux deux radiotélescopes. De la différence entre le décalage théorique (calculé avec une certaine vitesse de rotation de la Terre) et le décalage mesuré, on déduit la variation de la vitesse de rotation de la Terre par rapport à la valeur postulée.

La télémétrie Laser consiste à mesurer le temps que met une impulsion laser à atteindre la Lune (ou un des satellites artificiels conçus pour les études de géodynamique), à se réfléchir sur les cataphotes qui y sont installés et à retourner sur Terre (les cataphotes sont des systèmes optiques renvoyant la lumière en sens inverse et dans l'exacte direction d'où elle lui parvient). De même, le décalage entre la valeur mesurée et la valeur théorique donne la variation de la vitesse de rotation de la Terre par rapport à la vitesse postulée. On utilise également des mesures réalisées avec le système GPS (Global Positioning System) et le système radioélectrique DORIS, du Centre national d'études spatiales. En recoupant les résultats obtenus par ces différentes techniques, on obtient une précision de 0,01 milliseconde sur la longueur du jour.



prendre, peut-être même à les prévoir. Pour atteindre ce but, les géophysiciens et les climatologues étudient les relations existant entre ces trois éléments. Notamment ils sont en train de préciser et de quantifier les effets des événements El Niño sur le moment cinétique atmosphérique, l'un des indices les plus précis pour tester la validité des modèles climatiques.

La vitesse de rotation de l'atmosphère

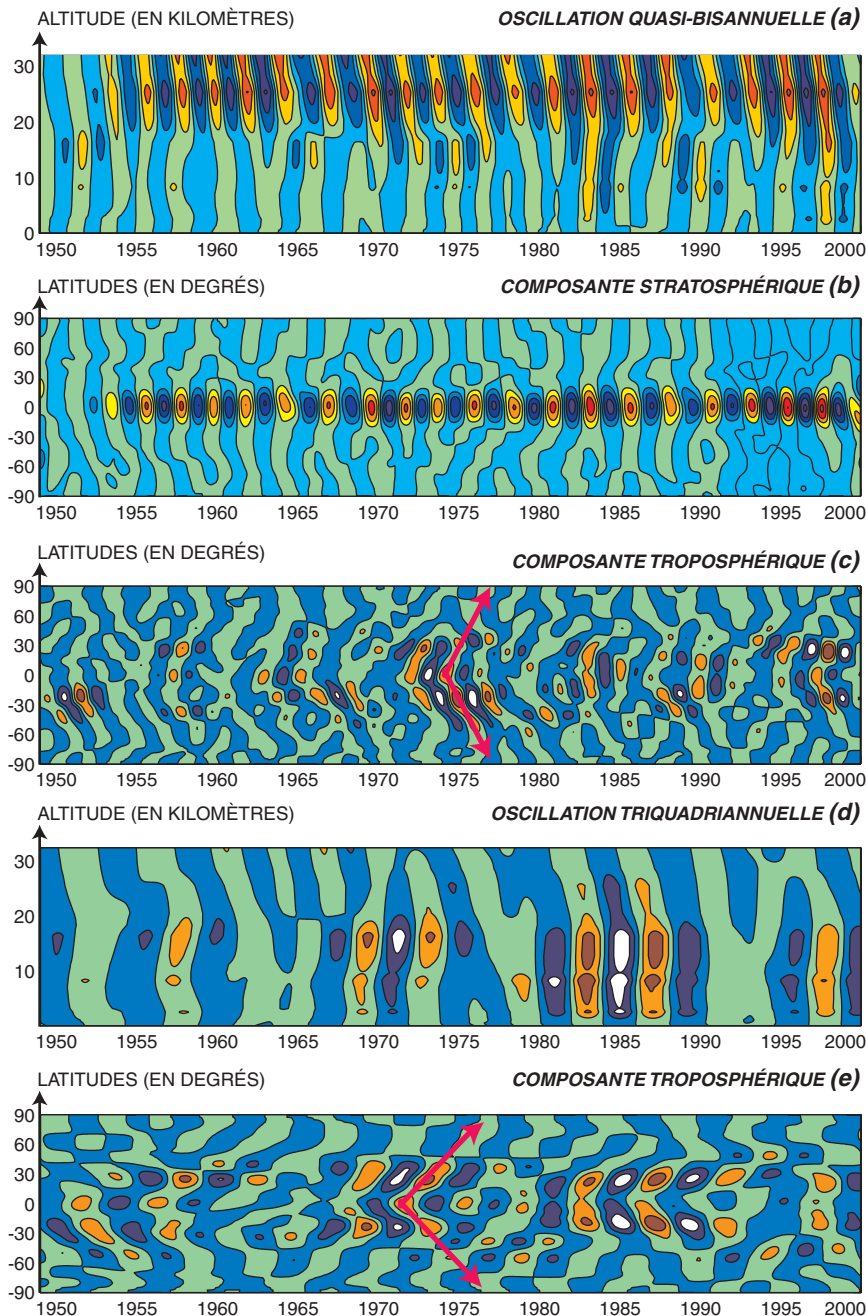
Les deux derniers El Niño intenses ont eu lieu en 1982-1983 et en 1997-1998 (il y en a eu de moindre intensité en 1986-1987 et 1992). Celui de 1982-1983 a été particulièrement intense. Il a provoqué des tempêtes et des inondations en Amérique et des sécheresses

en Indonésie et en Australie. C'est pendant cet événement que le moment cinétique de l'atmosphère a atteint la plus grande valeur jamais enregistrée et que l'on a remarqué pour la première fois les corrélations entre le moment cinétique atmosphérique et l'indice de l'oscillation australe. En comparant leurs valeurs lors des années précédentes, on constate qu'elles varient en opposition de phase et qu'elles atteignent des valeurs extrêmes chaque fois qu'un événement El Niño a lieu (voir la figure 5).

En juin 1997, le Pacifique tropical, jusqu'alors légèrement plus froid que d'habitude, a commencé à se réchauffer, et les observations par satellite ont montré que le niveau de la mer s'élevait à l'Est, à cause de l'arrivée d'un train d'ondes de Kelvin : ces prémices annonçaient l'épisode El Niño de 1997-1998. Les alizés ont faibli et le jet-stream de l'hémisphère Nord s'est intensifié, entraînant une augmentation du moment cinétique atmosphérique et de la longueur du jour. L'événement El Niño a atteint son apogée en février 1998, quand ces deux valeurs étaient maximales. Jusqu'en mai 1998, les eaux superficielles de l'océan Pacifique sont restées anormalement chaudes, puis, à partir d'août 1998, El Niño a laissé la place à La Niña.

Les moyennes régionales du moment cinétique atmosphérique montrent le lien direct entre cette quantité et les événements El Niño, pendant chaque phase de leur déroulement (voir la figure 6). Lors de l'épisode El Niño de 1997-1998, elles indiquent qu'il était anormalement élevé à l'équateur de mars à octobre 1997, ce qui correspond à la perturbation de la cellule de Walker, puis aux latitudes moyennes de novembre 1997 à janvier 1998, ce qui correspond à la perturbation de la cellule de Hadley, et enfin aux hautes latitudes jusqu'en juillet 1998.

À une échelle de temps un peu plus longue, trois types de vents sont responsables des variations du moment cinétique atmosphérique (voir la figure 7) : des vents stratosphériques qui se propagent des hautes vers les basses altitudes et localisés au voisinage de l'équateur, des vents troposphériques qui se propagent de la surface vers les hautes altitudes et de l'équateur vers les pôles (ces vents stratosphériques et troposphériques ont une période d'environ deux ans et forment ce que l'on nomme l'oscillation «quasi-bisannuelle»), des vents essentiellement



7. L'OSCILLATION QUASI-BISANNUELLE a une période d'environ 2 ans (a), comme le montrent les mesures du moment cinétique atmosphérique (qui augmente du violet au bleu, vert, jaune, rouge et blanc). Elle est formée par des vents stratosphériques (b) qui se propagent des hautes vers les basses altitudes et localisés au voisinage de l'équateur, des vents troposphériques (c) qui se propagent de la surface vers les hautes altitudes et de l'équateur vers les pôles (selon les flèches rouges). L'oscillation triquadiannuelle (d) est formée par des vents essentiellement troposphériques (e) qui se propagent de l'équateur vers les pôles (selon les flèches rouges) avec une période de trois à quatre ans.

troposphériques qui se propagent de l'équateur vers les pôles avec une période de trois à quatre ans (ils forment l'oscillation «triquadriennale»).

Lors des deux événements El Niño de 1982-1983 et de 1997-1998, les variations d'intensité de ces vents étaient en phase et présentaient de grandes amplitudes. Était-ce une coïncidence ? Non, car les deux types de vents troposphériques dépendent des variations de température en surface des océans, donc de El Niño. En outre, les variations d'intensité des vents stratosphériques étaient en phase avec celles des vents troposphériques, ce qui indique probablement un lien de cause à effet entre ces vents et les épisodes El Niño, par l'intermédiaire des vents troposphériques, et ce qui accentue encore la relation entre le moment cinétique atmosphérique et l'indice de l'oscillation australe.

Selon une hypothèse encore débattue au sein de la communauté scientifique, les épisodes El Niño intenses, tels ceux de 1982-1983 et de 1997-1998, se produiraient quand les oscillations quasi-bisannuelles et triquadriennales sont en phase et de grande amplitude. À l'aide de méthodes statistiques, on détermine l'évolution de ces oscillations. En 2001-2002, leurs composantes troposphériques seraient en phase, ce qui apparaît comme une condition nécessaire au déclenchement d'un épisode El Niño, mais celle de l'oscillation quasi-bisannuelle serait de faible amplitude, ce qui laisse présager un épisode El Niño peu intense. Cependant, cette prévision a ses limites : l'emploi des méthodes statistiques introduit une incertitude irréductible tant que l'on ne comprendra pas comment la période et l'amplitude

des oscillations quasi-bisannuelle et triquadriennale varie. En outre, elle suppose que ces deux oscillations intègrent l'influence des autres composantes du système climatique, notamment de l'océan.

Le moment cinétique atmosphérique présente aussi des fluctuations décennales. El Niño en est-il responsable ? Nous ne savons pas encore répondre à cette question, tant les sources de variations sont nombreuses à cette échelle de temps. D'autres phénomènes climatiques pourraient aussi intervenir, notamment l'oscillation Nord-atlantique, le deuxième phénomène de plus grande ampleur après El Niño.

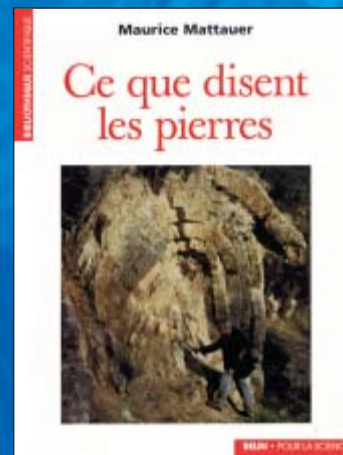
Aujourd'hui, on sait que les épisodes El Niño sont plus fréquents pendant certaines décennies, alors que les épisodes La Niña sont plus fréquents pendant d'autres. Dans les années 1990, des conditions chaudes se sont «anormalement» maintenues dans le Pacifique tropical. On parle de El Padre ou de La Madre pour qualifier ces périodes de 10 à 20 ans où les conditions sont respectivement plutôt chaudes ou plus froides et pendant lesquelles El Niño ou La Niña apparaissent plus souvent. La communauté scientifique essaie de trouver les causes de cette variabilité décennale. Dans ces modèles, elle doit aussi tenir compte de l'impact des gaz à effet de serre qui participent au réchauffement du climat de notre planète. Ceux qui, comme nous, étudient tant des données astrométriques et géodésiques que des processus atmosphériques, océaniques ou liés au couplage avec le noyau terrestre, cherchent à comprendre tous ces phénomènes pour prévoir le climat futur.

Rodrigo ABARCA DEL RIO est géophysicien au département de mécanique spatiale de la société Communication et Systèmes (CS), à Toulouse. Daniel GAMBIS est astronome à l'Observatoire de Paris, où il dirige le Service international de la rotation terrestre. David SALSTEIN est météorologiste dans la société de Recherche Atmosphérique et Environnementale, à Lexington (Massachusetts) où il dirige le service de diagnostic atmosphérique et océanique. Boris DEWITTE est océanographe de l'Institut de recherche pour le développement au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiale, à Toulouse.

ABARCA DEL RIO, R. D. GAMBIS, D.A. SALSTEIN, *Interannual signals in length of day and atmospheric angular momentum*, Ann. Geophys., n° 18, pp. 347-364, 2000.

DICKEY, J.O., P. GEGOUT, et S.L. MARCUS, *Earth-Atmosphere angular momentum exchange and ENSO. The rotational signature of the 1997-98 event.*, Geophys. Res. Lett., n° 26, pp. 2477-2488, 1999.

T. DELCROIX, B. DEWITTE, Y. DUPENHOAT, F. MASIA et J. PICAUT, 2000 : *Equatorial waves and warm pool displacement during the 1992-1998 El Niño events.* J. Geophys. Research., n° 105, pp. 26045-26062, 2000.



CE QUE DISENT LES PIERRES

Maurice Mattauer

Ce livre vous convie à une promenade illustrée dans l'univers des pierres. À partir de l'image, Maurice Mattauer, professeur de géologie à l'Université de Montpellier, reconstitue l'histoire des roches et les grands événements dont elles sont les témoins, et invite à un «retour aux pierres», gage d'une nouvelle compréhension de la nature.

**Code 075001 • 100 F
144 pages**

**Voir bon de commande
page 98**

BELIN • POUR LA SCIENCE

