

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-

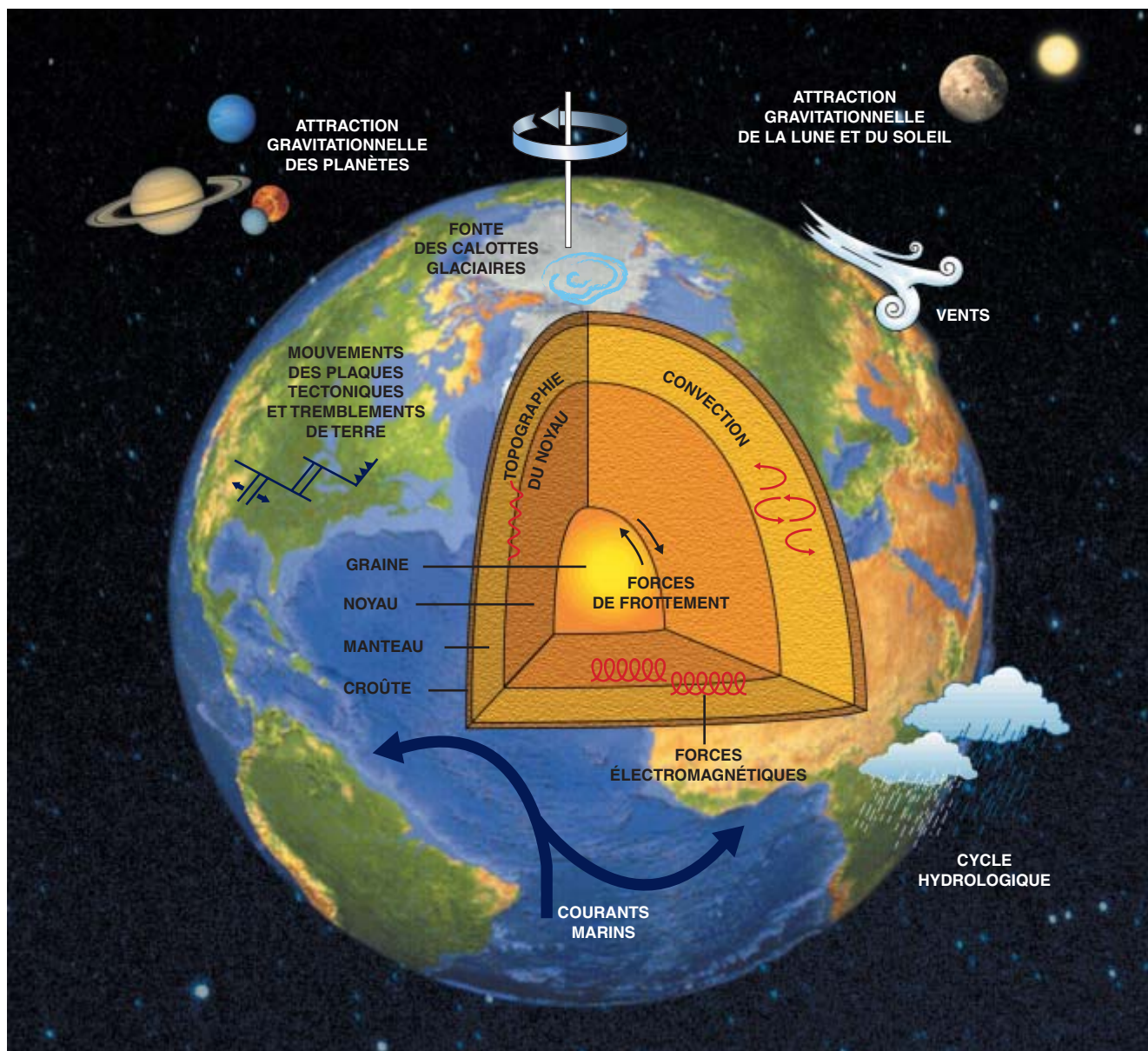
lement comment El Niño agit sur l'atmosphère à des échelles de temps qui vont de quelques mois à la décennie.

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

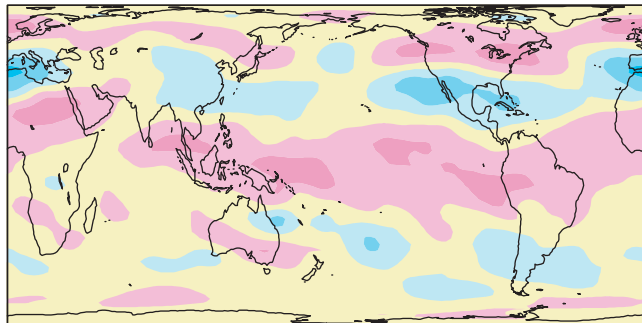
siècle, Kepler est le premier à soupçonner que sa rotation n'est pas uniforme (il fait allusion à cette possibilité dans divers passages de son œuvre), suivi par Newton, qui écrit : « Il est possible qu'il n'existe aucun mouvement uniforme par lequel le temps puisse être mesuré avec précision. » Edmund 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



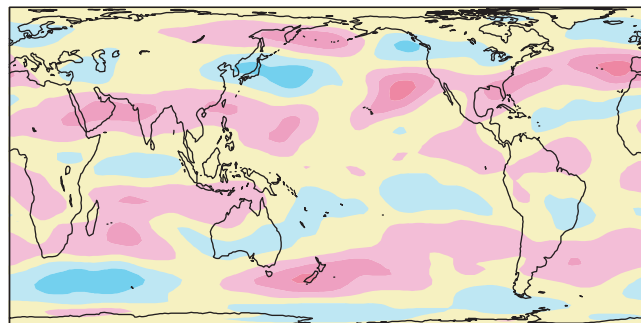
4. LA ROTATION DE LA TERRE n'est pas uniforme. Plusieurs phénomènes la font varier : l'attraction gravitationnelle de la Lune, du Soleil et des planètes, la circulation atmosphérique et océanique, le cycle

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

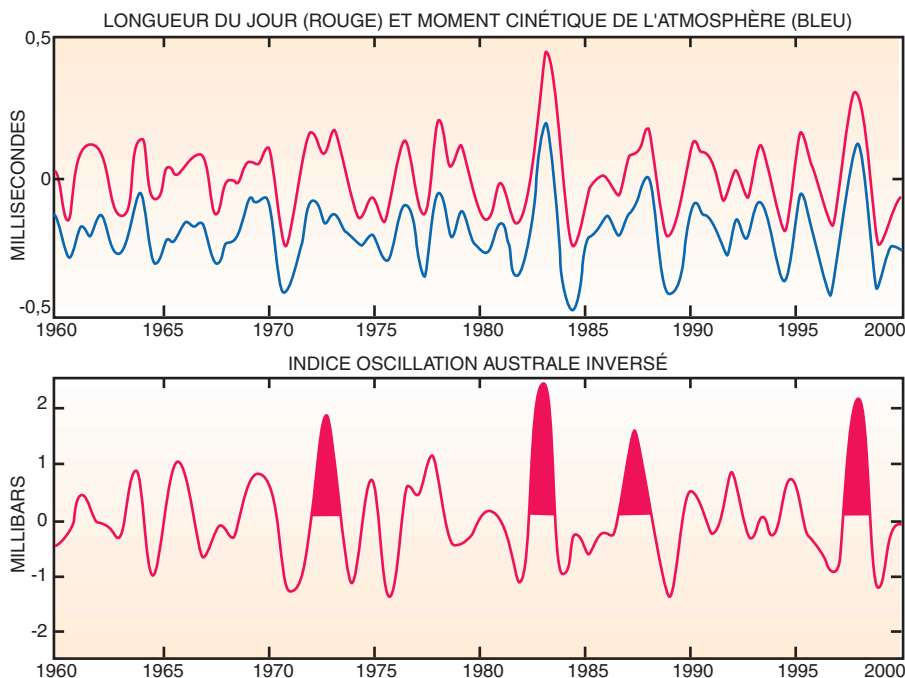
de temps différentes. La Lune et le Soleil sont responsables de variations séculaires de la vitesse de rotation de la Terre, sur laquelle elles exercent des forces de gravitation qui freinent son mouvement : la longueur du jour augmente d'environ deux millisecondes par siècle. Selon cette estimation, 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.

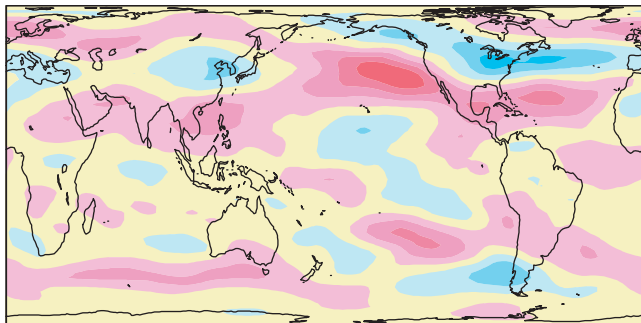
Les phénomènes géophysiques, tels la cristallisation de la graine liée au refroidissement progressif de la Terre depuis sa formation, les couplages électromagnétiques entre le noyau et le manteau ou les mouvements de convection au sein de ces deux éléments entraînent des variations décennales irrégulières 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

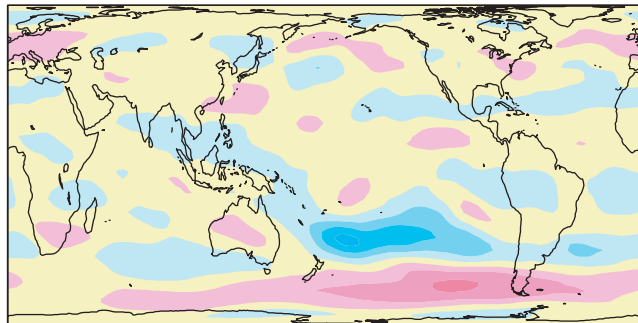


5. LA LONGUEUR DU JOUR, ou période de rotation de la Terre, varie en phase avec le moment cinétique atmosphérique, qui mesure la «quantité de rotation» de l'atmosphère et avec l'indice de l'oscillation australe inversé, c'est-à-dire la différence de pression entre Darwin, en Australie, et Tahiti, qui 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.

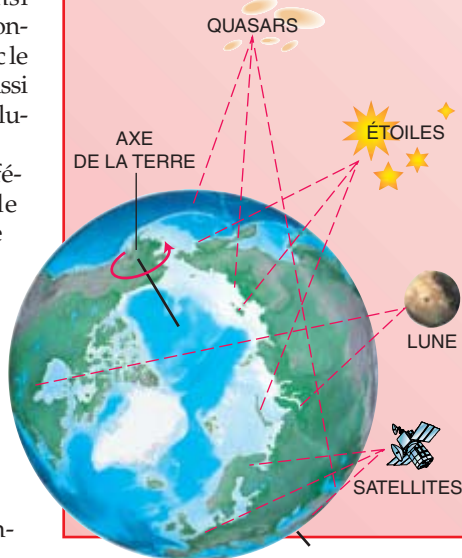
Les méthodes de mesure de la longueur du jour

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

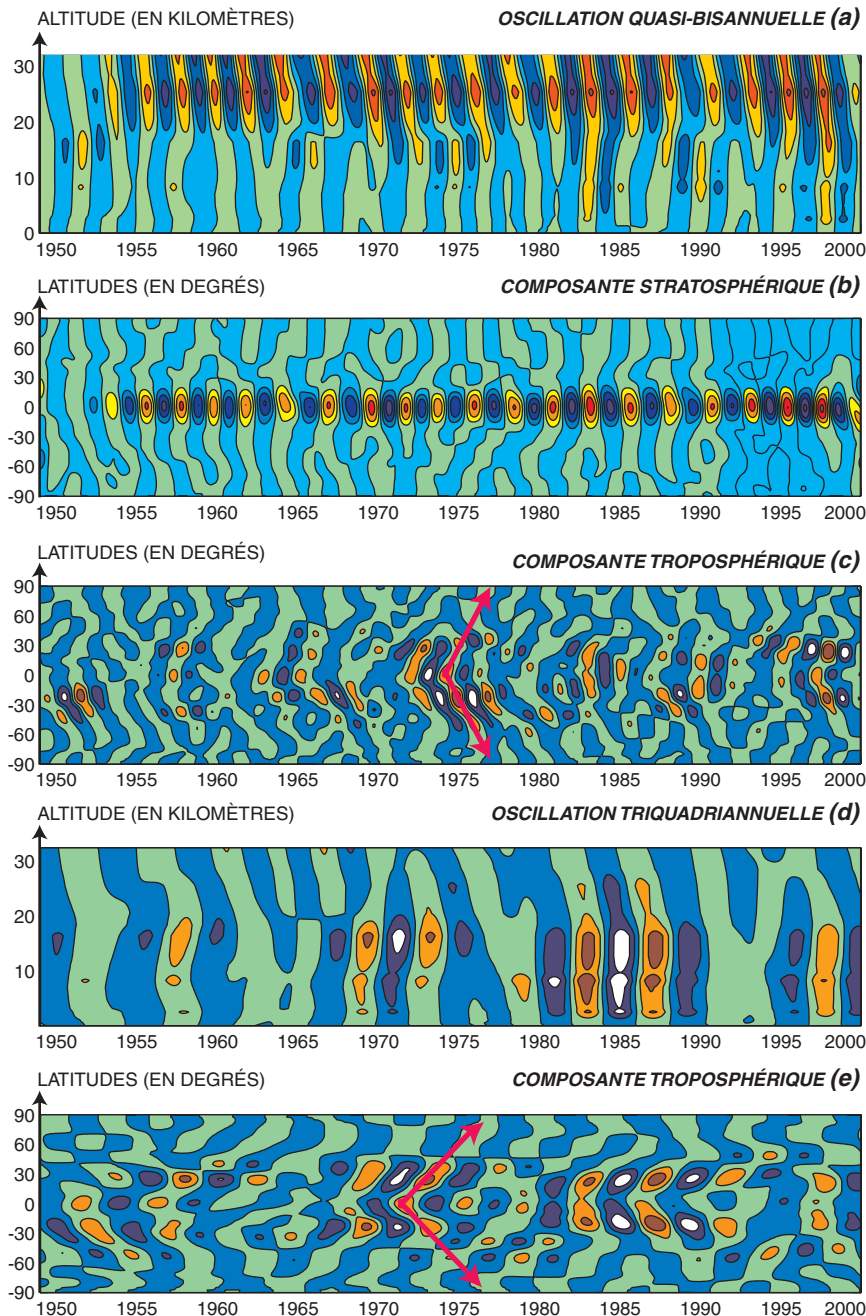
Les deux derniers El Niño intenses ont eu lieu en 1982-1983 et en 1997-1998 (il y en a eu de moindre intensité en 1986-1987 et 1992). Celui de 1982-1983 a été particulièrement intense. Il a provoqué des tempêtes et des inondations en Amérique et des sécheresses

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 triquadiennuelle (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.

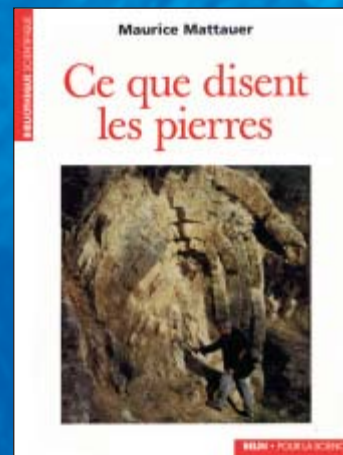
Aujourd'hui, on sait que les épisodes El Niño sont plus fréquents pendant certaines décennies, alors que les épisodes La Niña sont plus fréquents pendant d'autres. Dans les années 1990, des conditions chaudes se sont «anormalement» maintenues dans le Pacifique tropical. On parle de El Padre ou de La 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

