

Les ondes équatoriales et El Niño

Les ondes océaniques équatoriales sont supposées jouer un rôle clé dans le déroulement d'un El Niño. Pour la première fois une étude systématique de l'existence de ces ondes a été entreprise.

Tous les deux à sept ans, le Pacifique tropical est le lieu de déroulement du phénomène El Niño/Oscillation Australe (ENSO) (voir figure 1 p. I de l'article «le programme TOGA» dans ce numéro). C'est la manifestation la plus importante sur Terre de la variabilité climatique à court terme. Ses conséquences économiques, écologiques et humaines peuvent être dramatiques (pluies diluviennes sur l'Amérique du Sud, sécheresse dans la région indonésienne...).

Observations

Observer, comprendre et prédire cette variabilité climatique à court terme ont été les objectifs majeurs du programme TOGA (Tropical Ocean Global Atmosphere). Au cours de ce programme (1985-1994), a été mis en place le réseau de bouées TOGA-TAO (Tropical Atmosphere Ocean) couvrant actuellement l'ensemble du Pacifique équatorial (voir figure 3 p. III de l'article «le programme TOGA» dans ce numéro). La couverture synoptique de ce réseau a été atteinte à partir de mi-1992 et il fournit désormais, en temps réel, un ensemble de mesures *in situ* océaniques et atmosphériques à partir desquelles peuvent être calculées, entre autre, la topographie de surface de la mer (c'est-à-dire le niveau de la mer) et la tension de vent en surface.

D'autres sources d'observation de cette topographie sont les mesures altimétriques des satellites GEOSAT (1986-1989) et TOPEX/POSEIDON (depuis octobre 1992). Ces deux missions satellitaires ont fourni une couverture spatio/temporelle dense du niveau de la mer dans le Pacifique tropical au cours des événements El Niño de 1986-1987, 1992-1993 et La Niña de 1988-1989.

A l'aide de ces deux jeux de données (*in situ* et altimétriques), il est désormais possible de confronter théories d'ENSO et observations. En particulier, le mécanisme de «l'oscillateur retardé» (Schopf *et al.*, 1988, Battisti, 1988) repose sur l'existence des ondes équatoriales océaniques, ondes affectant notamment la topographie de surface de la mer (niveau de la mer).

Long equatorial waves and El Niño

It is suspected that equatorial oceanic waves play a key role in the El Niño phenomenon. For the first time a systematic study of these waves has been made.

El Niño/Southern Oscillation is the most dominant mode in short-term climate variability. This coupled ocean-atmosphere phenomenon is generated in the tropical Pacific (see Figure 1 p. I of «the TOGA Programme» in this Letter) and occurs with a periodicity of between two and seven years. Its economic, ecological and human consequences can be dramatic (heavy rainfall over South America, droughts in Indonesia...).

Observations

The main goals of the TOGA (Tropical Ocean Global Atmosphere) international programme were to observe, understand and predict this short term climate variability. During this ten-year programme (1985-1994), the TOGA-TAO (Tropical Atmosphere Ocean) moored-buoy array was deployed (see Figure 3 p. III of «the TOGA Programme» in this Letter). A wide deployment of this array was attained in mid-1992. Since then, it has been providing in situ oceanic and atmospheric observations of the equatorial Pacific. In particular, these data allow the calculation of the surface topography of the sea and of surface wind stresses.

Other observations of this topography are also provided by altimetric measurements from GEOSAT (1986-1989) and TOPEX/POSEIDON satellites (from October 1992). These two altimetric missions allowed high spatial and temporal resolution data sets of sea-level height to be calculated in the tropical Pacific during the El Niño events of 1986-1987, 1992-1993 and those of La Niña in 1988-1989.

With both data sets at hand (satellite and in situ observations), it becomes possible to test the validity of theoretical ENSO mechanisms by observations. In particular, the «delayed action oscillator» theoretical mechanism assumes the existence of long equatorial wave propagations, which have a large effect on the sea-level.

Ondes équatoriales

La structure thermique de l'océan Pacifique équatorial est telle que la couche d'eau superficielle, chaude, bien mélangée, de température homogène, a une épaisseur située entre 150 et 200 mètres dans le Pacifique ouest et s'amenuise à moins de 50 mètres dans le bassin est, au large des côtes de l'Amérique centrale. La thermocline est la zone qui limite cette couche en profondeur, zone où la température décroît fortement. Les coups de vents dans la zone équatoriale exercent une pression sur la surface de la mer, agissant ainsi à la fois sur le niveau de la mer et sur la profondeur de la thermocline, et donnent lieu à la propagation d'ondes.

Au cours des événements El Niño, seules les ondes de Kelvin et de Rossby peuvent jouer un rôle influent. Les ondes de Kelvin (Figure 1) se propagent d'ouest en est à une vitesse proche de 3,0 m/s. Les ondes de Rossby (Figure 1; nous nous limitons ici au premier mode méridien) se propagent d'est en ouest à une vitesse proche de 1,0 m/s. Dans le cas d'une anomalie de vent d'ouest (fort coup de vent soufflant de l'ouest vers l'est), anomalie car dans cette région les vents réguliers sont les alizés qui soufflent de l'est vers l'ouest, les ondes générées sont :

- une onde de Kelvin de «downwelling» à l'est, c'est-à-dire se propageant vers l'est, à partir de l'endroit où a eu lieu le coup de vent,
- une onde de Rossby d'«upwelling» à l'ouest.

Si au contraire l'anomalie est d'Est, les ondes sont respectivement d'«upwelling» et de «downwelling».

Le terme «downwelling» signifie élévation du niveau de la mer et approfondissement de la thermocline, le terme «upwelling» signifiant l'inverse.

Un autre aspect fondamental du mécanisme de «l'oscillateur retardé» concerne la fin d'un événement El Niño. Il repose sur la réflexion des ondes de Rossby sur le bord ouest du bassin Pacifique (côte asiatique). Au cours d'un événement chaud El Niño, des anomalies de vents d'ouest (coup de vent d'ouest) sont observées depuis le Pacifique ouest jusque dans le Pacifique central. Ces anomalies de vent engendrent des ondes de Kelvin de «downwelling» qui, en se propageant vers l'est, vont amplifier le réchauffement des couches de surface océaniques. Elles engendrent également des ondes de Rossby d'«upwelling» qui, en arrivant sur la côte ouest du bassin, se transforment, lors de leur réflexion, en ondes de Kelvin, toujours d'«upwelling». Ces dernières se

Long equatorial waves

The surface thermal structure of the equatorial Pacific ocean can be represented by a warm upper-ocean surface layer that is homogeneous in temperature with a thickness of about 150-200 m in the west Pacific and less than 50 m in the east Pacific. The thermocline is the limiting depth of this surface layer. In the thermocline, the temperature decreases rapidly with depth. Westerly wind bursts in the equatorial region generate long equatorial waves and thus act on the sea-level and on the thermocline depth.

During an El Niño event, only Kelvin and long Rossby waves can play an important role. Kelvin waves (Fig. 1) propagate eastward at a phase velocity close to 3.0 m/s. Long Rossby waves (Fig. 1; only the first meridional mode is considered) propagate westward at a phase velocity close to 1.0 m/s. A westerly wind anomaly induces the following equatorial waves :

- *an eastward propagating «downwelling» Kelvin wave at the eastern boundary of the wind anomaly,*
- *a westward propagating «upwelling» Rossby wave at the western boundary of the wind anomaly.*

If the wind anomaly is easterly, forced equatorial waves are upwelling Kelvin and downwelling Rossby waves, respectively. Downwelling signifies elevation of the height of the sea-level and deepening of the thermocline depth; with upwelling the opposite occurs.

Another crucial assumption of the «delayed action oscillator» mechanism is the reflection of long Rossby waves at the western boundary of the equatorial Pacific basin (Indonesian coasts). During an El Niño event, westerly wind anomalies are observed from the western to central Pacific. These anomalies induce downwelling Kelvin and upwelling Rossby waves. The former enhance the initial warm sea surface temperature and contribute to the unstable growth of the warm anomaly. The latter propagate to the western Pacific where they reflect as upwelling Kelvin waves. These propagate eastwards to the region of the growing unstable anomaly and counteract its growth by shoaling the thermocline. Kelvin and long Rossby waves have been observed in the equatorial Pacific ocean (cf Lettre PIGB N°2, article TOPEX/POSEIDON), but hitherto no observations have allowed the propagation/reflection mechanisms to be studied over many years. Such a study is now possible with satellite and in situ data.

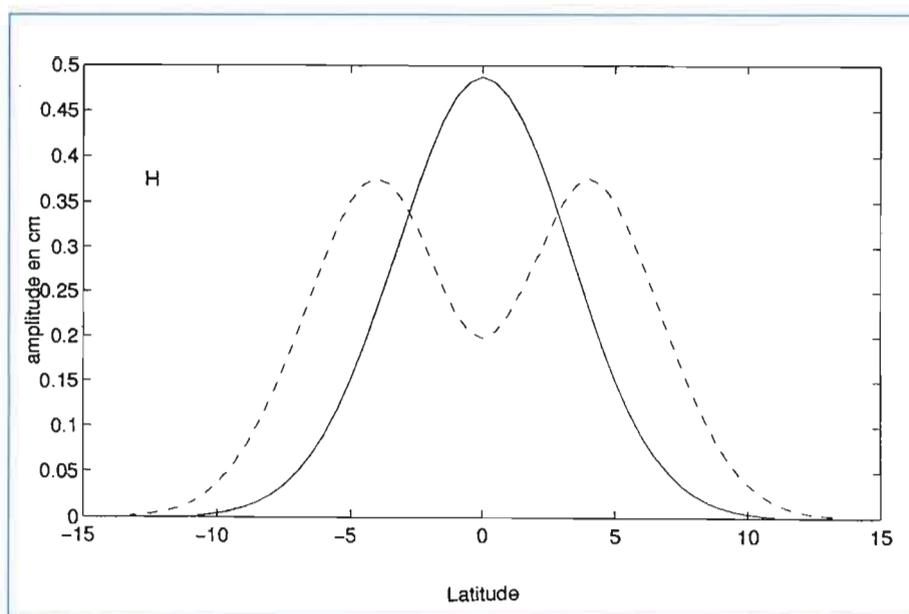


Figure 1 : Structure méridienne des ondes en fonction de la latitude. L'amplitude de chaque onde est exprimée en cm de niveau de la mer (ceci correspondant à un coefficient unité de l'onde). L'onde de Kelvin (trait plein) a une amplitude maximale à l'équateur; cette onde se propage toujours vers l'est, à la vitesse de 3 m s⁻¹. L'onde de Rossby (trait pointillé) a une amplitude maximale à 4° N et 4° S, et se propage vers l'ouest à la vitesse de 1 m s⁻¹.

Meridional structure of waves as a function of latitude. The amplitude of each wave is expressed in cm of sea height, corresponding to unit coefficient of the wave. The Kelvin wave (full line), with maximum amplitude at the Equator, always propagates eastwards with a velocity of 3 m s⁻¹. The first meridional mode of the Rossby wave (dashed line) has maximum amplitude at 4°N and 4°S, and propagates westwards at 1 m s⁻¹.

propagent alors vers le Pacifique central où elles agissent contre le développement de l'instabilité chaude en provoquant notamment une remontée de la thermocline et des eaux froides, plus profondes, vers la couche superficielle. Dans la théorie de l'oscillateur retardé, ce mécanisme est suggéré comme responsable de la fin des événements chauds El Niño. Bien que l'existence des ondes équatoriales de Kelvin et de Rossby ait déjà été démontrée, aucune étude n'avait jusqu'à présent permis de quantifier sur plusieurs années des mécanismes de propagation/réflexion de ces ondes à travers l'ensemble du bassin Pacifique. Ces deux aspects (propagation et réflexion) ont été abordés à l'aide de données dans les deux études suivantes.

Résultat des analyses du niveau de la mer

D'une part, utilisant les données GEOSAT, il a été possible d'étudier la variabilité des ondes équatoriales au cours des épisodes El Niño de 1986-1987 et La Niña de 1988-1989 et montrer que les ondes de Kelvin et de

Sea-level data analysis

First, using GEOSAT data, investigations were made of long equatorial wave variability during the 1986-1987 El Niño and 1988-1989 La Niña events, which showed that Kelvin and Rossby waves explained more than 70% of the sea-level variability in the (4°N-4°S) equatorial band. The accuracy of the GEOSAT data in the western Pacific did not, however, allow analysis of reflections at the maritime boundary.

A newly developed method of decomposing sea-level height into long equatorial waves has made it possible to use TOPEX/POSEIDON and TOGA-TAO data from November 1992 to December 1993 : the existence and propagation of long equatorial waves at theoretical phase velocities has been shown (Fig. 2 p. VI). As the method allows the calculation of long equatorial wave coefficients even near the western coasts where meridional boundaries are close to the equator, long wave reflections can be studied. The conclusions are : a) long Rossby waves seem not to reflect into Kelvin waves during the

Rosby expliquaient plus de 70 % de la variance du niveau de la mer dans la bande équatoriale (4° N-4° S). La qualité des données de GEOSAT dans le Pacifique ouest n'a pas permis d'étudier les réflexions de ces ondes sur la côte.

D'autre part, après avoir développé une méthode originale de séparation des ondes à partir du niveau de la mer, il a été possible d'utiliser les données TOPEX/POSEIDON et TOGA-TAO de novembre 1992 à décembre 1993. Des ondes de Kelvin et de Rossby, se propageant aux vitesses théoriques, ont ainsi été mises en évidence (Figure 2 p. VI). De plus, la méthode mise au point permettant de calculer les amplitudes des ondes jusqu'au bord ouest du bassin Pacifique, les réflexions des ondes de Rossby en ondes de Kelvin ont pu être étudiées. Les conclusions sont, d'une part, que les ondes de Rossby ne semblent pas se réfléchir sur la frontière maritime du Pacifique ouest et, d'autre part, que le vent dans cette région explique une grande part de la variance du signal en onde de Kelvin se propageant vers le Pacifique central. Les résultats ne plaident donc pas en faveur du mécanisme de l'oscillateur retardé. Toutefois, cette étude doit être confirmée par l'analyse d'observations sur plusieurs années afin de séparer les influences du cycle saisonnier et de la variabilité de type ENSO. Ainsi, le maintien du réseau TOGA-TAO et la surveillance altimétrique des océans sur plusieurs années sont indispensables pour mieux appréhender les processus couplés mis en jeu dans la variabilité climatique saisonnière et inter-annuelle.

period under study, and b) wind variability in the western Pacific explains most of the variance of the Kelvin waves propagating towards the central Pacific. These results do not favour the «delayed action» mechanism. This study must, however, be confirmed by analysing a longer time series of accurate sea-level observations in order to separate seasonal cycles and interannual signals. Thus, maintenance of the TOGA-TAO array and of satellite observations of the oceans over many years is necessary for the investigation and understanding of the coupled ocean-atmosphere processes involved in seasonal and interannual climate variability.

● Contact : J.-P. Boulanger - C. Menkes
LODYC UMR 121 (CNRS-ORSTOM-
UPCM) Université Pierre et Marie Curie
4, place Jussieu
75252 Paris cedex 05

Boulanger J.P., Menkès Christophe (1995)

Les ondes équatoriales et El Nino = Long equatorial waves
and El Nino

Lettre PIGB-PMRC-France, (3), 12-15

ISSN 1261-4246