

# Les grandes fluctuations des hydroclimats : le phénomène ENSO



Sur notre planète, il existe à toutes les échelles de temps et d'espace des interactions complexes entre l'atmosphère et l'océan qui sont en constante communication. L'atmosphère est la partie nerveuse de ce système, car elle réagit très rapidement aux modifications de

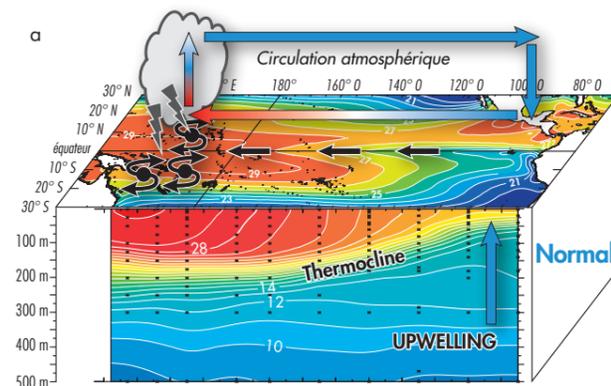
l'océan. L'océan, par contre, est beaucoup plus visqueux et emmagasine la chaleur sur de beaucoup plus longues périodes. Il constitue ainsi la mémoire du système climatique puisque certains phénomènes océaniques sont de l'ordre du millénaire. La différence de temps de réaction

entre l'océan et l'atmosphère maintient le système climatique en constant déséquilibre. De ce déséquilibre naissent des oscillations naturelles du climat telles que le phénomène ENSO\*.

## La situation moyenne du bassin Pacifique tropical

En temps normal, dans le Pacifique intertropical, les alizés soufflent d'est en ouest sur la majeure partie du bassin (carte a de la planche cartographique) avec une vitesse moyenne de 10 m/s (~18 nœuds\*) dans l'est de l'océan Pacifique. Ces vents ont une influence sur les températures de l'eau et les courants marins ; à l'équateur, ils poussent les eaux de surface des côtes d'Amérique du Sud vers l'ouest où elles forment, au-delà de 180° de longitude, une « piscine d'eau chaude » (*warm pool* en anglais) avec des températures supérieures à 28-29 °C (carte b de la planche cartographique), et ce, sur plus de 100 m de profondeur, au-dessus de la thermocline\* (fig. 1 a). Au-dessus de cet immense réservoir de chaleur, une intense évaporation d'air chaud et humide nourrit d'importantes vitesses verticales de l'air et une convection\* profonde, ainsi dénommée car elle affecte l'intégralité de la colonne d'air sur environ 10 km de hauteur (la troposphère\*). C'est une zone de basse pression atmosphérique. De vastes nuages en enclume (les cumulo-nimbus) se forment alors (fig. 1). Enfin, la *warm pool* est la région où la pêche de bonites (thons de surface) est la plus importante du monde. Cette zone d'eaux chaudes, d'une surface supérieure à celle des États-Unis d'Amérique, constitue le moteur principal de la machine océan-atmosphère mondiale. Les alizés circulent dans les basses couches, tandis qu'une boucle de retour en haute atmosphère permet à l'air chaud ascendant de la piscine d'eau chaude de retourner et redescendre vers le continent américain dans des zones appelées zones de subsidence\*, qui sont des régions de haute pression atmosphérique et de faibles pluies. Cette cellule est-ouest se nomme « circulation de Walker » d'après le nom du météorologue Sir Gilbert Walker.

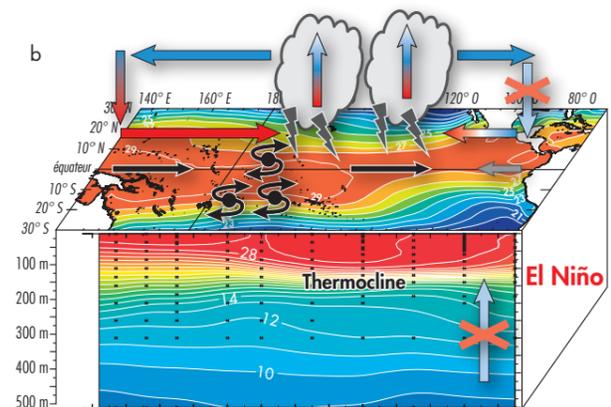
Figure 1  
La situation moyenne du bassin Pacifique tropical  
La machine « océan-atmosphère » mondiale



a - La situation atmosphérique et les 500 premiers mètres de l'océan dans la situation normale

b - La situation atmosphérique et les 500 premiers mètres de l'océan en situation El Niño en décembre 1997.

Sur la verticale, les données de température sont issues du système d'observations TOGA-TAO (<http://www.pmel.noaa.gov>) de bouées ancrées. La thermocline est la zone où la température varie le plus rapidement sur la verticale.



Source : Ch. Menkès, IRD

Les alizés convergent vers les zones de convection où d'intenses précipitations sont observées (carte a de

la planche cartographique). La zone de convergence\* du nord se nomme Zone de convergence intertropicale (*Intertropical Convergence Zone* ou ITCZ en anglais) et celle du sud, Zone de convergence du Pacifique sud (*South Pacific Convergence Zone* ou SPCZ). L'ITCZ et la ZCPS sont des zones fondamentales dans le fonctionnement de notre climat. Ce sont aussi des zones, où la combinaison de vents convergents et tournants, de températures chaudes et de fortes humidités fournit tous les ingrédients de la cyclogenèse\*. La Nouvelle-Calédonie se situe entre la ZCPS et une zone de climat subtropical plus sec au sud. De ce fait, de faibles fluctuations de la ZCPS suffisent à faire basculer le climat calédonien entre régime tropical et subtropical.

Par contraste, dans l'est du Pacifique équatorial et le long des côtes du Pérou et du Chili, les eaux poussées vers l'ouest par le vent de surface sont remplacées en surface par des eaux plus froides (carte b de la planche cartographique et fig. 1) selon un phénomène appelé upwelling\*. Dans ces régions, la thermocline peut atteindre la surface (fig. 1 a). Outre les eaux froides, l'upwelling apporte des eaux riches en nutriments qui alimentent une production phytoplanctonique\* et une vie marine intenses sur plusieurs milliers de kilomètres (carte e de la planche cartographique).

## La situation ENSO (El Niño-Oscillation australe) du bassin Pacifique tropical

Saisonnement, aux alentours de Noël, le régime normal des alizés se relâche et des eaux plus chaudes apparaissent le long des côtes du Pérou et de l'Équateur.

Ce phénomène est à l'origine de l'appellation « El Niño », ou « L'enfant Jésus ». Quelquefois, ce phénomène saisonnier s'amplifie et évolue vers un dérèglement général du climat.

### Des eaux plus chaudes au Pérou mais plus froides en Nouvelle-Calédonie pendant El Niño

Le terme El Niño a donc progressivement désigné un événement de plus grande échelle, où les anomalies chaudes de températures péruviennes persistent au-delà de la saison, progressent vers le sud jusqu'au large des côtes du Chili, et intéressent finalement l'ensemble du bassin oriental et central du Pacifique équatorial. On observe alors, comme durant l'été austral de 1998, des anomalies de températures de surface (carte d de la planche cartographique) de plus de 3-4 °C dans le Pacifique central et oriental. Elles peuvent atteindre 8 °C localement. Contrairement aux évolutions saisonnières, elles perdurent sur plus d'un an et apparaissent en moyenne tous les 3 à 6 ans. En fait, durant les El Niño forts, les anomalies chaudes correspondent à une bascule entière du bassin durant laquelle les eaux chaudes de la *warm pool* se déplacent vers l'est (carte d de la planche cartographique et fig. 1 b). Conséquence importante, l'apparition, dans l'ouest du bassin et de part et d'autre de l'équateur, de masses d'eau légèrement plus froides, comme en Nouvelle-Calédonie où des anomalies négatives de l'ordre de 0,5-1 °C peuvent être observées en mer.

### Pluies

Le déplacement des eaux chaudes vers l'est s'accompagne d'un même déplacement des zones de convection atmosphérique de plusieurs milliers de kilomètres, avec des anomalies de pluies pouvant atteindre plus de 10 mm/jour (carte c de la planche cartographique et fig. 1 b) dans des régions habituellement sèches, comme sur les côtes occidentales d'Amérique du Sud. Dans le Pacifique sud-ouest, la ZCPS se déplace considérablement et peut passer, comme en 1998, de sa position inclinée nord-ouest/sud-est à une position zonale est-ouest avec un centre d'action beaucoup plus à l'est. La Nouvelle-Calédonie est alors affectée par la remontée de la ZCPS vers le nord et enregistre des déficits pluviométriques (carte c de la planche cartographique).

### Vents

Corrélativement au déplacement des zones de convection, la pression atmosphérique à l'ouest du Pacifique augmente, tandis qu'elle baisse à l'est. Une convergence des vents s'organise vers ces zones orientales de basse pression et, ainsi, les alizés sont affaiblis dans la zone équatoriale où des vents d'ouest durables apparaissent même dans le Pacifique ouest et central (fig. 1 b et carte c de la planche cartographique).

La situation est différente pour les alizés du Pacifique sud-ouest, qui convergent vers la ZCPS à des latitudes plus tropicales. Ces vents ont tendance à se renforcer en été austral (carte c de la planche cartographique), car le déplacement de la ZCPS vers le nord-ouest favorise un régime de vents forts qu'on rencontre habituellement plus au sud. En Nouvelle-Calédonie, on enregistre ainsi une augmentation de la vitesse des alizés, durant l'El Niño de 1997-1998 de l'ordre de 2 m/s (~ 4 nœuds).

### Impacts

La zone de cyclogenèse habituellement confinée dans l'ouest peut alors se déplacer avec la ZCPS vers l'est et provoquer des cyclones dans des zones généralement épargnées. Ce fut le cas, en Polynésie française, durant les épisodes El Niño de 1982-1983, 1991-1992, et 1997-1998.

Ainsi, des pluies diluviennes apparaissent dans l'est du Pacifique, provoquant inondations et glissements de terrains. À l'inverse, sur les continents indonésien et australien, ainsi qu'en Nouvelle-Calédonie, des sécheresses dramatiques peuvent être observées, comme durant l'El Niño de 1997-1998 avec une forte augmentation des feux de forêts sur la Grande Terre.

Dans les zones d'upwelling, les anomalies chaudes de température (carte d de la planche cartographique) correspondent à un enfoncement de la thermocline de plusieurs dizaines de mètres par rapport à sa profondeur normale (fig. 1 b) avec pour conséquences une réduction de l'apport d'éléments nutritifs vers la surface, une réduction (d'un facteur 5 durant les El Niño de 1982-1983 et 1997-1998) du contenu en phytoplancton dans l'upwelling équatorial, et, dans les cas extrêmes, alliée à la surpêche, une quasi-disparition d'espèces comme les anchois le long des côtes du Pérou et du Chili durant l'El Niño de 1972-1973.

Du côté occidental, en relation avec les déplacements zonaux de la *warm pool*, les zones de concentration de bonites se déplacent de plusieurs milliers de kilomètres.

### La Niña

Il existe aussi une phase globalement inverse appelée « La Niña », « La petite fille », durant laquelle les alizés sont renforcés, et les températures de surface de la mer anormalement froides sur toute la zone du centre est du Pacifique de part et d'autre de l'équateur, et dans la région de l'upwelling des côtes du Pérou et du Chili. Durant cette phase, la production biologique marine est renforcée dans l'est du bassin et des apparitions de phytoplancton très spectaculaires le long de l'équateur (carte f de la planche cartographique) provoquent la prolifération d'espèces marines en concentrations

inhabituelles. Du côté occidental, avec le retrait vers l'ouest de la *warm pool* durant La Niña, les zones de pêche à la bonite se déplacent également massivement vers l'ouest.

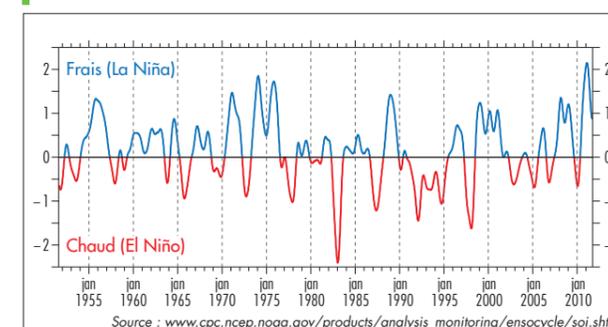
Cette phase, d'amplitude moins importante qu'El Niño, provoque aussi son lot de dégâts et, en particulier, des sécheresses plus marquées dans le sud-ouest des États-Unis. En Nouvelle-Calédonie, c'est un temps généralement plus pluvieux et des alizés moins forts, voire inexistant, qui sont alors observés en été. Cette fois-ci, c'est le déplacement de la zone de convergence du Pacifique sud vers le sud qui explique une partie des phénomènes qui s'expriment ici.

## Surveillance, compréhension et prévision d'ENSO

### Indices

Tous les événements ENSO (El Niño, en particulier) ne se ressemblent pas. Pour qualifier facilement ces dérèglements, on utilise habituellement un indice qui traduit le basculement des zones de basse et de haute pression entre l'est et l'ouest du Pacifique tropical. C'est l'Indice d'oscillation australe (*Southern Oscillation Index* ou SOI). C'est à partir de cet indice que la « force » ou « l'intensité » d'ENSO est souvent déterminée. Plus l'indice est négatif, plus les pressions sont hautes en Australie et basses en Polynésie. Ce fut le cas en mars 1983 où il fut particulièrement négatif. La figure 2 nous confirme qu'en effet, les deux El Niño les plus forts de la période sont ceux de 1982-1983 et 1997-1998. On constate également qu'il existe une grande variété d'événements ENSO et que leur périodicité est loin d'être régulière. La force d'ENSO mesurée par la SOI détermine souvent l'intensité des impacts dans les zones équatoriales. Ainsi, on considère que ce sont les El Niño de 1982-1983 et 1997-1998 qui ont eu globalement le plus d'impacts socio-économiques dans la zone équatoriale.

Figure 2  
L'indice d'oscillation australe



En revanche dans les zones plus tropicales, ces indices simples d'ENSO ne sont pas toujours de bons indicateurs d'impacts locaux. Ainsi, en Nouvelle-Calédonie, les températures de la mer ont été plus froides durant l'épisode El Niño de 1986-1987 que durant celui de 1997-1998 et, en Polynésie française, un nombre substantiel de cyclones fut observé non seulement en 1982-1983 et 1997-1998, mais aussi en 1991-1992, alors que l'indice d'oscillation australe n'était pas exceptionnellement élevé (fig. 2). En fait, dans ces régions du Pacifique sud-ouest, les impacts sont plus directement liés aux variations de la ZCPS fortement associées à ENSO, mais de façon complexe.

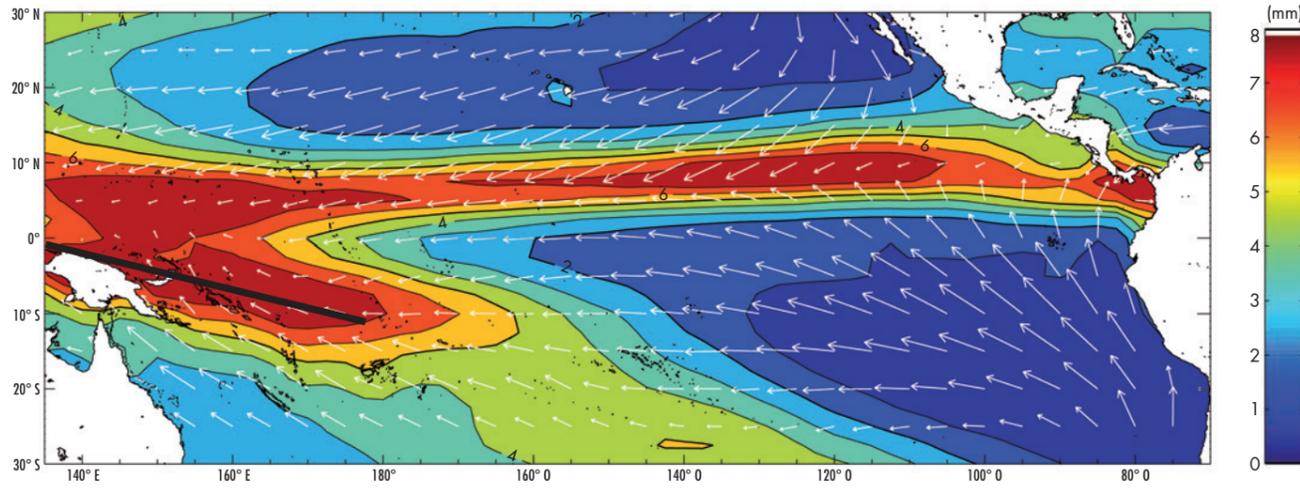
Ces considérations illustrent la variété des phénomènes regroupés génériquement sous le vocable d'ENSO. À l'heure actuelle, il reste de gros progrès à accomplir pour comprendre les processus qui contrôlent les modifications de la ZPCZ durant ces épisodes.

### Mécanismes

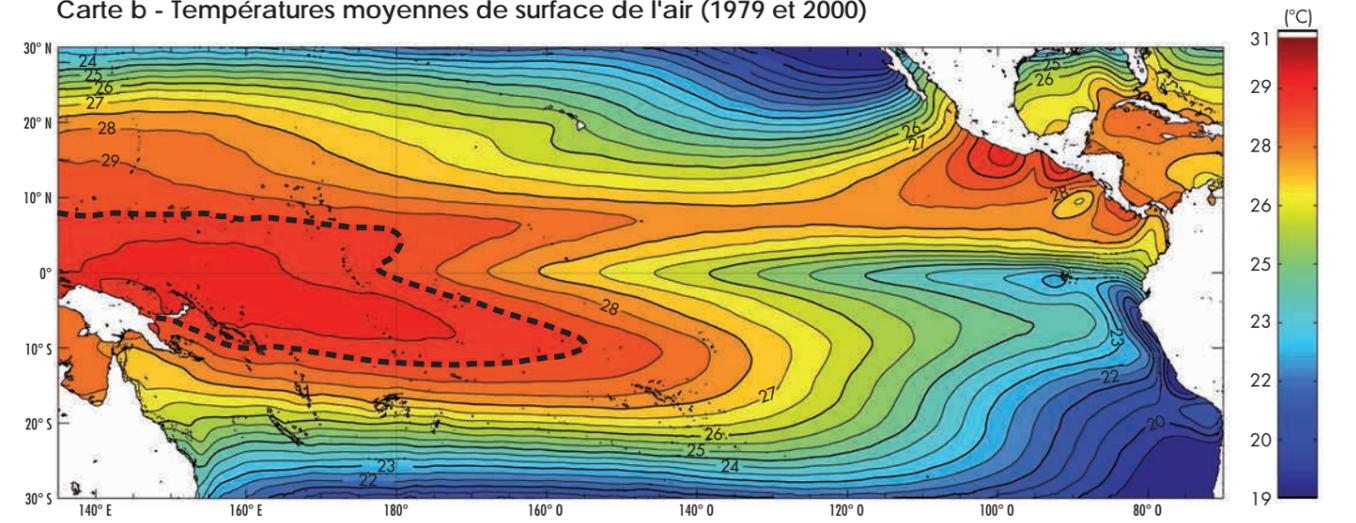
ENSO résulte d'une interaction entre l'atmosphère et l'océan. Les modifications de l'activité solaire ou les éruptions volcaniques n'ont probablement pas d'effet majeur sur le phénomène. Si nous savons décrire les rétroactions entre l'océan et l'atmosphère qui se mettent en place durant ENSO, nous ne connaissons qu'imparfaitement les raisons exactes de son déclenchement, de sa périodicité, de son amplitude et de sa terminaison. Plusieurs théories sur son fonctionnement existent, l'une des plus célèbres étant celle de « l'oscillateur retardé ».

Dans cette théorie, une température plus chaude dans le Pacifique central (carte d de la planche cartographique) provoque une anomalie de vent d'ouest (carte c de la planche cartographique). Celle-ci génère de vastes perturbations du niveau de la mer et des courants dans l'océan, qui vont se propager à la fois vers l'est (ce sont les ondes de Kelvin équatoriales, qui se déplacent à environ 200 km/j vers l'est) et vers l'ouest (ce sont les ondes de Rossby équatoriales, qui se déplacent à environ 70 km/jour vers l'ouest) jusqu'aux côtes d'Amérique du Sud pour les ondes de Kelvin et de Papouasie-Nouvelle-Guinée pour les ondes de Rossby. Elles se réfléchissent en partie sur les côtes et reviennent au centre du bassin. Elles peuvent faire remonter la thermocline et refroidir progressivement la surface jusqu'à ce que les eaux anormalement chaudes du Pacifique central basculent vers des eaux anormalement froides. On passe ainsi dans une situation La Niña, avec des eaux froides et des vents d'est dans le Pacifique central. Des ondes opposées sont alors engendrées. Elles vont se propager, se réfléchir sur les côtes et revenir pour réduire l'anomalie froide et la refaire basculer en anomalie chaude et ainsi de suite. Dans cette théorie, le phénomène

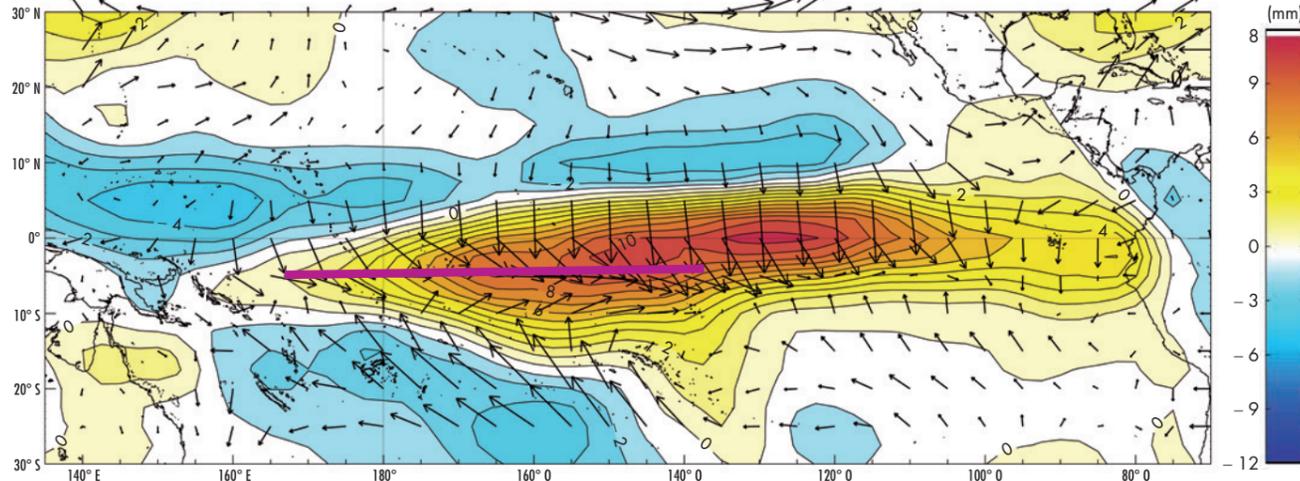
Carte a - Précipitations moyennes (1979-2000)



Carte b - Températures moyennes de surface de l'air (1979 et 2000)

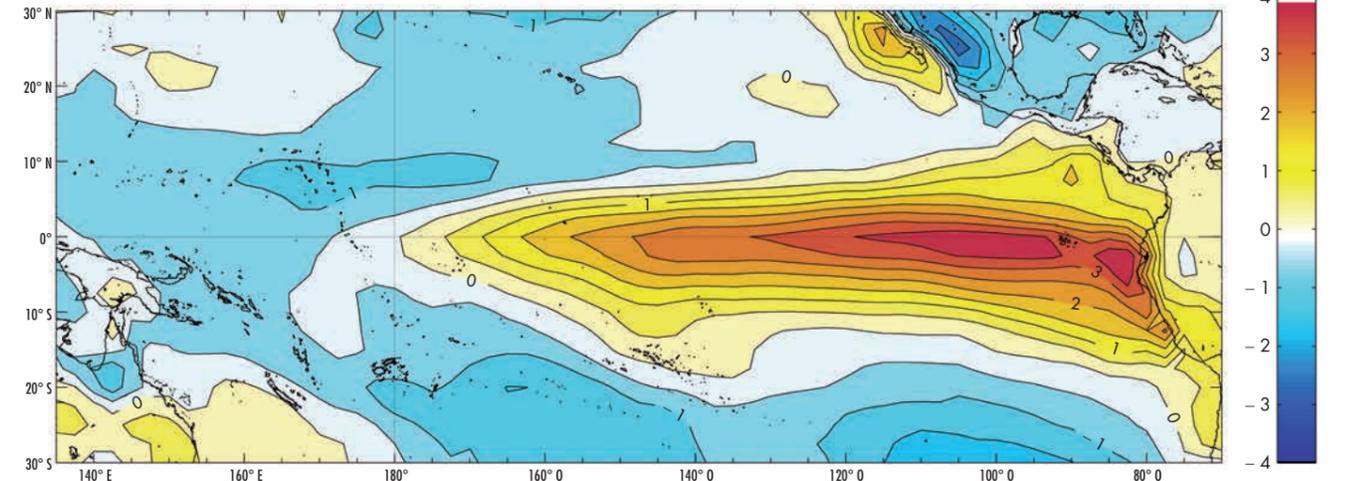


Carte c - Anomalies des précipitations de janvier à mars 1983



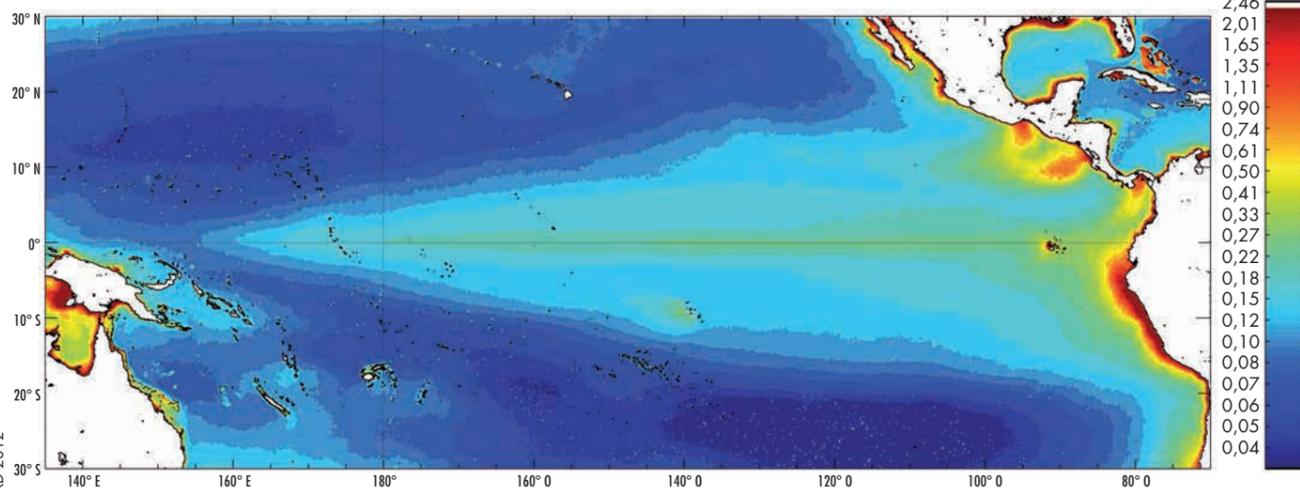
Note : anomalies calculées par rapport aux précipitations saisonnières moyennes sur la période 1979-2000

Carte d - Anomalies de la température de surface de l'air de janvier à mars 1983

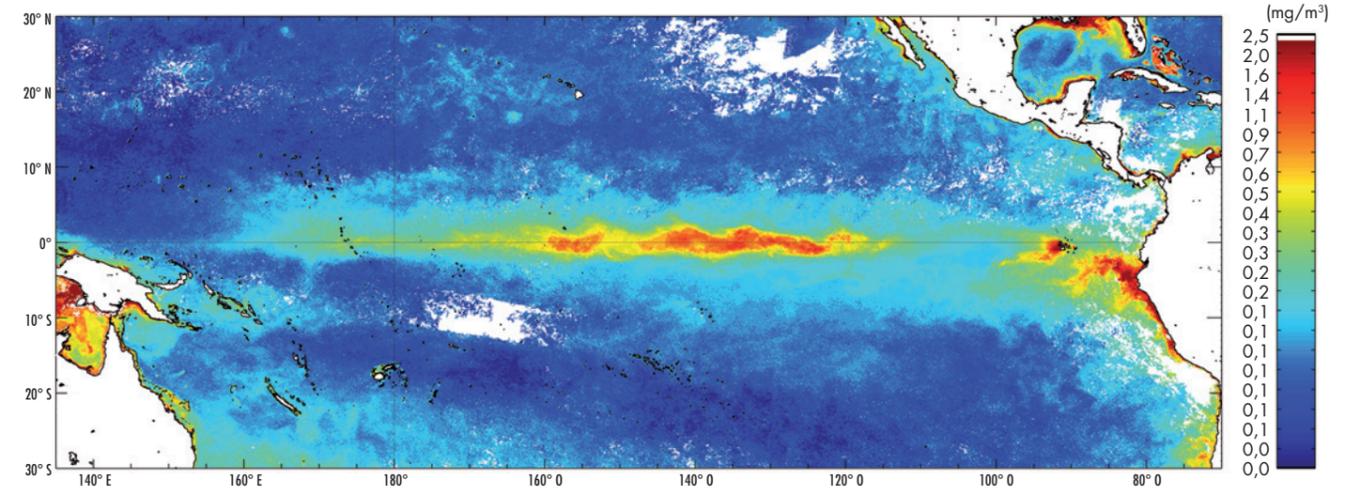


Note : anomalies calculées par rapport à la température saisonnière moyenne sur la période 1979-2000

Carte e - Moyenne de la chlorophylle de surface (1998-2007)



Carte f - Chlorophylle de surface durant La Niña (juin 1998)



- Vents moyens (10 m/s)
- Limite de la piscine d'eau chaude (warm pool)
- Zone de convergence du Pacifique sud
- Position de la ZCPS durant El Niño
- Anomalies des vents de surface

ENSO est parfaitement oscillant, régulier et la vitesse de propagation des ondes explique que 3 à 4 ans puissent s'écouler entre chaque phase. Ce sont les ondes qui, à retardement, font basculer le bassin dans telle ou telle phase, d'où le terme « d'oscillateur retardé ».

Les données des bouées ancrées dans le Pacifique équatorial ou des satellites observant le niveau de la mer confirment la présence des ondes équatoriales et leurs réflexions sur les côtes durant ENSO. Mais les processus permettant la renverse de l'anomalie de température dans le bassin restent mal connus. Enfin, cette théorie n'explique pas le manque de périodicité et la diversité des événements observés, ce qui pose évidemment un problème de prévisibilité du phénomène.

**Prévision**

À l'heure actuelle, les outils les plus performants pour prévoir ENSO sont les modèles numériques de climat. Ils utilisent les équations connues du comportement de l'océan, de l'atmosphère et de leurs interactions. Ils partent d'une situation connue

(« condition initiale ») et la fournissent à de puissants ordinateurs qui simulent une situation du futur, par exemple six mois à l'avance.

La figure 3 montre l'état de l'art des systèmes de prévisions « couplés océan-atmosphère » pour détecter la venue d'ENSO environ six mois à l'avance. Globalement, les prévisions des modèles suivent l'évolution observée (en noir), mais il y a aussi une importante dispersion des courbes notamment en 2011. Bien que la plupart prédisent une évolution vers La Niña en 2011, d'autres ne montrent pas cette évolution aussi clairement.

On vérifie rétrospectivement la véracité de la prévision, puisqu'au final, 2011 fut une année La Niña (fig. 3). À l'heure actuelle, la capacité prédictive des modèles est de 6 mois à 1 an, mais le succès des prévisions est variable suivant les événements. L'exemple le plus célèbre est celui d'El Niño 1997-1998 qui n'a pu vraiment être prévu que lorsqu'il était déjà apparu.

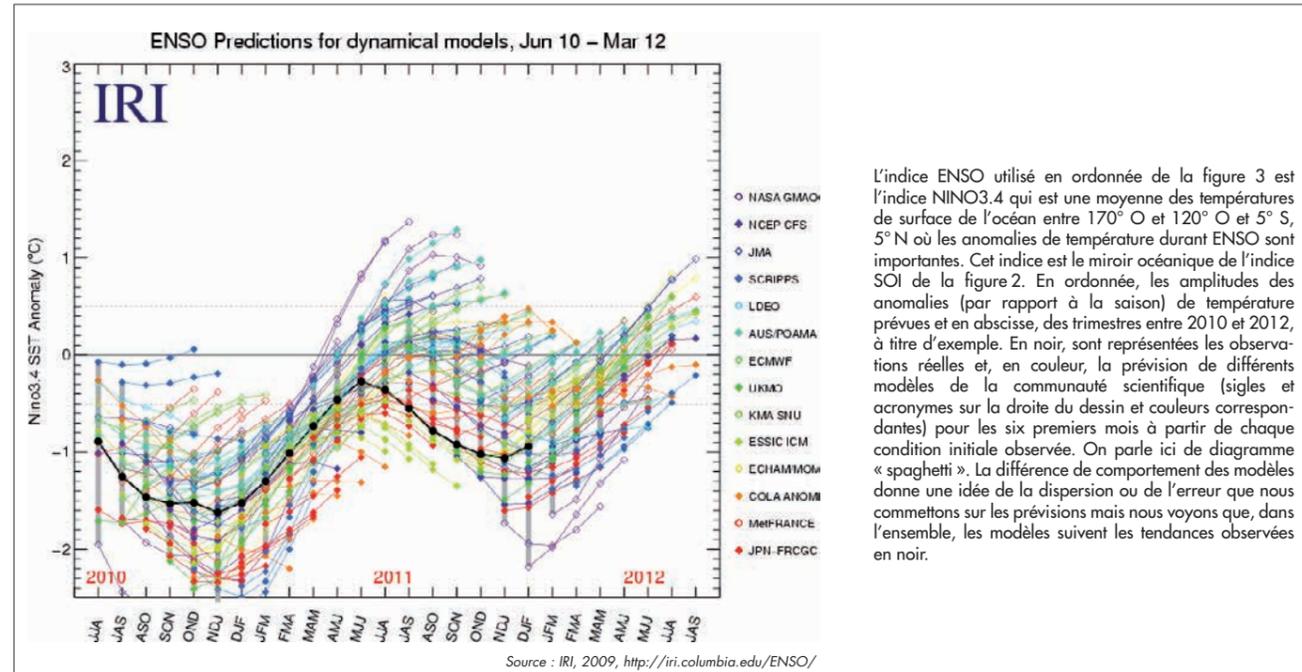
Le défi actuel consiste non seulement à prévoir l'apparition et l'évolution d'ENSO quelques mois à l'avance, mais aussi à prévoir ses modifications potentielles avec le changement climatique. Pour étudier comment ENSO variera dans le futur, on utilise les mêmes modèles, mais appliqués à de très longues périodes (par exemple sur 100 ans). À l'heure actuelle, face à la diversité de leurs réponses, on ne peut pas conclure sur l'évolution de la fréquence et de l'intensité d'ENSO. On s'aperçoit aussi que, dans les simulations de changements climatiques, la ZCPS, qui intéresse directement la Nouvelle-Calédonie, est l'un des phénomènes les moins bien pris en compte. Les grandes questions que les scientifiques se posent pour le futur concernent aussi l'évolution du nombre et de l'intensité des cyclones durant ENSO et comment ENSO affectera les écosystèmes marins.

**Christophe Menkès**

**The major fluctuations of the hydro-climate: the ENSO phenomenon**

*El Niño Southern Oscillation (ENSO) is the predominant inter-annual variation mode in the world's climate. It is a natural phenomenon with a frequency that ranges from two to eight years, with a mean period of around 4 years. ENSO is characterized by a warm phase (El Niño) and a cool phase (La Niña). This major phenomenon has global repercussions, in the atmosphere, on the land and in the sea, which can last for over a year. It originates in the equatorial Pacific the normal climatic situation in the equatorial Pacific as warm waters, above 29°C, lie between 10°N and 10°S, and to the west of 180° longitude, and cooler waters at around 23°C are located to the east of 120° longitude. Above the warm east waters, in particular to the north and south of the Equator, intense convection occurs, characterized by cumulo-nimbus formations reaching more than 10 km high, heavy precipitations occur and atmospheric pressure is low. To the south of the Equator the zone is known as the SPCZ (South Pacific Convergence Zone), and it is a determining factor for the climate of South Pacific and New Caledonia. During El Niño episodes, the normal regime of the tropical Pacific is completely modified and the warm waters of the west are displaced to the eastern Pacific, reducing the intense marine life on the coasts of South America, and bringing rain and cyclones to the east where they do not normally occur. Conversely, to the west, in the Australian and Indonesian region, and also in New Caledonia, the atmosphere is drier, the sea cooler and the rainfall below seasonal averages. While in New Caledonia these phenomena are relatively weak, they can be dramatic in northern Australia and Indonesia, with markedly increased risk of drought and fires. The La Niña situation is roughly the reverse. The theories on the existence and the behaviour of ENSO only partly explain the phenomenon, which varies in its impact, its duration, and its amplitude. Nevertheless, it can be forecasted 6 months in advance. To forecast episodes, numerical climate models are used, which also enable calculations of the possible changes in ENSO patterns that could come with climate change. These changes are as yet an unknown factor.*

Figure 3  
Un modèle numérique de prévision couplée « océan-atmosphère »



L'indice ENSO utilisé en ordonnée de la figure 3 est l'indice NINO3.4 qui est une moyenne des températures de surface de l'océan entre 170° O et 120° O et 5° S, 5° N où les anomalies de température durant ENSO sont importantes. Cet indice est le miroir océanique de l'indice SOI de la figure 2. En ordonnée, les amplitudes des anomalies (par rapport à la saison) de température prévues et en abscisse, des trimestres entre 2010 et 2012, à titre d'exemple. En noir, sont représentées les observations réelles et, en couleur, la prévision de différents modèles de la communauté scientifique (sigles et acronymes sur la droite du dessin et couleurs correspondantes) pour les six premiers mois à partir de chaque condition initiale observée. On parle ici de diagramme « spaghetti ». La différence de comportement des modèles donne une idée de la dispersion ou de l'erreur que nous commettons sur les prévisions mais nous voyons que, dans l'ensemble, les modèles suivent les tendances observées en noir.

**ORIENTATIONS BIBLIOGRAPHIQUES**

La Recherche, 1998 – Heurs et malheurs de la prévision d'El Niño, n° 307. : 72-77.  
 El Niño, La Niña and the Southern Oscillation, 1990 – SGH Philander, Academic Press Inc., 293 p.  
[http://www.pmel.noaa.gov/tao/el\\_nino/nino-home.html](http://www.pmel.noaa.gov/tao/el_nino/nino-home.html)  
<http://portal.iri.columbia.edu/portal/server.pt?open=512&objID=491&mode=2>  
<http://www.cpc.naa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>  
[http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/rechfran/4theme/varioclima/el\\_nino97.html](http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/rechfran/4theme/varioclima/el_nino97.html)

Menkès Christophe.

Les grandes fluctuations des hydroclimats : le phénomène ENSO.

In : Bonvallot Jacques (coord.), Gay Jean-Christophe (coord.), Habert Elisabeth (coord.).  
Atlas de la Nouvelle Calédonie.

Marseille (FRA), Nouméa : IRD, Congrès de la Nouvelle-Calédonie, 2012, p. 49-52.

ISBN 978-2-7099-1740-1