

Océan et atmosphère, des échanges pour la vie

© G. MOTTI - WESTLIGHT - COSMOS



Les mille et une facettes de l'océan mondial

Trois dossiers pour comprendre l'océan et les impacts des activités humaines, c'est peu. L'immensité du domaine océanique et les phénomènes complexes qui lui sont liés nécessiteraient d'aborder tous les cycles de la matière et de la vie sur notre planète. Une démarche ambitieuse qui dépasse largement le cadre de notre revue. Il nous a donc fallu faire un choix, ainsi après avoir abordé la zone littorale, puis l'exploitation des ressources marines, avons-nous voulu conclure le thème de l'océan par un dossier sur ses multiples relations avec l'atmosphère. Dans ce domaine, la recherche scientifique mondiale, à la pointe des nouvelles technologies, permet d'envisager des explications toujours plus précises sur le fonctionnement des grands phénomènes qui régissent l'équilibre dynamique de notre planète.

- Des échanges de chaleur et de mouvements
- Le carbone stocké dans les sédiments
- El Niño et la Niña du Pacifique tropical
- A la recherche des civilisations englouties

Phénomènes fascinants

Entre l'eau des océans et l'air de l'atmosphère, les échanges sont permanents : chaleur, énergie mécanique, gaz. La régulation thermique de la planète en dépend, comme le cycle du carbone, essentiel à la vie. Le soleil transmet de l'énergie à la surface des océans qui est ensuite transportée sur plusieurs milliers de kilomètres par les courants superficiels ou profonds. Les fluctuations du climat, parfois désastreuses pour les populations, comme les cyclones ou El Niño, trouvent leurs origines dans ces phénomènes, à l'interface océan-atmosphère. Le monde marin fascine les hommes autant qu'il les effraie, tandis que le déluge ou l'Atlantide hantent toujours les esprits. L'archéologie sous-marine a de beaux jours devant elle, et ses récentes découvertes, dans le port d'Alexandrie, ne font qu'épaissir le mystère des cités englouties.



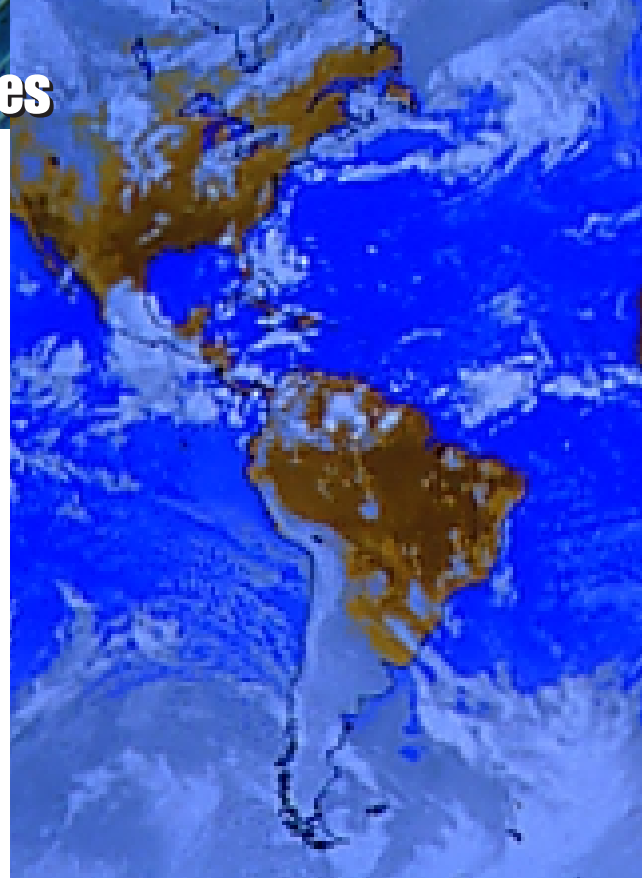
POUR EN SAVOIR PLUS



Internet :
<http://www.fnh.org>

La mer et l'air, un couple capricieux

L'océan est le grand régulateur des échanges thermiques entre l'atmosphère et la planète. La machine couplée océan-atmosphère régit le climat de la Terre.



L'océan qui couvre environ 70% de la surface du globe a une importance considérable dans le climat de la Terre. Il tient le rôle principal dans le cycle de l'eau : plus de 80% de l'eau de l'atmosphère provient de l'évaporation de l'océan et 75% des précipitations tombent directement dans les mers. L'océan et l'atmosphère, en constante interaction, constituent un système dynamique.

Le soleil fournit l'énergie

Sous l'action du soleil, des échanges d'énergie – radiative, thermique et mécanique – ont lieu à l'interface de ces deux milieux fluides. L'océan est chauffé en surface par les rayons solaires qui pénètrent jusqu'à plusieurs dizaines de mètres. La quantité d'énergie ainsi transmise à l'eau est maximale au niveau de l'équateur et diminue en allant vers les pôles. Une partie de l'énergie absorbée par l'océan est ensuite restituée à l'atmosphère ; lorsque la température de l'eau est plus élevée que celle de l'air (la nuit en particulier et l'hiver dans les zones tempérées, par exemple) : l'eau s'évapore et se condense pour former les nuages (cf. schéma p.13).

Les vents mélangent les eaux

Les vents jouent le rôle de "mélangeurs" dans les échanges d'énergie entre l'atmosphère et l'océan. Ils balaient la surface et lèvent les vagues, provoquant une véritable turbulence qui tend à homogénéiser les eaux superficielles. L'action combinée des rayons du soleil, des échanges thermiques et des mouvements mécaniques des vents crée des courants superficiels. Ceux-ci transportent de la chaleur de la zone intertropicale vers les zones polaires (cf. encadré).

Le sel alourdit l'eau

En réponse aux échanges thermiques et mécaniques entre l'eau et l'air, les mers du globe présentent des températures, des salinités et donc des densités différentes. En effet, plus une eau est froide et salée, plus elle est dense.

La température de surface varie avec la latitude, elle est au maximum de 30°C en zones tropicales et au minimum de -2°C dans les régions polaires. Par ailleurs, la densité croît régulièrement de la surface vers les profondeurs. La partie superficielle ou "couche de mélange", située entre 0 m et 200 m environ, dépend de la latitude et est soumise aux variations saisonnières.

En dessous, se situe une couche

intermédiaire : la **thermocline**, sous laquelle circulent les eaux profondes qui ne sont pas soumises aux variations saisonnières. Leur température moyenne est de 3,5°C sur l'ensemble du globe. La présence de la thermocline empêche le mélange entre eaux profondes et superficielles. Sans présence de turbulence, les eaux de densités différentes ne se mélangent pas.

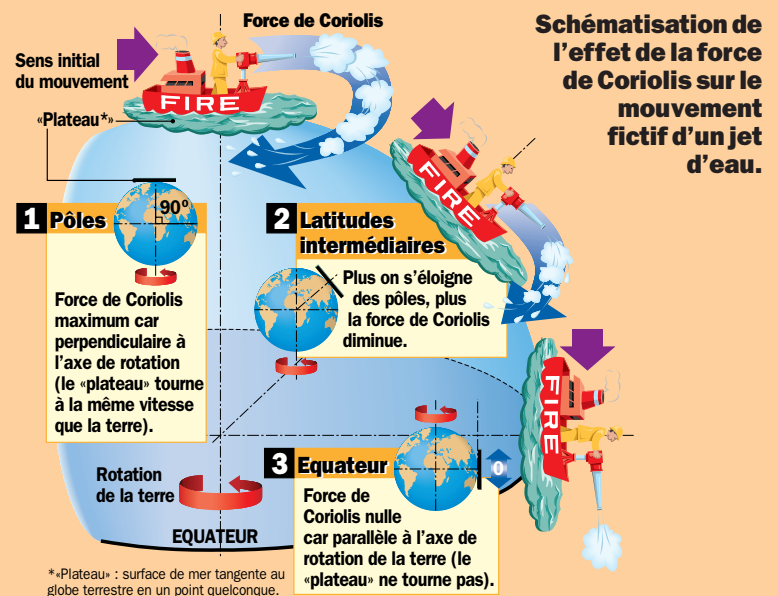
Les eaux profondes se déplacent à 1 mm/s

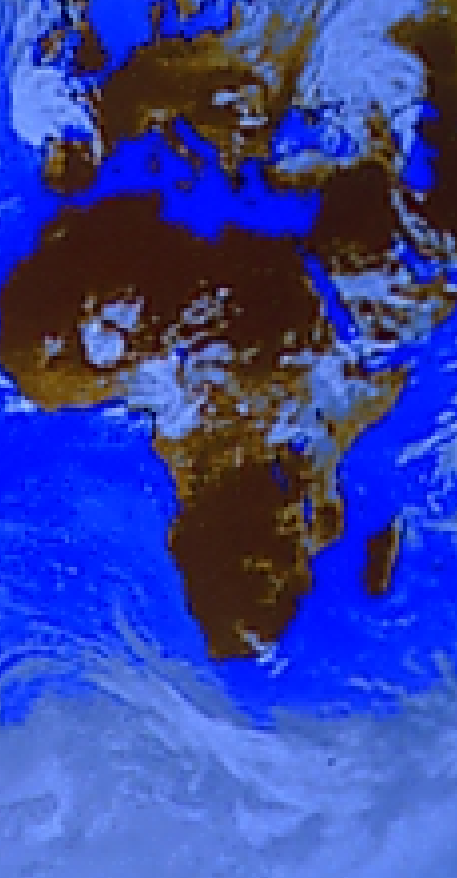
Poussées par les courants de surface, les eaux superficielles se refroidissent en allant des basses vers les hautes latitudes. L'évaporation aug-

● **Radiative** : l'énergie du soleil parvient à l'atmosphère et à l'océan sous forme de radiation lumineuse, on dit donc qu'elle est radiative.

● **Thermocline** : couche intermédiaire séparant les eaux superficielles des eaux profondes. La température y décroît rapidement. A l'inverse, la densité augmente avec la profondeur (quand il est fait référence à la densité, on parle de pycnocline). La thermocline se situe à une profondeur variable suivant la latitude et la saison.

La rotation de la Terre dévie tous les





© METEO FRANCE - CMS LANNON

L'Océan mondial, ou global, à la différence des terres immergées, est continu sur toute la planète.

mente la salinité et diminue la température de l'eau. Les masses d'eau en surface rendues plus denses plongent, générant les courants profonds, c'est le phénomène de "convection". Les courants profonds ont une vitesse moyenne faible (environ 1 mm/s) et suivent une direction générale permanente (tropiques, Atlantique nord, Pacifique) selon un cycle qui dure environ 1000 ans (cf. carte page suivante). Les mécanismes de compensation, c'est-à-dire les remontées d'eaux froides de cette circulation per-

manente, sont encore mal connues. Elles se produisent de façon hétérogène, en comparaison à leur plongée qui est bien connue et localisée dans l'Atlantique Nord, la mer de Weddell (Antarctique) et la Méditerranée. Les échanges entre océan et atmosphère déterminent donc les mouvements de l'eau de mer et des masses d'air. Mais ce gigantesque mécanisme suscite aussi de nombreux échanges gazeux : eau, oxygène, gaz carbonique, etc. Le cycle du carbone, élément chimique à la base de toutes les formes de vie, est directement lié à la masse océanique qui en est le réservoir principal.

L'océan stocke le carbone

Il y a environ 20 fois plus de carbone stocké dans l'océan global que dans l'ensemble des écosystèmes terrestres et 50 fois plus que dans l'atmosphère (cf. schéma p. 17). Et, cet énorme réservoir ouvert échange en permanence du gaz carbonique (CO₂) avec l'atmosphère. L'eau de mer absorbe d'autant plus de carbone qu'elle est dense. Les eaux froides et salées des hautes latitudes se chargent donc en CO₂ dissous avant de plonger vers les fonds marins. Ce phénomène physique amène un enrichissement en carbone des zones profondes qui constituent un "puits" de CO₂. A l'inverse, l'océan peut être "source" de CO₂ car en se réchauffant, les eaux libèrent du gaz carbonique vers l'atmosphère. L'état de calme ou d'agitation de la surface de la mer a un effet important sur la vitesse de ces échanges. ▶▶▶

mouvements à la surface de la planète

La force de Coriolis, due à la rotation de la Terre, agit en déviant tout mouvement vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud. Ces déviations ne sont significatives que pour des mouvements de plusieurs dizaines de kilomètres d'ampleur, comme les courants marins. D'énormes masses d'eau sont ainsi déplacées en surface.

L'eau chaude tropicale réchauffe nos côtes

Dans la zone intertropicale soufflent les alizés, vents d'est (sud-est dans l'hémisphère sud et nord-est dans l'hémisphère nord). Ils provoquent des courants de part et d'autre de l'équateur. Ces courants, orientés globalement d'est en ouest, sont légèrement déviés par la force de Coriolis. Au contact des rives

occidentales des océans, les courants provoquent l'apparition de fortes turbulences. De grandes boucles de circulation, tournant dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et en sens inverse dans l'hémisphère sud, se mettent en place. Ce sont les gyres anticycloniques subtropicales. Ainsi dans l'Atlantique nord, la boucle anticyclonique des Açores entretient le Gulf Stream sur la rive ouest de l'Atlantique. Il a une orientation méridienne en direction des pôles mais est dévié vers la droite par la force de Coriolis qui s'intensifie lorsque l'on monte en latitude. En hiver, ce courant chaud, au contact avec des masses d'air continental froid, provoque un réchauffement et un afflux d'humidité dans l'atmosphère. En France on parle de climat océanique, humide et doux en hiver.

INTERVIEW

JEAN-FRANÇOIS MINSTER

« Vers des informations en temps réel »

Directeur de l'Insu (Institut national des sciences de l'univers), il est océanographe et auteur de nombreux ouvrages de vulgarisation.



■ Comment est organisée la recherche océanographique ?

Elle coûte très cher : une journée sur un navire de recherche représente 50 000 francs, et un satellite (lancement compris), 1 milliard de francs. Pour faire face à ces coûts et parce que les phénomènes sont mondiaux, les grands programmes de recherche s'organisent à l'échelle internationale. Mais chaque pays finance son thème et diffuse ensuite ses résultats.

■ Quels sont les programmes de recherche en cours ?

Le programme Global change, coordonné par l'Unesco, existe depuis 1987, et fait appel à différentes disciplines (hydrodynamique, géochimie, ou biologie intégrée, etc.). Les programmes Tropical ocean and Global atmosphere observent et modélisent El Niño, le World ocean circulation experiment (WOCE) étudie les circulations océaniques, et, le Joint global ocean flux study, la biogéochimie du carbone. Ils s'appuient sur les mesures in situ des satellites et des modèles numériques. Le lancement du satellite Topex/Poséidon (franco-américain) dans les années 90 a permis de formidables progrès, notamment en utilisant l'altimétrie radar pour mesurer à trois centimètres près la hauteur de la surface de la mer.

■ Comment l'océanographie mesure-t-elle l'impact de l'homme ?

Une océanographie dite "opérationnelle", qui diffusera des données régulières et en temps réel, se met actuellement en place. C'est l'objectif du système mondial d'observation des océans (le GOOS), coordonné par la Commission océanographique intergouvernementale (COI), l'Organisation météorologique mondiale (OMM), le programme des Nations unies pour l'environnement et l'Unesco.

Pascale d'Erm

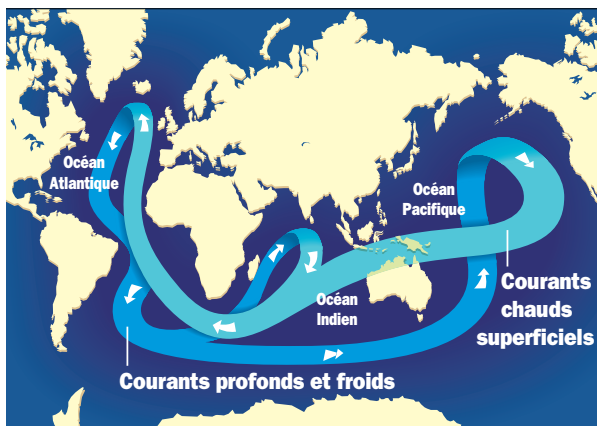
Métier

Météorologiste-océanographe dans la Marine nationale

● **Description** : renseigne les forces aéronavales et aéronaves sur l'environnement météorologique et océanographique. Chargé des observations, mesures au sol et en altitude, contrôle, et interprétation des données.
● **Formation** : dispensée dans le cadre de la Marine nationale, et à l'école de la Météorologie nationale à Toulouse.
● **Scolarité préalable** : acquis professionnels sur les règles de navigation interna-

tionale, météorologie, documents nautiques, maintenance. Niveaux de qualification requis : BEP, CAP, Bac technicien ou brevet technicien, équivalent BTS, DUT.
● **Débouchés** : Responsable d'une cellule météorologique à bord d'un bâtiment, ou dans une station.
● **Où s'adresser** : Service d'information sur les carrières de la Marine. Tél. : 01 53 42 80 00. Minitel 3615 code MN. <http://www.defense.gouv.fr/marine>

La mer et l'air, un couple capricieux



Circulation océanique moyenne : les eaux profondes de l'Atlantique Nord et de l'Antarctique alimentent celles du Pacifique et de l'océan Indien. Dans certaines zones, elles remontent lentement vers la surface. Ce déplacement des eaux profondes, dit circulation thermohaline, est dû aux variations de leur densité.

▶▶▶ Les vagues, par exemple, piègent des bulles de gaz carbonique de l'air. On trouve le carbone dans les mers sous quatre formes différentes : trois espèces minérales dissoutes – CO_2 / gaz carbonique ; HCO_3^- / bicarbonate ; CO_3^{2-} /carbonate – et le carbone organique.

La présence de carbone dans les eaux océaniques permet le développement de la vie. Les algues du phytoplancton sont les principales responsables de la production primaire, c'est-à-dire la transformation du carbone minéral dissous en carbone organique. Cette transformation a lieu grâce à la photosynthèse, au cours de laquelle les végétaux utilisent l'énergie lumineuse. Par ailleurs, certaines espèces du plancton utilisent le carbone pour fabriquer du carbonate de calcium (CaCO_3) pour leur squelette ou leur enveloppe.

A chaque passage d'un niveau à l'autre de la chaîne trophique, depuis le phytoplancton jusqu'aux grands prédateurs, la plus grande part de la matière organique vivante se transforme en matière organique morte (cadavres, pelotes fécales des consommateurs, etc.). Dans sa chute vers le fond, elle est décomposée par des organismes saprophytes, essentiellement des bactéries, et est ainsi minéralisée. La minéralisation libère

du CO_2 et des molécules minérales (azote, phosphore, fer, silicium, etc.), qui pourront être absorbées par le phytoplancton. Une toute petite partie de la matière organique et des restes de carbonate de calcium arrive sur les fonds marins et s'incorpore aux sédiments calcaires, qui constituent donc un autre puits de carbone. Ainsi piégé, le carbone ne sera libéré dans l'océan et l'atmosphère qu'au cours de mouvements telluriques, volcaniques par exemple.

“ Le rôle de l'homme semble bien faible à cette échelle ”

L'alimentation des puits de carbone de l'océan s'effectue grâce aux phénomènes physique et biologique. Mais le fonctionnement du cycle biologique est limité par la disponibilité en sels minéraux qui, comme le CO_2 , enrichissent les grands fonds. Seules les remontées des eaux, en surface ces éléments propices à la vie, permettent la mise en place de la chaîne alimentaire (cf. encadré).

Du local au global : des échelles de valeurs différentes

Cycle de l'eau, cycle thermique, cycle du carbone... s'expliquent par la présence et le fonctionnement de l'énorme masse océanique. Les relations continues des fluides air et eau régissent ces phénomènes complexes. Le rôle de l'homme semble bien faible à cette échelle ; toutefois, le développement accéléré des activités humaines arrivera peut-être à perturber la machine. On estime que la quantité de CO_2 anthropique dégagée depuis le début du XIX^e siècle aurait dû avoir pour conséquence une augmentation de 60 % de ce gaz dans l'atmosphère, or elle n'est que de 29 %. Les réservoirs naturels de carbone, l'océan et les écosystèmes ter-

restres, ont absorbé ce surplus. Malgré la différence de vitesse de réponse de l'atmosphère (rythme rapide) et de l'océan, (rythme lent) on sait mieux modéliser les phénomènes atmosphériques pour prévoir le temps, ou encore les conséquences climatiques d'une augmentation du CO_2 . En ce qui concerne l'océan, il faut se placer à une échelle spatiale et temporelle beaucoup plus grande. Les recherches scientifiques récentes permettent de mieux cerner les répercussions d'un évènement local sur un niveau global. Comme pour le phénomène ENSO (El Niño Southern Oscillation) qui provoque des perturbations à travers tout le Pacifique et dont les effets affectent le monde entier (cf. infographie). En revanche, la vitesse du cycle du carbone et surtout son piégeage dans les puits océaniques restent mal connus, on ne sait pas évaluer les limites de leurs capacités d'absorption.

Cathy Hoare et Cécile Ostria



Des progrès restent à faire pour anticiper les phénomènes océaniques.

Tous nos remerciements à Maxence Revault d'Allones et à son équipe du laboratoire d'Océanographie physique du Museum national d'Histoire naturelle.

Les éléments nutritifs proviennent du fond des mers

Pour accroître la production primaire et par conséquent augmenter celle des autres niveaux de la chaîne alimentaire, on a tenté des essais d'enrichissement de la surface. Ainsi pour stimuler le développement du krill, crevette planctonique, du fer a été déversé sur les eaux arctiques. Mais il est très complexe d'effectuer de l'aquaculture à grande échelle et les résultats ne sont pas encore probants. A l'heure actuelle, pour rentrer avec de bonnes prises, les pêcheurs utilisent leur connaissance du milieu naturel. La moitié des pêches

mondiales provient de zones de remontées d'eaux froides proches des côtes occidentales (phénomène appelé *upwelling*), qui représentent au plus 5% de la surface océanique. De telles remontées d'eaux froides se produisent dans les zones à fortes perturbations de surface. Pour que l'eau remonte, il faut que l'eau plus chaude de la surface soit balayée par les vents et emportée par les courants de surface. C'est le cas dans les zones cycloniques. C'est aussi le cas dans les régions subtropicales sur les rives occidentales des continents, où l'action

combinée des alizés et de la force de Coriolis pousse l'eau vers l'ouest. Le long des côtes du Chili et du Pérou, le courant froid de Humboldt, enrichi des eaux froides du fond, permet le développement d'une vie marine très appréciée des pêcheurs. Le phénomène du Niño empêche, au moins en partie, la remontée des eaux riches en éléments nutritifs, réduisant les ressources des pêcheurs péruviens de façon dramatique. Au contraire, dans les zones de calmes équatoriaux, les eaux reçoivent très peu d'apport du fond et restent particulièrement pauvres.

El Niño/La Niña

Dans l'océan Pacifique équatorial et tropical, les courants et les échanges d'énergie avec l'atmosphère composent le système climatique ENSO. Les fluctuations d'ENSO permettent de décrire deux phases majeures : El Niño et La Niña.

Pendant El Niño, les eaux chaudes se déplacent en surface du Pacifique ouest vers les côtes sud-américaines.

Pendant La Niña, ce sont les eaux froides de l'est Pacifique qui migrent vers l'ouest du bassin.

Ces déplacements inverses des eaux de surface s'expliquent par une variation du régime des vents. Il en résulte des épisodes de sécheresse à l'ouest du bassin pendant El Niño et à l'est pendant La Niña. L'amplitude de chacune des phases, de même que leur fréquence, sont très variables. On parle de Niño fort, comme celui de 1982/83 ou encore celui de cette année, quand les conséquences climatiques (sécheresses, cyclones, pluies diluviennes) sur les populations humaines sont particulièrement marquées et étendues dans le temps.

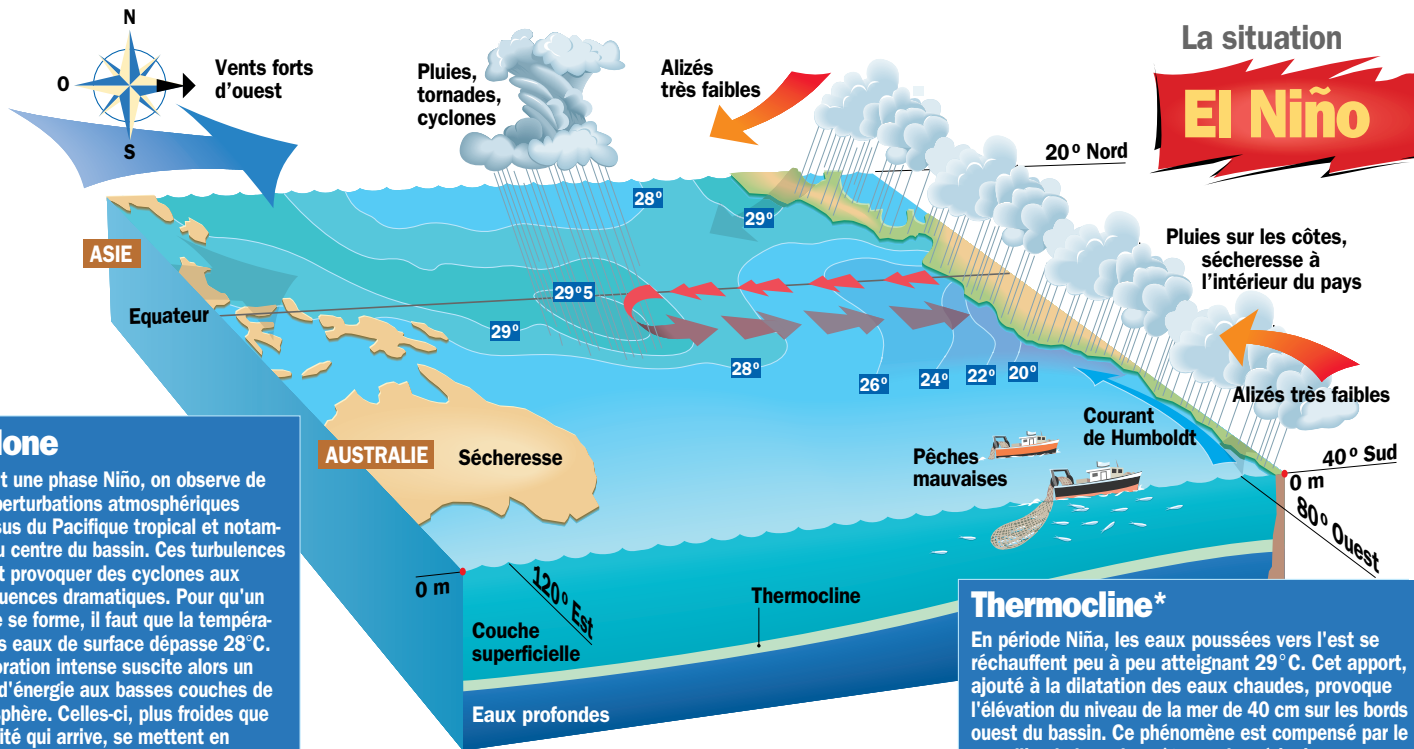
L'événement El Niño : un exemple de fluctuation du couple océan-atmosphère

Les relations de l'océan et de l'atmosphère régissent le climat de la planète. Dans le Pacifique, les fluctuations irrégulières du système climatique ENSO (El Niño-Southern Oscillation) provoquent des perturbations locales qui ont des répercussions globales.

Le très fameux El Niño constitue l'une des phases de ce phénomène.

La situation

El Niño



Cyclone

Pendant une phase Niño, on observe de fortes perturbations atmosphériques au-dessus du Pacifique tropical et notamment au centre du bassin. Ces turbulences peuvent provoquer des cyclones aux conséquences dramatiques. Pour qu'un cyclone se forme, il faut que la température des eaux de surface dépasse 28°C. L'évaporation intense suscite alors un apport d'énergie aux basses couches de l'atmosphère. Celles-ci, plus froides que l'humidité qui arrive, se mettent en mouvement tourbillonnant par l'action de la force de Coriolis.

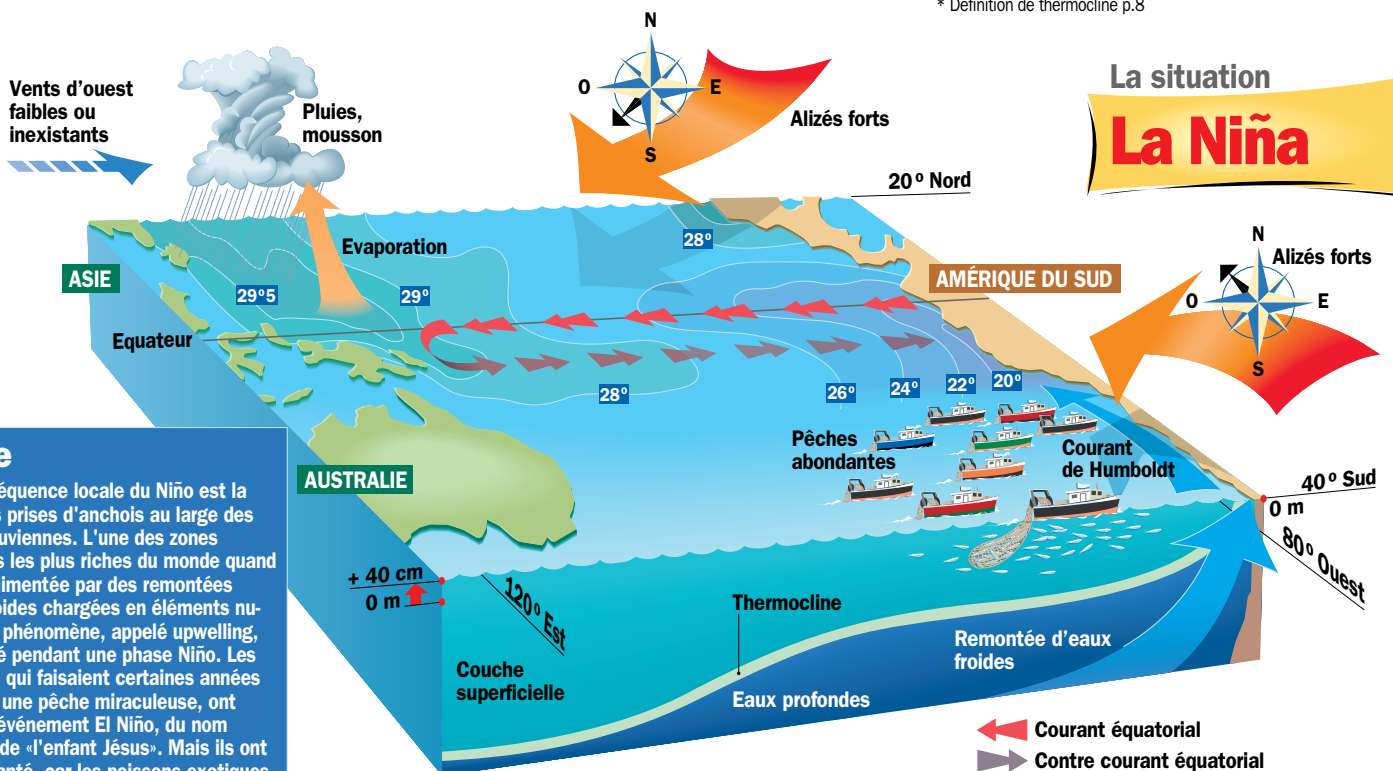
Thermocline*

En période Niña, les eaux poussées vers l'est se réchauffent peu à peu atteignant 29°C. Cet apport, ajouté à la dilatation des eaux chaudes, provoque l'élévation du niveau de la mer de 40 cm sur les bords ouest du bassin. Ce phénomène est compensé par le upwelling le long des côtes sud-américaines. En même temps, la thermocline, subit une inclinaison qui s'atténue durant une phase Niño.

* Définition de thermocline p.8

La situation

La Niña



Pêche

Une conséquence locale du Niño est la chute des prises d'anchois au large des côtes péruviennes. L'une des zones de pêches les plus riches du monde quand elle est alimentée par des remontées d'eaux froides chargées en éléments nutritifs. Ce phénomène, appelé upwelling, est bloqué pendant une phase Niño. Les pêcheurs, qui faisaient certaines années vers Noël une pêche miraculeuse, ont baptisé l'événement El Niño, du nom espagnol de «l'enfant Jésus». Mais ils ont vite déchanté, car les poissons exotiques qui voyagent avec les eaux chaudes depuis l'ouest, ne remplacent pas les énormes pêches connues en période Niña.