

La marée

← Précédente Accueil → Suivante

Rôle des astres

[Plan](#)

L'onde de marée

La marée est le mouvement périodique de montée et descente du niveau de la mer. Savez-vous vraiment pourquoi ?

Spectre de la marée

Pour vous guider dans ce tour voici les points qui seront expliqués :

Prédiction de la marée

- ◆ L'influence de la Lune et du Soleil
- ◆ La marée est une onde qui tourne dans les océans
- ◆ La marée est un peu comme un son musical
- ◆ Comment prédit-on la marée ?

Recherche sur la marée

Que reste-t-il à découvrir sur la marée ?

Lexique



← Précédente → Suivante

Les ondes dans l'océan

← Précédente Accueil → Suivante



[Plan](#)

◆ [Qu'est-ce qu'une onde ?](#)

◆ Quel est le [mouvement](#) des particules d'eau au passage de l'onde ?

- Cas des [ondes courtes](#)
- Cas des [ondes longues](#)

◆ Quelle est la [vitesse](#) de propagation d'une onde ?

◆ Comment [classer](#) les ondes ?

◆ Ondes forcées par le vent : [houle, vagues](#)

- [Pourquoi](#) la houle est-elle une onde courte ?
- Quels sont les [facteurs](#) qui déterminent l'amplitude, la période et la longueur d'onde de la houle ?
- Que [devient la houle](#) en arrivant près des côtes ?

◆ Ondes forcées par les tremblements de terre : [tsunamis](#)

- [Pourquoi](#) les tsunamis sont-ils des ondes longues ?
- Les [tsunamis](#) dans l'histoire
- [Pourquoi](#) les tsunamis sont-ils si dangereux, si redoutés ?

◆ Ondes forcées par les astres (soleil, lune) : marées, ondes internes

Mise à jour : 23/08/01
Ifremer



L'océan en mouvement

→ Suivante

- ◆ [Pourquoi l'océan bouge-t-il?](#)
- ◆ [La circulation océanique](#)
- ◆ [Vagues et ondes](#)
- ◆ [La marée](#)
- ◆ [L'océan et le climat](#)
- ◆ [El Nino](#)
- ◆ [Observer l'océan](#)

Contribution : S. Speich, B. Blanke, V. Thierry, G. Roulet, E. Da Costa, T. Huck, L. Hua, Ph. Le Bot

[Laboratoire de Physique des Océans \(DRO/LPO\)](#)

Unité mixte de recherche CNRS-IFREMER-UBO n° 6523



CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Mise à jour : 06/11/02
Ifremer

→ Suivante



Plan

Le phénomène ENSO (El Niño / Southern Oscillation)



1. Pourquoi prévoir le climat ?

La marche des saisons imprime un rythme à la vie sur Terre. Presque partout, le climat oscille comme un pendule entre été et hiver. Même aux tropiques, où le climat est chaud tout l'année, des saisons pluvieuses (les moussons) alternent avec des saisons sèches, avec chacune ses régimes de vent caractéristiques.

Pour se faire "une place au soleil", les hommes ont appris à s'adapter au rythme des saisons. Année après année, ils ont semé et récolté, élevé du bétail, déployé des bateaux de pêche, préparé des expéditions de chasse, selon un calendrier bien défini. Des siècles de tradition ont influencé la manière dont nous organisons aujourd'hui nos activités, comme les projets de construction, les campagnes militaires, les vacances scolaires, ...

Mais il n'est pas toujours possible de se fier au rythme des saisons. Quelquefois l'Océan Pacifique tropical et une grande fraction de l'atmosphère globale semblent obéir à une musique différente, modifiant les habitudes et perturbant d'innombrables espèces animales et végétales, et de millions d'êtres humains. De manière à permettre d'anticiper ces à-coups occasionnels dans la marche des saisons et d'aider une meilleure planification des économies, les scientifiques cherchent de comprendre ces rythmes rivaux, dont le plus marqué se nomme El Niño et présente une alternance entre un climat "normal" et un ensemble de conditions climatiques "différentes" (mais récurrentes) dans le Pacifique.

2. El Niño, qu'est-ce que c'est ?

L'expression El Niño (signifiant "l'Enfant Jésus" en espagnol) était utilisé à l'origine par les pêcheurs le long des côtes de l'Équateur et du Pérou et s'appliquait à un courant océanique chaud qui apparaît habituellement au moment de Noël pour ne disparaître que quelques mois plus tard. Les poissons sont alors moins abondants pendant ces intervalles chauds, et les pêcheurs souvent en profitent pour réparer leur équipement de pêche et rester avec leurs familles. Certaines années, cependant, l'eau est particulièrement chaude, et l'arrêt de la saison de pêche s'éternise jusqu'à mai ou quelquefois juin. Avec le temps, l'utilisation de l'expression "El Niño" a été réservée à ces intervalles exceptionnellement chauds et marqués, qui non seulement perturbent les vies de ces pêcheurs sud-américains, mais également, apportent des pluies intenses.

Au cours des 40 dernières années, 9 El Niño ont affecté la côte sud américaine. Le dixième est en cours... La plupart ont coïncidé avec une augmentation de l'eau de la mer non seulement le long de la côte mais également aux Îles Galápagos, et sur une ceinture qui s'étend environ 8000 km à travers le Pacifique équatorial. Les événements les moins marqués correspondent à une augmentation des températures d'environ 1°C et à un impact mineur sur les pêcheries sud-américaines. Mais les plus violents, comme celui de 1982-1983, ont non seulement laissé leur empreinte sur la vie marine et le climat locaux, mais aussi sur des conditions climatiques à l'échelle de la planète.

3. L'événement de 1982-1983

L'El Niño de 1982-83, qui est souvent considéré comme le plus intense de ce siècle, n'avait pas été prévu ni même reconnu par les scientifiques pendant les premières étapes de son développement. Rétrospectivement ses origines peuvent être détectées en mai 1982 quand les vents d'est de surface (les alizés) qui habituellement s'étendent des Îles Galápagos jusqu'en Indonésie ont commencé à décroître. À l'ouest de la ligne de changement de date, les vents se sont inversés, associés au début d'une période de temps orageux.

Au cours des quelques semaines qui ont suivi, l'océan a commencé à réagir aux changements d'intensité et de direction du vent. Le niveau de la mer aux Îles Christmas dans le Pacifique central s'est élevé de près de 10 cm. En octobre, le niveau de la mer était anormalement élevé de près de 25 cm sur près de 6000 km à partir de l'Équateur. Alors qu'il s'élevait dans le Pacifique est, il s'affaissait simultanément dans le Pacifique ouest, exposant (et détruisant) les couches supérieures des fragiles récifs coralliens qui entourent de nombreuses îles. Les températures de surface aux Îles Galápagos et le long de la côte de l'Équateur étaient passées de 22°C à plus de 27°C !

En réponse à ces modifications de l'Océan Pacifique, la flore et la faune marines ont rapidement réagi (Figure 1). Après l'augmentation de niveau de la mer aux Îles Christmas, les oiseaux de mer abandonnèrent leur progéniture et se dispersèrent sur tout l'océan en quête désespérée de nourriture. Lors du retour à la normale de la mi 83, 25% des phoques et otaries adultes et tous les nouveaux nés étaient décédés. De nombreuses espèces de poisson connurent un sort équivalent. Le long des côtes qui s'étendent du Chili à la Colombie Britannique les températures de la mer étaient supérieures à la normale, et les poissons qui vivent habituellement dans les eaux tropicales ou subtropicales avaient migré vers les pôles. En contrepartie certaines espèces ont bénéficié de ces conditions inhabituelles comme en attestent les récoltes inattendues de coquilles Saint-Jacques sur les côtes équatoriennes.

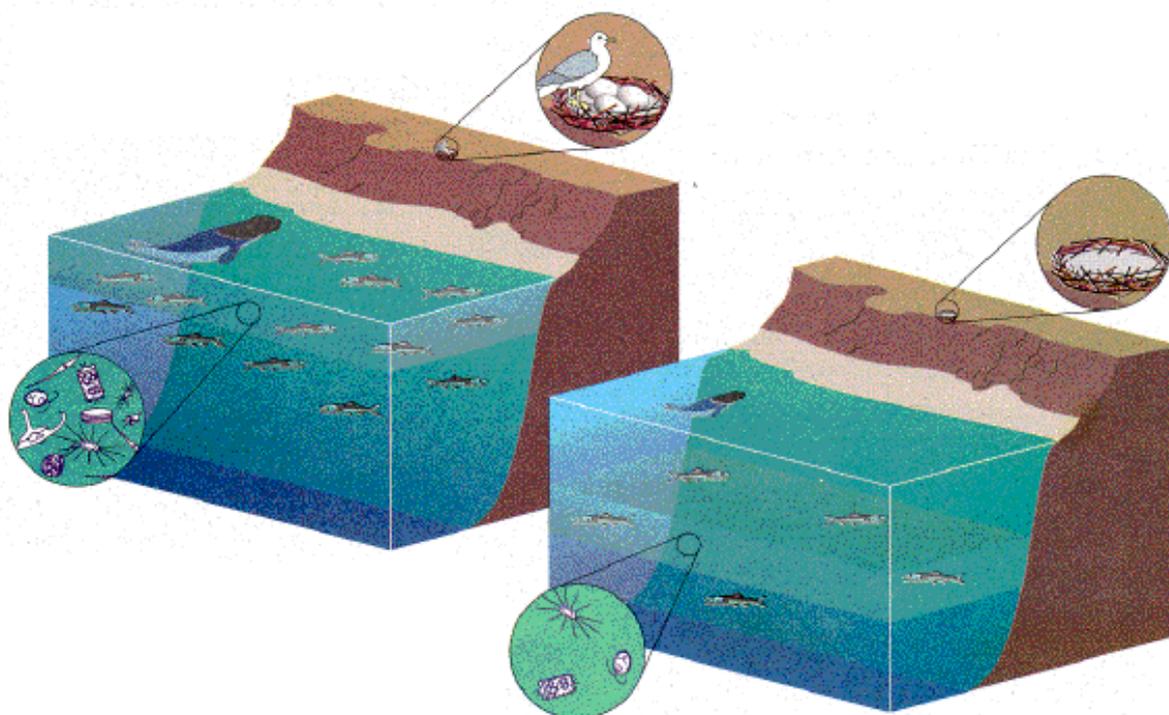


Figure 1: Ces figures montrent le contraste saisissant qui existe pour l'écosystème marin le long des côtes du Pérou et de l'Équateur entre une année normale (à gauche) et une année El Niño (à droite). L'eau chaude et pauvre en nutriments apportée par un El Niño ne peut abriter que peu de phytoplancton (petites créatures qui sont à la base de la chaîne alimentaire marine). Les poissons, otaries et autres animaux marins doivent plonger plus profondément dans l'océan pour chercher de la nourriture. Les oiseaux de mer se dispersent sur les océans, en abandonnant leurs petits.

Le El Niño de 1982-1983 a aussi produit des effets dramatiques sur les continents. En Équateur et dans le nord du Pérou environ 250 cm de pluie tombèrent pendant 6 mois, transformant le désert côtier en prairie, avec l'apparition de 6 lacs. L'apparition d'une nouvelle végétation a entraîné l'arrivée d'essaims de sauterelles, permettant l'expansion des colonies d'oiseaux. Les nouveaux lacs ont également fourni un habitat temporaire pour les poissons qui avaient remonté le courant des rivières depuis la mer pendant les inondations, et qui étaient désormais prisonniers. Beaucoup d'entre eux furent attrapés par les riverains lorsque ces lacs s'asséchèrent. Dans certains estuaires inondés, la production de crevettes a atteint des records, comme d'ailleurs le nombre de cas de malaria (induits par la recrudescence des moustiques).

Comme le montrent ces exemples, les impacts économiques de cet El Niño furent très étendus. Le long de la côte sud-américaine, les pertes ont dépassé les bénéfices. Les industries de pêche de l'Équateur et du Pérou ont terriblement souffert quand leurs prises d'anchois se sont évanouies et quand les sardines se sont enfuies vers les eaux chiliennes (plus froides). Plus vers l'ouest, les anomalies de vent ont dérouté les typhons de leurs routes habituelles, vers Hawaii ou Tahiti non préparées à de telles conditions météorologiques. Ces anomalies ont aussi déplacé les pluies des moussons sur le Pacifique central, au lieu du Pacifique ouest. Sécheresses et feux de forêt se sont alors déclenchés en Indonésie et en Australie. Des orages se sont abattus sur la Californie méridionale en hiver, et ont causé des inondations sur tous le sud des États-Unis, tandis que les stations de sport d'hiver du nord avaient à se plaindre d'une saison trop peu froide et d'un manque évident de neige. Le coût total pour la planète de cet El Niño a été évalué à plus de 100 milliards de francs. Les impacts psychologiques, ou même le nombre de victimes, sont plus difficiles à évaluer.

4. El Niño et le climat

Le lien entre ces effets climatiques disséminés sur le globe et El Niño est maintenant bien établi. Il a pourtant fallu du temps aux scientifiques pour comprendre comment s'assemblaient les différents morceaux du puzzle, des courants océaniques aux vents et aux pluies intenses. Voici plusieurs années, le scientifique britannique Sir Gilbert Walker a en fait posé les premiers éléments de la réflexion.

Pendant les années 20, tandis que les scientifiques d'Amérique du sud étaient occupés à documenter les effets locaux de El Niño, Walker était affecté en Inde, et essayait de trouver des moyens utiles à la prévision de la mousson asiatique. En étudiant les données atmosphériques à sa disposition, il s'aperçut d'une corrélation remarquable entre les relevés barométriques de l'est et de l'ouest du pacifique. Il se rendit compte que la pression augmentait dans l'ouest quand elle s'affaissait dans l'est, et inversement. Il utilisa l'expression "Southern Oscillation" pour caractériser ce mouvement de balançoire visible dans les données barométriques.

Pendant les phases d'indice haut de ce mouvement oscillant, la pression est élevée dans l'est du pacifique et basse dans l'ouest. Le long de l'équateur, le contraste zonal (longitudinal) de pression accélère les vents de surface d'est en ouest, des Îles Galápagos jusqu'en Indonésie. Pendant les phases d'indice bas, la différence de pression entre les deux extrémités du bassin s'atténue, et les alizés de surface s'affaiblissent. C'est dans le Pacifique ouest que de produisent les modifications de vent les plus marquées. À l'ouest de la ligne de changement de date les alizés disparaissent alors qu'ils sont juste atténués à l'est (Figure 2).

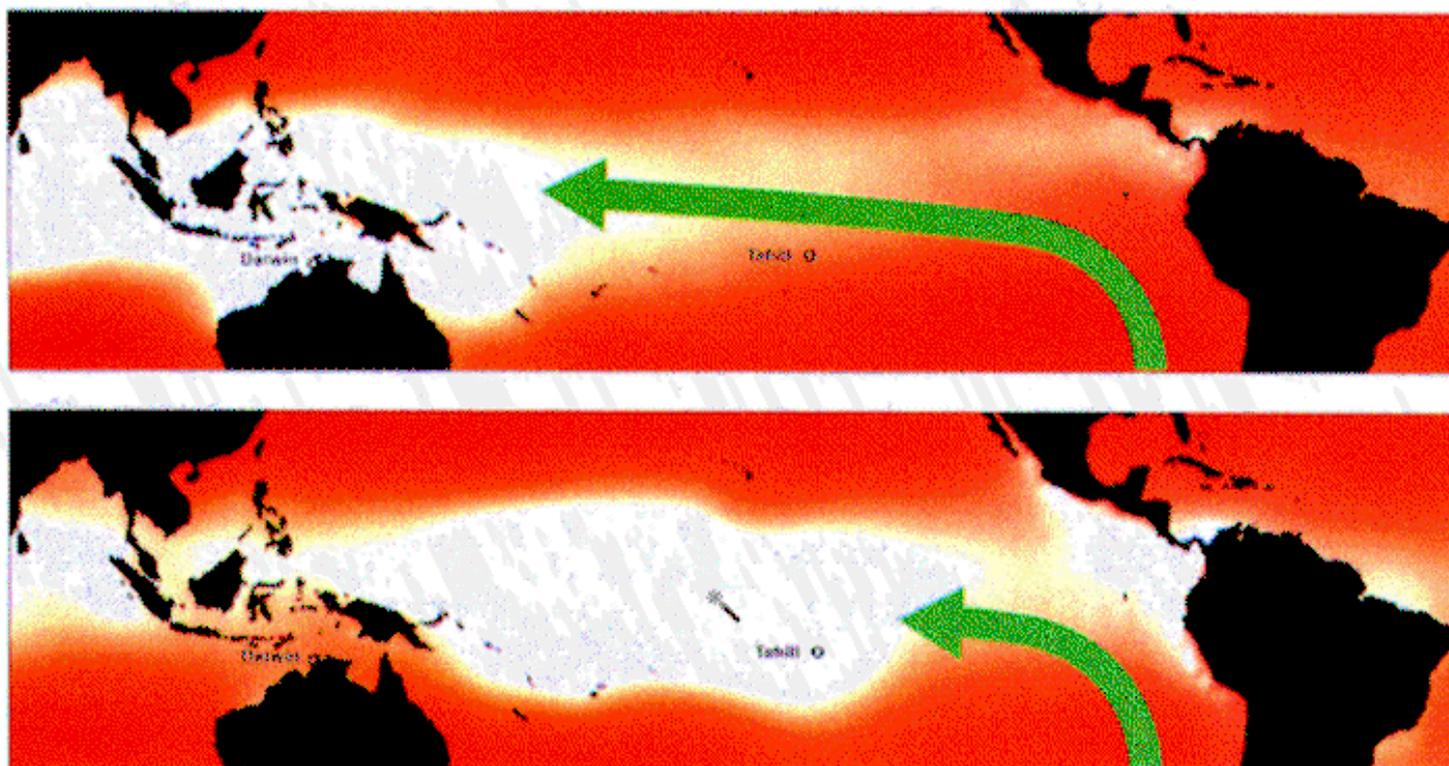


Figure 2: Sir Gilbert Walker a fourni un élément important à la compréhension d'El Niño quand il découvrit que les pressions au niveau de la mer dans le Pacifique sud oscillaient entre deux états distincts. Pendant une phase d'indice haut de ce que Walker a dénommé "Oscillation Australe" (en haut, pour novembre 1988), la pression est plus élevée (rouge sombre) près et à l'est de Tahiti que plus à l'ouest de Darwin. ce gradient de pression le long de l'équateur entraîne l'air vers l'ouest (flèche longue). Quand l'atmosphère bascule dans une phase d'indice bas (en bas, pour novembre 1982), les baromètres sont à la hausse dans l'ouest et à la baisse dans l'est, signalant une réduction, voire une inversion, de la différence de pression entre Darwin et Tahiti. L'aplatissement de cette structure de pression provoque l'affaiblissement des alizés de surface, et leur retrait vers l'est. On sait que cette phase d'indice bas est habituellement accompagnée de conditions El Niño.

Walker se rendit compte que les saisons de mousson associées à un indice bas étaient souvent caractérisées par des sécheresses en Australie, en Indonésie, en Inde et dans différents secteurs de l'Afrique. Il énonça aussi le fait que ces indices bas étaient également associés à des hivers particulièrement doux dans le Canada occidental. Un de ses collègues l'attaqua dans une revue scientifique pour oser suggérer que des conditions climatiques dans des régions du globe aussi distantes pouvaient être liées. dans sa réponse Walker prédit, correctement, qu'une explication devait exister mais qu'elle devait vraisemblablement exiger une connaissance des structures du vent à des niveaux autres que le sol (ce qui était à l'époque difficilement observable).

pendant les décennies qui suivirent, les chercheurs ont ajouté de nouveaux morceaux à ce puzzle de l'oscillation australe. Une information de ce type provint d'une région du monde distante, sur laquelle Walker n'avait que peu de renseignements: les îles désertiques du Pacifique central équatorial. Selon les statistiques climatiques normales, ces îles stériles reçoivent autant de pluie que de nombreuses autres îles qui présentent au contraire une végétation luxuriante. L'origine de ce paradoxe devient triviale lorsqu'on examine les statistiques pour ces îles année par année: le plus souvent les précipitations sont en fait très faibles, voire nulles, mais à l'occasion de certaines années "de bas index" ce sont de véritables déluges qui s'y abattent jour après jour, mois après mois. Ainsi l'index de pression de Walker s'avère lié à des changements dramatiques de la distribution des précipitations dans les tropiques.

Vers la fin des années 60, le professeur Jacob Bjerknes mis en place une nouvelle pièce importante du puzzle. En fait, alors qu'il était jeune chercheur, Bjerknes avait établi sa renommée en publiant la première description compréhensible du cycle de vie des tempêtes aux moyennes latitudes. Près de 50 ans plus tard, il était le premier à voir une connexion entre les températures de surface anormalement chaudes, les alizés faibles et les fortes chutes de pluie qui accompagnent les conditions d'indice bas. C'est donc Bjerknes qui le premier établit que El Niño et l'oscillation australe étaient deux parties d'un même phénomène, souvent désigné par ENSO.

5. Tirer les leçons du passé

Contrairement à la marche des saisons, régulière et par conséquent facilement prévisible, El Niño se produit avec des intervalles de temps irréguliers, allant de 2 à 10 ans, et deux événements ne sont jamais tout à fait les mêmes. Ainsi, celui de 1982-83 prit les scientifiques par surprise parce qu'à la différence des événements précédents il n'avait pas été précédé par une période d'alizés renforcés à l'équateur. De plus, il se produisit de façon exceptionnellement tardive dans l'année.

De manière à se préserver de la possibilité de telles surprises (c'est à dire de l'arrivée d'un El Niño "dissident"), les scientifiques ont continué de documenté autant d'événements passés possible, en agençant ensemble des petits bouts d'évidences historiques issues de sources très variées (Figure 3) :

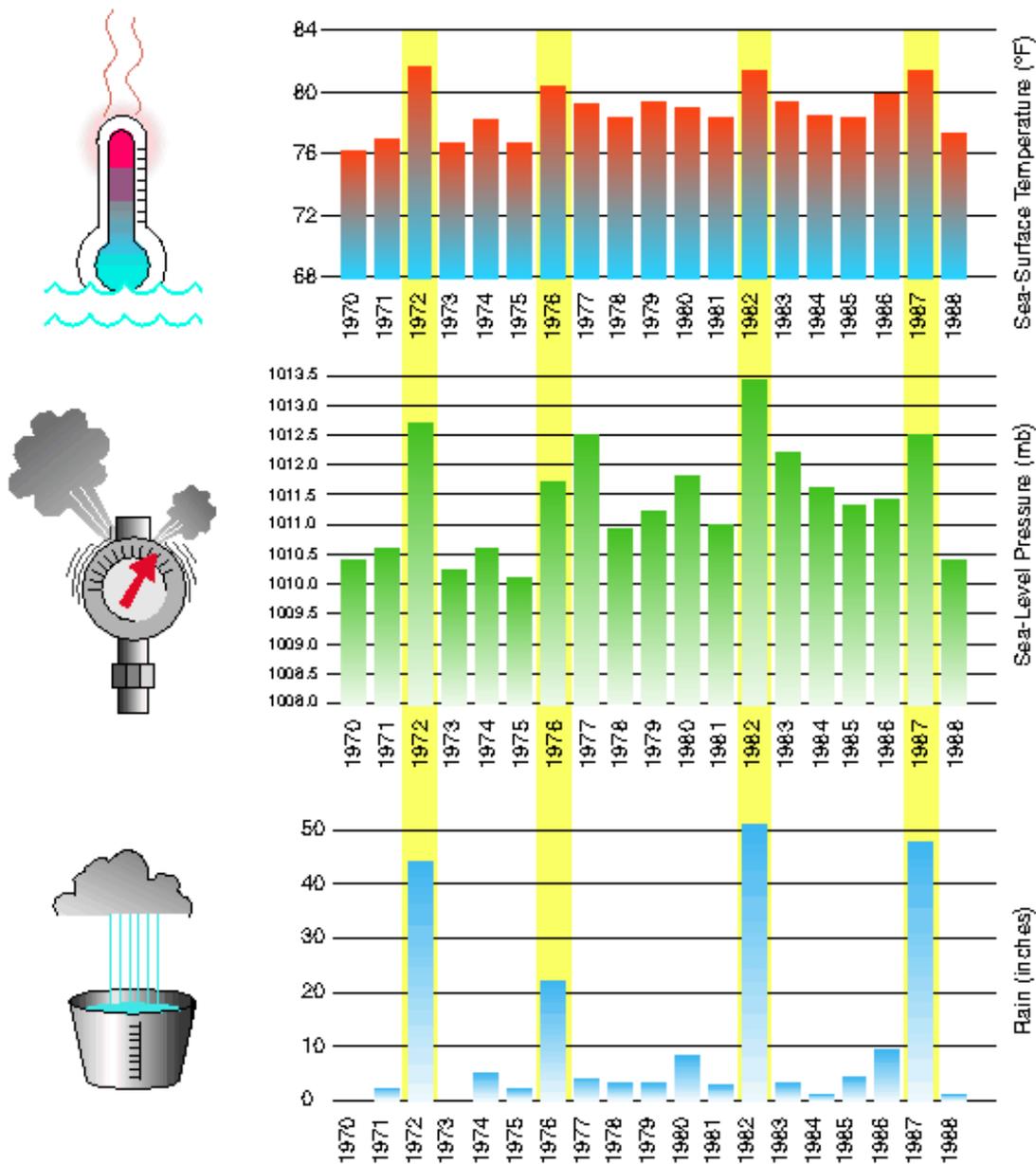


Figure 3: Les années El Niño (surlignées en jaune) ressortent clairement dans ces enregistrements de température de surface de lamer le long de l'équateur dans le Pacifique est, dans les données barométriques de Darwin, et dans les mesures de pluie aux îles Christmas dans le Pacifique central.

- Enregistrements de température de surface de la mer. Des millions de rapports de navires marchands ayant traversé l'équateur ont été recueillis sur plus d'un siècle. Puerto Chicama sur la côte péruvienne dispose de données de température depuis les années 30.
- Observations quotidiennes de pressions atmosphériques, de précipitations. Des stations météorologiques comme celle de Darwin en Australie disposent de données depuis plus de 100 ans.
- Archives des pêcheries d'Amérique du Sud.
- Écrits des colons espagnols implantés le long des côtes du Pérou et de l'Équateur, datant de la fin du 15ème siècle.

D'autres évidence indirectes, fondées sur des échantillons de corail (Figure 4), fournissent des renseignements sur la façon dont la fréquence des El Niño passés a varié à l'échelle des siècles voire des millénaires. Des données tirées des arbres les plus vieux (espacement variable entre deux anneaux de croissance consécutifs) renseignent également sur les événements du passé.



Figure 4: Les coraux tropicaux voient leur structure enrichie chaque année d'une nouvelle bande. Un corail comme celui représenté ici est assez vieux pour avoir acquis 100 de ces bandes de croissance. Leur composition chimique révèle la température et la salinité de l'eau à l'époque où elles ont été formées. Les scientifiques s'appuient entre autres sur ces évidences du passé pour déterminer le comportement d'El Niño dans des scénarios du climat futur.

6. Vents, upwelling, et la chaîne alimentaire

Pour comprendre comment El Niño affecte l'océan, il faut d'abord apprendre comment les vents de surface déplacent l'eau de l'océan pendant les années normales et comment les mouvements induits affectent les températures et les contenus en nutriments chimiques, disponibles à la base de la chaîne alimentaire. Nous allons considérer deux régions distinctes: le Pacifique équatorial qui s'étend vers l'ouest depuis les Îles Galápagos jusqu'à la ligne de changement de date, et les eaux côtières le long du Pérou de du sud de l'Équateur.

Les alizés qui soufflent le long de l'équateur et les vents du sud-est qui soufflent le long des côtes sud-américaines ont tous tendance à entraîner les eaux de surface sur leur chemin (Figure 5). Du fait de la rotation de la Terre, les courants sont déviés vers leur droite dans l'hémisphère nord, et vers leur gauche dans l'hémisphère sud. Les eaux de surface sont ainsi repoussées vers les pôles au niveau de l'équateur, et vers le large le long de la côte sud-américaine. Là où l'eau de surface est chassée, elle est remplacée par une eau plus profonde, plus froide, et riche en nutriments (phénomène d'upwelling). L'upwelling équatorial et l'upwelling côtier sont tous deux concentrés dans des régions très étroites (de l'ordre de 150 km), et sont aisément visibles par satellite.

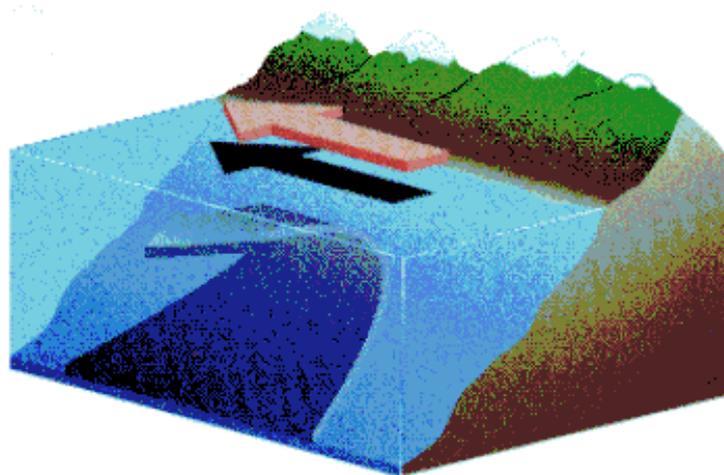


Figure 5: D'intenses vents du sud-est (flèche rouge) dominent le long de la côte de l'Équateur et du Pérou. Ces vents qui soufflent pendant les années normales et les années El Niño entraînent l'eau de surface vers le nord-ouest, et occasionnent la remontée vers la surface d'eaux froides et riches en nutriments (bleu foncé) le long de la côte du Pacifique est.

Les vents qui soufflent le long de l'équateur affectent aussi les propriétés de l'eau upwellée (Figure 6). En absence de vent, la couche limite entre l'eau chaude de surface et l'eau froide profonde (la thermocline) serait pour ainsi dire plate à l'échelle du Pacifique équatorial. Lorsque les alizés entraînent les eaux de surface vers l'ouest, la thermocline bascule en affleurant la surface dans le Pacifique est, et en s'enfonçant dans l'ouest.

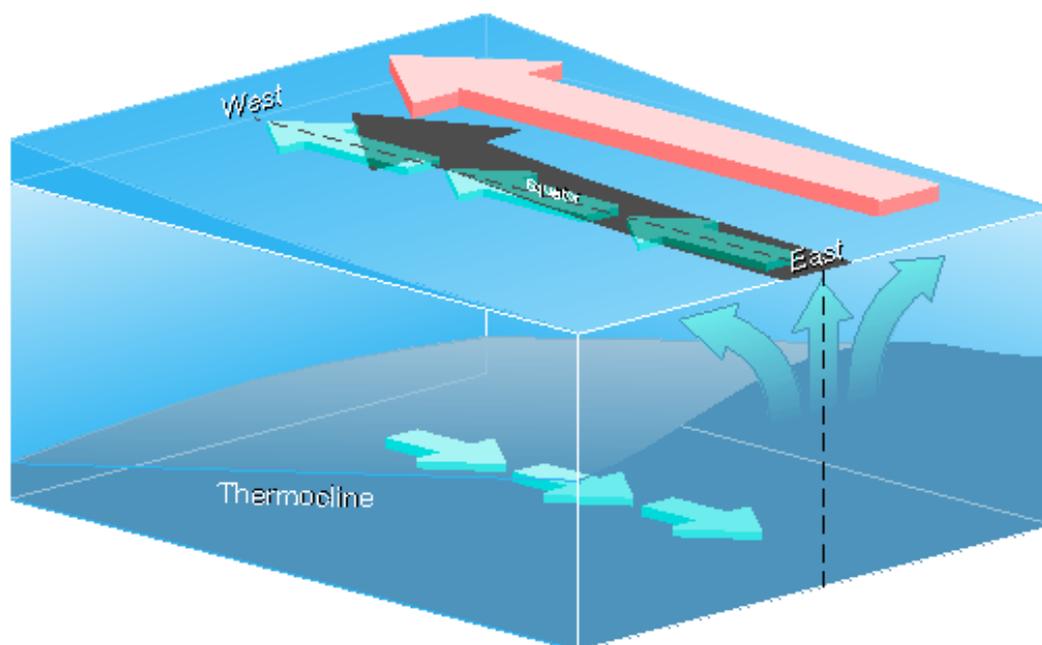


Figure 6: Les vents d'est (flèche rouge) entraîne l'eau de surface vers l'ouest le long de l'équateur. La rotation de la Terre dévie ce courant vers le nord dans l'hémisphère nord et vers le sud dans l'hémisphère sud, écartant les eaux de l'équateur et les remplaçant par de l'eau issue de couches plus profondes (flèches vers le haut). De plus, les vents provoquent l'accumulation des eaux dans la partie ouest du pacifique. Parce que l'eau plus chaude est moins dense, le niveau de la mer est plus élevé dans la partie ouest du bassin que dans la partie est, où les vents soufflent à pleine puissance. La thermocline qui marque la limite entre les eaux chaudes de surface et les eaux froides plus profondes (bleu foncé) est inclinée. Elle affleure la surface dans le Pacifique équatorial oriental.

L'eau froide sous la thermocline est riche en nutriments. Lorsque la thermocline est assez proche de la surface, le brassage induit par les vents est capable de les mélanger avec l'eau de surface. En présence de lumière (solaire), des espèces végétales minuscules (phytoplancton) utilisent ces nutriments pour produire une substance végétale verdâtre, la chlorophylle. La floraison du phytoplancton est très rapide, explosive, et en une semaine tous les nutriments disponibles sont utilisés. Ensuite le phytoplancton meure et coule. ces

floraisons sont observables par satellite (tâches vertes à la surface de l'océan) pendant la durée de vie de ces floraisons de phytoplancton. Ces tâches peuvent servir de marqueurs des endroits où les phénomènes d'upwelling apportent des nutriments à la surface.

L'eau nouvellement upwellée est plus froide que son environnement. Elle peut être suivie pendant plusieurs jours par de l'imagerie infrarouge qui révèle la température de la surface de la mer (Figure 7). Cette signature prend la forme d'une langue froide qui s'étend vers l'ouest le long de l'équateur depuis la côte sud-américaine .

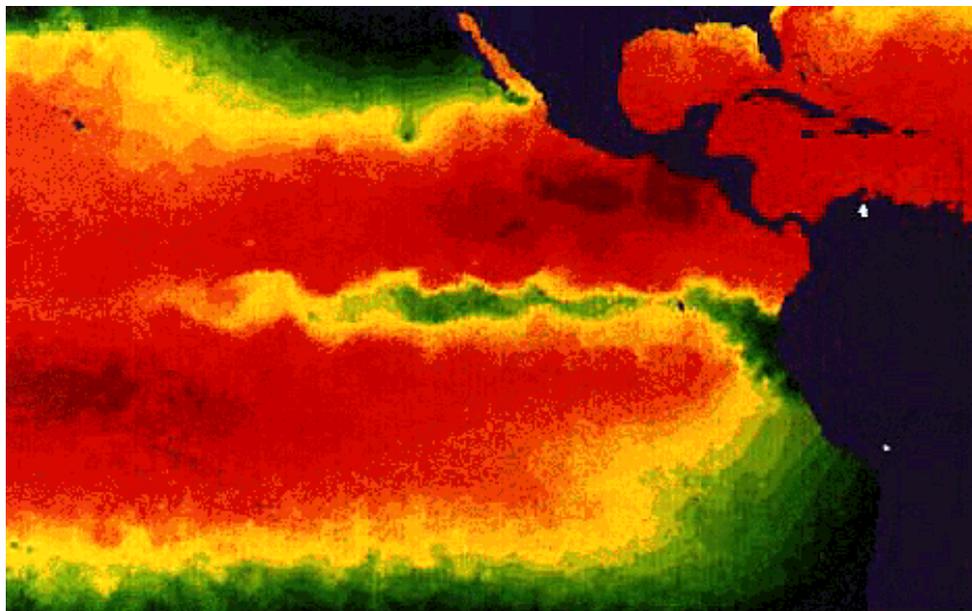


Figure 7: Cette carte montre la distribution de la température de surface de la mer le 31 mai 1988, quand le Pacifique équatorial était froid. Les eaux les plus chaudes sont indiquées en rouge foncé, et les eaux plus froides par du jaune puis du vert. On peut noter la langue d'eau froide récemment upwellée qui s'étend le long de l'équateur depuis la côte sud-américaine.

Ainsi, les vents contrôlent l'upwelling, qui lui-même contrôle la production de phytoplancton. Cette production affecte en retour les évolutions des minuscules animaux marins qui forment le zooplancton, qui le broutent, et finalement l'effet se fait ressentir à tous les échelons de la pyramide alimentaire marine. Les vents sont aussi responsables de l'apparition de la langue froide dans la structure horizontale de la température de surface de la mer.

7. Quand les vents faiblissent

Pendant des années El Niño, lorsque les alizés sont cantonnés dans le Pacifique est, l'océan répond de la manière suivante (Figure 8):

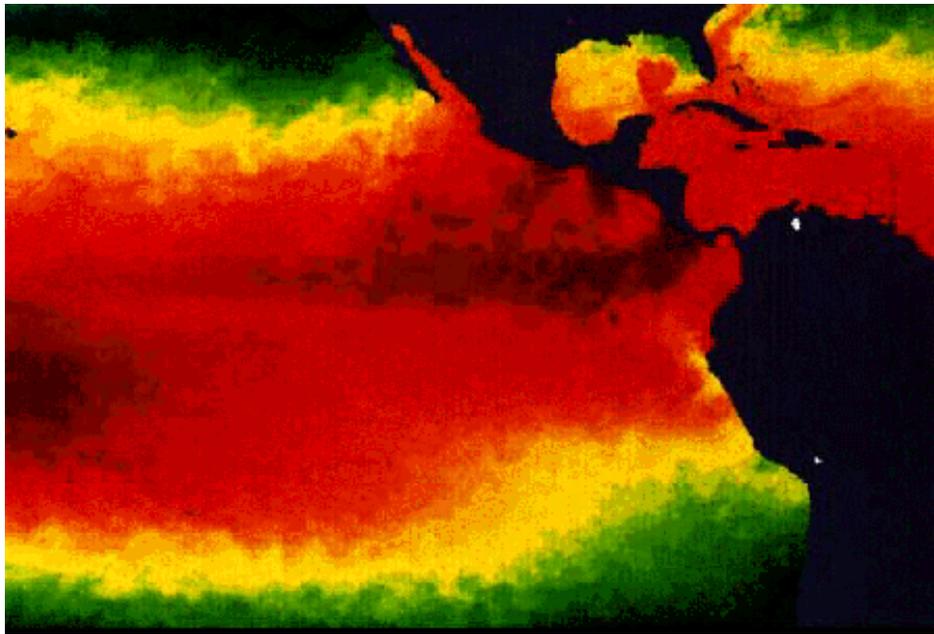


Figure 8: La température de surface de la mer apparaît très différente le 13 mai 1992, pour des conditions El Niño, quand la thermocline dans le Pacifique oriental était plus profonde que la normale et quand l'upwelling équatorial était supprimé. On peut noter l'absence d'une langue froide bien définie.

- La thermocline s'aplatit le long de l'équateur, remontant dans l'ouest et plongeant dans l'est de plusieurs dizaine de mètres. L'affaissement dans l'est est assez fort pour que l'upwelling côtier ne soit plus en mesure d'aspirer l'eau froide et riche en nutriments sous-jacente.
- L'upwelling équatorial décroît, réduisant d'autant plus l'apport en nutriments pour la chaîne alimentaire.
- La langue d'eau froide se rétracte ou disparaît (Figure 9).

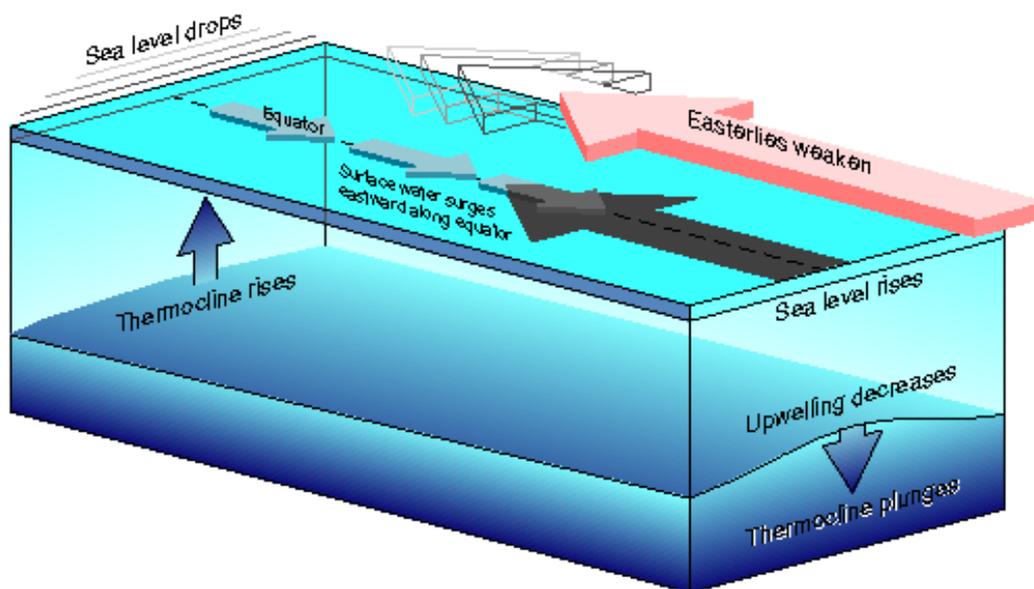


Figure 9: Les alizés (flèche rouge) qui s'étendent habituellement sur tout le Pacifique équatorial régressent vers l'est lors du déclenchement de conditions El Niño. Ceci déclenche des changements dans la couche supérieure de l'océan. Le long de l'équateur, la pente de la surface et la pente de la thermocline s'aplatissent toutes les deux.

- Le niveau de la mer s'aplatit, en remontant dans l'est et s'affaissant dans l'ouest. L'eau de surface déferle vers l'est du bassin.

Quand cet afflux d'eau relativement chaude atteint la partie est du bassin, quelques mois plus tard, la

présence du continent l'oblige à s'étendre vers le sud et vers le nord le long de la côte. Les sardines et autres espèces de poissons quittent cette zone, et le niveau de la mer monte. Ces effets ont pu être ressentis jusqu'au Canada au nord, et au milieu du Chili au sud.

8. Ou comment la mer affecte les vents en retour

Les océans et l'atmosphère entretiennent un dialogue continu, en s'écoutant et se répondant mutuellement. Jusqu'à présent nous nous sommes concentrés sur l'un des côtés de la conversation: comment les vents le long de l'équateur influencent la pente de la thermocline et l'intensité de l'upwelling. Les modifications induites sur la température de surface de la mer vont cependant affecter en retour les vents.

Quand les alizés soufflent à leur pleine puissance, l'upwelling d'eau froide le long du Pacifique équatorial refroidissent l'air qui le surplombe, le rendant trop dense pour qu'il s'élève assez haut pour permettre à la vapeur d'eau de se condenser et de former des nuages et des gouttes de pluie. Ainsi l'air reste libre de nuages pendant les années "normales", et la pluie dans la ceinture équatoriale est largement confinée dans l'extrême ouest du bassin, au voisinage de l'Indonésie (Figure 10).

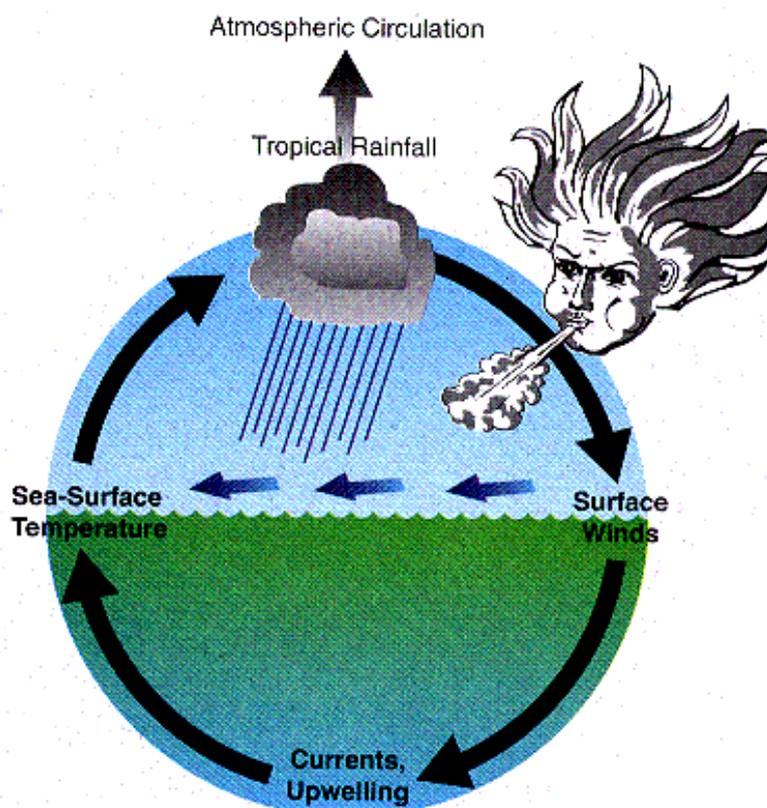


Figure 10: Comme des interlocuteurs engagés dans un dialogue, l'Océan Pacifique tropical et l'atmosphère qui le recouvre s'influencent mutuellement et interagissent. Des modifications dans la force des alizés (vents d'est) le long de l'équateur induisent des modifications des courants océaniques et de l'upwelling, qui induisent des modifications de la température de surface de la mer, qui en retour altèrent la distribution des pluies, qui altère la force des alizés, ...

Mais lorsque les alizés s'affaiblissent et régressent vers l'est pendant les premiers stades d'un événement El Niño, l'upwelling se ralentit et l'océan se réchauffe. L'air humide à la surface de l'océan se réchauffe également. Il devient assez léger pour former des nuages épais qui produisent de fortes pluies le long de l'équateur. Cette modification des températures de surface océaniques est donc responsable du déplacement vers l'est du maximum de pluie sur le Pacifique central. Les ajustement atmosphériques associés correspondent à une baisse de pression dans le Pacifique central et oriental, et à une augmentation de pression dans le Pacifique ouest (Indonésie et Australie), propice à une plus grande relaxation et un plus grand retrait des alizés (Figure 11).

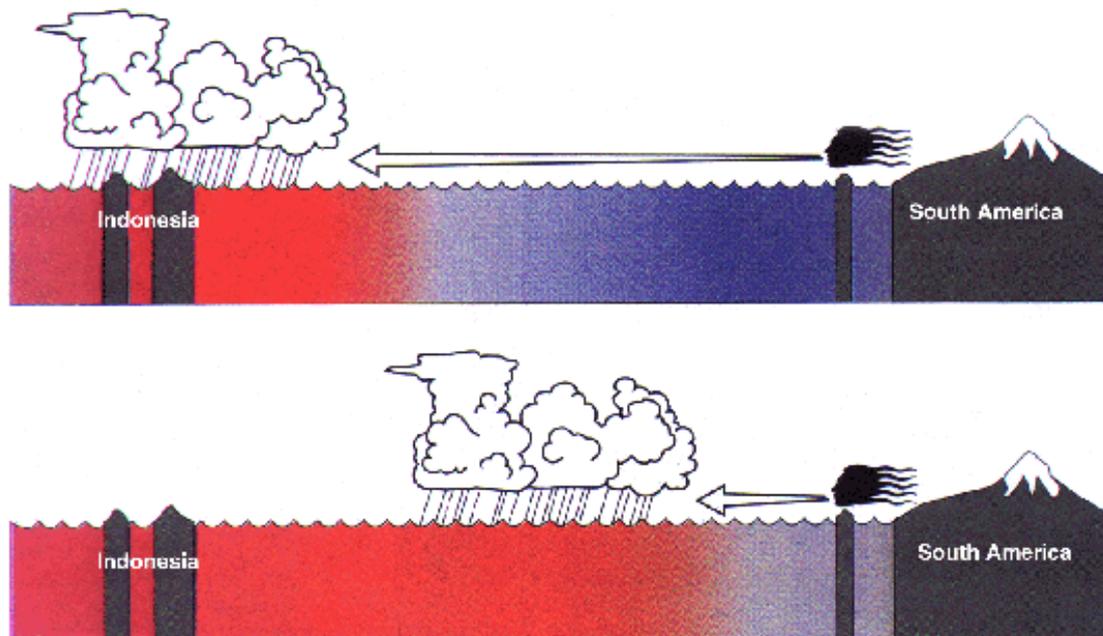


Figure 11: El Niño réarrange les distributions de pluie dans le Pacifique équatorial. Pendant des années normales (en haut), l'upwelling induit par les alizés de surface (flèche) maintient les eaux de surface du Pacifique central froides (bleu). Les fortes pluies sont confinées au dessus des eaux chaudes (rouge) qui entourent l'Indonésie sur le bord ouest du pacifique. Pendant un El Niño (en bas), les alizés faiblissent et régressent dans le Pacifique est, permettant au Pacifique central de se réchauffer, et aux zone de pluie de se déplacer vers l'est.

De cette manière, le dialogue entre le vent et la mer dans l'Océan Pacifique peut devenir de plus en plus intense, chaque interlocuteur renvoyant une réponse à chaque fois amplifiée. De petites perturbations dans l'océan ou l'atmosphère peuvent s'amplifier jusqu'au déclenchement éventuel d'un fort El Niño. De la même façon qu'il est souvent difficile d'incriminer l'un ou l'autre des partenaires dans la dégénérescence d'un dialogue, il est difficile d'identifier le changement subtil dans le système océan-atmosphère qui initie une transition hors de ou vers des conditions El Niño.

9. Les conséquences d'un El Niño à l'échelle du globe

Les à-coups du dialogue qui s'établit entre l'océan et l'atmosphère dans le Pacifique peuvent affecter par ondes de choc les conditions climatiques dans les régions les plus éloignées du globe. Ce message d'échelle planétaire est convoyé par des déplacements des régions de pluies tropicales, qui affectent ensuite les structures de vent sur toute la planète. On peut imaginer un courant par dessus de larges rochers. Ces rochers créent des trains d'onde, avec des creux et des crêtes, qui apparaissent à des positions fixes. Si l'un des rochers venait à changer de position ou de forme, l'allure du train d'onde serait modifiée et les creux et les crêtes apparaîtraient à des endroits différents (Figure 12).

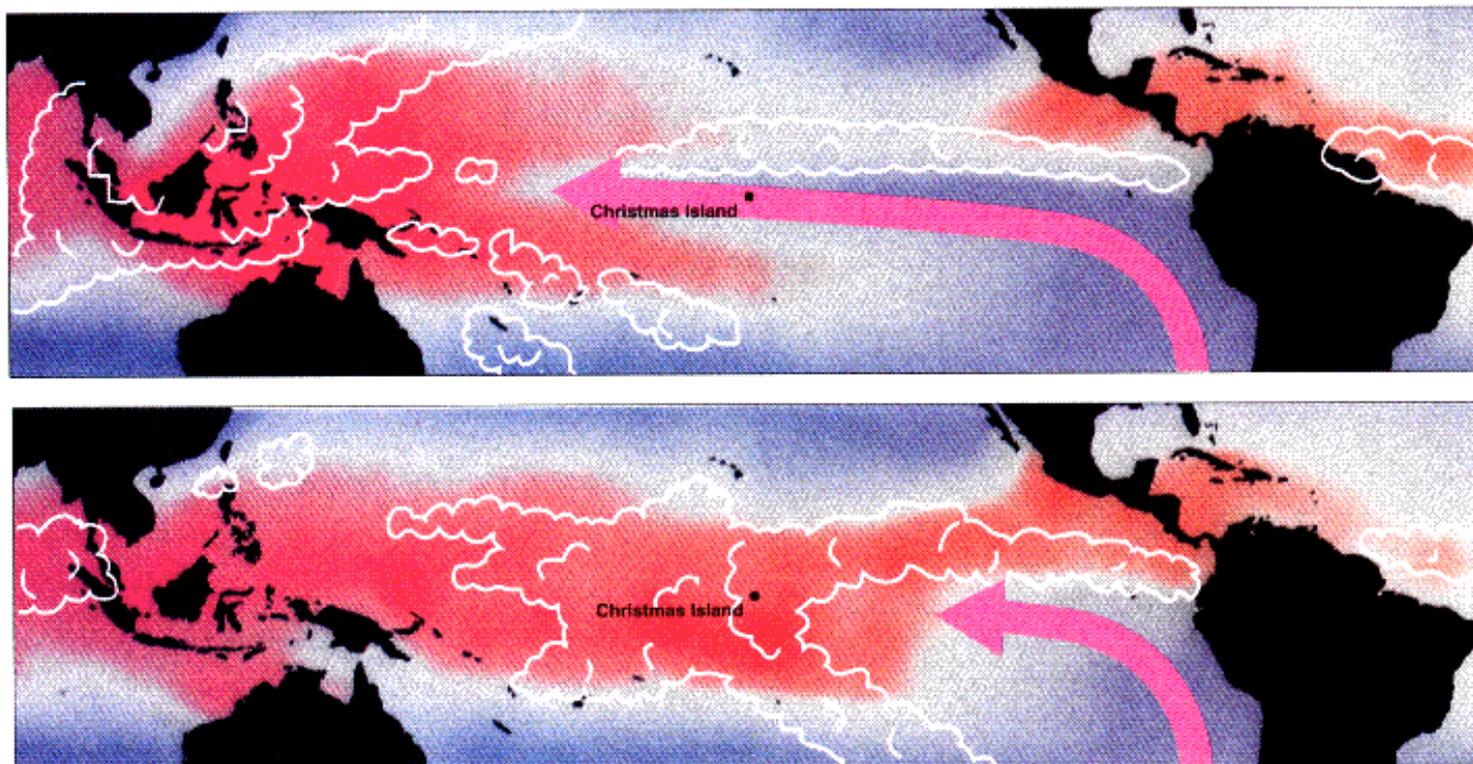
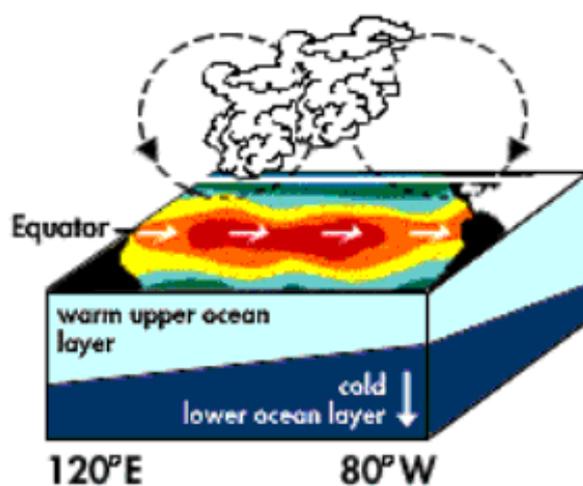
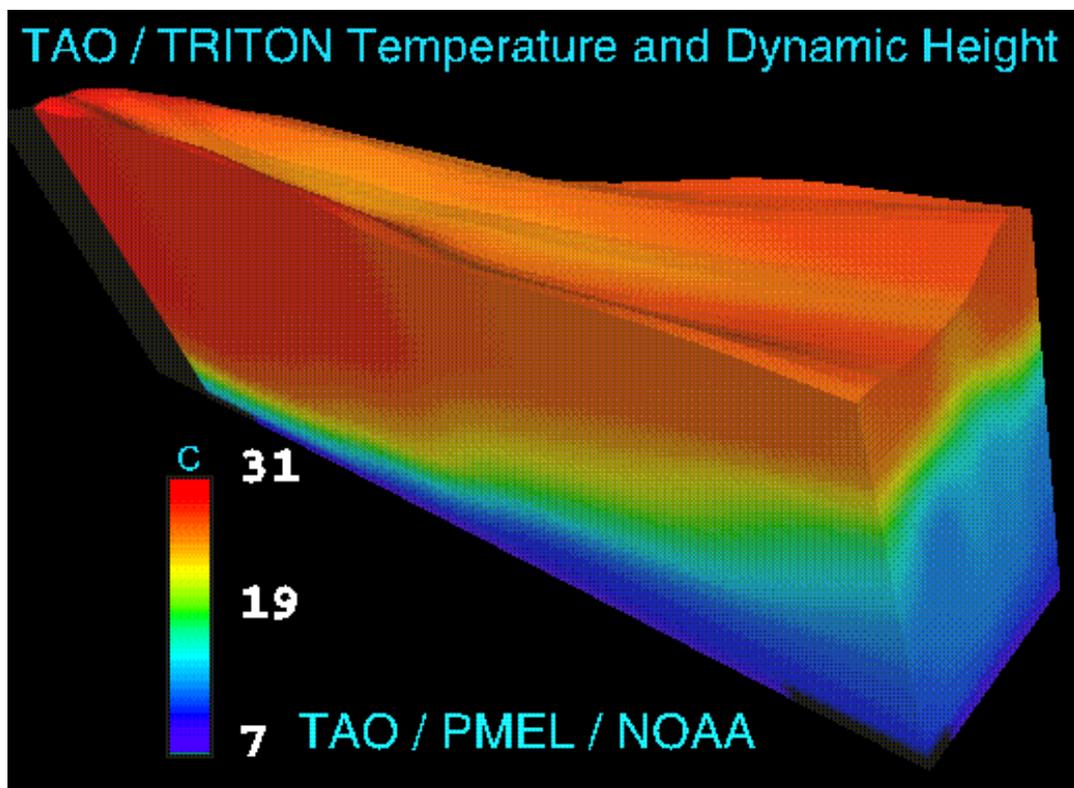


Figure 12: Voici une vision plus détaillée de la façon dont El Niño réarrange les régions de pluie sur le Pacifique tropical. Les couleurs indiquent la répartition des températures de surface de la mer pour le mois froid de novembre 1988 et pour le mois chaud (El Niño) de novembre 1982, c'est à dire pour les mêmes mois que ceux de la figure 4. Le rouge correspond aux eaux les plus chaudes, et le bleu correspond aux régions les plus froides. Les zones de fortes pluies, telles qu'elles étaient vues par satellites, sont indiquées par des nuages. Les vents de surface à l'équateur sont indiquées par des flèches. On peut noter la suppression des précipitations tropicales là où les températures de surface de la mer sont inférieures à 27°C (couleurs bleutées).



Cette animation est l'illustration tridimensionnelle de la figure 12



Vision tridimensionnelle du comportement de l'océan pendant le passage d'une phase normale à une phase El Niño. Les couleurs représentent la température de l'eau chaude à l'ouest en phase "normale". Les variations d'épaisseur de la couche océanique montrent les variations du niveau de la mer. En conditions "normales" le niveau de la mer est plus élevé à l'Ouest (sur les côtes Indonésienne) qu'à l'Est. Toujours pendant la phase "normale" les eaux froides de subsurface (en bleu) sont proches de la surface de la mer dans la partie Est du bassin (côtes Américaines). Pendant la phase El Niño, les eaux chaudes se déplacent vers l'Est, le niveau de la mer diminue à l'Ouest et augmente à l'Est. Les eaux froides de subsurface à l'Est s'éloignent de la surface.

Les nuages tropicaux porteurs de pluie déforment l'air qui les surplombe (8 à 16 km au dessus du niveau de la mer), comme des rochers affectent le cours d'un courant ou comme les îles modifient le profil de vent qui souffle sur elles (sur des milliers de km). Les ondes qui sont formées dans l'air au dessus de ces nuages vont déterminer les positions des moussons, et les routes des cyclones et ceintures des vents intenses qui les surplombent ("jet streams") séparant les régions chaudes et froides à la surface de la Terre. Pendant des années El Niño, quand la zone de pluie habituellement centrée sur l'Indonésie se déplace vers l'est vers le Pacifique central, les ondes présentes dans les couches hautes de l'atmosphère sont affectées, causant des anomalies climatiques sur de nombreuses régions du globe.

Les impacts de El Niño sur le climat aux latitudes tempérées sont les plus évidents pendant l'hiver. Par exemple, la plupart des hivers El Niño sont doux sur le Canada occidental et sur des régions du nord-ouest des États-Unis, et pluvieux sur le sud des États-Unis (du Texas à la Floride). El Niño affecte également les climats tempérés durant les autres saisons. mais, même pendant l'hiver, El Niño n'est qu'un des nombreux facteurs qui influencent le climat des régions tempérées. Les années El Niño ne sont donc pas toujours marquées par des conditions aussi typiques que celles répertoriées dans les tropiques (Figure 13).

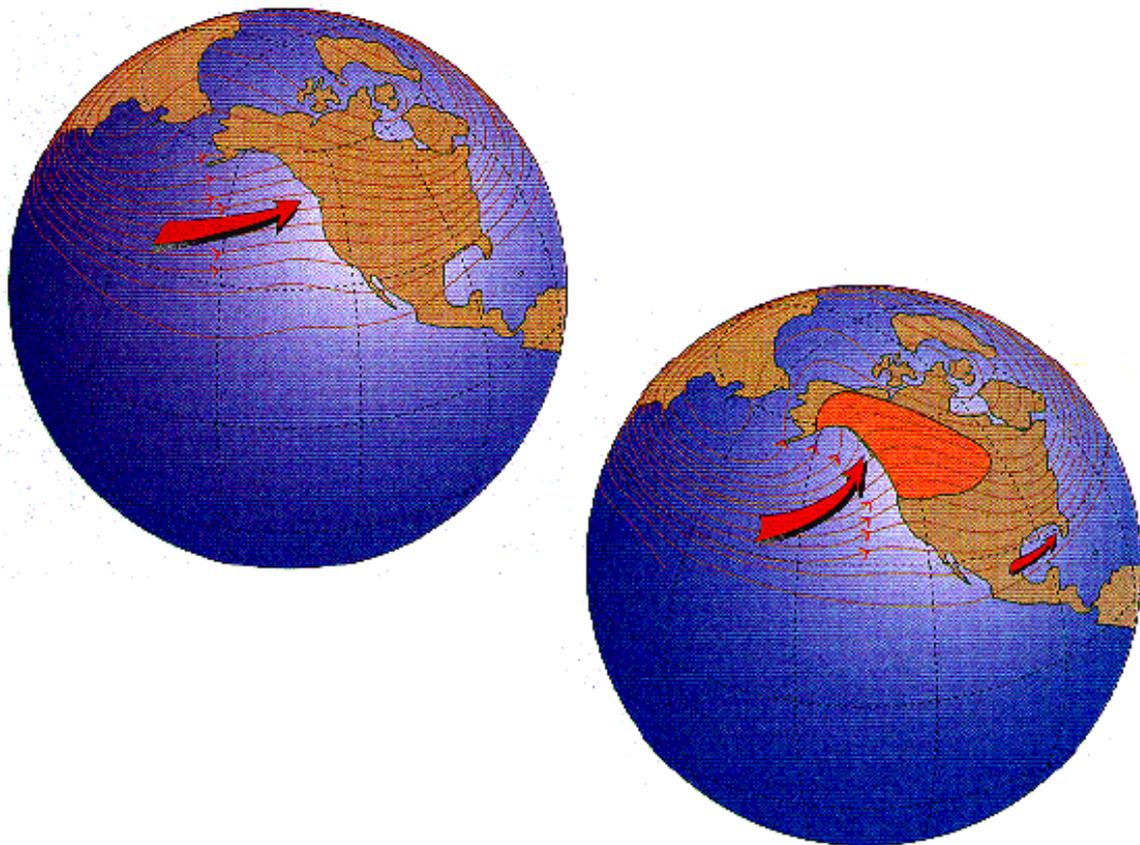


Figure 13: Les vents au niveau du jet-stream (petites flèches noires), 8 à 25 km au dessus du niveau de la mer, changent de parcours entre un hiver normal (en haut) et un hiver El Niño (en bas). Une dorsale de haute pression présente sur la côte ouest de l'Amérique du Nord pendant les hivers El Niño préserve des températures supérieures à la normale dans les régions dessinées en orange, et dirige les orages qui habituellement affectent les états de Washington et de l'Orégon plus vers le nord, au niveau de la côte de l'Alaska (flèche épaisse). Les conditions El Niño créent aussi un environnement favorable pour le développement d'orages dans le Golfe du Mexique, apportant des pluies intenses à presque tout le sud des États-Unis. Un phénomène analogue de renforcement des vents d'ouest se produit dans l'hémisphère sud pendant son hiver, apportant de fortes pluies à des régions du sud du Brésil, et du nord du Chili et de l'Argentine.

10. La prévision d'El Niño

Nous avons considéré jusqu'ici la façon dont un événement El Niño se développe, comment il perturbe le monde marin dans le Pacifique, comment il influence les caractéristiques du climat à travers tout le globe, et comment les conditions atmosphériques et océaniques anormales nous affectent. Les scientifiques vont maintenant plus loin dans la connaissance du phénomène en incorporant les descriptions des événements passés dans des modèles de prévision (des programmes informatiques conçus pour représenter, en termes d'équations, les processus qui se développent dans la nature). Ces modèles sont nourris d'informations, représentées par des nombres, qui décrivent l'état présent du système atmosphère-océan (comme par exemple des observations de vitesses du vent, de courants océaniques, de niveaux de la mer, de profondeurs de la thermocline le long de l'équateur) (Figure 14). Les modèles de prévision produisent en retour des séries de chiffres (!) susceptibles d'indiquer la façon dont le système va évoluer au cours des quelques saisons ou années à venir (Figure 15).

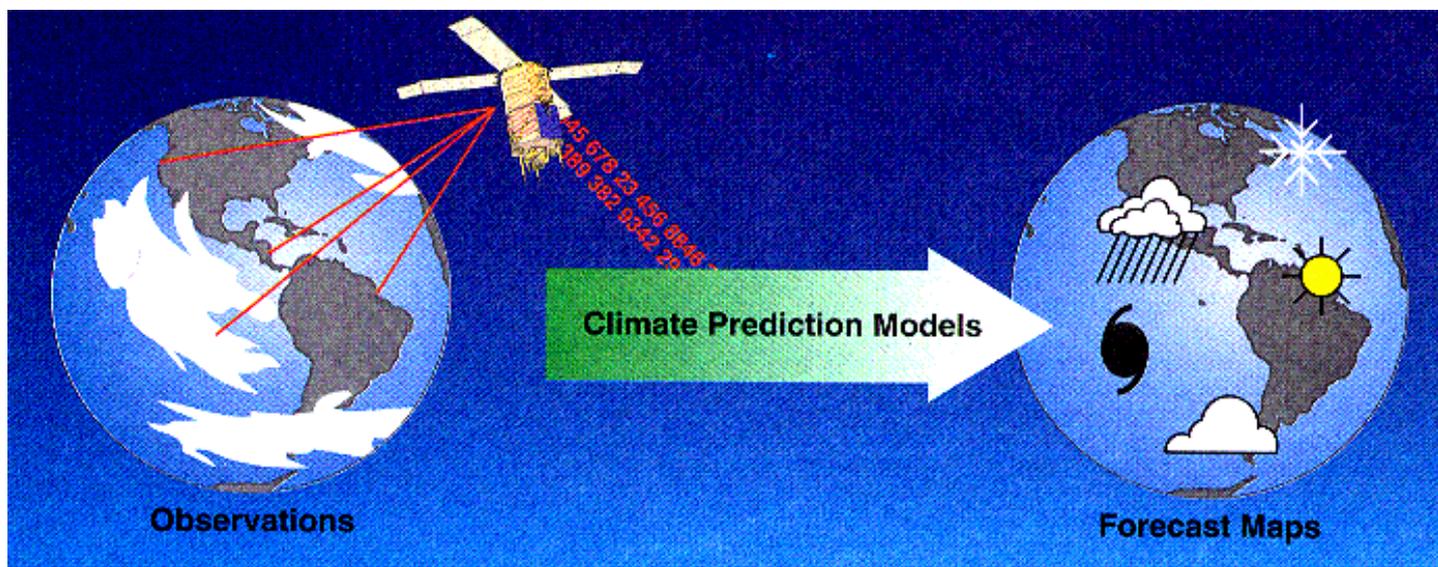


Figure 14: Des données de qualité (non entachées d'erreur) sur les conditions du moment, et des modèles numériques réalistes pour projeter cet état dans le futur sont au cœur des efforts des chercheurs, non seulement pour comprendre El Niño, mais aussi pour prévoir quand des événements se produiront dans le futur, et quels seront leurs impacts.

ENSO Observing System

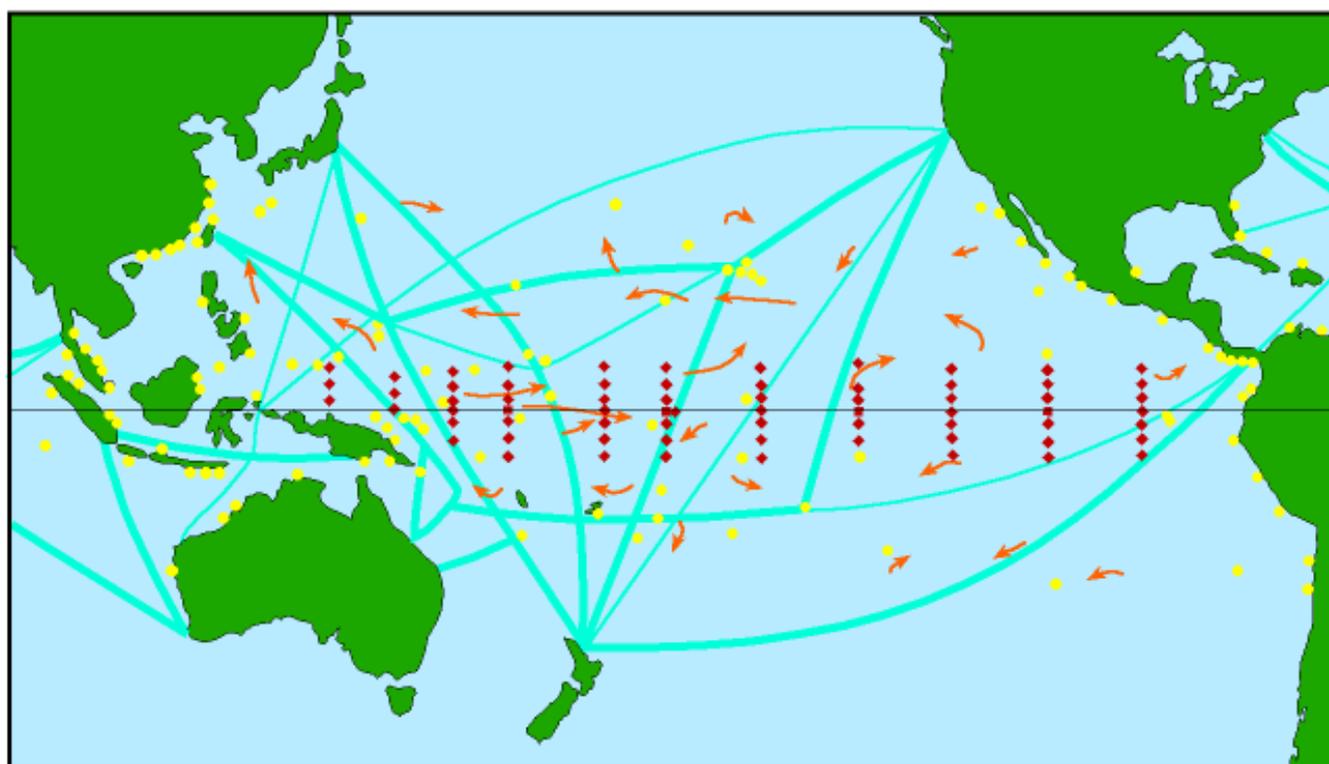


Figure 15: Ce diagramme représente quelques unes des composantes du système d'observation de l'océan qui ont été déployées pour aider à la prévision d'El Niño. Les points rouges correspondent à des relevés automatiques du niveau de la mer. Les carrés jaunes et les losanges montrent l'emplacement de bouées fixes (ancrées au fond de la mer) assurant le contrôle des vents de surface et d'autres quantités atmosphériques, ainsi que la mesure de la température de l'océan à différents niveaux. Elles fonctionnent en continu pendant des mois sans intervention humaine. Les flèches roses décrivent les trajectoires de bouées dérivantes, mesurant la température de l'océan et renseignant sur le mouvement des eaux de surface. Les lignes bleues représentent les lignes des navires marchands qui sont disposés à effectuer des profils verticaux dans l'océan (à l'aide de sondes bathythermographes jetables) La plupart de ces observations sont envoyées directement par satellite aux centres de prévision météorologiques disséminés sur le globe.

De tels modèles permettent aux scientifiques de tester leur compréhension du comportement de systèmes complexes, et par exemple de voir si ces modèles sont capables de simuler des El Niño passés. Si les modèles s'avèrent assez réalistes, les chercheurs peuvent les utiliser pour effectuer des prévisions du climat futur.

De tels modèles numériques fondés sur les lois de la physique ont été utilisés en météorologie depuis les années 60, à des fins de prévision. Au début, ces prévisions numériques n'étaient pas meilleures que celles réalisées par les prévisionnistes chevronnés qui ne comptaient que sur leur propre expérience à analyser et comprendre le temps qu'il faisait. Mais, grâce aux avancés dans notre connaissance des systèmes climatiques et aux progrès des modèles numériques utilisés pour les représenter, les modèles de prévision d'aujourd'hui font systématiquement mieux que les meilleurs prévisionnistes.

Les modèles numériques de El Niño ne sont pas encore aussi performants que ceux utilisés dans la prévision du temps, mais ils sont maintenant capables de reproduire les caractéristiques d'un événement typique. récemment, plusieurs groupes de recherche se sont investis dans l'utilisation de ces modèles pour prévoir le déclenchement et l'évolution d'El Niño individuels, et leurs effets sur les structures météorologiques à travers le monde, avant même que ces El Niño se soient réellement produits. Les résultats jusqu'à présents, bien qu'imparfaits, donnent une meilleure indication des conditions climatiques qui prévaudront pendant la ou les saisons suivantes que de simples raisonnements fondés sur la persistance du phénomène ou sur un retour systématique à des conditions normales.

11. Un exemple d'utilisation des prévisions

Le Pérou fournit un excellent exemple de l'utilité de prévisions d'El Niño, même à court terme. Comme dans la plupart des pays en voie de développement dans les tropiques, l'économie (et la production de nourriture en particulier) y est extrêmement sensible aux fluctuations climatiques.

Année après année, les va-et-vient entre température de surface de la mer, le long de la côte du Pérou, au dessus ou en dessous des valeurs normales produisent une grande variété d'impacts locaux. Les années chaudes (El Niño) sont plutôt défavorables à la pêche et certaines d'entre elles ont été caractérisées par des inondations dévastatrices dans la plaine côtière et sur les pentes occidentales de la Cordillère des Andes. Les pêcheurs se réjouissent au contraire des années froides, mais pas les agriculteurs qui se retrouvent confrontés à des sécheresses et des récoltes insignifiantes. De telles années froides surgissent souvent après le déroulement d'un fort El Niño. Ainsi les Péruviens ont de bonnes raisons d'être attentifs non pas aux seuls événements El Niño, mais plutôt aux deux extrêmes du cycle El Niño.

Avant même que les inondations issues du phénoménal El Niño de 1982-83 aient totalement disparu, les fermiers du Pérou commençaient déjà à craindre que les températures de surface de l'océan ne tombent sous la normale l'année suivante, apportant la sécheresse et un manque à gagner dans les récoltes. C'est à ce moment que le gouvernement péruvien a décidé de développer un programme apte à prévoir les futurs bascules du climat.

La première tâche était d'effectuer une prévision pour la saison pluvieuse suivante, attendues pour début 1984. Les informations disponibles début novembre 1983 indiquaient que les conditions climatiques dans le Pacifique équatorial étaient proches de la normale et le resteraient vraisemblablement tout au long de la saison pluvieuse, favorisant de ce fait l'agriculture. Ces informations furent transmises à de nombreuses organisations et au Ministère de l'Agriculture, qui les incorporèrent dans leur plans pour la période de pousse 1983-84 à venir. La prévision s'est avérée correcte, et les récoltes furent abondantes. depuis, des prévisions

pour la saison pluvieuse à venir ont été émises chaque mois de novembre, à partir d'observations de vents et de températures de l'océan dans la région du pacifique tropical, et à partir de modèles numériques. les prévisions sont présentées sous la forme de 4 possibilités:

- Conditions proches de la normale.
- Un El Niño faible avec une période de pousse légèrement plus humide que la normale.
- Un El Niño intense, avec des inondations.
- Des eaux côtières plus fraîches que la normale, avec une plus probabilité de sécheresse.

Une fois la prévision émise, les représentants des agriculteurs et le gouvernement se rencontrent pour décider de la combinaison appropriée des plantes à semer de manière à maximiser le rendement global. Le riz et le coton, deux des principales plantations dans le nord du Pérou, sont très sensibles à la quantité et à la chronologie des précipitations. Le riz est florissant pour des conditions humides lors de la période de pousse, suivies de conditions plus sèches pendant la phase de maturation. Le coton, avec son système de racines plus profond, peut tolérer un climat plus sec. Par conséquent, une prévision d'un hiver El Niño peut indiquer aux fermiers de planter plus de riz et moins de coton que pour un hiver d'une année sans El Niño.

12. Le futur

Le Pérou est l'un des nombreux pays qui utilise déjà avec succès les prévisions de El Niño, en liaison avec une planification de l'agriculture. Les autres pays qui ont pris des initiatives similaires sont notamment l'Australie, le Brésil, l'Éthiopie et l'Inde. Ce n'est pas par hasard que tous ces pays se situent au moins partiellement dans les tropiques. Les états tropicaux ont énormément à gagner de prévisions réussies d'El Niño parce qu'ils sont concernés par une fraction majeure des impacts que l'on a résumés plus haut, et parce qu'ils occupent les régions du monde où la précision des modèles de prévision du climat est justement la meilleure. Mais pour d'autres pays en dehors des tropiques, comme le Japon et les États-Unis, des prévisions plus précises d'El Niño aideront la planification stratégique dans des secteurs comme l'agriculture ou la gestion des ressources en eau ou encore les réserves de blé et de pétrole (utilisé à des fins de chauffage). Encouragés par les progrès accomplis au cours de la dernière décennie, les scientifiques et les gouvernements de nombreux pays travaillent ensemble pour concevoir et réaliser un système global pour:

- Observer les océans tropicaux.
- Prévoir El Niño et les autres rythmes climatiques irréguliers.
- Effectuer des prévisions climatiques systématiques, immédiatement disponibles à ceux qui en ont besoin à des fins de planification, de la même façon que les prévisions météorologiques sont diffusées auprès du public de nos jours.

La capacité d'anticiper les changements climatiques d'une année sur l'autre conduira à une meilleure gestion des productions agricoles, des réserves en eau, des pêcheries, et autres ressources. En incorporant les prévisions du climat dans ses décisions de gestion, l'humanité devient mieux préparée pour affronter les rythmes irréguliers du climat.

Remerciements / Copyright : "Report to the Nations" de UCAR / NOAA



Rôle des astres


[Accueil](#)

[Remonter](#)

[Suivante](#)

La marée est un effet de l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil sur les océans. Pour comprendre vraiment cet effet il est nécessaire de faire un petit détour par l'astronomie. Pour simplifier les choses nous commencerons par expliquer le rôle de la Lune, il sera alors aisé de comprendre celui du Soleil.

Quel est le rôle de l'attraction gravitationnelle ?

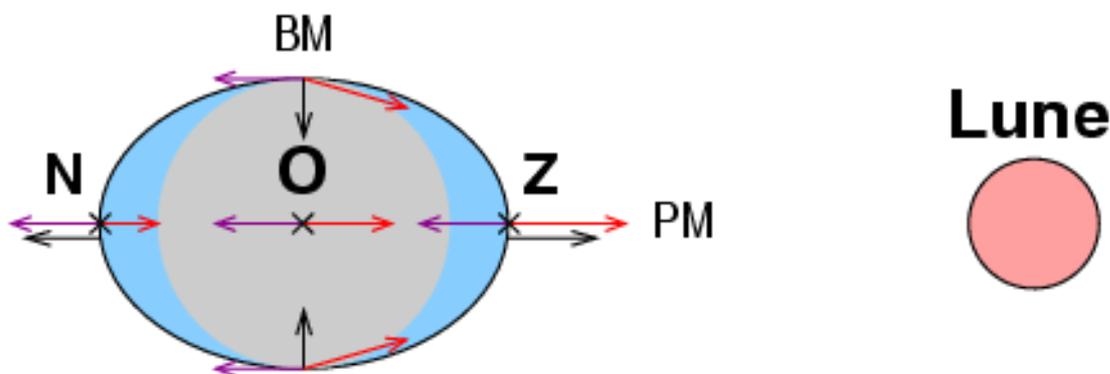
Lorsque Newton découvre la loi universelle de la gravitation il comprend que si la pomme tombe de l'arbre alors que la Lune ne tombe pas sur la Terre, bien que tous les deux soient attirés par la Terre, c'est parce que la Lune, tournant autour de la Terre, est soumise à une force centrifuge qui tend à la repousser. Il s'agit de la même force centrifuge que celle qui vous projette à l'extérieur d'un manège en rotation.

De la même manière la Terre est à la fois attirée vers la Lune et repoussée. Les océans sont donc soumis à deux forces opposées :

- ◆ attraction gravitationnelle
- ◆ force centrifuge



L'intensité de la force centrifuge est constante sur la Terre tandis que l'intensité de l'attraction gravitationnelle est variable car son intensité dépend de la distance à la Lune : plus un point est proche de la Lune, plus l'attraction est forte.



La résultante des deux forces (en noir) dépend donc de la position sur la Terre, elle est :

- ◆ nulle au centre de la Terre (point O)
- ◆ dirigée vers la Lune au zénith (point Z)
- ◆ dirigée à l'opposée de la Lune au nadir (point N)
- ◆ dirigée plus ou moins vers le centre de la Terre pour les points situés perpendiculairement à l'axe ZN.

Lorsque la force résultante est dirigée vers le centre de la Terre, la surface des océans a tendance à baisser créant une basse-mer (BM) et à l'inverse lorsque la force est dirigée vers le ciel (au zénith et au nadir) la surface des océans a tendance à monter créant une pleine-mer (PM).

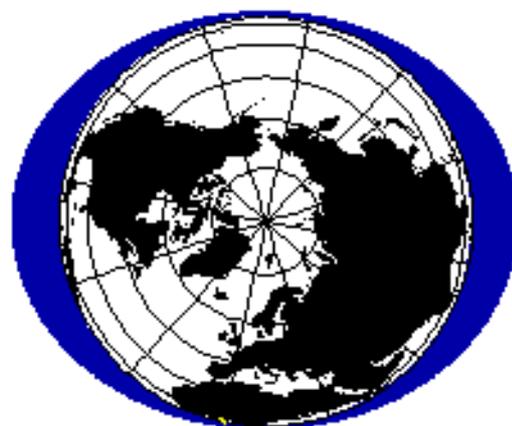
L'effet de la force génératrice peut être schématisé par un bourrelet (en bleu clair sur la figure) représentant la forme que prend la surface des océans. Cette forme est en réalité plus compliquée comme nous le verrons plus loin.



Pourquoi la marée est-elle semi-diurne ?

L'alternance de la PM et de la BM deux fois par jour vient de la rotation de la Terre sur elle-même et non de la rotation de la Lune autour de la Terre.

Le bourrelet (bleu foncé) est constamment dirigé vers la Lune. A cause de la rotation de la Terre sur elle-même il semble tourner. Le trait jaune représente la hauteur d'eau en un point fixe : il oscille bien deux fois par jour.

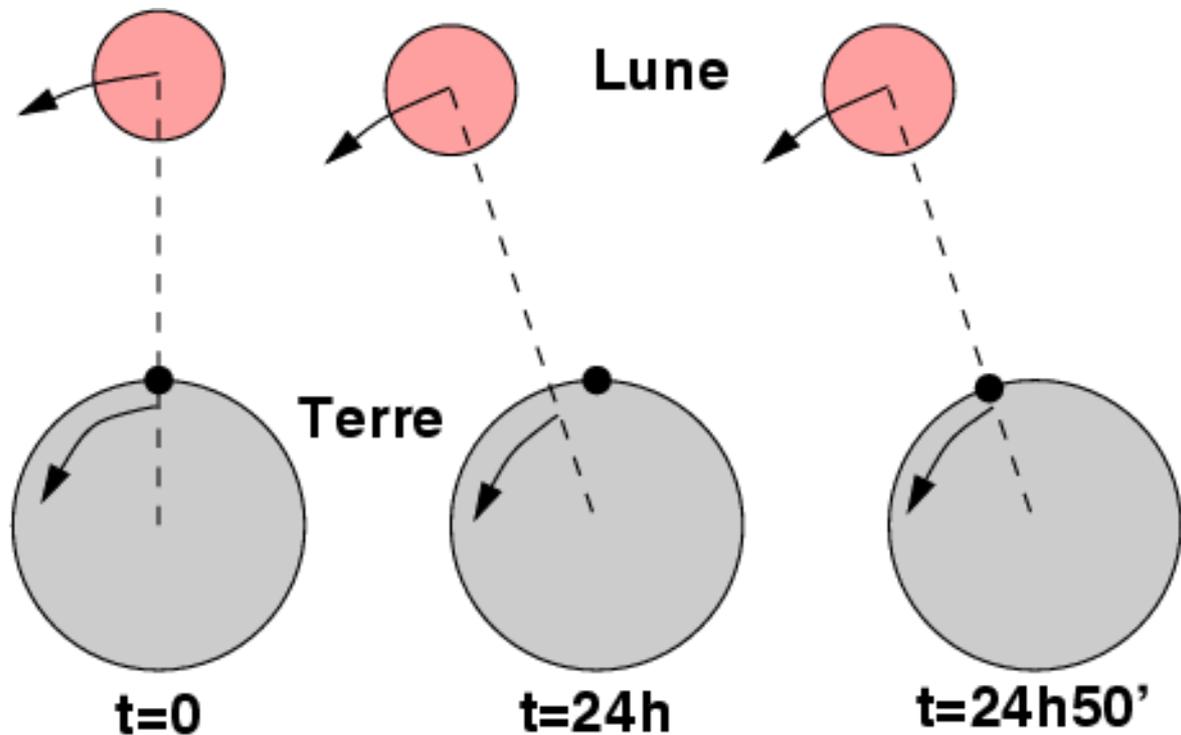


L'effet principal de la Lune est donc de créer une marée semi-diurne.

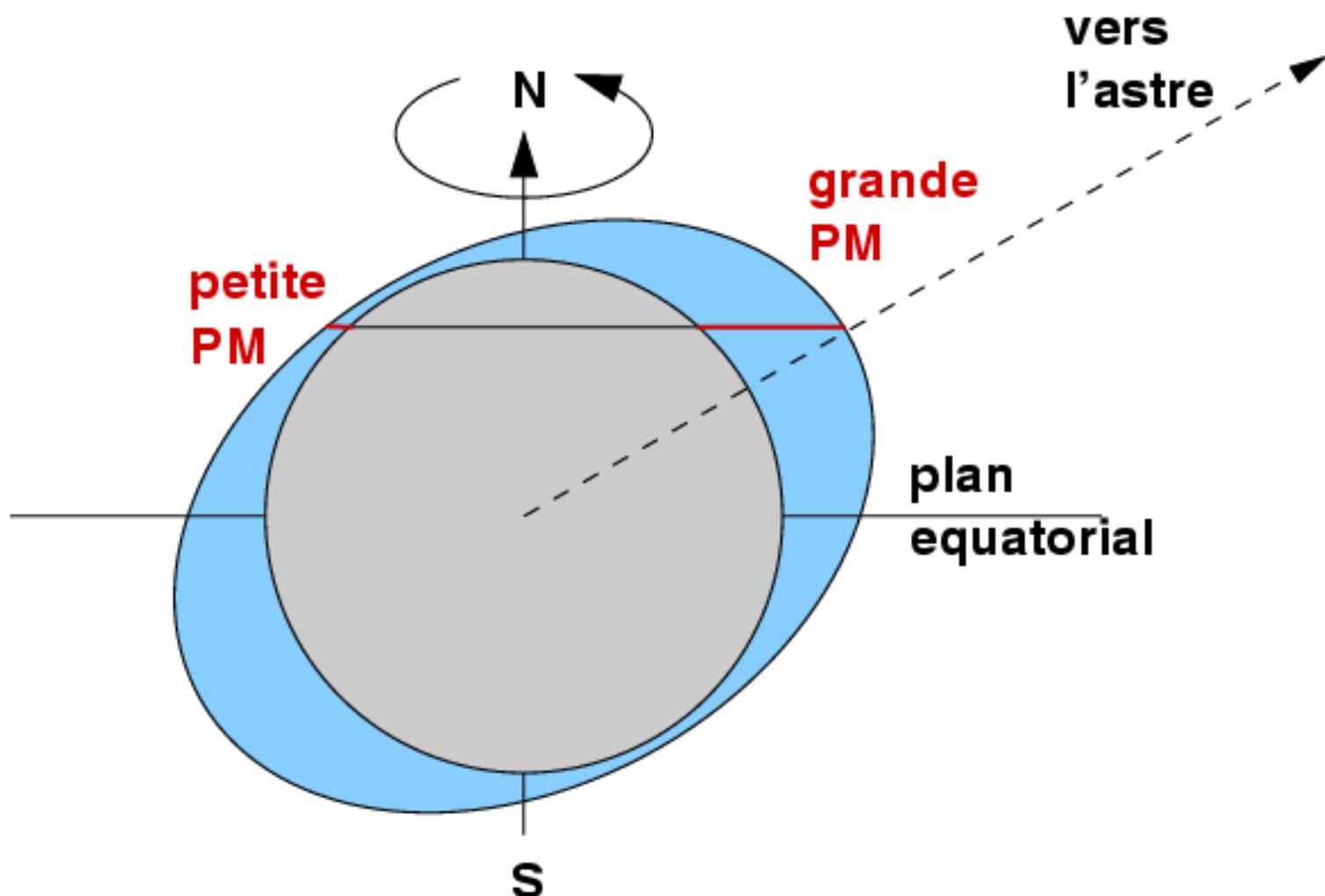


Pourquoi la marée se décale-t-elle de 50 minutes tous les jours ?

En réalité le cycle se répète toutes les 12h25' créant un retard de 50' tous les jours car pendant que la Terre fait un tour sur elle-même la Lune tourne aussi un peu (de 1/28ème de tour). La Lune se retrouve donc exactement au dessus du même point un peu plus tard soit en 24h50'28".



Comment apparaît la composante diurne ?



La Lune n'étant en général pas dans le plan équatorial, les deux bourrelets ne sont pas symétriques. Le bourrelet situé au nadir est plus faible que celui au zénith. Les pleines-mer sont alternativement forte et faible ce qui crée une composante diurne à la marée.

A Brest cette composante est très faible de sorte qu'il n'y a pas de grosses différences entre la pleine-mer du matin et celle du soir. Cela n'est cependant pas vrai partout. Il existe des endroits où la marée est essentiellement diurne et d'autres où elle est tantôt diurne tantôt semi-diurne.



La marée est-elle d'origine lunaire ou solaire ?

Les deux astres jouent un rôle à peu près équivalent et leurs effets s'ajoutent. La période de la composante semi-diurne solaire est en revanche exactement de 12h.

La marée que l'on observe est donc à la fois d'origine lunaire et solaire.



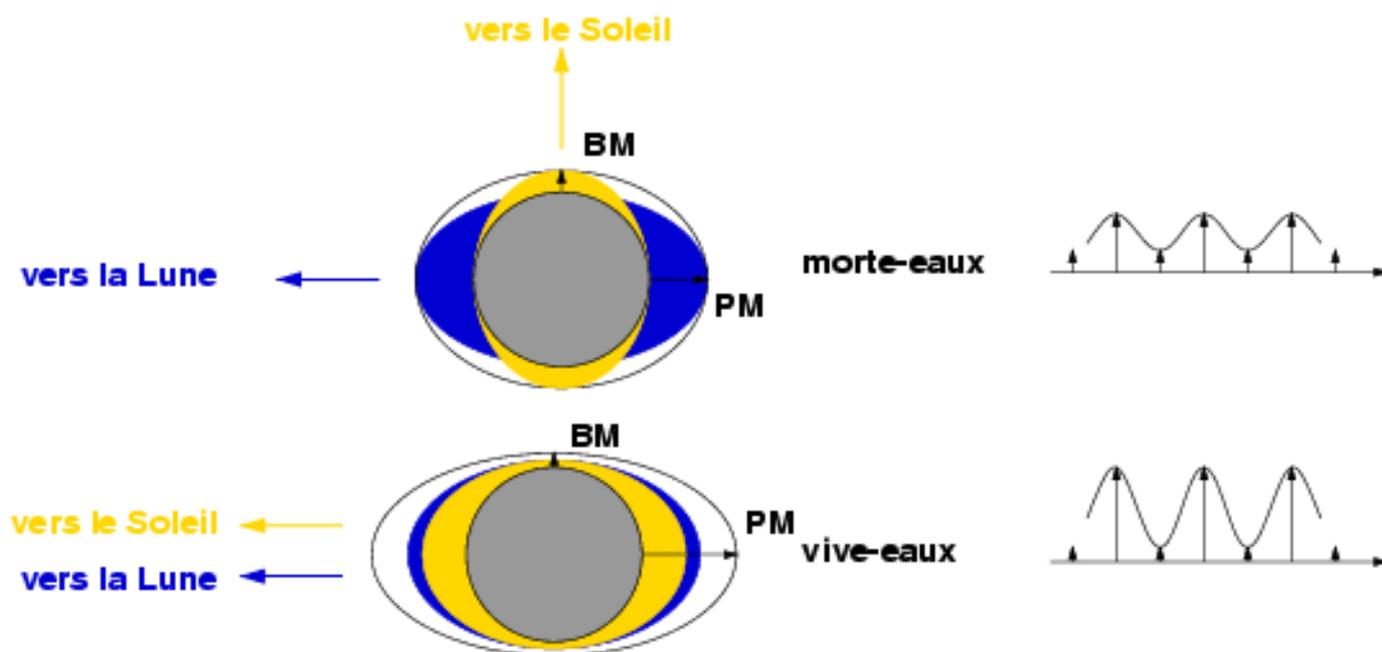
Pourquoi y a-t-il alternance des vives et des mortes-eaux ?

Toutes les semaines environ la marée alterne de forts coefficients (vive-eaux) et des faibles (morte-eaux). Cet effet est dû à la combinaison des marées lunaires et des

marées solaires.

L'effet du Soleil est de moduler l'effet de la Lune :

- ◆ Lorsque les deux astres sont alignés les effets s'ajoutent (nouvelle et pleine Lune), le marnage est alors fort. On parle de marée de vive-eaux, ou de syzygie.
- ◆ Lorsque les deux astres sont perpendiculaires les effets se soustraient, le marnage est alors faible. On parle de marée de morte-eau.

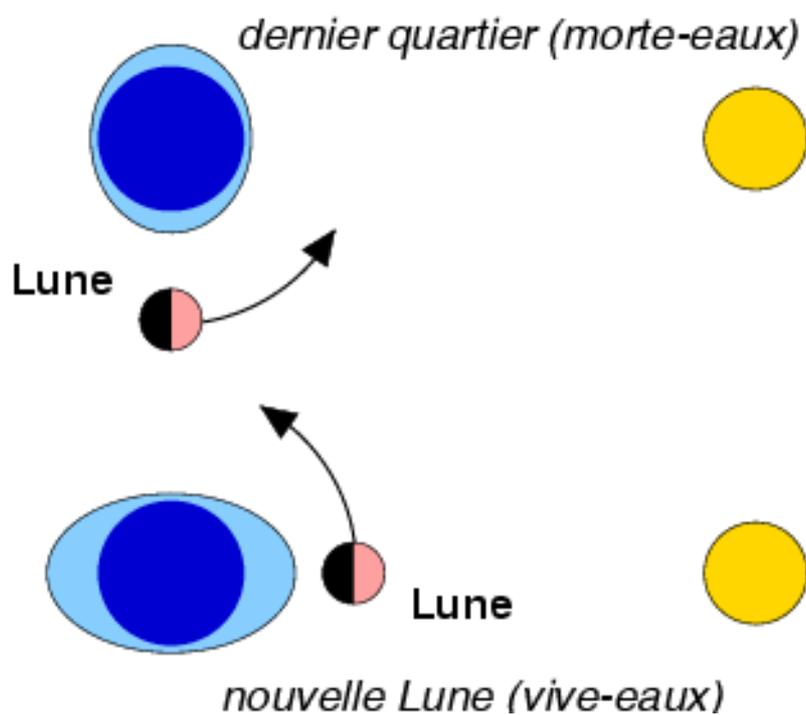
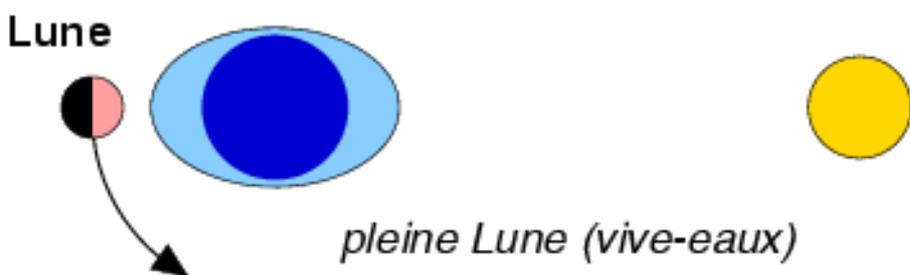
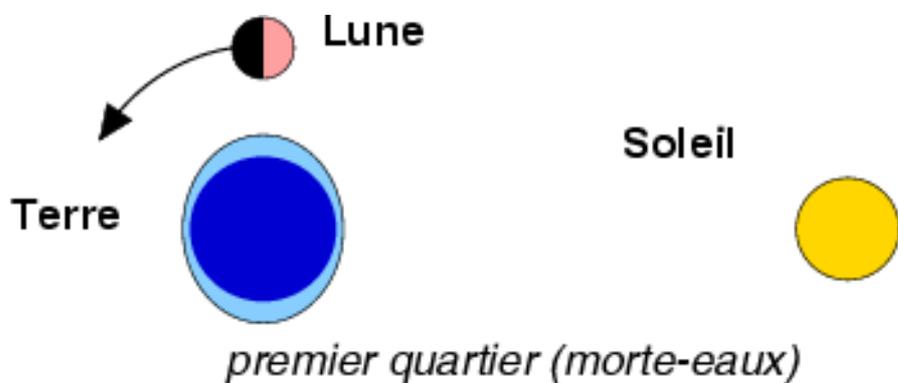


Vous pouvez constater cette alternance des vive-eaux, morte-eaux sur [un marégramme de Brest](#).



Pourquoi le cycle des vives-eaux est-il de 14 jours ?

La Lune tourne autour de la Terre en 28 jours par conséquent l'oscillation a une période de 14 jours.



Ce cycle ne se répète pourtant pas à l'identique, les coefficients de marées sont plus forts à l'équinoxe et plus faibles aux solstices. Ces modulations plus lentes sont dues à la variation d'autres paramètres orbitaux.



Variations plus lentes des marées

Au cours d'un cycle annuel l'axe de rotation de la Terre sur elle-même (l'axe des pôles) oscille par rapport au plan de l'écliptique. Lorsque la Terre, la Lune et le Soleil sont dans le même plan (équinoxe) les effets combinés de la Lune et du Soleil sont les plus importants créant de forts coefficients.

En plus de cycle annuel de nombreux autres paramètres oscillent sur des périodes plus grandes ce qui fait que la marée n'est jamais la même d'une année à l'autre. Il existe cependant un cycle de 18 ans, appelé saros, proche multiple de nombreux paramètres orbitaux au bout duquel la marée se répète presque à l'identique.



Mise à jour : 10/07/01
Ifremer





L'onde de marée

← Précédente Ⓞ Accueil ↶ Remonter → Suivante

Sous l'action des forces génératrices de marée la surface des océans ne prend pas la forme d'un bourrelet mais une forme plus compliquée. L'image du bourrelet permet de rendre compte de certains phénomènes pas tous. Pour aller plus loin dans l'explication il nous faut découvrir le monde des amphidromes.

Où l'on découvre le monde des amphidromes

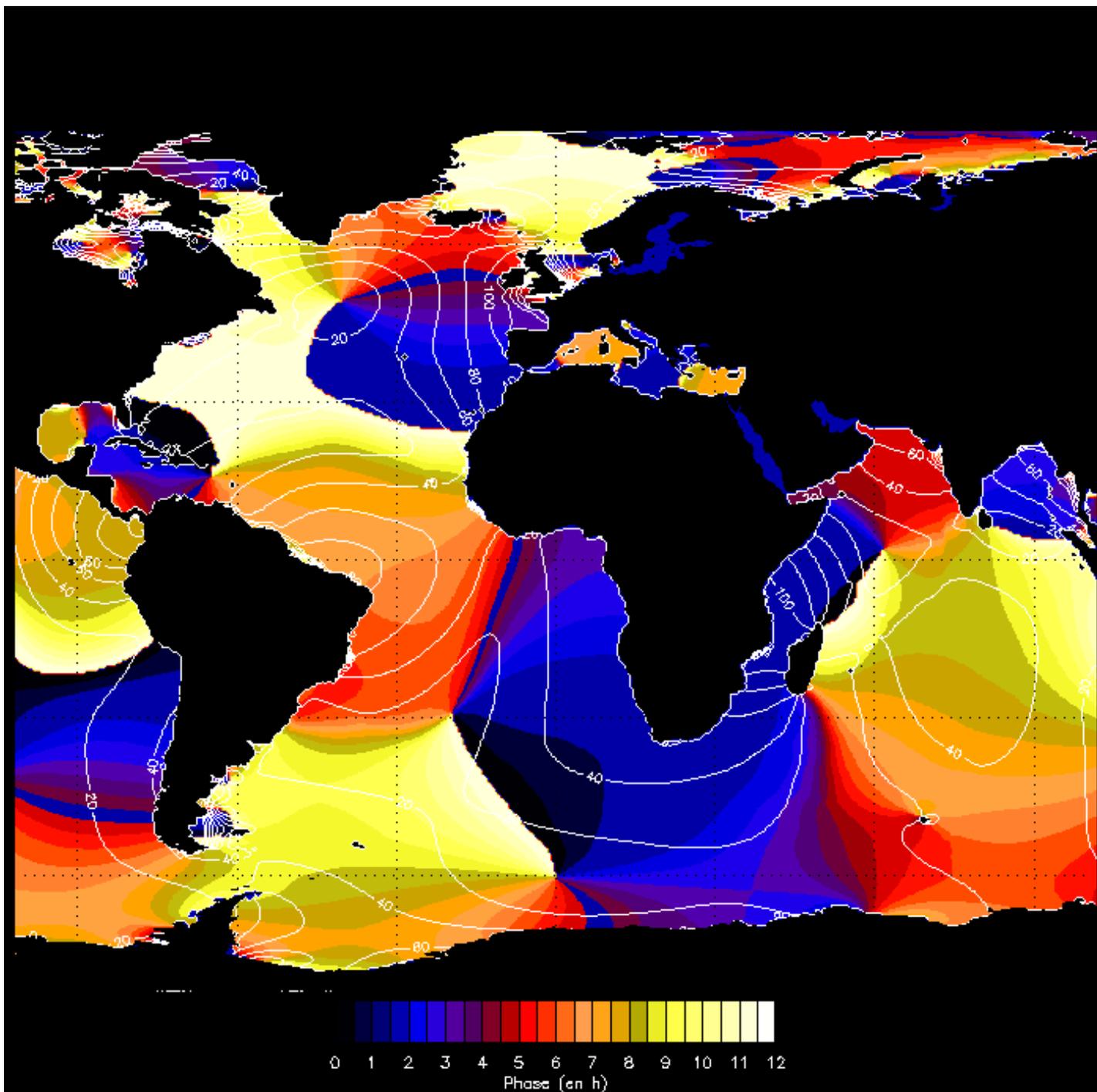
La surface des océans ne prend pas la forme imposée par la [force génératrice](#) (pleine-mer au zénith et au nadir) pour plusieurs raisons :

- ◆ les continents forment des barrières empêchant la marée de tourner autour de la Terre.
- ◆ si l'on suivait une pleine-mer elle devrait faire un tour de la Terre en 24h50' or aucune onde ne peut aller aussi vite dans l'océan. La vitesse de propagation des ondes dépend de la profondeur, elle est maximale au dessus des grandes plaines abyssales et diminue très fortement au voisinage des côtes.
- ◆ la [force de Coriolis](#) vient compliquer la propagation des ondes : elles ont tendance à tourner dans le sens contraire des aiguilles d'une montre et en laissant la côte sur leur droite dans l'hémisphère Nord.

Pour ces différentes raisons la marée est une onde stationnaire tournant autour de points fixes appelés [points amphidromiques](#) où l'amplitude de la marée est nulle. Plus précisément, chaque composante de la marée possède une structure bien définie, la marée réelle étant la superposition de toutes les composantes.

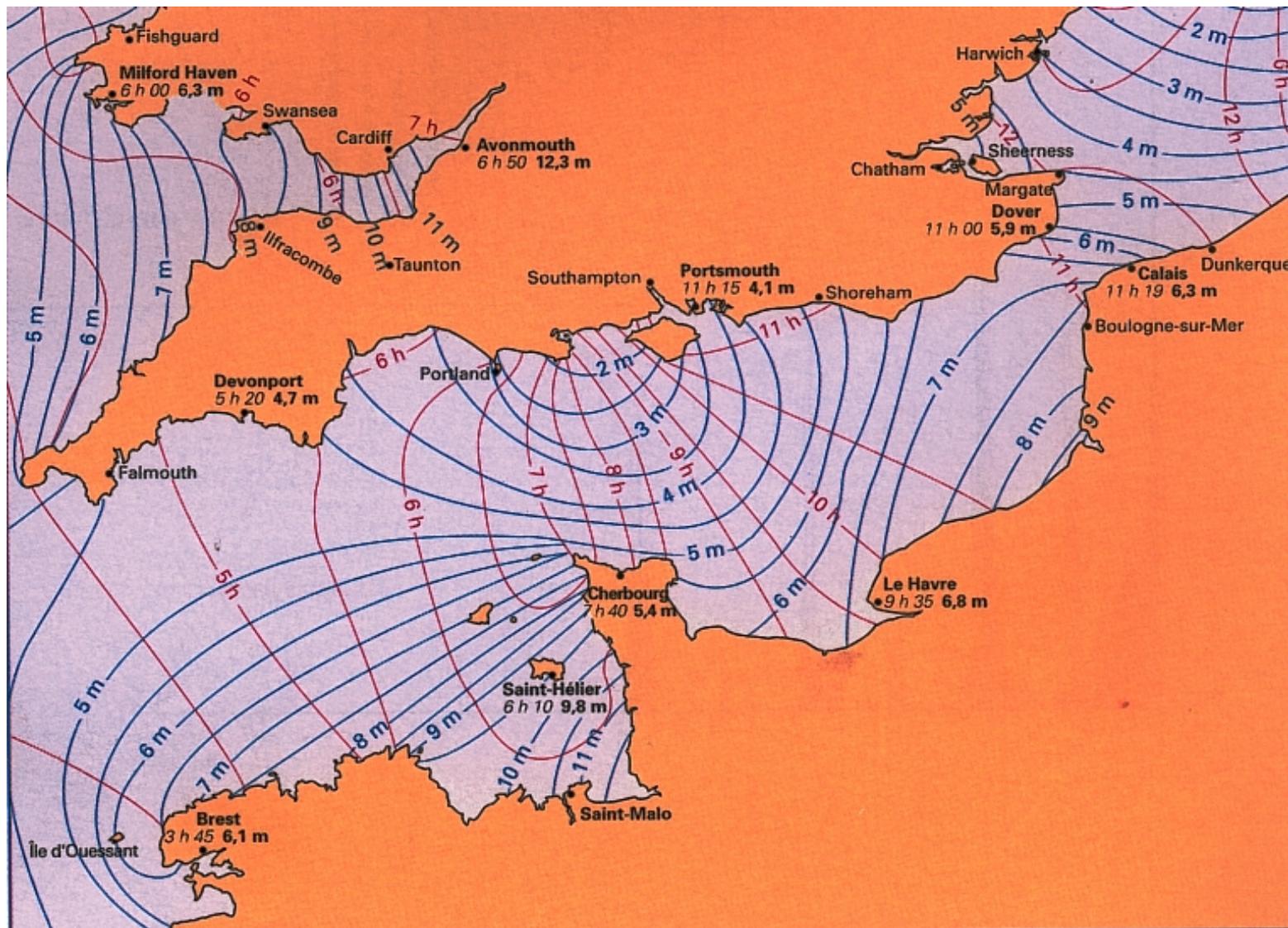
Représentation de la composante lunaire semi-diurne (M2), composante principale de la marée à Brest. L'onde de marée possède s'étend sur toute la planète. On distingue très nettement les points amphidromiques autour desquels tournent la marée (convergence des fuseaux colorés). Un de ces points se trouve au milieu de l'océan Atlantique Nord. La structure de l'onde en mer du Nord est très compliquée du fait des trois points amphidromiques.

Les lignes blanches représentent les lignes d'iso-[marnage](#) et les fuseaux de couleurs les régions d'iso-[phase](#) ou lignes cotidales.



Une [animation](#) de cette carte permet de mieux comprendre comment tourne l'onde de marée.

L'onde de marée en Manche



Cette carte représente l'évolution de la marée réelle dans la Manche (somme de toutes les composantes). Les nombres indiqués sous certains ports sont la phase de la pleine-mer et l'unité de hauteur. Les lignes représentent :

- ◆ en bleu : lignes d'iso-marnage représentant une égale valeur de marnage. C'est cette hauteur qui est utilisée pour le calcul du coefficient de marée. Notez que la marée est plus importante le long des côtes françaises que des côtes anglaises, cela est due à la force de Coriolis qui tend à pousser l'onde vers la droite.
- ◆ en rouge : les lignes cotidiales représentant les points se trouvant en pleine-mer (PM) à la même heure. Si la PM est à 3h45 à Brest, la marée est encore montante à Cherbourg et la PM ne sera atteinte qu'à 7h40, soit presque 4h après. L'onde de marée se propage vers le Pas de Calais.



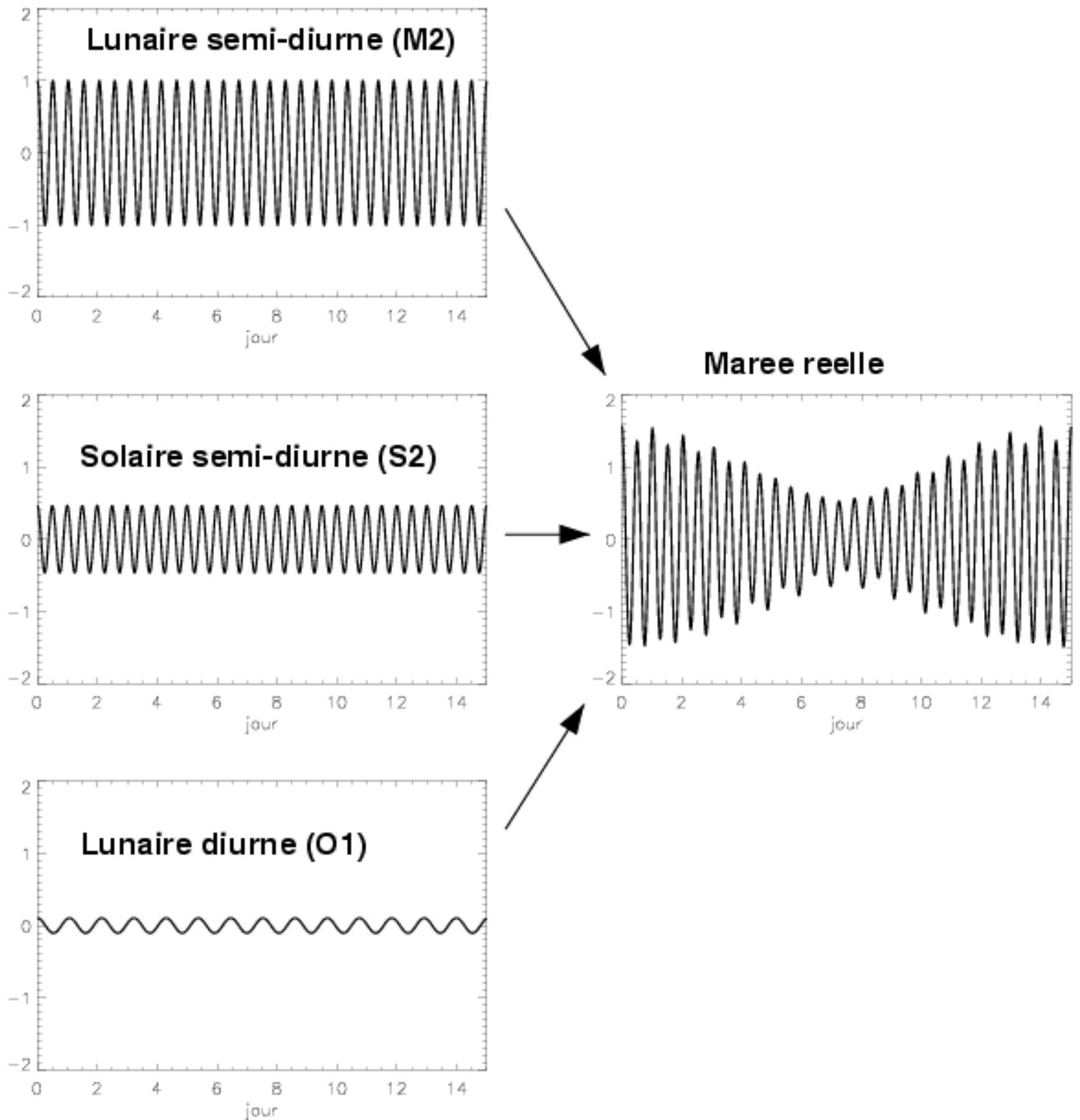
Spectre de la marée



Tout comme une note musicale est composée d'un fondamental et de plusieurs harmoniques, l'onde de marée peut être décomposée en une série d'harmoniques. Ces harmoniques ayant des périodes incommensurables entre elles, la marée est un signal non périodique. Elle ne se répète jamais à l'identique.

Nomenclature des harmoniques

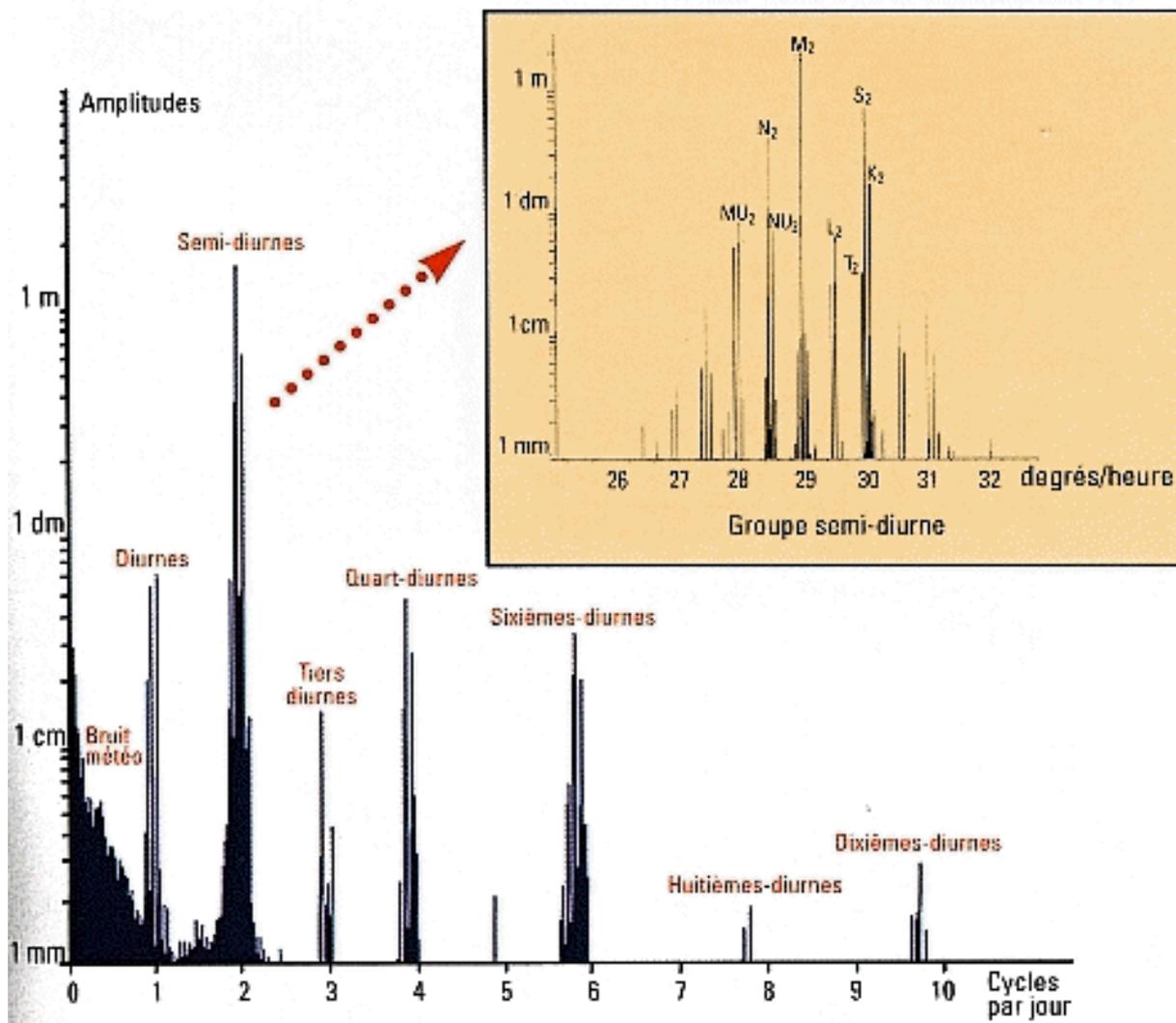
L'harmonique principal est la composante lunaire semi-diurne, provoquée par la résultante de l'attraction gravitationnelle de la Lune sur la Terre et de la force centrifuge. Les harmoniques se regroupent par groupes selon qu'ils sont plutôt semi-diurnes, diurnes, bimensuels, mensuels etc. et aussi quart-diurnes, sixième-diurnes etc.



Les composantes portent un nom de code (M2 par exemple), le chiffre indique le groupe de la composante : 1 pour diurne, 2 pour semi-diurne, 3 pour tiers-diurne etc.

Spectre de la marée à Brest

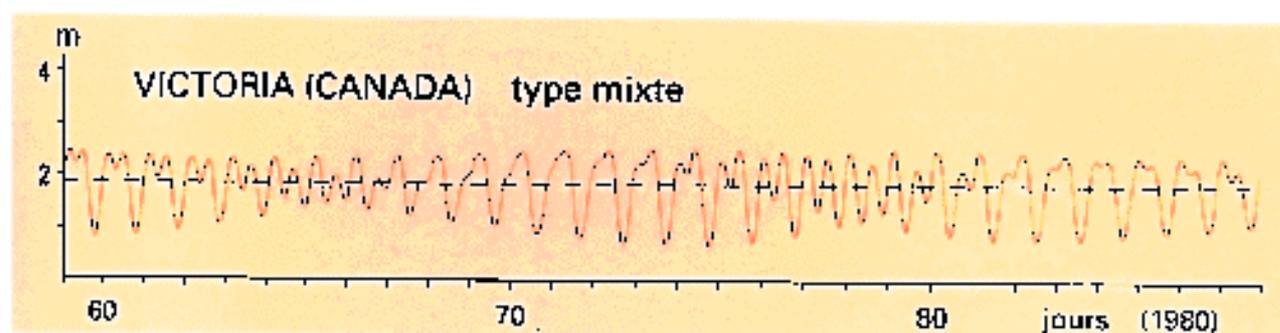
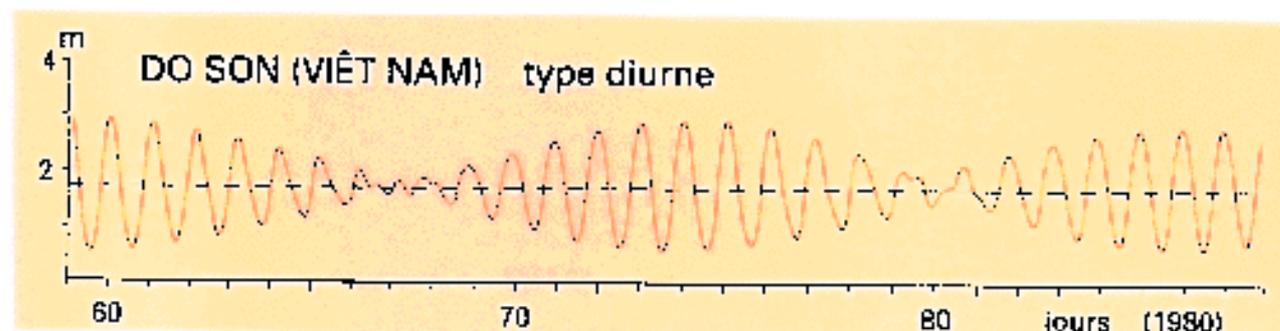
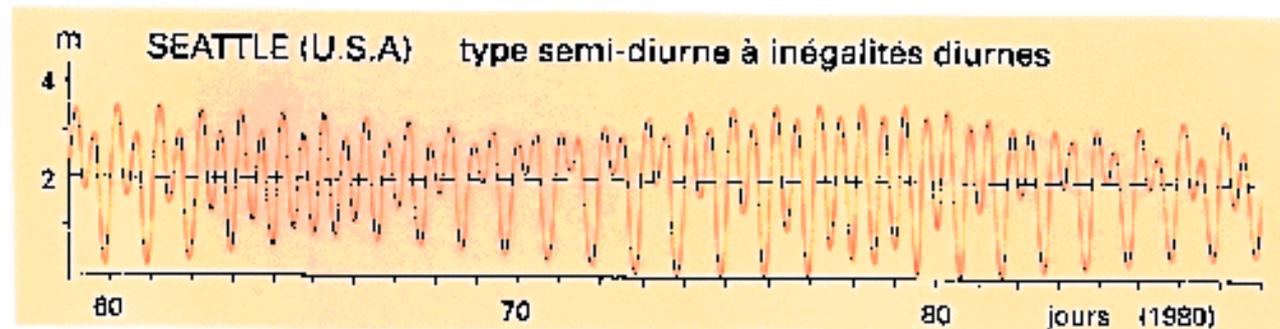
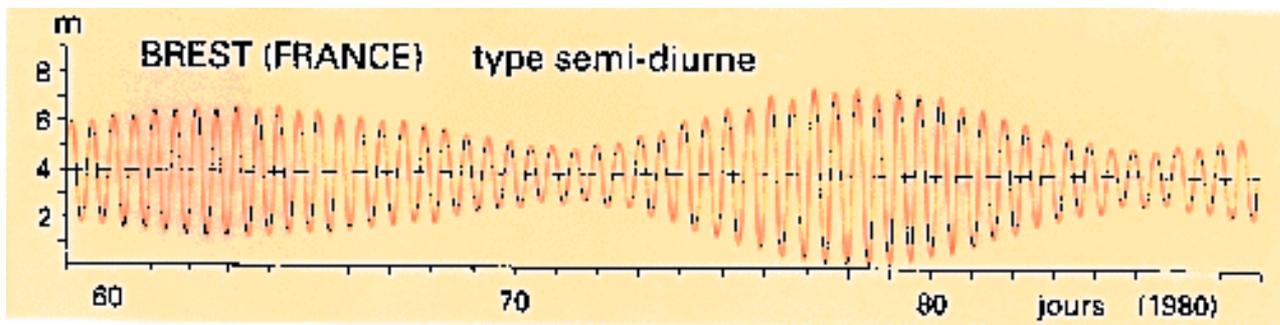
La figure ci-dessous illustre l'amplitude des harmoniques à Brest. Les deux composantes principales sont les semi-diurnes lunaire (M2) et solaire (S2). Les autres bien que moins importantes contribuent à la complexité du signal de marée. D'ailleurs [la prédiction de la marée](#) utilise les 105 plus importantes composantes.



Les composantes tiers-, quart- etc. diurnes modulent l'amplitude de la marée au sein d'une journée, ce qui fait que la pleine-mer du matin peut être différente de la marée du soir. Ces composantes haute fréquences apparaissent près des côtes du fait des interactions des composantes entre elles.

Types de marée

Sur le pourtour de l'océan Atlantique et de la Manche la marée est essentiellement semi-diurne pourtant ce n'est pas le cas partout ailleurs dans le monde. Voici les marégrammes en 4 points du globe, ils représentent l'évolution du niveau de la mer pendant un mois.



Dans certaines régions la marée est beaucoup plus irrégulière qu'à Brest : entre une PM et une BM il peut y avoir une mini oscillation (comme à Seattle) ou bien elle peut être tantôt semi-diurne, tantôt diurne (comme à Victoria).

Le type de marée dépend en fait de l'importance relative des composantes diurnes par rapport aux composantes semi-diurnes selon le rapport :

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

c'est le rapport des amplitudes diurnes (solaire O1 et lunaire K1) sur les amplitudes semi-diurnes (solaire S2 et lunaire M2)

Les types de marées se répartissent ainsi dans le monde :



- ◆ vert : semi-diurne, $0 < F < 0.25$
- ◆ orange : mixte, $0.25 < F < 3$
- ◆ blanc : diurne, $3 < F$

D'où viennent les harmoniques ?

Certains harmoniques sont associés aux mouvements des astres tandis que d'autres apparaissent sans qu'apparemment rien ne les produise comme par exemple l'harmonique quart-diurne. D'où viennent-ils alors ?

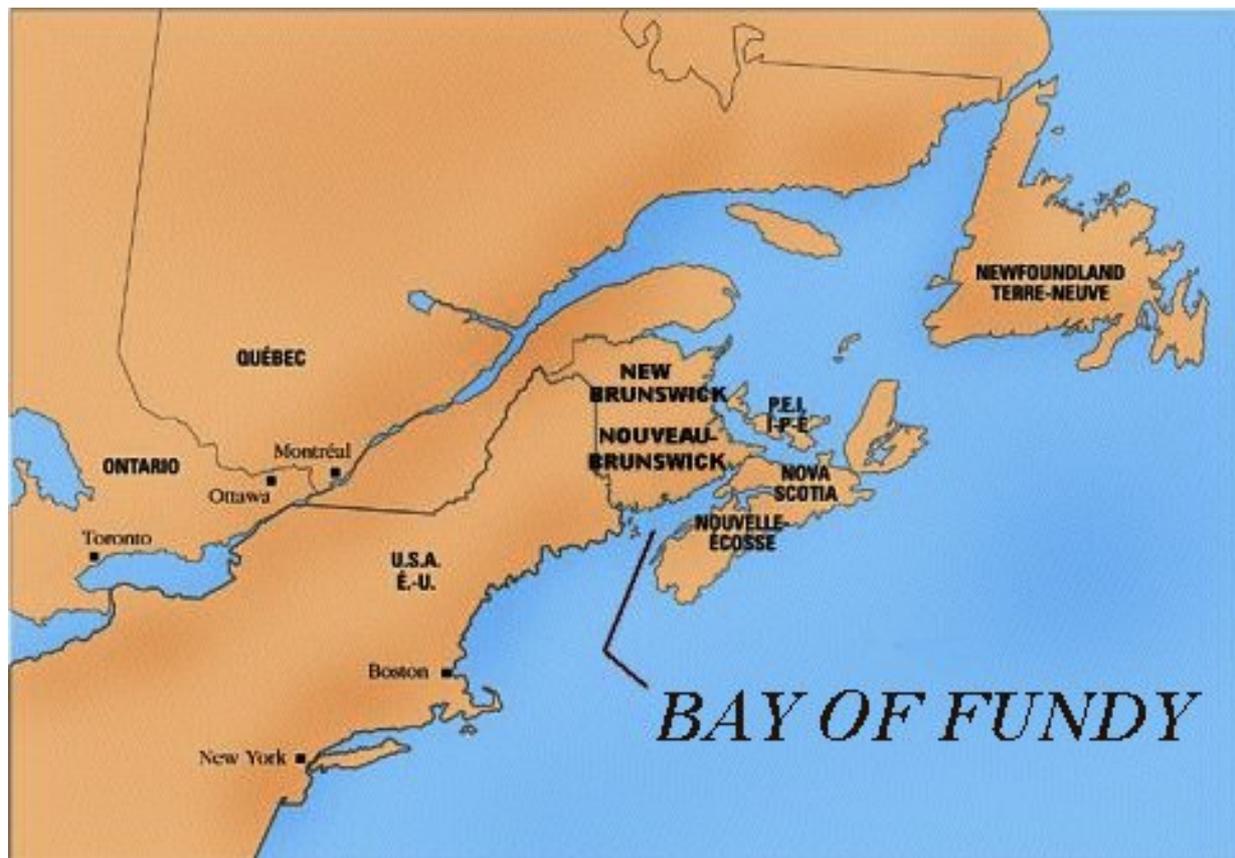
Dans le jargon des physiciens ces harmoniques proviennent des interactions non-linéaires des composantes de marée entre elles. Cela signifie que lorsque l'amplitude de la marée devient suffisamment importante, la marée réelle n'est plus la somme des composantes harmoniques mais quelque chose de plus compliqué. Dans la réalité cela se produit sur les plateaux continentaux là où la marée est amplifiée.

Une des conséquence de ces interactions est la création d'une résiduelle, c'est à dire d'une composante qui n'oscille plus du tout. Il s'agit donc d'un courant permanent créé par la marée.

Si le Soleil et la Lune créent un harmonique semi-diurne, comment sont créés tous les autres ? Certains sont associés aux variations des paramètres orbitaux et la plupart des autres sont dûs aux interactions nonlinéaires des ondes entre elles. Ces interactions se produisent principalement près du littoral où les courants de marée sont importants. Ainsi, l'interaction de l'onde M2 avec elle même crée l'onde M4 ainsi qu'une résiduelle constante. Cette résiduelle de marée participe de fait au courant moyen.

Résonance

Dans certaines régions du globe la marée est particulièrement forte, c'est le cas dans la baie du Mont Saint-Michel (15 m d'unité de hauteur). Les marées les plus fortes se trouvent dans la baie de Fundy, située sur la frontière entre les Etats Unis et le Canada du côté Atlantique.



Ce phénomène d'amplification de la marée est dû à la forme particulière des côtes. L'onde de marée incidente rebondit au fond de ces baies et crée une onde réfléchi. Lorsque la baie a une certaine longueur l'onde incidente et l'onde réfléchi peuvent être en phase, doublant ainsi l'amplitude de la marée. Ce phénomène porte le nom de résonance.

Mise à jour : 10/07/01
Ifremer



Prédiction de la marée



La marée est un phénomène se prêtant très bien à la prédiction car bien que non périodique elle est constituée d'harmoniques parfaitement déterminées. Tout le problème est donc de connaître précisément ces harmoniques.

Méthode

La prédiction de la marée utilise la décomposition harmonique. Connaissant l'amplitude et la phase des composantes de marée les plus importantes il est alors possible de reconstruire le signal de marée très précisément et à n'importe quel instant, passé ou futur. Le calcul de la marée à Brest utilise environ une centaine d'harmoniques (105) dont les plus faibles ont à peine 1 mm d'amplitude.

Ces paramètres nécessitent au préalable d'avoir une série temporelle de marée suffisamment longue pour pouvoir réaliser une analyse harmonique. En pratique il faut au moins une série de 6 mois.

Coefficient de marée

Le coefficient de marée, introduit par Laplace, permet de comparer le marnage dans différents ports. Pour cela on introduit l'unité de hauteur U qui est *la valeur moyenne de l'amplitude de la plus grande marée qui suit d'un jour et demi environ l'instant de la pleine ou de la nouvelle lune, vers les vive-eaux d'équinoxe*. Le coefficient est alors déterminé par la formule :

$$C = \frac{H - N_0}{U}$$

où

- ◆ H est la hauteur de la pleine mer
- ◆ N_0 est le niveau moyen de la mer
- ◆ U est l'unité de hauteur

Pour Brest cette unité de hauteur vaut 3,05 m. Un coefficient de 100 correspond donc à une amplitude de 3,05m et à un marnage de 6,10m. L'unité de hauteur dépend de

l'endroit considéré comme nous pouvons le constater sur la [carte de marée en Manche](#).

- ◆ marée extraordinaire de vive-eau d'équinoxe : 120
- ◆ marées de vive-eau moyenne : 95
- ◆ marées moyennes : 70
- ◆ marées de morte-eau moyenne : 45
- ◆ marée de morte-eau la plus faible possible : 20

Surcôtes

Les variations du niveau de la mer ne sont pas seulement dues à la marée. D'autres phénomènes peuvent influencer la hauteur d'eau, le plus important est le passage des dépressions atmosphériques. En effet les dépressions aspirent les océans et font monter le niveau de la mer : une dépression de 980 hPa fait ainsi monter le niveau de 30cm environ.



Mise à jour : 10/07/01
Ifremer



Recherche sur la marée



La marée n'a cependant pas fini de révéler tous ses secrets. Aujourd'hui une recherche très active porte sur la marée interne et la dissipation de l'énergie de la marée. Les longues séries de mesures de marée permettent de suivre l'évolution du niveau moyen de la mer suite au réchauffement planétaire.

Marée interne

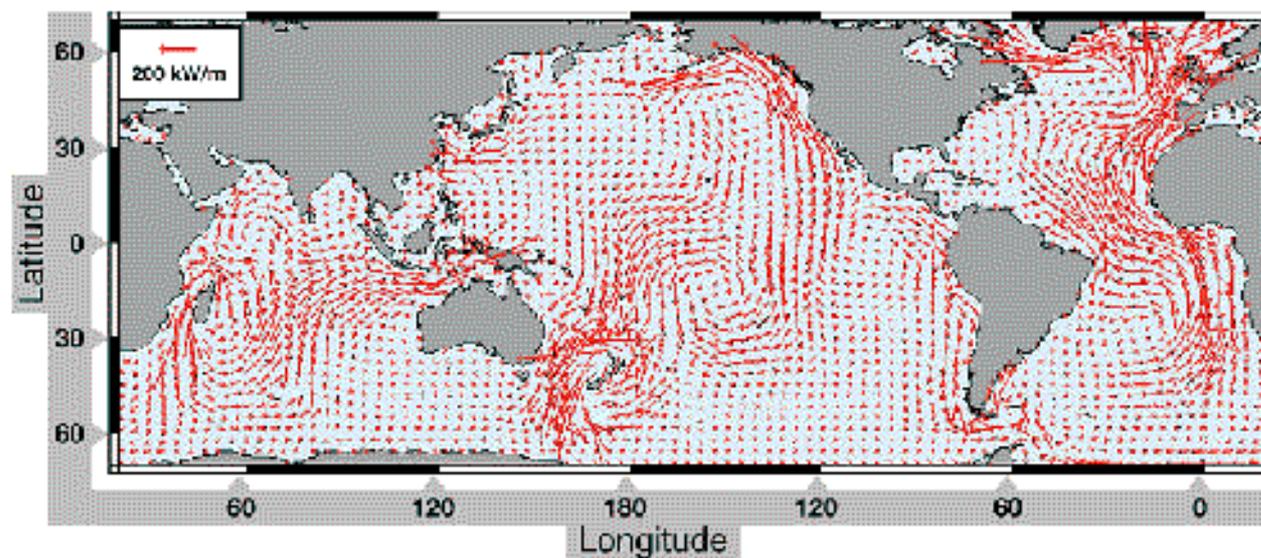
La marée interne désigne les oscillations de même fréquence que la marée mais se produisant à l'intérieur de l'océan sans être associées à des mouvements de la surface (d'où le nom interne). La marée interne est un mouvement de yoyo des isopycnes : l'interface entre les eaux chaudes et froides oscille verticalement.

La marée interne est produite par interaction entre la marée externe (la marée que l'on voit sur la côte) et le relief sous-marin (dorsales médio-océaniques, talus continental).

Dissipation de la marée

A cause du frottement des courants de marée sur les fonds océaniques, une partie de l'énergie est transformée en chaleur. Ce frottement a lieu principalement sur les plateaux continentaux, il est notamment très important en Manche du fait des grandes amplitudes de marée.

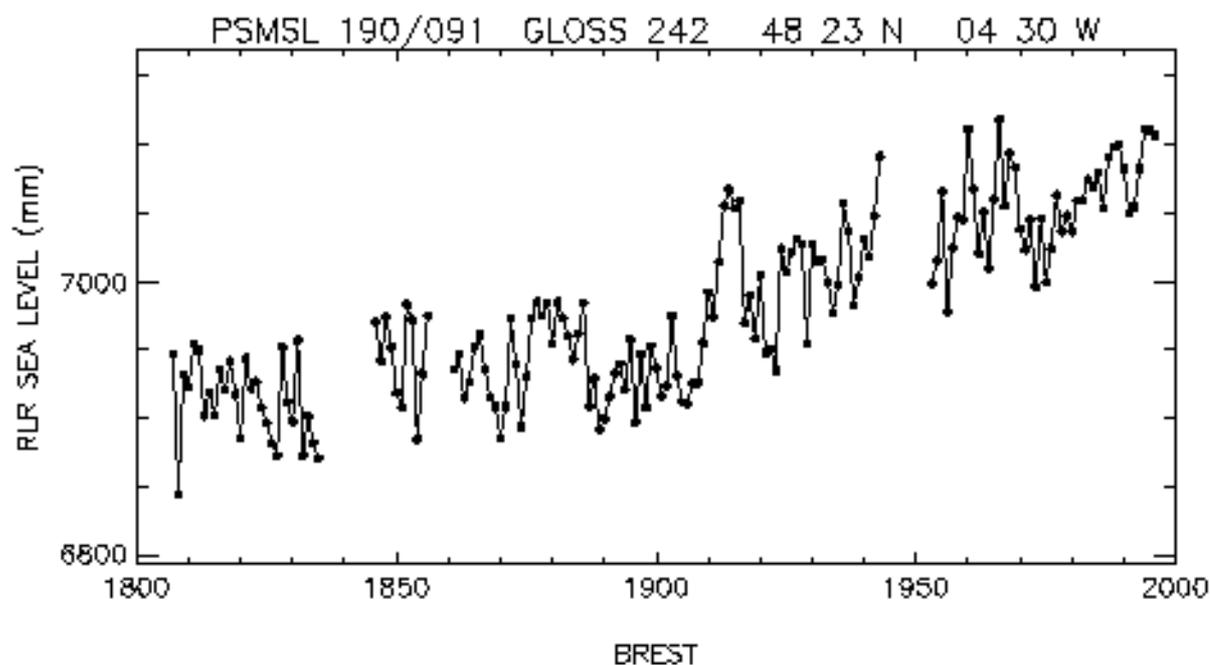
Grâce aux modèles numériques il est possible de reconstruire le flux d'énergie associé à l'onde de marée. Sur la figure ci-dessous on remarque un flux convergent vers la Manche.



Cette dissipation de l'énergie s'accompagne d'un rapprochement de la Lune par conservation du moment cinétique.

Niveau moyen de la mer

Brest est la ville possédant la plus longue série temporelle de marée car dès le début du 18^{ème} siècle Laplace s'y est intéressé. Aujourd'hui cette série permet de suivre la montée du niveau moyen de la mer. On a perdu le niveau de référence des premiers marégraphes d'où les discontinuités. Le marégraphe a été détruit à la fin de la 2^{ème} Guerre Mondiale et ne fut reconstruit qu'en 1952.



Mise à jour : 09/09/02
Ifremer



Lexique



Petit Lexique

Coefficient

Grandeur permettant de comparer l'intensité des marées d'un port à l'autre. Il varie entre 20 et 120. Ce coefficient, pourtant très pratique, n'est utilisé qu'en France.

Harmonique

Signal sinusoïdal caractérisé par une période, une amplitude et une phase. C'est en quelque sorte une "note pure".

Marée semi-diurne

Marée comportant deux basses mers et deux pleines mers par jour sensiblement de la même hauteur pour un jour donné. C'est le type de marée que l'on retrouve sur les côtes françaises.

Marnage

Différence de hauteur d'eau entre une pleine mer et une basse mer consécutives, à ne pas confondre avec l'amplitude de la marée (qui ne vaut que la moitié).

Morte-eau

Période à faible marnage lors des quarts de Lune.

Phase

La phase est l'heure à laquelle un signal sinusoïdal de période 12h est maximal. D'une manière plus générale la phase permet de repérer dans un cercle la direction (=l'heure) à laquelle un signal périodique est maximal.

Point amphidromique

En toute rigueur, un point amphidromique est défini pour une composante de la marée. C'est un point où l'amplitude est nulle et où les lignes cotidales se rejoignent (le marnage est nul). [L'onde de marée](#) tourne autour de ces points dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pour l'hémisphère Nord. Il existe cependant des exceptions...

Vive-eau

Période à forts marnage correspondant à l'alignement de la Terre, de la Lune et du Soleil.



Mise à jour : 12/07/01
Ifremer

 Précédente

 Remonter

Cours d'Océanographie - la marée - DRO/LPO - Ifremer

- ◆ [Rôle des astres](#)
- ◆ [L'onde de marée](#)
- ◆ [Spectre de la marée](#)
- ◆ [Prédiction de la marée](#)
- ◆ [Recherche sur la marée](#)
- ◆ [Lexique](#)



Mise à jour : 17/07/01
Ifremer

L'océan et le climat

← Précédente Accueil → Suivante

Plan

Oscillation Nord-Atl.

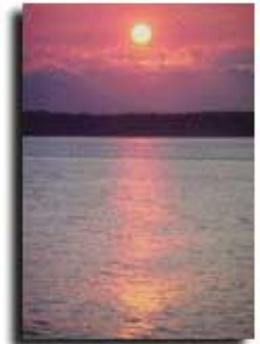
Variations climatiques

climat n. m.

Ensemble des éléments qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère dans une région déterminée.

Les éléments du climat sont : la température et l'humidité de l'air dans les couches voisines du sol, les précipitations, l'insolation, le vent, la pression atmosphérique et, accessoirement, le champ électrique de l'atmosphère, l'ionisation de l'air, sa composition chimique. On classe les climats en quelques types principaux : climats équatorial, tropical, tempéré, polaire; ou : climats maritime, continental, d'altitude. Il existe de nombreux sous-climats (alpin, méditerranéen, désertique, etc.).

(Source : *Dictionnaire Universel Francophone Hachette*)



L'océan joue un rôle aussi important que l'atmosphère dans la régulation du climat terrestre, en transportant des eaux chaudes des Tropiques vers les hautes latitudes (dans le Gulf Stream par exemple), et des eaux froides des hautes latitudes vers les tropiques (l'eau profonde nord-atlantique ou l'eau antarctique de fond par exemple). Il représente également un réservoir de chaleur immense (mille fois plus important que l'atmosphère), ce qui lui donne un rôle de modérateur des variations climatiques (comparez par exemple les différences de températures entre l'été et l'hiver sous des climats continentaux et océaniques) : c'est en quelque sorte la mémoire du système climatique terrestre.

L'océan intervient ainsi dans la plupart des phénomènes climatiques récurrents, par exemple en ce qui nous concerne en Europe, [l'Oscillation Nord-Atlantique](#). Mais c'est surtout dans les [variations climatiques de longue période](#) que son influence est primordiale, par exemple en réponse au réchauffement global dû à l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz carbonique. Couplé avec l'atmosphère, il participe également à un signal climatique majeur, [El Niño](#) (ou Oscillation Australe) dans le Pacifique tropical.



Pour en savoir plus...

[Dossier Climat du CNRS](#)

[Programme international CLIVAR \(Climate variability and predicatibility\)](#)

← Précédente → Suivante

Observer l'océan

← Précédente

⊕ Accueil

Plan



Pour réaliser ces mesures en mer le laboratoire met en oeuvre différents moyens de mesures présentés ci-dessous.

- ◆ [L'hydrologie](#)
- ◆ [La courantométrie](#)
- ◆ [Les flotteurs dérivants](#)

Bathysonde équipée d'une rosette de 30 bouteilles pour prélèvements

Cette technique consiste à descendre, à partir du navire à l'arrêt, un châssis équipé de bouteilles de prélèvements et de divers instruments de mesures (sonde Neil Brown, ADCP, thermomètres et pressiomètres à renversement) au bout d'un câble électroporteur (jusqu'à 6000 mètres de profondeur). Les mesures sont transmises en temps réel à bord du navire et traitées par un ordinateur embarqué dans un conteneur. Lorsque la bathysonde a atteint le fond, on la remonte en refermant les bouteilles une à

une, à différent niveau. L'eau ainsi prélevée sera analysée à l'arrivée de la bathysonde sur le pont (mesure de salinité, oxygène, sel nutritifs, etc...). Une partie de ces analyses (S , O_2) serviront à calibrer les mesures de la sonde.

Le LPO a développé un ensemble de logiciels et d'outils permettant de traiter les données d'hydrologie depuis l'acquisition jusqu'à l'édition et le tracé pour le rapport de données.

Au cours des campagnes CTD, l'acquisition des données s'effectue en temps réel via le logiciel AMBRE (Acquisition des Mesures Bathysonde et Rejeu).

Mise à l'eau de la bathysonde. (début de profil)

© Ifremer/DRO/LPO

Ce logiciel, développé pour le compte et en collaboration avec le LPO par le service DITI/DSI de l'IFREMER :

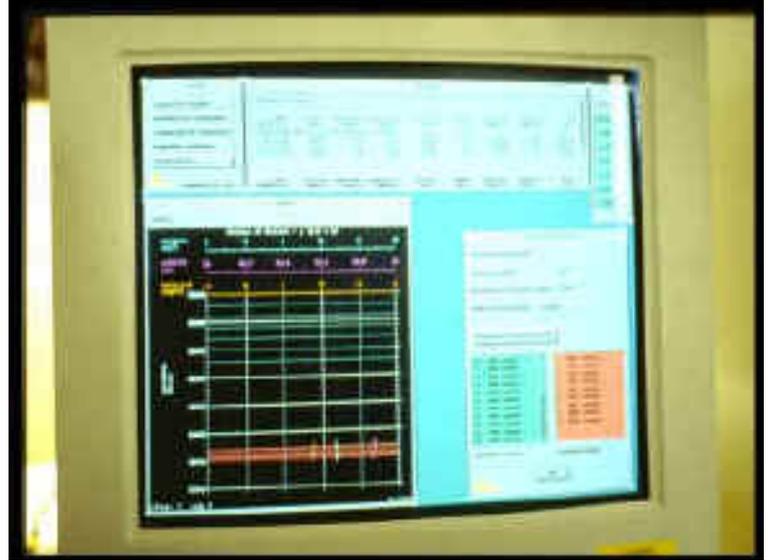
- enregistre les données de la sonde Neil Brown MarkIII B (Pression, Température, Conductivité, Oxygène) à la cadence de 32 mesures par seconde (31.25 Hz)
- gère le déclenchement des bouteilles au cours du profil remontée
- permet de suivre en temps réel les tracés qui visualisent les mesures des différents capteurs.

Les données acquises sont ensuite moyennées et réduites à une valeur par mètre de profondeur (1dbar) grâce au logiciel TpsDiffere. Ce logiciel permet aussi la saisie des résultats d'analyse chimie. Il a été développé au LPO. Ces 2 logiciels sont exécutés en mer, à chaque station.



Centrale d'acquisition mesures de la bathysonde. (container embarqué)

Visualisation des profils (mesures capteurs) en temps réel sur station SUN.



© Ifremer/DRO/LPO

Le Système **AMBRE** (Acquisition des Mesures Bathysonde et Rejeu)

Pour mettre en oeuvre cette instrumentation le laboratoire possède un container embarqué regroupant l'ensemble de ces moyens informatiques et techniques.

Au cours d'un profil, la sonde effectue des mesures de pression, température, conductivité et oxygène dissous.

Ces données sont transmises sous forme de signal acoustique via le câble électroporteur au bateau.

Un appareil de bord décode le signal des capteurs et le transmet au système informatique d'acquisition.

AMBRE est implanté sur une station SUN.

Cette station permet la vérification, l'archivage, ainsi que de la visualisation des données.

Ce système peut être connecté au réseau local Ethernet du bord à partir duquel les informations de position, de bathymétrie et de longueur de câble filé sont automatiquement saisies.

◆ La courantométrie

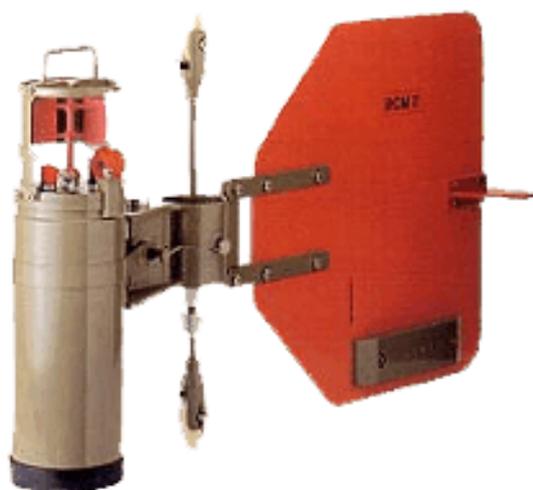
Pour mesurer les courants en un point sur une grande période, le laboratoire met en

place des lignes de mouillages.

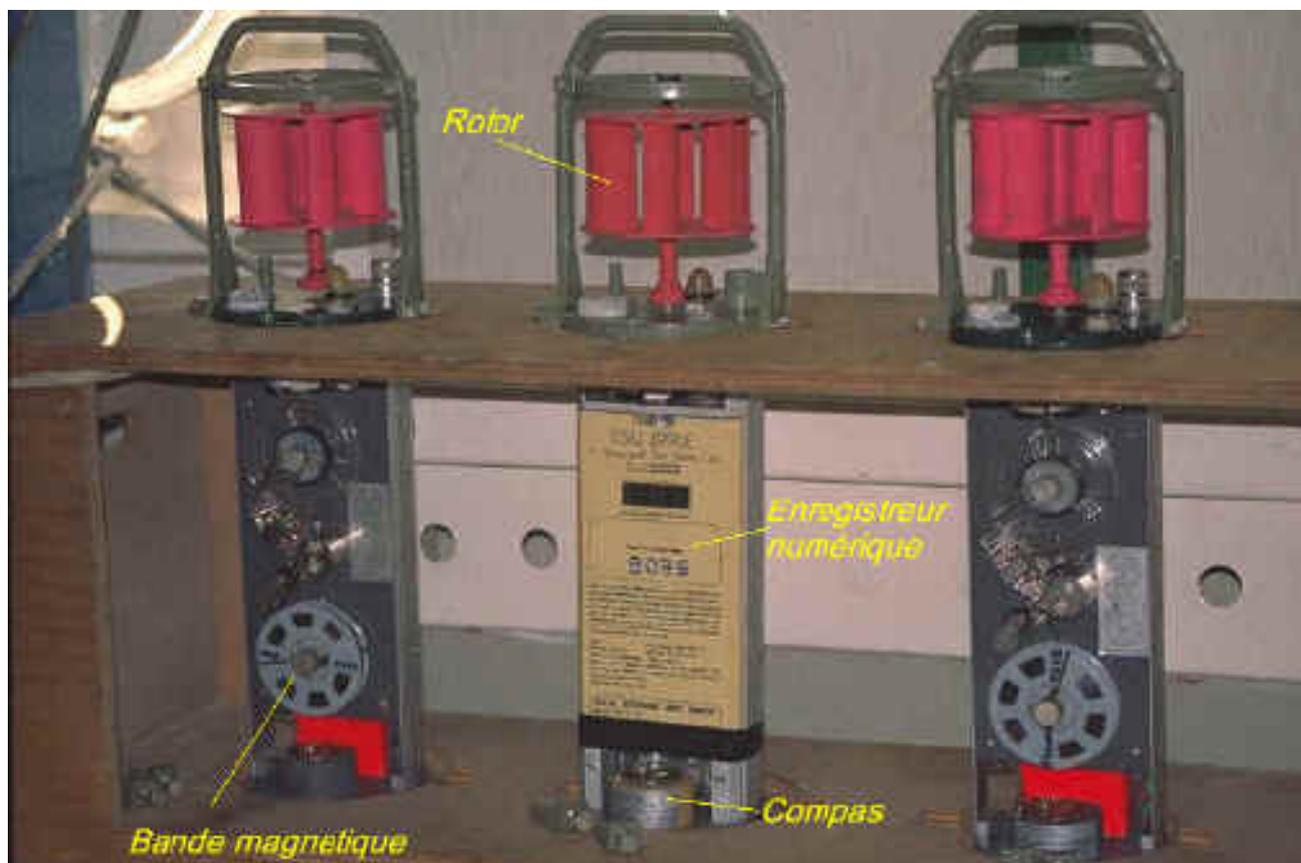
Celles-ci sont équipées de courantomètres, de flottabilités, de largueurs acoustiques. Il s'agit en général de mouillages sub-surfaces, c'est à dire, que rien n'apparaît à la surface des océans: ils sont ancrés sur le fond par l'intermédiaire d'un lest et la ligne (acier ou kevlar) est maintenue verticale grâce à des flottabilités réparties à différentes de profondeurs.

Les courantomètres

Ils permettent de mesurer la vitesse et direction du courant en un point de la ligne de mouillage.



Courantomètre RCM7



© Ifremer/DRO/LPO

Les courantomètres stockent les données recueillies sur bande magnétique ou sur

enregistreur numérique.(cf. fig. ci-dessus)

Une nouvelle génération d'instruments commence à apparaître: les courantomètres à effet Doppler ou temps de trajet. ([principe du Doppler](#)).



Courantomètre RCM9 (doppler)



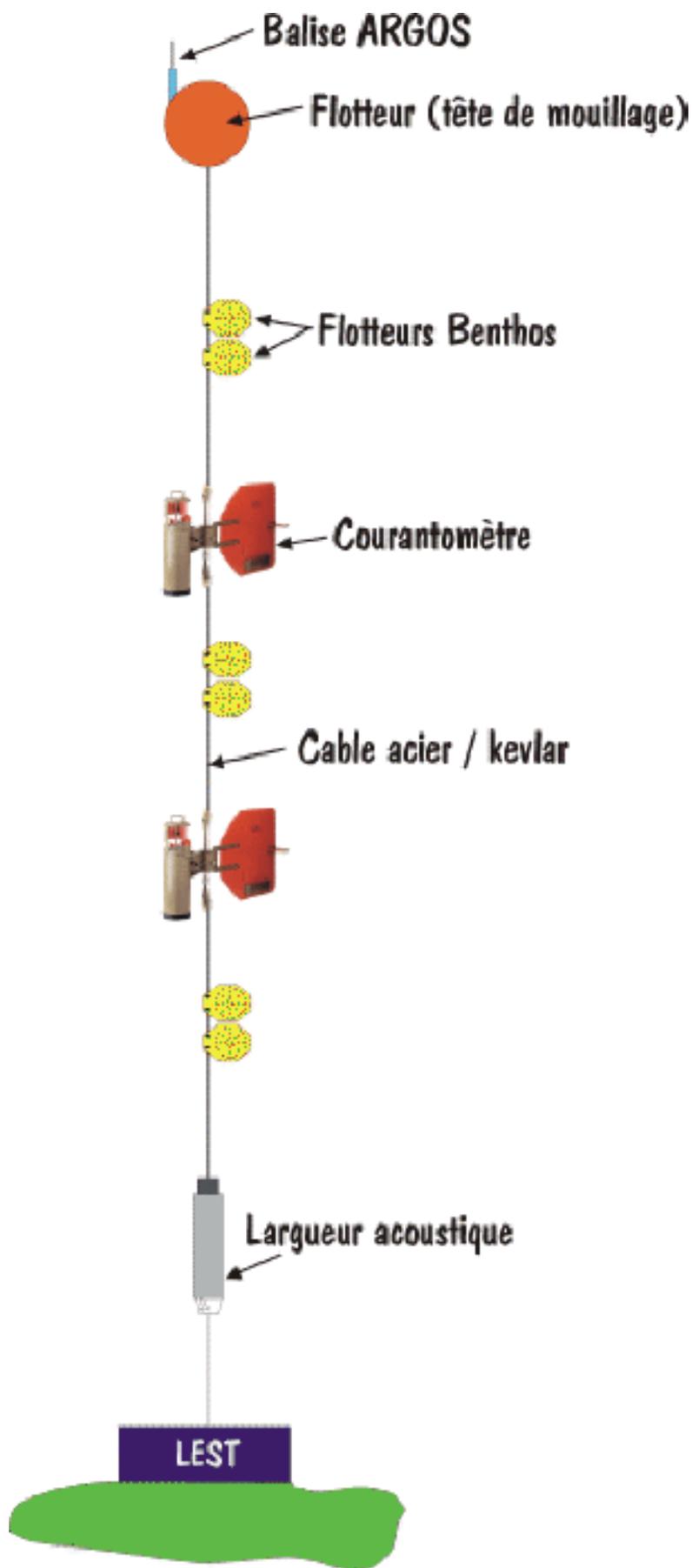
© Ifremer/DRO/LPO

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Les largueurs acoustiques

Ces instruments permettent de relier la ligne de mouillage au lest posé sur le fond. Pour déclencher la remontée du mouillage, un signal acoustique est envoyé à partir du navire vers le largueur. A la réception de ce signal, le largueur libère le lien mécanique qui le relie au lest: l'ensemble de la ligne remonte alors vers la surface grâce à la flottabilité positive de l'ensemble.

Schéma d'une ligne de mouillage

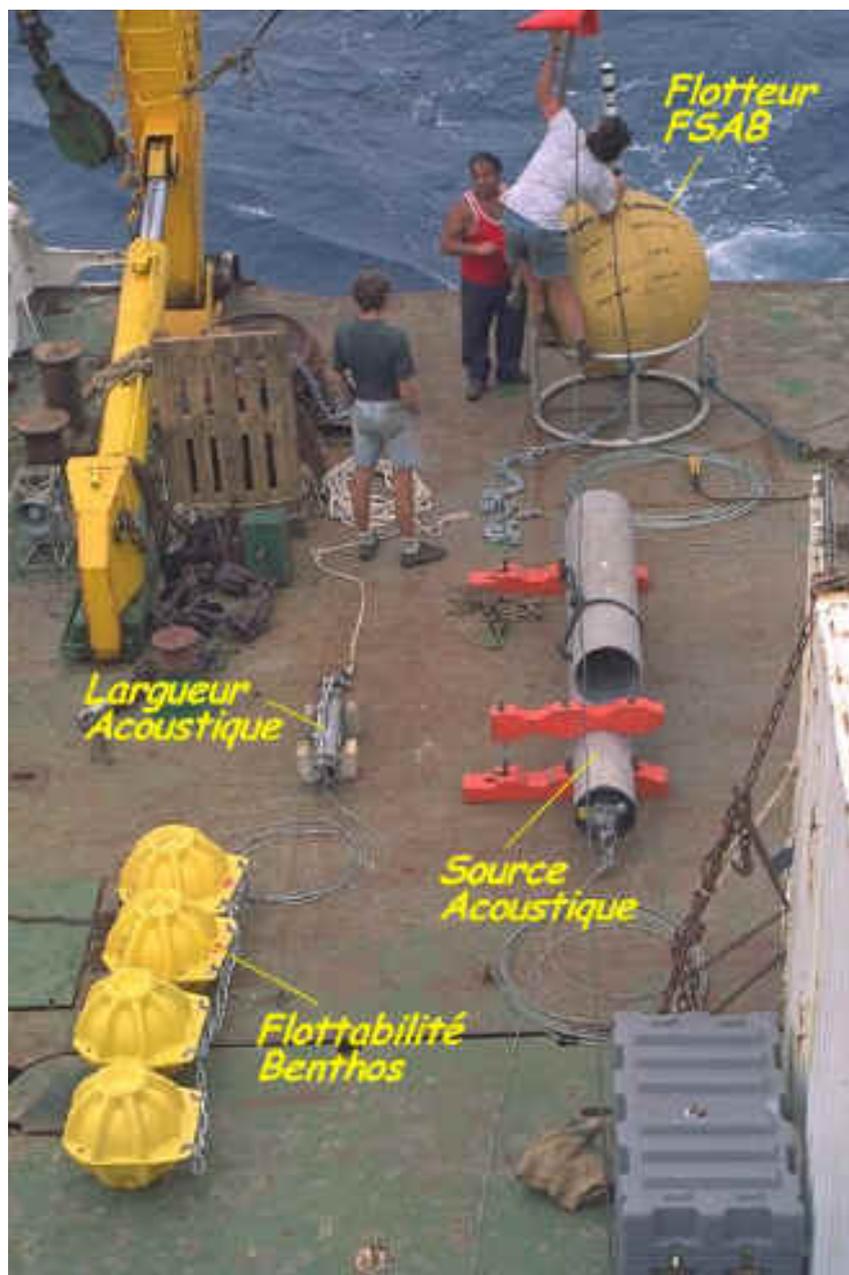


Ce type de mouillage est dit "subsurface", la flottabilité (tête de mouillage) peut se trouver à 1000m en dessous de la surface.

◆ Les flotteurs dérivants

Ces flotteurs (type MARVOR) permettent l'étude des masses d'eau profondes sur une grande période.

Le fonctionnement de ces flotteurs nécessite au préalable la mise en place d'un réseau de sources acoustiques. (cf. photo).



© Ifremer/DRO/LPO

Ces flotteurs sont immergés en un point donné, ils plongent jusqu'à une profondeur d'équilibre comprise entre 500m et 2500m (choisi par l'utilisateur) et dérivent dans la masse d'eau.

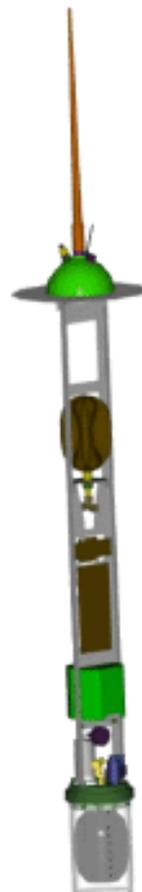
La réception des signaux émis par le réseau de sources acoustiques permet de positionner le flotteur géographiquement à un instant donné.

Ils sont programmés pour remonter à la surface après quelques semaines d'immersion afin de transmettre les informations collectées au cours de la plongée via les satellites du système ARGOS, puis replongent à leur profondeur de consigne pour un nouveau cycle.



© Ifremer

Flotteurs MARVOR



Vue intérieure

Mise à jour : 23/08/01
Ifremer

← Précédente

Cours d'Océanographie - observer l'océan - DRO/LPO - Ifremer

- ◆ [L'hydrologie](#)
- ◆ [La courantométrie](#)
- ◆ [Les flotteurs dérivants](#)



Mise à jour : 17/07/01
Ifremer