

Les tropiques vus du ciel, ou l'altimétrie satellitaire dans les régions équatoriales

S. Arnault

Laboratoire d'océanographie et de climatologie (LODYC/ORSTOM), Tour 14, Boîte 100,
Université P. et M. Curie, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05

Mots-clés : Altimétrie satellitaire, circulation océanique, dynamique tropicale.
Key words : Satellite altimetry, ocean currents, tropical dynamics.

Résumé

Le rôle important de l'océan sur le climat de notre planète, et particulièrement le rôle de l'océan tropical, est maintenant bien admis par l'ensemble des scientifiques. Toutefois, comme beaucoup de sciences de la Terre, l'océanographie se heurte au problème crucial du manque de données.

Au cours de la dernière décennie, les océanographes ont pu obtenir, grâce aux techniques spatiales, une nouvelle source d'acquisition de mesures. Les différentes missions altimétriques et les principaux travaux en océanographie physique, auxquels celles-ci ont donné lieu dans les tropiques, sont repertoriés et analysés ici.

Satellite altimetry of the tropical areas

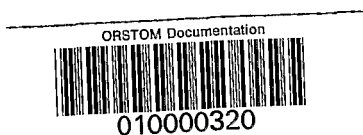
Abstract

It is now widely assumed that the ocean, and more particularly the tropical ocean, plays a key-role in the global evolution of our climate. However, in common with other Earth sciences, oceanography suffers acutely from a lack of data. During these last ten years, spatial techniques have brought a new hope to oceanographers by providing wide and regularly sampled data sets over the world. Different altimetric experiments are analysed in this paper with emphasis on the tropical studies which have followed.

Introduction

Transportant flux de matières et de chaleur, l'océan influence tout à la fois notre activité économique (pêches, transports maritimes, tourisme...), notre environnement (pollution, marées noires...), et notre climat : tout le monde a un jour appris que la Bretagne jouissait d'un climat plus tempéré que son vis-à-vis américain grâce à l'action thermique d'un courant atlantique. Il est donc important de pouvoir étudier et comprendre les différents mécanismes qui régissent les mouvements de cette masse d'eau qui recouvre environ les deux tiers de notre planète.

Depuis plusieurs décennies, les océanographes se trouvent confrontés au problème crucial du manque de données. Les campagnes à la mer sont difficiles à mettre en place, chères et donc rares. Les mesures récoltées, bien que de haute précision maintenant, sont encore trop souvent éparses dans le temps et dans l'espace pour entreprendre le suivi à long terme de l'océan en général, et de l'océan tropical en particulier. Même le programme franco-américain FOCAL/SEQUAL (Français Océan Climat en Atlantique tropical/Seasonal EQUatorial



- 3 AOUT 1995

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 42203

Cote : B Ex 1 M

experiment), destiné à l'étude du cycle saisonnier des couches de surface de l'océan Atlantique tropical, programme qualifié d'"intensif" en 1982-1984, ne mettait en jeu qu'une campagne océanographique tous les trois-quatre mois, une vingtaine de points de mesures fixes (mouillages courantométriques, marégraphes, écho-sondeurs inversés...), et quelques lâchers de bouées dérivantes. Bien que l'apport de ce programme à notre connaissance de l'océan Atlantique tropical et de sa dynamique ait été incontestable, la possibilité de maintenir un tel dispositif sur une échéance plus longue est difficile, voire impossible.

Et, pourtant, c'est dans un but à la fois d'observations et de prévisions que va opérer l'océanographie tropicale à grande échelle. De grandes questions ont vu le jour au cours de ces dernières années, qui sensibilisent l'opinion publique et mobilisent l'activité de certains chercheurs autour de la climatologie. Par exemple, quels sont les mécanismes qui produisent l'apparition des phénomènes El Niño, ces couches d'eau chaudes qui apparaissent tous les trois à cinq ans dans le Pacifique Équatorial Est, paralysant momentanément toute l'activité piscicole péruvienne, et semblant directement reliés à des anomalies météorologiques à l'échelle planétaire (régimes de pluies perturbés au Sahel ou au Brésil, cyclones en Polynésie...) ? Ou bien encore quel est (sera) le rôle de l'océan dans le cycle du gaz carbonique ? En effet, les mesures des taux de gaz carbonique présents dans l'atmosphère, déficitaires par rapport aux quantités réellement rejetées par l'activité humaine, animale ou végétale (biosphère et géosphère), accréditent l'hypothèse de l'absorption par l'océan d'une partie des gaz émis. Dès lors, peut-on se demander comment s'effectue ce transfert océan/atmosphère et en quelle quantité ? Y a-t-il risque de saturation de l'océan et de réchauffement global de notre planète ? Enfin, dans ce cas, comment suivre et prédire à l'échelle mondiale la montée du niveau des océans résultant de la dilatation stérique, remontée des eaux qui menacerait d'inondations de vastes étendues, depuis les côtes hollandaises jusqu'aux îles polynésiennes, en passant par le Bangladesh ?

L'océanographie traditionnelle et l'acquisition des mesures *in situ* ne peuvent, à elles seules, permettre de constituer les bases de ces nouvelles études à grande échelle (décennie et ceinture planétaire). Les mesures satellitaires peuvent apporter l'une des solutions à ce problème de pénurie de données.

L'altimétrie satellitaire

Parmi les différents types de capteurs pouvant être embarqués sur satellite se trouve l'altimètre. L'altimètre mesure la distance qui sépare le satellite de la surface de l'océan. Une hypothèse couramment utilisée en océanographie dynamique, dès lors qu'on s'intéresse aux grandes échelles spatio-temporelles, dite hypothèse de géostrophie, permet par ailleurs de relier la pente méridienne (zonale) de la surface de la mer aux courants zonaux (méridiens) à la surface océanique. Avec cette hypothèse géostrophique, l'altimétrie satellitaire peut donc conduire à la connaissance globale de la circulation océanique en surface. Mais, attention, dans les tropiques, une erreur de mesure sur la pente de quelques centimètres sur quelques centaines de kilomètres entraîne une incertitude sur les courants de plusieurs dizaines de centimètres/seconde ! Le défi est donc simple : il faut, à partir d'un satellite placé sur une orbite à plusieurs centaines de kilomètres (souvent 800 km), mesurer des distances avec une précision centimétrique ! Cette exigence explique que, bien que des altimètres satellitaires aient été lancés depuis le début des années 70, seules les dernières missions possédaient le niveau de précision requis pour des études océanographiques.

Nous ne développerons pas ici toutes les caractéristiques du signal altimétrique, et les particularités de son traitement. Les personnes intéressées pourront trouver tous les détails dans la littérature spécialisée (par exemple Ménard, 1982; "POSEIDON", document CNES, 1983). Rappelons toutefois que la mesure altimétrique, en plus de la topographie océanique, comprend également le géoïde, qu'il faut donc soustraire avant d'atteindre le signal océanique (Fig. 1). Malheureusement, la précision de ce géoïde reste encore insuffisante dans de nombreuses régions, en particulier les régions tropicales, pour aborder ainsi directement le signal océanographique. C'est pourquoi l'approche généralement adoptée par les océanographes consiste en l'étude de la variabilité de ce signal océanique, par soustraction d'une valeur moyenne, représentative à la fois de ce géoïde mal connu et de la circulation océanique moyenne, de la mesure altimétrique (méthode des arcs répétitifs, méthode des points de croisement...). Mais il faut garder à l'esprit que cette valeur "différenciée" reste elle aussi perturbée par un grand nombre de phénomènes qui sont autant d'"erreurs" pour les océanographes (signaux de marées, problèmes d'orbite, corrections ionosphériques et troposphériques, etc.). Une étude exhaustive de ces problèmes et de leur importance respective dans les régions tropicales peut être trouvée dans Arnault et Périgaud (1992). Disons, pour résumer, que les perturbations prépondérantes dans les études de la dynamique tropicale *via* l'altimétrie satellitaire sont liées à l'erreur d'orbite (surtout pour les études à grande échelle), à la présence dans l'air de vapeur d'eau (correction troposphérique humide) et aux marées océaniques (surtout près des côtes).

Nous allons voir maintenant que, malgré ces restrictions, l'apport de l'altimétrie satellitaire dans l'étude de la dynamique des océans tropicaux a été important.

L'altimétrie en zone tropicale

L'océan tropical est caractérisé, par rapport aux hautes et moyennes latitudes, par deux propriétés : sa structure thermique à deux couches et l'annulation de la force de Coriolis dans les équations de Navier-Stokes, équations de base de la dynamique des fluides. En effet, la structure thermique de l'océan tropical peut être décrite comme une couche chaude et homogène (100 m d'épaisseur environ) recouvrant une couche plus froide et plus profonde. Cette structure en "marches d'escalier", avec une séparation eaux chaudes/eaux froides (thermocline) très contrastée diffère profondément des profils thermiques très stratifiés des hautes latitudes. Elle permet ainsi d'appréhender les variations de certains paramètres comme la profondeur de la thermocline, paramètre très important pour l'océanographe physicien, à partir des variations d'autres quantités comme la hauteur dynamique (intégrale du volume spécifique entre deux isobares) ou la hauteur du niveau de la mer (donnée notamment par l'altimétrie).

L'annulation de la force de Coriolis, proportionnelle au sinus de la latitude, entraîne par ailleurs une réponse rapide et forte de l'océan tropical aux variations du vent. Dès lors, les phénomènes océaniques aux échelles annuelles et interannuelles deviennent accessibles à l'observation. Enfin, la théorie des ondes linéaires (ondes de Kelvin, ondes de Rossby...), avec des échelles de temps de propagation de l'ordre du mois, permet d'expliquer un certain nombre de phénomènes équatoriaux. Ces ondes communiquent rapidement d'un bord à l'autre du bassin l'information de la réponse de l'océan à l'action du vent, principal moteur de la dynamique océanique tropicale, alors qu'aux latitudes tempérées l'effet d'une tempête peut être encore perçu dans l'océan des années plus tard.

Si la dynamique tropicale peut être ainsi schématisée pour l'ensemble des océans, l'Indien, le Pacifique et l'Atlantique ont quand même leurs particularités propres, liées en fait

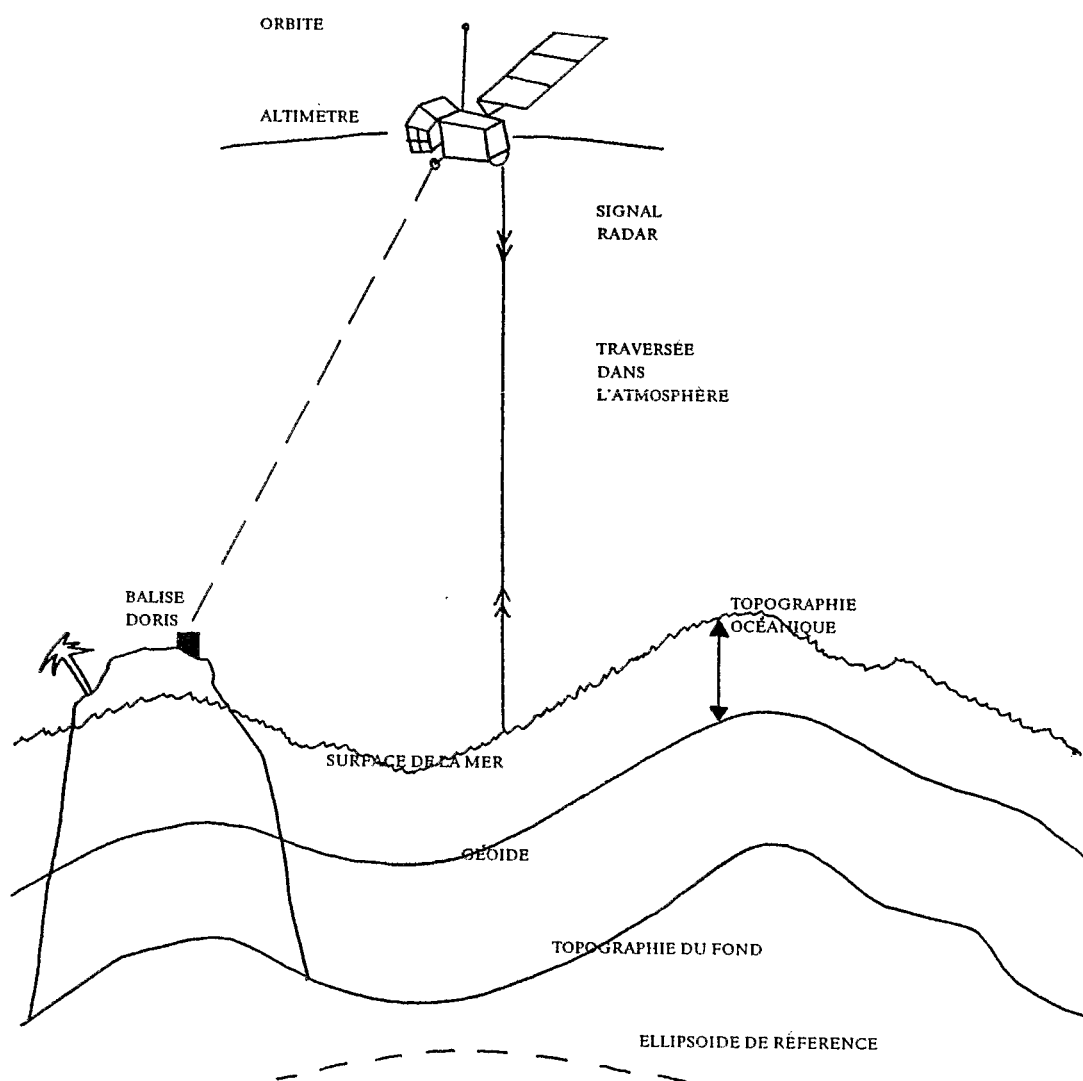


Fig. 1 - Principe de la mesure altimétrique (d'après un document Alcatel-France).
- The principle of altimetric measurement (from Alcatel-France).

principalement aux différentes caractéristiques des champs de vents qui les affectent. Ainsi le Pacifique présente un très fort signal interannuel (phénomènes El Niño/La Niña), alors que la réponse de l'Atlantique est plutôt à échelle saisonnière, même si des anomalies interannuelles peuvent aussi l'affecter. Nous retrouverons ces particularités dans l'énoncé qui suit.

Cinq générations d'altimètres ont été lancées depuis 1973 : SKYLAB en 1973, GEOS 3 en 1975, SEASAT en 1978, GEOSAT en 1985 et ERS1 en 1991, la précision instrumentale allant de 1 mètre pour les premiers à quelques centimètres pour les derniers. Comme nous l'avons rappelé, cette mauvaise précision des premiers altimètres les a écartés de tout usage océanographique. De plus, dans les tropiques, le signal à capter est de l'ordre de la dizaine de centimètres sur le millier de kilomètres, par rapport aux très fortes variabilités, de l'ordre du mètre sur quelques centaines de kilomètres, de certains signaux des moyennes latitudes, comme les courants du Gulf Stream ou du Kuroshio. Le rapport signal/bruit n'est donc pas favorable dans les régions tropicales. Ceci explique que la plupart des études entreprises avec SEASAT (7 cm de précision) avaient pour objectifs les grands courants de bord ouest et leurs tourbillons, plus faciles à détecter. De plus, la courte durée de cette mission (trois mois)

s'accommodait bien de ces études méso-échelles. Le numéro spécial SEASAT, publié en 1982 par le *Journal of Geophysical Research*, ne comprenait en fait aucun article réellement consacré à l'océanographie tropicale, qui n'était abordée que par le biais d'études plus générales : Fu (1983), par exemple, montrait que les spectres d'énergie calculés le long des traces de SEASAT sur l'ensemble des océans avaient une pente significativement différente selon que l'on était dans une région hautement énergétique (pente en k^{-5}) ou non (pente en k^{-1}), comme les régions tropicales. Cheney *et al.* (1983) présentaient des cartes de variabilité méso-échelle sur tout le globe d'où l'on pouvait extraire une valeur moyenne de l'ordre de 6 cm pour les tropiques.

Il faudra attendre quelques années avant de voir paraître les premières études traitant réellement d'altimétrie tropicale, et ces premières études s'intéressent d'abord à des comparaisons données altimétriques/mesures traditionnelles. Périgaud & Minster (1988) comparent ainsi les données SEASAT avec des hauteurs dynamiques calculées à partir des sondes thermiques tirées d'un bateau marchand dans l'océan Indien, et trouvent un assez bon accord entre les deux types de mesures. Dans l'Atlantique, Ménard (1988) combine les données GEOS 3 et SEASAT pour obtenir un cycle saisonnier moyen du niveau de la mer assez similaire à celui donné par une climatologie de hauteurs dynamiques (Merle & Arnault, 1985). Dans le Pacifique enfin, Malardé *et al.* (1987) mettent en évidence, à partir des mesures altimétriques SEASAT, un ensemble de tourbillons de 600 km de diamètre, de 15-20 cm d'amplitude, se propageant vers l'ouest, vers 4-5°N, avec une vitesse de 40 km/jour environ. Ces tourbillons semblent concorder avec des ondulations thermiques observées en surface par Legeckis (1977) à partir d'un autre type de mesures satellitaires : les données thermiques AVHRR. L'explication de ces phénomènes de type ondulatoire réside dans l'instabilité créée par la proximité de deux courants océaniques de sens contraires (proximité particulièrement critique lors de l'intensification des courants en été-automne boréal), le courant équatorial Sud (CES), situé le long de l'équateur et portant à l'ouest, et le contre-courant équatorial Nord (CCEN), dirigé vers l'est, entre 4 et 8°N (Philander, 1978; Cox, 1980).

Mais la grande aventure en altimétrie tropicale ne commence réellement qu'en mars 1985, avec le lancement du satellite GEOSAT. Plus de quatre années de mesures vont ainsi être recueillies grâce à cet altimètre de la marine américaine. La première période de la mission (mars 1985-novembre 1986), classifiée et réservée à la marine américaine pour obtenir une image du géoïde marin la plus précise possible, sert de base à Miller *et al.* (1986), pour suggérer, puis suivre tout le long de l'équateur, dans le Pacifique, la propagation d'une onde à la vitesse de 3 m/s vers l'est, entre mai et juin 1986. Ces auteurs vont par la suite produire chaque mois des cartes altimétriques sur l'ensemble du Pacifique, dans un but d'observation permanente de cet océan, alors qu'un phénomène El Niño, le "El Niño 86-87", se développe sur cet océan.

En novembre 1986, après sa mission géodésique, le satellite est placé sur une orbite répétitive à 17 jours, et ses données sont alors distribuées à l'ensemble des scientifiques intéressés. Plusieurs expériences sont alors conduites pour juger de la précision de l'altimètre et de l'amélioration apportée par rapport aux missions précédentes. Reprenant les travaux de Cheney *et al.* (1983), Zlotnicki *et al.* (1989) comparent les cartes mondiales de variabilité méso-échelle calculées par GEOSAT à celles fournies par SEASAT, et montrent qu'avec l'utilisation d'une plus longue série temporelle de mesures (GEOSAT) les valeurs moyennes sont améliorées et augmentées. Dans l'Atlantique, Carton et Katz (1990) trouvent une bonne corrélation entre les signaux mensuels données par des écho-sondeurs inversés sur le bord nord-ouest du bassin et les mesures GEOSAT. Arnault *et al.* (1992) organisent quant à eux une campagne de validation en octobre 1988, la campagne ARAMIS 1, dont le but est d'encadrer le passage du satellite par une collecte intensive de mesures traditionnelles de températures et salinités, lesquelles permettent le calcul de la hauteur dynamique proche, pour les océans tropicaux

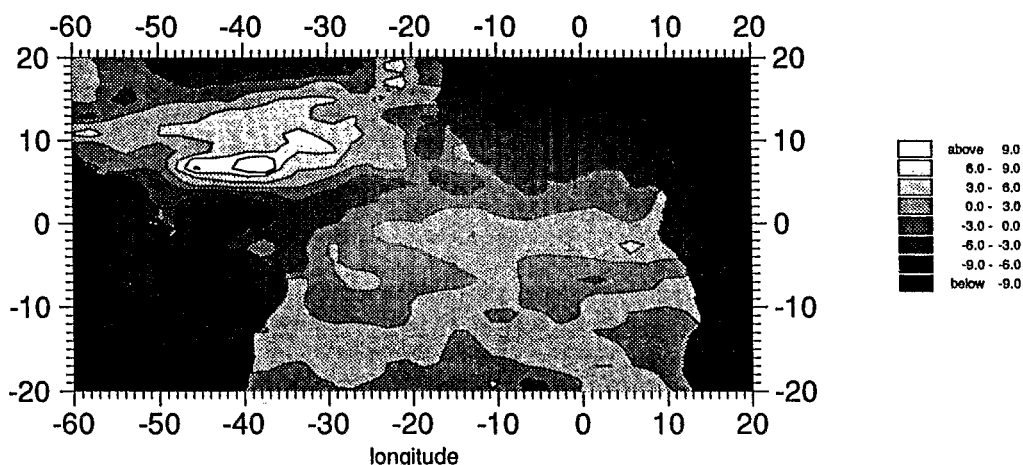
comme nous l'avons rappelé, du niveau de la mer. La corrélation entre les deux signaux tout au long de la route du bateau est de l'ordre de l'ordre de 0,9, avec une différence moyenne de 3,5 cm en écart-type au nord de 5°S.

Le Pacifique est, lui aussi, le théâtre de telles investigations : Cheney *et al.* (1989) trouvent entre les données GEOSAT et des anomalies du niveau de la mer, obtenues par quatorze marégraphes placés sur des îles du Pacifique, une différence de l'ordre de 4 cm et une corrélation de 0,7. Tai *et al.* (1989) comparent également les données GEOSAT avec des données marégraphes du Pacifique, mais ajoutent à la comparaison des hauteurs dynamiques dérivées de sondes thermiques échantillonnées près de ces îles. Les trois champs ainsi obtenus présentent entre eux une corrélation statistique significative. Les corrélations entre hauteurs dynamiques et altimétrie sont toutefois plus élevées dans l'hémisphère Nord, et, près des îles, l'accord se révèle meilleur entre marégraphes et altimétrie (0,64) qu'entre hauteurs dynamiques et altimétrie (0,46). Toujours avec les marégraphes du Pacifique, Périgaud (1990) montre que l'échantillonnage à 17 jours du satellite influe peu pour retrouver notamment les basses fréquences du signal océanique. Enfin, l'étude menée par Picaut *et al.* (1990), est intéressante, car elle ne s'adresse pas seulement au niveau de la mer altimétrique, mais aussi au courant géostrophique dérivé de ce dernier. Trois courantomètres situés le long de l'équateur à 165°E, 140°W, 110°W, dans le Pacifique, fournissent les points de comparaison. A notre connaissance, c'est une des premières approches de comparaison des courants menée dans les tropiques. Les corrélations entre les deux types de mesures sont étonnamment bonnes : 0,83, 0,85 et 0,51 avec une différence moyenne de 23 cm/s. Les auteurs expliquent ce surprenant accord, par rapport aux 3-4 cm de différence annoncés pour le niveau de la mer altimétrie/marégraphe (et qui devrait entraîner, selon l'équation rigoureuse de la géostrophie, une erreur sur le courant de l'ordre de 3 m/s), par le filtrage opéré sur les données GEOSAT en prenant la dérivée seconde du signal préalablement lissé spatialement et temporellement.

Ces premiers travaux, bien que souvent locaux et soumis à des incertitudes diverses pour tenir compte des délocalisations ou déphasages entre les séries de mesures, paraissent cependant suffisamment encourageants pour que les océanographes se tournent vers des études à grande échelle — pour lesquelles certaines erreurs comme l'erreur d'orbite sont plus critiques — ou vers la reconnaissance, à travers des données altimétriques, de nouveaux phénomènes océanographiques.

Faisant suite aux travaux de Ménard (1988), Arnault *et al.* (1990) obtiennent des cartes d'anomalies mensuelles du niveau de la mer GEOSAT sur tout l'Atlantique tropical, de novembre 1986 à novembre 1987 (Fig. 2). Ces cartes concordent avec le signal grande échelle spatio-temporelle de la hauteur dynamique climatologique. L'accord est particulièrement remarquable dans la région du contre-courant équatorial Nord, entre 4 et 8°N. Carton et Katz (1990) trouvent d'ailleurs un transport, pour ce courant déduit de GEOSAT, de 40 sv. à 38°W en novembre 1987, valeur tout à fait compatible avec les mesures traditionnelles. Les fluctuations latitudinales du coeur du courant peuvent également être suivies par GEOSAT et reliées au déplacement de la zone de convergence des alizés (Arnault *et al.*, 1991a).

L'intérêt de la couverture spatio-temporelle de GEOSAT est encore plus manifeste lorsqu'on s'intéresse à l'océan Pacifique, puisqu'un phénomène El Niño se développa en 1986-1987, c'est-à-dire juste pendant la mission GEOSAT. Pour la première fois, un El Niño et les différents phénomènes océaniques lui étant associés ont pu être observés d'un bout à l'autre du bassin.



MARS 1987

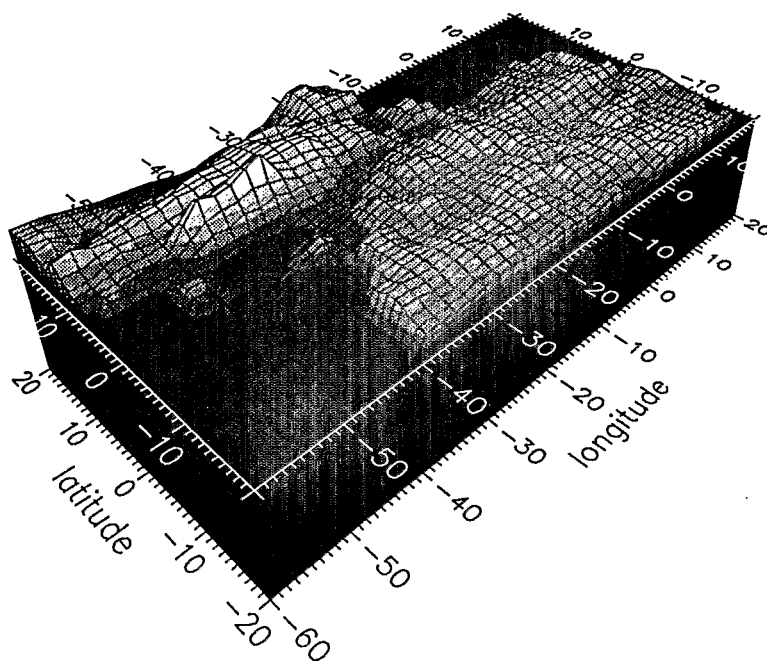


Fig. 2 - Exemple de reconstitution de l'anomalie du niveau de l'océan obtenue par altimètre : ici, Geosat sur l'Atlantique tropical, en mars 1987. Les anomalies négatives (en foncé) sont associées à des creux de la topographie de l'océan, et les anomalies positives (en clair) à des élévations. Les courants marins, proportionnels aux différences entre crêtes et creux, seront d'autant plus forts que le contraste sera marqué.

- Example of a sea level anomaly as it can be obtained from altimetry: here GEOSAT data over the tropical Atlantic Ocean in March 1987. Negative anomalies (in dark grey) are linked to lows in the ocean topography whereas positive anomalies are linked to highs. Therefore the oceanic currents, which are proportional to the gradients, will be stronger in the case of stronger contrasts.

Dès le début de la mission GEOSAT, Miller *et al.* (1986, 1988) mettent en évidence des propagations d'anomalies du niveau de la mer, le long de l'équateur, associées à cet El Niño 1986-1987. Ces anomalies, positives ou négatives, de 10 cm d'amplitude, se déplacent à travers le Pacifique avec des vitesses de 2,4 à 2,8 m/s; cet ordre de grandeur suggère des propagations d'ondes de Kelvin associées à des plongées des eaux chaudes de surface ("downwelling") ou à des remontées d'eaux froides profondes ("upwelling"). L'anomalie positive (onde de Kelvin de "downwelling") pourrait par ailleurs avoir été produite en 1986 par une relaxation, voire une renverse, des alizés habituels. Delcroix *et al.* (1991) suivent une onde de Kelvin de "downwelling", considérée depuis comme un des phénomènes majeurs de cet El Niño 1986-1987, qui s'est produite en décembre 1986, alors qu'une importante anomalie de vent d'ouest se produisait à l'ouest de la ligne de changement de date. L'élévation associée à cette onde est de 15 cm et la vitesse de phase (2,28 à 2,82 m/s) est caractéristique d'un mode vertical barocline du premier ordre (c'est-à-dire que le profil vertical de la vitesse zonale, par exemple, n'a qu'une seule profondeur où le courant change de signe). Une onde de Kelvin, d'"upwelling" cette fois, est ensuite détectée en janvier 1987, tout le long de l'équateur, et une seconde en juin 1987, créant une dénivellation de 10 cm et se propageant de la partie ouest à la partie centrale du Pacifique. Une onde de Rossby, traversant tout le Pacifique d'est en ouest de mars à septembre 1987 est également mise en évidence à 4°N et à 4°S. La vitesse de propagation (1,02 m/s) est aussi caractéristique du premier mode barocline et correspond à peu près à la valeur donnée par la théorie des ondes linéaires : $c/(2m+1)$, m le mode vertical considéré, c la vitesse de l'onde de Kelvin du mode considéré. Dans un premier temps, les auteurs suggèrent que ces ondes de Rossby pourraient être la réflexion de l'onde de Kelvin détectée en janvier 1987. Mais leurs récents travaux (Dupenhoat *et al.*, 1992) montrent en fait que ces ondes se produisent annuellement sous l'effet du vent local, près de la côte américaine, et que la contribution de l'onde de Kelvin en 1987, incidente, se limite à un renforcement des amplitudes.

Ces amplitudes, d'ailleurs, de l'ordre de la dizaine de centimètres, peuvent paraître négligeables comparées au millier de mètres de la profondeur de l'océan. Mais il faut savoir qu'en termes de courants, les anomalies liées au passage de ces ondes furent du même ordre de grandeur que la variation annuelle desdits courants ! Toujours dans le domaine des ondes tropicales, Périgaud (1990) reprend les travaux initiés par Malardé *et al.* (1987) sur les instabilités de Legeckis. Elle retrouve le long de 5°N des fluctuations, avec des périodes de 28-40 jours et des longueurs d'onde de 1000-2000 km, se déplaçant vers l'ouest à la vitesse de 35 km/jour. Mais elle montre que des ondes similaires se trouvent à 12°N, avec des périodes de 50-90 jours, des longueurs d'onde de 630-950 km et une propagation vers l'ouest avec une vitesse d'environ 12 km/jour. Comme les ondes situées à 5°N sont bien corrélées en espace et en temps avec les renforcements des cisaillements entre courant équatorial Sud vers l'ouest et contre-courant équatorial Nord vers l'est, les ondes situées à 12°N peuvent être reliées au cisaillement entre contre-courant équatorial Nord et courant équatorial Nord vers l'ouest à nouveau. Enfin, Hansen et Maul (1991) combinant données GEOSAT avec bouées dérivantes, sondes thermiques et mesures hydrologiques traditionnelles, décrivent des tourbillons anticycloniques à l'approche de la côte d'Amérique centrale, qu'ils attribuent à la conservation de la vorticité potentielle lorsque le contre-courant équatorial Nord, rencontrant la côte, vire au nord en automne boréal.

Pour conclure cette rétrospective des travaux ayant utilisé l'altimétrie dans les régions tropicales, mentionnons une dernière approche intéressante puisqu'elle utilise les deux seuls moyens (à ce jour) d'obtenir des visions globales des phénomènes océaniques : la modélisation numérique et les techniques spatiales.

Ainsi, dans l'océan Indien, Périgaud et Delecluse (1991) comparent les données GEOSAT et les résultats obtenus par un modèle numérique non linéaire schématisant l'océan comme un milieu à deux couches, dont l'une, la couche inférieure, est au repos (modèle "shallow-water"). Un bon accord est trouvé sur les composantes semi-annuelles, annuelles et interannuelles du signal. Il est surprenant de constater que les plus fortes variations annuelles sont identifiées dans l'hémisphère Sud. Le signal se propage vers le sud-ouest et est identifié comme des ondes libres de Rossby irradiant de la bordure est. Arnault *et al.* (1991b) utilisent aussi un modèle simple du même type, mais dans l'Atlantique tropical, conjointement avec un autre modèle dit "aux équations primitives", c'est-à-dire limitant au maximum les hypothèses simplificatrices pour reproduire au mieux la "réalité" de l'océan. Les deux modèles sont forcés par les mêmes champs de vents entre 1986 et 1988. Le meilleur accord sur la variabilité basse fréquence avec GEOSAT est donné par le modèle le plus complexe, comme on pouvait s'y attendre, mais les différences avec le modèle simple sont assez faibles. Cette étude met aussi en évidence une anomalie interannuelle, dans le golfe de Guinée, avec l'apparition d'eaux chaudes au printemps 1988. Comme une anomalie de ce type avait déjà été remarquée en 1984, lors du programme FOCAL/SEQUAL, après le El Niño Pacifique 82-83, il est raisonnable de penser à une interconnexion des deux bassins. Plusieurs explications sont d'ailleurs étudiées actuellement. Enfin, un bon accord est également trouvé entre les données GEOSAT et les résultats d'un modèle aux équations primitives par Cheney *et al.* (1989) sur le Pacifique tropical.

Conclusion

Il est maintenant établi que l'altimétrie satellitaire peut fournir un puissant outil aux océanographes physiciens pour obtenir des informations à des échelles spatio-temporelles globales, ce qui est difficilement concevable à partir de simples moyens conventionnels. En ce sens, le satellite américain GEOSAT, avec ses quatre années de mesures, a constitué une mine d'informations, y compris pour des travaux en région tropicale, difficiles d'approche à cause de l'importance relative de certaines "erreurs" altimétriques face à la faiblesse du signal recherché. La concordance (inespérée !) entre la mission et un El Niño dans le Pacifique a permis de mettre en évidence bon nombre de phénomènes océaniques (ondes, anomalies dans l'Atlantique) associés à cet événement. Aujourd'hui encore, les causes exactes de ces phénomènes climatiques demeurent mal connues, et des équipes de recherche envisagent de se fonder sur les mesures GEOSAT, entre autres types de mesures, pour tenter de percer certains mystères quant aux mécanismes des El Niño, car comme nous l'avons rappelé dans notre introduction, les conséquences socio-économiques et climatiques de ce phénomène sont grandes.

Jusqu'à nos jours, les missions altimétriques ont malheureusement été limitées par divers facteurs : SKYLAB n'était pas assez précis, de même que GEOS 3 qui possédait de plus une très mauvaise couverture spatiale. SEASAT n'a duré que trois mois. Même GEOSAT aurait pu être amélioré par la présence à bord d'un radiomètre embarqué, indispensable pour obtenir une bonne correction des phénomènes liés à la vapeur d'eau, si importants dans les tropiques. En ce sens, la mission franco-américaine (NASA/CNES) TOPEX/POSEIDON, lancée au cours de l'été 1992, devrait véritablement marquer une avancée nouvelle de l'océanographie spatiale : deux altimètres de haute précision, un système de poursuite performant (meilleure orbite), un radiomètre à bord (vapeur d'eau), des modèles de marées, de ionosphère..., de quoi constituer une nouvelle source de données incomparable par sa couverture spatiale, sur une période qu'on espère la plus longue possible !

Références bibliographiques

- Arnault S., Ménard Y. & Merle J., 1990.- Observing the tropical Atlantic Ocean in 86-87 from altimetry.- *J. Geophys. Res.*, 95, C10 : 17921-17945.
- Arnault S., Boutin J., Etcheto J. & Citeau J., 1991a.- Satellite data : toward a new way to study the tropical ocean dynamics.- Soumis à *J. Phys. Oceanogr.*
- Arnault S., Morlière A., Merle J. & Ménard Y., 1991b.- Low-frequency variability of the tropical Atlantic surface topography : altimetry and model comparison.- A paraître dans *J. Geophys. Res.*
- Arnault S., Gourdeau L., & Ménard Y., 1992.- Comparison of the altimetric signal with *in situ* measurements in the tropical Atlantic Ocean.- *Deep-Sea Res.*, 39, 3/4 : 481-499.
- Arnault S. et C. Périgaud, 1992. Altimetry and models in the tropical oceans : a review.- Révisé pour *Oceanologica Acta*, n° spécial JASO.
- Carton J.A. & Katz E.J., 1990.- Estimates of the zonal slope and seasonal transport of the Atlantic North Equatorial Counter Current.- *J. Geophys. Res.*, 95, C3 : 3091-3100.
- Cheney R.E., Marsh J.G. & Beckley B.D., 1983.- Global mesoscale variability from colinear tracks of SEASAT altimeter data.- *J. Geophys. Res.*, 88 : 4343-4354.
- Cheney R.E., Douglas B.C. & Miller L., 1989.- Evaluation of GEOSAT altimeter data with application to tropical Pacific sea level variability.- *J. Geophys. Res.*, 94, C4 : 4737-4747.
- Cox M.D., 1980.- Generation and propagation of 30-day waves in a numerical model of the Pacific.- *J. Phys. Oceanogr.*, 10 : 1168-1186.
- Delcroix T., Picaut J. & Eldin G., 1991.- Equatorial Kelvin and Rossby waves evidenced in the Pacific ocean through GEOSAT sea level and surface current anomalies.- *J. Geophys. Res.*, 96 : 3249-3262.
- Dupenhoat Y., Delcroix T. & Picaut J., 1992.- Interpretation of Kelvin/Rossby waves in the equatorial Pacific from model-GEOSAT data intercomparison during the 1986-1987 El Niño.- Révisé pour *Oceanologica Acta*, n° spécial JASO.
- Fu L., 1983. On the wave number spectrum of oceanic mesoscale variability observed by SEASAT altimeter.- *J. Geophys. Res.*, 88 : 4331-4342.
- Hansen D.V. & Maul G.A., 1991.- Anticyclonic current rings in the eastern tropical Pacific ocean.- *J. Geophys. Res.*, 96, C4 : 6965-6979.
- Legeckis R., 1977.- Long waves in the eastern Equatorial Ocean : a view from a geostationary satellite.- *Science*, 197 : 1167-1181.
- Malardé J.P., De Mey P., Périgaud C. & Minster J.F., 1987.- Observation of long equatorial waves in the Pacific Ocean by Seasat altimetry.- *J. Phys. Oceanogr.*, 17 : 2273-2279.
- Ménard Y., 1982.- Télédétection de la surface dynamique des océans par l'altimétrie. Application à l'étude du champ turbulent géostrophique dans l'Atlantique N.W. et le Pacifique N.W.- Thèse de docteur-ingénieur, université Paul-Sabatier, Toulouse, 173 p.
- Ménard Y., 1988.- Observing the seasonal variability in the tropical Atlantic from altimetry.- *J. Geophys. Res.*, 93, C11 : 13 967-13 978.
- Merle J. & Arnault S., 1985. Seasonal variability of the surface dynamic topography in the tropical Atlantic Ocean.- *J. Mar. Res.*, 43 : 267-288.
- Miller L., Cheney R.E. & Milbert D., 1986.- Sea level time series in the equatorial Pacific from satellite altimetry.- *Geophys. Res. Lett.*, 13 : 475-478.
- Miller L., Cheney R.E. & Douglas B.C., 1988.- GEOSAT altimeter observations of Kelvin waves and the 1986-1987 El Niño.- *Nature*, 239 : 52-54.
- Périgaud C. & Minster J.F., 1988.- Variability of the Somali current as observed from SEASAT altimetry.- *J. Phys. Oceanogr.*, 18 : 25-39.
- Périgaud C., 1990.- Sea level oscillations observed with GEOSAT along the two shear fronts of the Pacific North Equatorial Counter Current.- *J. Geophys. Res.*, 95, C5 : 7239-7248.
- Périgaud C. & Delécluse P., 1991.- Annual sea level variations in the eastern tropical Indian ocean.- Soumis à *J. Geophys. Res.*
- Philander G.S.H., 1978.- Instabilities of equatorial currents, part II.- *J. Geophys. Res.*, 83 : 3679-3682.
- Picaut J., Busalacchi A.J., McPhaden M.J. & Camusat B., 1990.- Validation of the geostrophic method for estimating zonal currents at the equator from GEOSAT altimeter data.- *J.*

Geophys. Res., 95, C3 : 3015-3024.

Tai C.K., White W.B. & Pazan S.E., 1989.- GEOSAT crossover analysis in the tropical Pacific; 2. Verification analysis of altimetric sea level maps with expendable bathythermograph and island sea level data.- *J. Geophys. Res.*, 94, C1 : 897-908.

Zlotnicki V., Fu L.L. & Patzert W., 1989.- Seasonal variability in global sea level observed with GEOSAT altimetry.- *J. Geophys. Res.*, 94 : 17 959-17 969.