

Les courants océaniques et les tourbillons

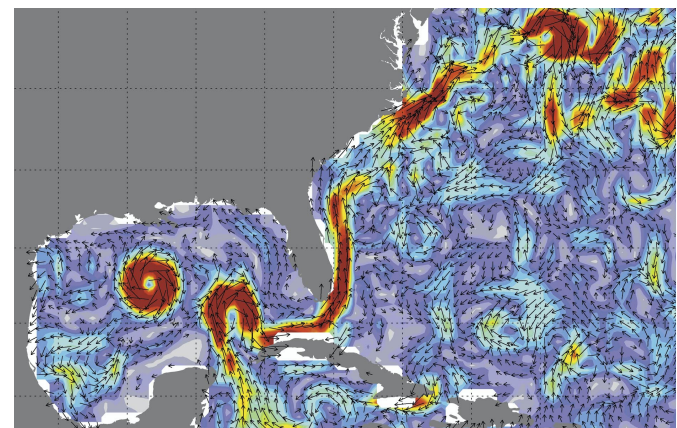
L'altimétrie par satellite fournit des informations détaillées sur la position, la vitesse et les déplacements des courants océaniques et des tourbillons.

En complément d'autres types d'observations, elle est une contrainte importante sur les modèles de circulation des océans à haute résolution.

Des méthodes sophistiquées d'assimilation de données sont développées dans ce but au laboratoire. Plusieurs projets auxquels participe le LEGOS, par exemple le projet d'océanographie opérationnelle MERCATOR, utilisent l'altimétrie et les données à la mer pour contraindre des modèles océaniques et fournir des estimations et des prévisions à court terme des variables océaniques.

Les principaux thèmes scientifiques sous-jacents sont la prédiction et l'observabilité des processus océaniques.

Les applications sont multiples :
Imbrication de modèles côtiers, initialisation de modèles climatiques, biogéochimie, halieutique.

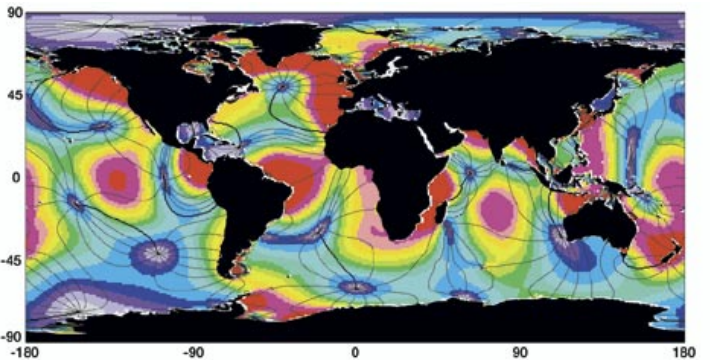


Trajectoire du Gulf Stream et le Loop Current du Golfe du Mexique sur une prévision MERCATOR.

Les marées et leur dissipation

Les marées sont de l'ordre du mètre en plein océan, et atteignent la dizaine de mètres le long des côtes. Dans le passé, les observations de marées étaient faites le long des côtes et sur les îles. L'altimétrie a apporté l'équivalent de milliers de marégraphes disposés le long des traces des satellites. Ces mesures ont permis d'améliorer la cartographie des marées à l'échelle globale. Leur prédiction est maintenant possible à la précision centimétrique en plein océan, et décimétrique le long des côtes. Les études en cours conduisent à revoir les concepts établis sur la dissipation de leur énergie, et reconnaître l'importance des ondes internes.

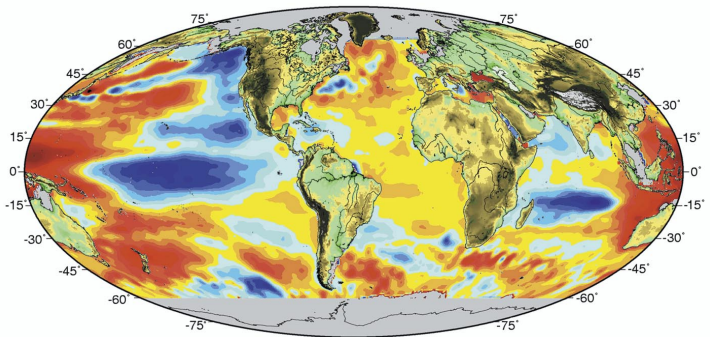
Excitées par l'interaction des courants de marée avec les montagnes sous marines, elles contribuent au mélange des masses d'eau et à l'entretien de la circulation profonde de l'océan (appelée circulation thermohaline) : les marées jouent ainsi un rôle à ce jour ignoré sur le climat de la terre.



Amplitude de la marée lunaire, en cm. L'onde de marée tourne autour des points d'amplitude nulle en 12h25 minutes.

Le Niveau Moyen des Mers

Depuis le début des années 1990, les satellites altimétriques, en particulier TOPEX/POSEIDON, surveillent en permanence les variations du niveau de la mer, par rapport à une référence liée au centre de la Terre, avec une couverture globale et une précision remarquable de quelques dixièmes de mm par an. Grâce à l'altimétrie spatiale, on peut ainsi surveiller ce qui se passe en pleine mer, et pas seulement le long des côtes continentales ou au bord des îles océaniques, comme le font les marégraphes.

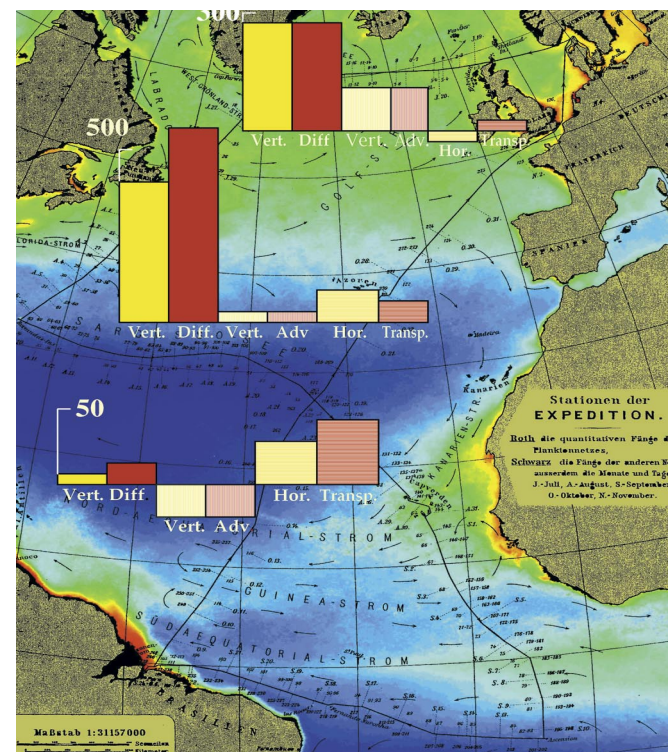


Variations régionales de la dérive du niveau de la mer entre 1993 et 2000. Les couleurs jaune et rouge représentent une élévation du niveau de la mer alors que la couleur bleue représente une baisse.

Les observations de TOPEX/POSEIDON indiquent que depuis début 1993, le niveau moyen global de la mer s'est élevé d'environ 2,5 mm/an. Mais il s'agit d'une élévation moyenne : si dans certaines régions la mer a en effet monté (jusqu'à 20-30 cm par endroits), dans d'autres régions, elle a au contraire baissé. Deux classes de phénomènes sont à l'origine des variations du niveau moyen de la mer : des changements de volume, d'origine thermique (expansion ou contraction des eaux océaniques en réponse à des variations de température) et des changements de contenu en eau résultant d'échanges avec les autres réservoirs de surface (atmosphère, réservoirs d'eaux continentales, calottes polaires). Des travaux récents réalisés au LEGOS montrent que l'élévation du niveau de la mer enregistrée par TOPEX/POSEIDON au cours de la dernière décennie résulte presque totalement du réchauffement des eaux océaniques.

La biogéochimie et la circulation océanique

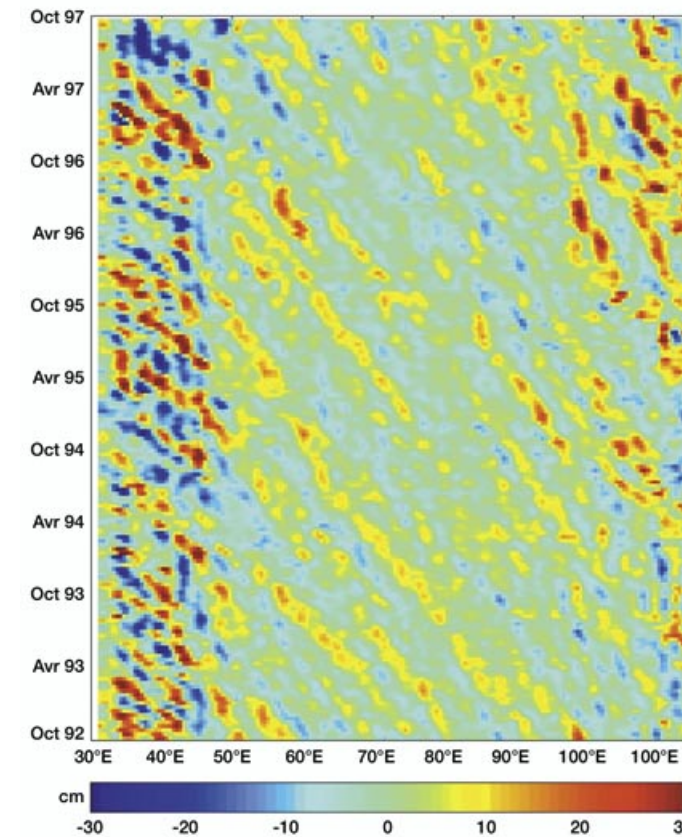
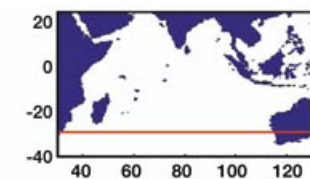
La circulation mésoéchelle océanique et ses tourbillons jouent un rôle majeur sur la dynamique du plancton.



Ce rôle est illustré dans les différentes provinces biogéochimiques de l'océan Atlantique Nord à l'aide d'un modèle tridimensionnel couplé physique/biogéochimie résolvant cette mésoéchelle. Le transport horizontal d'approvisionnement des sels nutritifs dans la couche euphotique prédomine dans le gyre subtropical, alors que le transport vertical joue un rôle majeur dans les autres provinces. La couleur rouge (jaune) réfère à une simulation avec (sans) assimilation de données altimétriques. Unité : $\text{mmol NO}_3/\text{m}^2/\text{an}$.

Les ondes océaniques

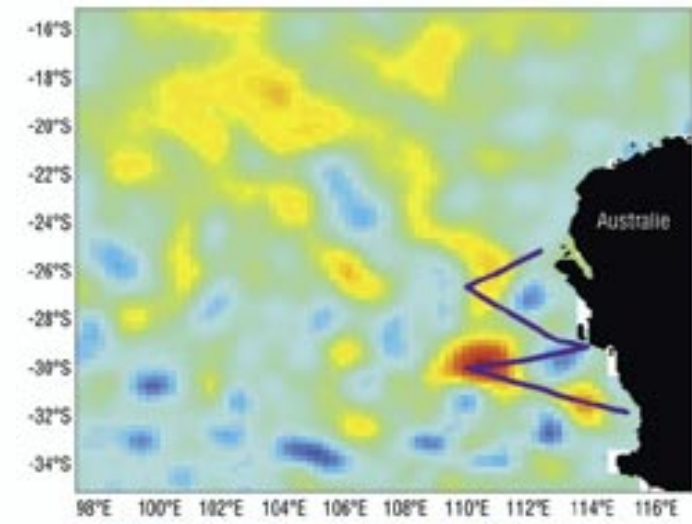
Un changement du forçage du vent à la surface de l'océan peut exciter des ondes planétaires. Ces ondes ont de grande longueur d'onde (500 - 1 000 km) à l'équateur. Les ondes de Kelvin sont des ondes de gravité longues guidées par la côte ou par l'équateur. Les ondes de Rossby se propagent dans l'océan profond, toujours vers l'ouest. Elles peuvent mettre 5 à 10 ans pour traverser l'océan aux moyennes latitudes. Bien connues en théorie, les vraies caractéristiques de ces ondes ont été relevées grâce aux observations de TOPEX/POSEIDON. On sait ainsi maintenant que l'océan a une très longue mémoire des perturbations générées à la surface, ce qui est important pour comprendre leurs rôles dans la variabilité du climat.



Propagation des ondes de Rossby vue par le satellite TOPEX/POSEIDON. La figure montre l'évolution temporelle du niveau de la mer le long 29°S dans l'océan Indien. L'abscisse (longitude) est en degré, des côtes de l'Australie (130°E) aux côtes d'Afrique (30°E) ; l'ordonnée est en années, d'octobre 1992 à octobre 1997 ; les couleurs marquent l'élévation du niveau de la mer, de -30 cm (en bleu) à +30 cm (en rouge). Ces ondes, générées à la frontière, se propagent librement vers l'ouest jusqu'à leur interaction avec les méandres et tourbillons du courant de la côte est de Madagascar

Altimétrie, géochimie et circulation

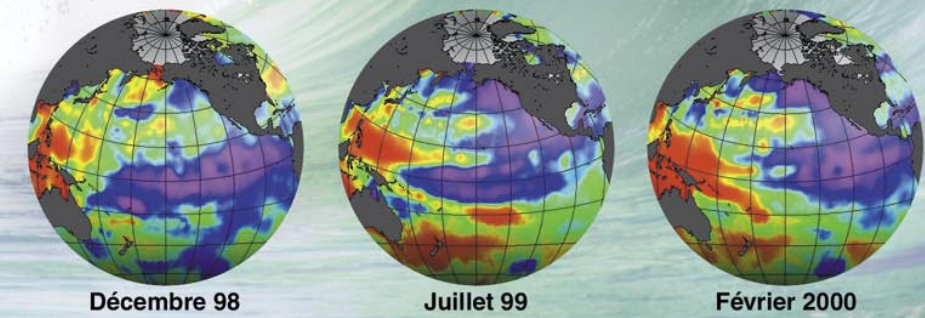
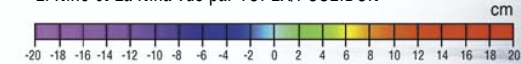
Une variation du niveau de la mer observée par altimétrie peut révéler un changement de masse ou un changement de densité interne : par exemple, de l'eau chaude et peu salée provoquera un niveau de la mer élevé. Quand la masse d'eau n'est plus en contact avec l'atmosphère, sa température et sa salinité ne



Le niveau de la mer dans l'Océan Indien Est révélé par les altimètres TOPEX/POSEIDON et ERS2 pendant la campagne TIP2000 en septembre 2000. Les couleurs marquent l'élévation du niveau de la mer, de -30 cm (en bleu) à +30 cm (en rouge) ; la ligne solide indique le parcours du navire de recherche Marion Dufresne.

changent plus sauf par les processus de mélange : la stabilité de ces deux paramètres, ainsi que le suivi de la distribution d'autres traceurs (sels nutritifs, fréons, tritium, thorium ou néodyme) nous permettent de reconstruire la trajectoire, l'histoire et l'âge des masses d'eaux. En couplant l'altimétrie et les traceurs chimiques, on dispose d'outils puissants pour comprendre la circulation d'une région océanique. Dans le cadre de la campagne océanographique TIP2000, nous avons adopté cette stratégie pour chercher à

El Niño et La Niña vus par TOPEX/POSEIDON



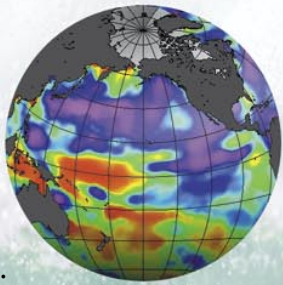
comprendre l'origine des variations spatiales du niveau de la mer dans l'Océan Indien : onde ou variation de masse d'eau ?

Les premiers résultats montrent que les anomalies positives de niveau de la mer sont associées aux masses d'eaux d'origine Indonésienne.

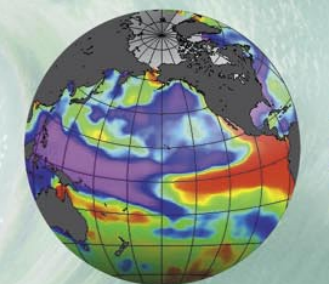
El Niño et le climat

Aux échelles de temps allant de la saison à quelques années, il est maintenant admis que le dérèglement du climat de notre planète est principalement dû aux interactions entre les océans tropicaux et l'atmosphère globale, et tout particulièrement au phénomène El Niño - Oscillation Australe (ENSO) du Pacifique Tropical. Compte tenu de la très grande inertie thermique de l'eau de mer par rapport à l'atmosphère, l'Océan Pacifique tropical est la mémoire du système ENSO, dont on arrive ainsi à prédire le retour six mois à un an à l'avance. L'utilisation intensive des mesures d'altimétrie satellitaire a permis de faire des progrès notables dans le suivi et la compréhension d'ENSO. L'El Niño du siècle survenu en 1997-1998 et son passage en phase froide, La Niña, ont ainsi été parfaitement détectés par TOPEX/POSEIDON.

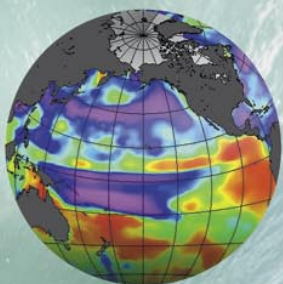
En assurant la continuité des mesures altimétriques, la série des satellites Jason permettra de mieux comprendre ENSO et d'améliorer ses prévisions. Notre société sera ainsi mieux à même d'anticiper et de réduire l'impact des dérèglements climatiques liés à l'ENSO.



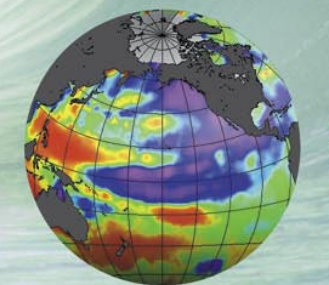
Mars 97



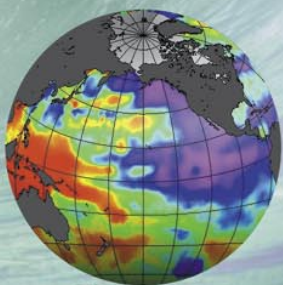
Décembre 97



Mars 98



Juillet 99

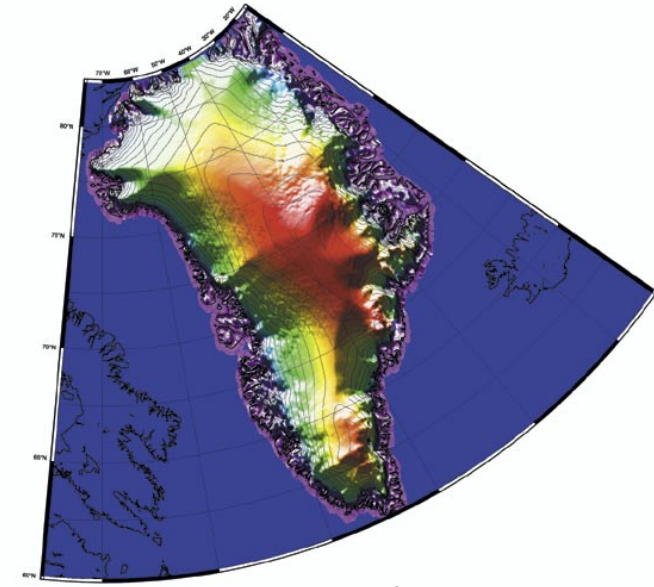
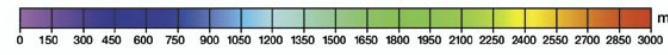


Février 2000

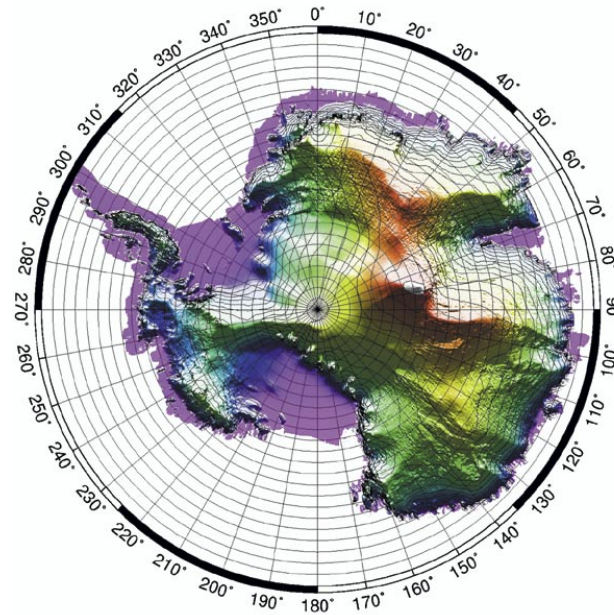
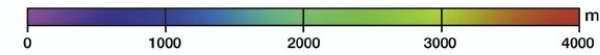
La cryosphère

L'altimétrie a permis de faire un bond sans précédent dans la cartographie de la topographie des calottes polaires Antarctique et Groenland. La précision sur les mesures de hauteur de ces régions est passée de 100 mètres à moins de 1 mètre. La topographie ainsi

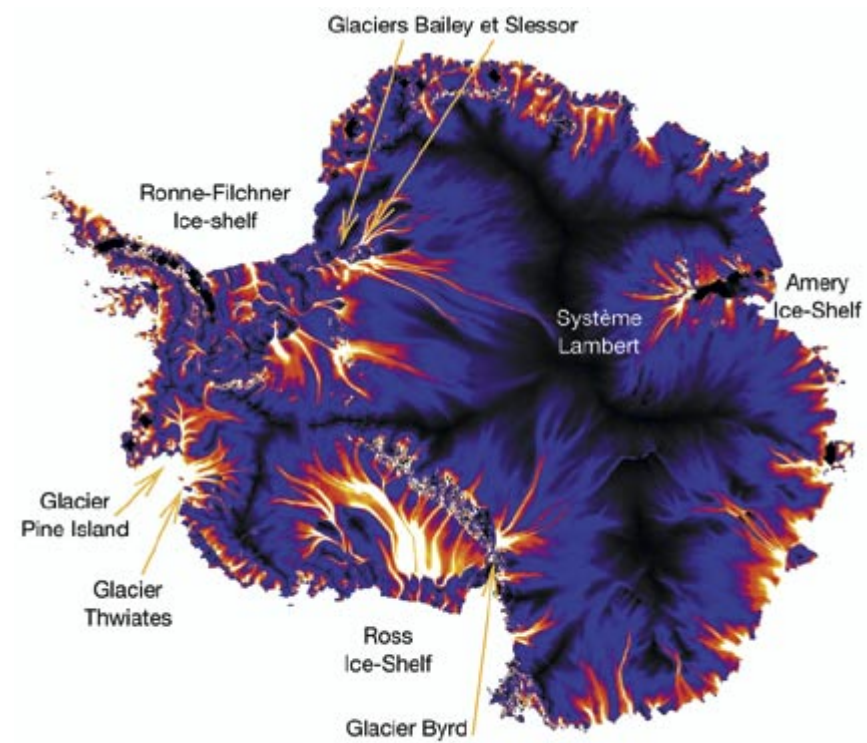
obtenue a permis de révéler nombre de détails parmi lesquels la structure de l'écoulement montrée par la figure ci-dessous, dont un réseau de fleuves de glace alimentant les glaciers à la périphérie de la calotte polaire. Sur le long terme la surveillance répétée de la topographie par ERS-1, ERS-2, et ENVISAT permettra d'évaluer la contribution des calottes polaires aux variations du niveau des océans.



Topographie du Groenland



Topographie de l'Antarctique

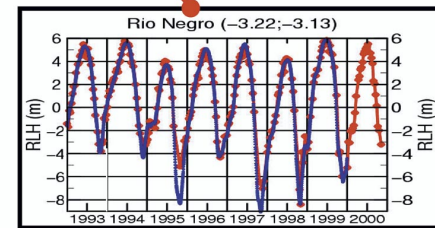
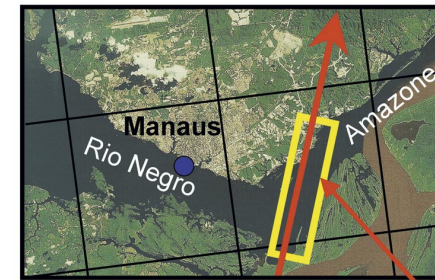


Vitesse d'écoulement de la glace en Antarctique



Les fleuves et les lacs

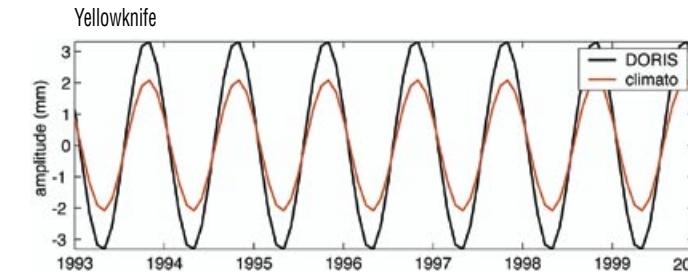
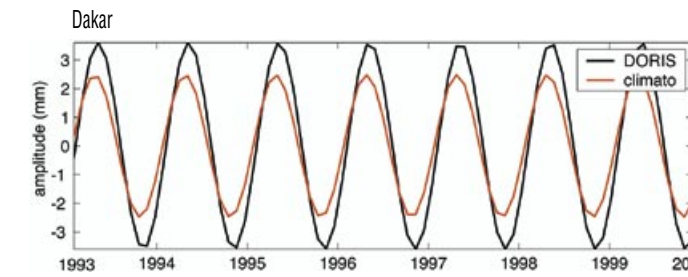
Une nouvelle application de l'altimétrie spatiale s'avère très prometteuse : elle consiste à mesurer les fluctuations temporelles des réservoirs d'eaux libres sur les continents (lacs, mers intérieures, fleuves, zones d'inondation). De telles fluctuations résultent de variations régionales du cycle hydrologique (précipitations, évaporation, ruissellement, construction de barrages, etc.) d'origine climatique ou anthropique. Ainsi grâce aux données des satellites TOPEX/POSEIDON, ERS-1 et ERS-2, on peut suivre les fluctuations de niveau de la mer Caspienne, de la mer d'Aral, et des grands lacs continentaux. Dans les grands bassins fluviaux du monde, on peut détecter les zones d'inondation temporaires et permanentes et mesurer les variations du niveau des fleuves et de leurs affluents. En plus des possibilités offertes par l'altimétrie radar sur les fleuves et les lacs, on pourra bientôt mesurer également les fluctuations des stocks d'eau contenus dans les sols et dans la couverture neigeuse grâce aux futures missions de gravimétrie spatiale (GRACE et GOCE). L'étude des réserves en eaux continentales et de leur évolution temporelle en réponse à la variabilité climatique est désormais une application importante de l'observation spatiale.



Exemple de cette application sur le bassin amazonien. La partie gauche de la figure montre le survol de l'Amazone par TOPEX/POSEIDON (trait rouge) près de la ville de Manaus. Sur la partie droite sont présentées les évolutions temporelles des niveaux d'eau mesurés par TOPEX/POSEIDON (en rouge) et, pour comparaison, les hauteurs d'eau issues de mesures hydrographiques in situ réalisées à Manaus (points bleus).

Doris mesure le poids des saisons

La Terre peut être considérée comme un corps élastique qui réagit aux pressions exercées à sa surface en se déformant. Ces déformations, radiales, de l'ordre de quelques millimètres, sont dues au poids de l'atmosphère, de la couverture neigeuse, de l'humidité des sols et des masses d'eau océaniques. Elles peuvent être détectées soit par l'analyse des champs de pression d'air et d'eau exprimés en terme de déformations verticales de la croûte terrestre, soit directement mesurées par géodésie spatiale. Le système DORIS est actuellement utilisé à cette fin. C'est l'un des trois systèmes d'orbitographie à bord de TOPEX/POSEIDON, et sera bientôt sur Jason-1 et ENVISAT. Il est également installé sur les satellites d'observation de la Terre Spot-2, Spot-3, Spot-4 et bientôt Spot-5. Des analyses récentes ont montré la bonne adéquation entre les déformations verticales saisonnières déduites des champs de pression d'air et d'eau, et les mouvements verticaux des balises DORIS. L'extrême précision de ce système permettra à l'avenir d'étudier les déformations à des périodes de temps autres que saisonnières, et devrait contribuer à améliorer les modèles hydrologiques globaux.



Amplitude des déformations verticales de la croûte terrestre dues aux variations de pression atmosphérique, de couverture neigeuse, d'humidité des sols et de distribution des masses d'eau océaniques, déduites des modèles et des observations de chacun de ces paramètres. Comparaison entre les déformations verticales de la croûte venant des données d'observations/modélisations cumulées (en rouge) et les observations directes obtenues par le système DORIS (en noir) pour deux stations DORIS (Dakar, Sénégal et Yellowknife, Canada).



Une unité de recherche CNES-CNRS-IRD-UPS, partenaire privilégié de la mission Jason

