



**ATELIER EXPERIMENTATION ET INSTRUMENTATION**  
**LE RESEAU D'OBSERVATION SUB-ANTARCTIQUE ET ANTARCTIQUE DU**  
**NIVEAU DE LA MER : ROSAME**

Fabien Lefèvre, Philippe. Téchiné et Christian. Le Provost (LEGOS, Toulouse)

LEGOS/GRGS – UMR5566/CNES/UPS/TRD  
18, av. Edouard Belin  
31401 Toulouse Cedex 4

### **Thématique Scientifique**

Le niveau de la mer est un index majeur de la variabilité dynamique et thermodynamique de l'océan aux différentes échelles de temps.

Aux échelles saisonnières à interannuelles, les fluctuations climatiques sont gouvernées, pour une très large part, par les échanges entre l'océan Tropical et l'Atmosphère. Comme le niveau moyen de la mer intègre le champ de densité vertical, il peut ainsi être considéré (combiné à une information sur la salinité) comme une mesure du contenu thermique de l'océan et, plus particulièrement dans les régions tropicales, comme un index de la profondeur de la thermocline. Son observation permet donc de déterminer et de suivre l'évolution de l'état climatologique de l'océan, et d'identifier les caractéristiques de la propagation d'événements baroclines de basse fréquence, dont El Nino est l'illustration la plus spectaculaire.

Aux échelles saisonnières, interannuelles à décennales, l'état thermodynamique de l'océan est lié à la circulation océanique globale, dans ses trois dimensions, et les gradients horizontaux du niveau moyen de la mer donnent en surface la composante géostrophique de cette circulation. L'observation de la topographie de l'océan et ses variabilités constitue donc une approche dont l'intérêt est désormais bien établi. Sur les bords ouest des océans, où les courants géostrophiques sont les plus intenses (Gulf Stream, Kuro Shivo, Courant du Brésil, Courant des Aiguilles,...), les écarts entre les niveaux instantanés et le géoïde sont de l'ordre du mètre sur des distances de l'ordre de 100 km, et leurs fluctuations, en particulier celles saisonnières, sont clairement identifiables sur les enregistrements marégraphiques et altimétriques. Il en est de même pour les tourbillons de mésoéchelle, dont les signatures sont typiquement de la dizaine de centimètres sur quelques centaines de kilomètres. A l'échelle globale, la faisabilité de l'observation de la topographie de l'océan n'était pas évidente: les pentes à mesurer sont très faibles, de l'ordre de  $10^{-6}$ . Mais les analyses des données altimétriques des missions TOPEX / POSEIDON et ERS1/2. ont apporté la preuve de cette faisabilité, et les résultats démontrent tout l'intérêt de cette observation de la topographie de l'océan, pour identifier et aider à comprendre les mécanismes en jeu dans la dynamique et la thermodynamique de l'océan, aux échelles saisonnières et interannuelles.

Aux échelles séculaires, enfin, la variation du niveau moyen des océans est reliée aux grandes oscillations climatiques que l'injection accélérée de gaz dans l'atmosphère est en train de perturber, par effet de serre. L'élévation actuelle du niveau de la mer, globalement estimée de l'ordre de 15 cm à 20 cm sur ce dernier siècle, risque de s'accélérer. L'étude de l'évolution à long terme du niveau de la mer vise donc à détecter une signature de cette perturbation.

Ce paramètre est relativement "facile" à observer in situ. D'où la mise en place à la fin des années 1980, d'un réseau coordonné d'observation des variations du niveau de la mer, à l'instigation de la Commission Intergouvernementale d'Océanographie de l'UNESCO: le réseau GLOSS (Global Sea Level Observing System). D'où aussi le développement de l'altimétrie satellitaire. C'est dans ce contexte que le réseau ROSAME a été implanté, comme sous ensemble de ce réseau mondial, et dans la perspective des programmes altimétriques satellitaires franco-américain T/P, et européen ERS1/2.

## ATELIER EXPERIMENTATION ET INSTRUMENTATION

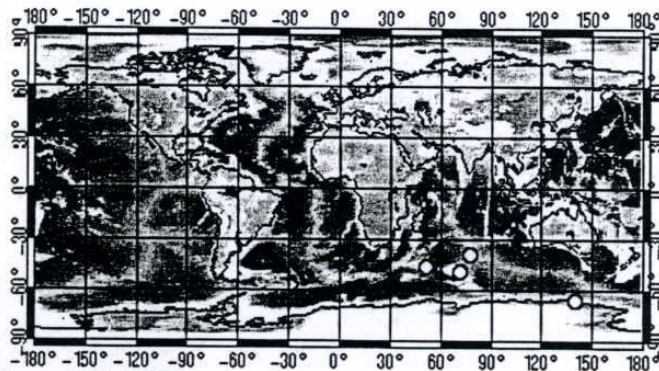
Le réseau ROSAME répond à trois objectifs scientifiques principaux:

- Une contribution au traitement et à la validation des mesures altimétriques satellitales. En ce qui concerne le traitement de ces données, notre apport concerne l'étude des marées à l'échelle mondiale. Il est en effet impératif d'éliminer la contribution des marées du signal altimétrique pour accéder aux signatures de la circulation générale océanique, et pour étudier la réponse régionale du niveau de la mer aux forçages météorologiques, dans le voisinage des sites d'implantation des stations d'observation. En ce qui concerne la validation des mesures altimétriques satellitales, les stations du réseau ROSAME apportent des données de contrôle particulièrement précieuses car elles sont situées dans une zone où les observations in situ sont rares et difficiles, et où les conditions météo-océaniques intervenant dans la détermination des corrections environnementales des altimètres sont particulièrement sévères.
- L'étude de la variabilité du courant Circumpolaire Antarctique, par mesure directe de la pente de la surface de l'océan, entre les îles Crozet, Kerguelen et Amsterdam, et entre Hobart, Macquaries et Dumont d'Urville, et en synergie avec les mesures altimétriques satellitaires,
- L'observation des variations à long terme (séculaires) du niveau de la mer dans l'Océan Indien Sud.

Mis en place dans le cadre de WOCE, ce réseau répond maintenant aux objectifs de CLIVAR visant l'étude des variabilités interannuelles à décennales de l'océan. L'objectif c) relevant par ailleurs de l'évolution séculaire du niveau de la mer, soulignons que ce réseau est appelé à être maintenu sur un très long terme.

### Antériorité de ce Service

Ce programme a débuté en 1986, à l'initiative du Laboratoire d'Océanographique du Muséum d'Histoire Naturelle de Paris, puis le programme a été repris par C. Le Provost, dans le cadre de WOCE (GLOSS), avec le soutien logistique et financier de l'IFRTP, et des crédits d'investissement de l'IFREMER, du Ministère de la Recherche et du CNRS/INSU. L'objectif central du programme a alors été d'installer 4 stations côtières d'observation du niveau de la mer, à Crozet, Kerguelen, Amsterdam-StPaul et Dumont d'Urville, équipées aux normes WOCE (i.e. avec télétransmission par satellite). Il constitue ce qui s'appelle désormais le réseau **ROSAME** (Réseau d'Observation Subantarctique et



Antarctique du niveau de la MER).

Figure 1 : Localisation des stations du réseau ROSAME

Les quatre stations côtières installées sont :

- la station de Kerguelen / Argos en (1992) ;
- la station de StPaul proche de l'île d'Amsterdam (1994) ;

- la station de Crozet (1994) ;
- la station de Dumont d'Urville (1997).

Les observations sont collectées via le système ARGOS, réceptionnées et validées à Toulouse sur une base hebdomadaire et transmises dans un délai de 15 jours au "Fast Delivery Center" de Hawaii.

Afin de permettre de relier les observations faites à la côte par ces stations aux variations du niveau de la mer au large (considérées comme index de la variabilité des signaux océaniques), le programme d'observation par marégraphes immergés sur les rebord des plateaux a été poursuivi à Kerguelen jusqu'en 1996, et est maintenu à Amsterdam et Crozet. Ce sont les opérations NIVMER réalisées chaque année conjointement aux visites de maintenance des stations du Réseau Subantarctique, avec le soutien logistique du Marion Dufresne II.

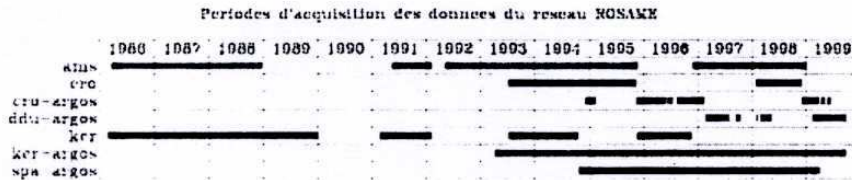


Figure 2 : Diagramme matérialisant les périodes sur lesquelles les variations du niveau de la mer ont été acquises (AMS, CRO et KER stations de plateau, CRO-ARGOS, DDU-ARGOS, KER-ARGOS et SPA-ARGOS stations côtières)

## Exploitation scientifique de ces données

### Contribution à l'exploitation et la validation des mesures altimétriques satellitales

#### *L'étude des marées océaniques*

L'étude intensive des marées océaniques est, dans le contexte des études climatiques, motivée par l'intérêt porté à l'utilisation de l'altimétrie satellitaire comme outil d'observation synoptique des circulations océaniques. Une meilleure connaissance de la contribution de la marée au signal altimétrique est nécessaire, pour pouvoir l'éliminer, et avoir accès au signal océanique associé aux circulations générales et à leur variabilité. Rappelons que, du fait de l'aliasing des composantes de haute fréquence du signal sur les basses fréquences (dû aux périodes de répétitivité des satellites altimétriques, de l'ordre de 10 à 30 jours), le signal des marées, principalement semi diurne et diurne, contamine le signal océanique de méso-échelle et de basses fréquences.

L'ensemble des données acquises dans le cadre de la composante Sea Level de WOCE a permis de valider les modèles de marées produits ces dernières années (Shum et al, 1997). Rappelons que notre modèle de prédiction des marées (Le Provost et al, 1998) a été retenu comme l'un des deux modèles recommandés pour les corrections des mesures altimétriques satellitaires de Topex/Poseidon dans les zones océaniques.

Nous avons depuis entrepris le développement d'un nouveau modèle avec comme objectif de proposer un modèle de prédiction fiable sur les zones littorales, ce qui n'est pas le cas actuellement pour les divers modèles globaux disponibles (Lefèvre et al, 1999). Une analyse récente de toutes les données disponibles dans la banque de Hawaii a été par ailleurs réalisée pour définir les barres d'erreur sur les composantes harmoniques de marée nécessaires pour leur utilisation dans les procédures d'assimilation (Ponchaut et al, 1999).

*La validation des observations satellitaires*

L'altimétrie satellitaire est une technique d'observation de l'océan dont l'importance est désormais clairement établie, en particulier suite aux missions ERS1/2 et T/P. D'où l'importance des futures missions JASON et ENVISAT pour les programmes à venir de nature scientifique (CLIVAR) ou opérationnelle (GODAE). En accompagnement de ces mesures altimétriques, la mesure in situ du niveau des océans est indispensable:

- pour fournir des séries temporelles, ponctuelles certes dans l'espace, mais continues dans le temps, à fin de comparaisons avec celles obtenues par altimétrie, synoptiques dans l'espace, mais discontinues dans le temps,
- pour contribuer à la validation des mesures altimétriques,
- pour apporter un moyen de relier entre eux des jeux de données altimétriques venant de satellites différents, à des périodes successives.

Les opérations menées dans le cadre de ROSAME correspondent ainsi à une contribution significative dans ce contexte, en particulier en raison de leur situation, au sud de l'Océan Indien. Ces données ont été comparées aux mesures altimétriques de l'altimètre T/P dans le voisinage des sites d'observation (Yoon, 1997 ; Cazenave et al, 1999). La concordance des mesures est particulièrement bonne pour le site d'Amsterdam pour le cycle saisonnier. Elle est aussi très satisfaisante sur le site de Crozet. Par contre, les comparaisons sur le site de Kerguelen sont plus complexes, en raison de l'extension du plateau continental sur cette zone. Malgré cette complexité, ce site a été retenu comme site de référence (pour la zone Océan Indien Sud) dans le cadre d'un réseau de 30 marégraphes (GLOSS-Alt) inscrit au plan d'implémentation de GLOSS pour la calibration sur le long terme des missions altimétriques satellitaires.

**Le monitoring du courant circumpolaire antarctique**

Cette composante du programme scientifique associé à ROSAME, et plus largement aux stations du réseau mondial situées dans l'Océan Austral vise à étudier la faisabilité d'un « monitoring » du courant circumpolaire Antarctique, du passage du Drake à l'entrée du Pacifique, reposant en particulier sur les mesures in situ des variations du niveau de la mer. La contribution anglaise ACCLAIM (Antarctic Circumpolar Current Levels for Altimetry and Island Measurements) concerne les secteurs Drake, et Atlantique Sud Est. La contribution française se situe sur le secteur Crozet-Kerguelen, d'une part, et sur la section Australie-Antarctique, en coopération avec les Australiens (S.Rintool).

L'observation continue des niveaux entre Kerguelen et Amsterdam est menée depuis. Les signatures de la variabilité des transports dans le Courant Circumpolaire Antarctique (CCA) sont de l'ordre de 10 cm. L'analyse spectrale de ces signaux révèle une grande variété de pics d'énergie distribués sur tout le spectre, allant de quelques jours à de l'interannuel. Saint Guily et Lamy (1988) avaient interprété les oscillations allant de la bande inertielle à 4 jours en terme d'ondes de Rossby topographiques piégées sur le plateau des Kerguelen. L'observation de la pression atmosphérique aux stations côtières nous a permis (Yoon, 1997) d'interpréter en terme d'effet de baromètre inverse les pics d'énergie dans tous les signaux analysés dans la bande de 10 à 60 jours. Lorsque les séries sont filtrées à 60 jours, les signaux résiduels sont dominés par des oscillations dont les périodes se situent entre 120 et 180 jours. Park et Saint Guily (1992) ont interprété les oscillations identifiées dans les données de Géosat dans la bande 2 à 4 mois en terme d'ondes de Rossby semi-annuelles advectées par le CCA. Cette interprétation a été confortée par Hugues (1995) sur la base des résultats de la simulation du CCA dans le cadre de FRAM. Cette contribution des ondes de Rossby doit être mieux comprise afin de l'éliminer des observations et accéder à la variabilité saisonnière à interannuelle du transport dans le CCA.

**L'observation des variations séculaires du niveau de la mer**

A l'échelle globale planétaire, l'élévation moyenne du niveau de la mer est actuellement de l'ordre 1 ou 2 mm / an, estimation basée sur l'analyse des observations marégraphiques archivées depuis plus d'un siècle. En relation avec le réchauffement attendu de notre planète par effet de serre, un scénario raisonnable conduit à prédire une élévation moyenne du niveau des océans de l'ordre de 50 cm au cours du prochain siècle (cf. Warrick et al, 1995). Si l'on se fixe comme objectif de détecter cette tendance sur les 10 années qui viennent avec une incertitude de 10%, le problème posé est donc de détecter une élévation globale de 5 cm avec une déviation standard de 5 mm sur ces 10 ans. Si l'on retient comme variabilité typique interannuelle du niveau de la mer un signal de l'ordre de 50 mm avec une pseudo-périodicité de 5 ans, les contraintes posées ci dessus conduisent donc à conclure qu'il faut disposer d'enregistrements de haute qualité en 50 stations indépendantes, à l'échelle planétaire. D'où le programme GLOSS, dont l'objectif est la constitution et la maintenance d'un réseau de stations de mesure du niveau de la mer décorréliées, et réalisant des mesures continues contrôlées avec précision. Les quatre stations françaises de ROSAME font partie de ce réseau. Comme les déformations géodynamiques des socles sur lesquels les appareils sont installés introduisent dans le signal observé une composante étrangère au problème, il est nécessaire de connaître les mouvements verticaux de ces socles, et donc de les mesurer avec une précision compatible avec celle évoquée ci dessus. Une étude a été réalisée à l'IGN pour évaluer les possibilités offertes par le système GPS pour localiser ces stations marégraphiques dans le repère ITRF, par rapport au centre de la terre, afin de suivre le déplacement vertical de ces stations sur le long terme. Au cours de la campagne NIVMER94, des repères géodésiques ont été posés autour des trois stations de Crozet, Kerguelen et StPaul, ainsi que des piliers GPS à Crozet et Kerguelen, rattachés chacun par nivellement aux repères géodésiques. Deux campagnes GPS a été réalisée à Kerguelen en 1994 et 1995, ainsi qu'un rattachement des mesures du niveau de la mer de KER-ARGOS au système de repère géodésiques qui entourent la station (Woppelman, 1997). Nous avons étudié plus récemment au LEGOS l'évolution comparée du niveau de la mer enregistré par marégraphes, de celui observé par le satellite T/P, et du mouvement vertical du socle terrestre des sites, via le système DORIS. L'impact de la variation verticale de la croûte terrestre sur l'évolution locale du niveau de la mer a été démontré en de nombreux points du réseau GLOSS-Alt (Cazenave et al, 1999).

**Moyens de mesures mis en œuvre.**

Chaque site est équipé de deux modules: un module côtier, et un module immergé sur le rebord du plateau continental proche.

Le module (type 1) côtier est composé d'un capteur de pression et température immergé dans un puits de tranquillisation, d'un câble de liaison et d'alimentation en énergie, et d'une centrale à terre, composée d'un module de communication avec le capteur immergé, d'un capteur de pression atmosphérique, et d'un module de gestion et archivage des mesures, avec transmission par ARGOS. Les stations de Kerguelen et St Paul ont été conçues et produites par CLS-ARGOS. Les stations plus récentes de Crozet et Dumont d'Urville ont été adaptées des précédentes et produites par MORS.

Le module (type 2) immergé sur le plateau est une station autonome supportant un capteur de pression et température. Son autonomie nominale est de 4 ans, mais pour des raisons de sécurité ces stations sont relevées avec un rythme annuel.

Le module de type 1 offre l'avantage d'une acquisition et transmission en temps réel, par satellite. Il est de plus rattaché géodésiquement par un ensemble de repaires fixes et reliés à l'aide des techniques GPS et DORIS au centre de masse de la terre, dans le système ITRF. Il comporte enfin un capteur de pression atmosphérique local. Par contre, situé à la côte, la mesure qu'il effectue est contaminée par des effets locaux qui peuvent être gênants.

**ATELIER EXPERIMENTATION ET INSTRUMENTATION**

Le module de type 2 présente l'avantage d'être déployé sur le rebord du plateau continental, affranchi (non totalement) des effets côtiers. Mais il présente deux inconvénients: la référence de niveau est perdue à chaque relevage de la station, et la pression atmosphérique locale, nécessaire pour convertir la mesure de pression en niveau de la surface libre de la mer, doit être déduite de celle mesurée à terre, avec une combinaison éventuelle d'informations venant des analyses des modèles de prévision météorologiques.

Ces stations ne sont pas équipées actuellement de capteur de salinité. C'est certainement la première amélioration à introduire afin d'augmenter la précision de la conversion pression-niveau de la mer. Le site de Kerguelen, nous l'avons mentionné plus haut, est un des sites de référence pour le monitoring à long terme de la calibration des altimètres satellitaires. La continuité des enregistrements doit donc être assurée sans faille: une deuxième station d'observation devra donc être installée sur ce site, dès que possible afin de parer à tout incident sur la station existante. Par ailleurs, l'établissement des bases de référence géodésique de ces stations n'est pas achevé.

**Références**

- Hugues C.W., Rossby waves in the Southern Ocean: a comparison of TOPEX/POSEIDON altimetry with model prediction. *J. Geophys. Res.*, Vol 100, C8, 15933-15950, 1995.
- Park Y.H. et B.Saint Guily, Sea Level variability in Crozet-Kerguelen-Amsterdam area from bottom pressure and Geosat altimetry, in *Sea Level Changes: Determination and effects. Geoph. Monog. 69, UGGI vol 11, pp 117-131, AGU, Washington D.C., 1992.*
- Saint Guily B. et A. Lamy, Ondes guidées par le talus de l'île de Kerguelen, *C. R. Acad. Sciences, Paris, t 307, série II, pp573-578, 1988.*
- Vassie J.M., A.J. Harrison, P.L. Woodworth, S.A. Harangozo, M.J. Smithson and S.R. Thompson, On the temporal variability of the transport between Amsterdam and Kerguelen Islands, *J. Geophys. Research*, 99, C1, 937-949, 1994.
- Warrick R., Le Provost C., Meier M.F., Oerlemans J., and Woodworth P.L., Sea Level change, in *Climate Change 1995, The Science of Climate change*, 361-405, J.T. Houghton, L.G. Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell editors, Cambridge University Press, 1996.
- Lyard F. and C. Le Provost, Energy budget of the tidal hydrodynamic model FES94.1, *Geophys. Res. Letters*, Vol 24, N°6, 687-690, march 1997.
- Le Provost C. and F. Lyard, Energetics of the semi-diurnal M2 ocean tides, *Progress in Oceanog.*, Vol 40, 37-52, 1997
- Arnault S., Le Provost C., Regional identification in the tropical Atlantic ocean of residual tide errors from an empirical orthogonal function analysis of Topex/Poseidon altimetric data, *J. Geophys.Res.*, Vol. 102, N0. C9, 21011-21036, sept 1997.
- Shum C.K., P.L. Woodworth, O.B. Andersen, G. Egbert, O. Francis, C. King, S. Klosko, C. Le Provost, X. Li, J.M. Molines, M. Parke, R. Ray, M. Schlax, D. Stammer, C. Thierney, P. Vincent, and C. Wunsch, Accuracy Assessment of recent Ocean Tide Models. *J. Geophys. Res.*, Vol 102, C12, 25173-25194, november 1997.
- Dehant V., Wilson C.R., Salstein D.A., Chao B.F., Gross, R.S., Le Provost C., and Ponte R.M., Study of Earth's Rotation and Geophysical Fluids Progresses, *EOS Trans. American Geophys. Union*, Vol 78, N°34, pp 357-360, August 1997.
- Le Provost C., Lyard F., Molines J.M., Genco M.L., Rabilloud F., A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilation a satellite altimeter-derived data set, *J. Geophys. Res.*, Vol 103, C3, 5513-5529, March 1998.
- Cazenave A., K. Dominh, F. Ponchaut, L. Soudarin, J.F. Crétaux and C. Le Provost, Sea Level Change from Topex/Poseidon altimetry and tide gauges, and vertical crustal motions from DORIS, *G. Res. Let.*, Vol 26, N°14, 2077-2080, 1999.
- Lefèvre F., C. Le Provost and F. Lyard, How to improve a global ocean tide model at a regional scale: a test on the Yellow Sea and East China Sea, in press *J. Geophys. Res.*, 1999.
- Le Provost C. and F. Lyard, A model for predicting the barotropic component of ocean tidal currents, submitted to *Geophys. Research Letters*, 1999.
- Ponchaut F., F. Lyard and C. Le Provost, Tidal analysis of the WOCE sea level data set, in press *J.A.O.T.*, 1999.