

Suivre L'Évolution du Niveau Moyen de la Méditerranée

P. Exertier, P. Bonnefond, F. Barlier
Observatoire de la Côte d'Azur, Département CERGA
Avenue N. Copernic - 06130 Grasse
E-mail: P. EXERTIER

Tél: (33-4)/(04)-93 40 53 53 Fax: (33-4)/(04)-93 40 53 33

Résumé: La topographie de la surface de la mer, qui est directement reliée à la forme du géoïde et à la signature des effets océaniques, n'est accessible que grâce à la résolution spatiale et temporelle de l'altimétrie satellitaire. En particulier, l'apport des missions altimétriques Seasat (lancé en 1978), Geosat (1985) puis ERS1 (1991) et TOPEX/Poseidon (1992) à l'étude de la Méditerranée est considérable. Les premières cartes du géoïde marin, avec des précisions relatives de 10-20 cm suivant les solutions, ont beaucoup contribué à la compréhension des phénomènes géophysiques. Ensuite, grâce, d'une part, aux réductions d'erreurs d'orbite sous-jacentes à l'amélioration des modèles de champ de gravité et, d'autre part, au développement de méthodes de calcul d'orbite pseudo-géométriques, la précision des déterminations du niveau moyen absolu de la surface de la mer est passée de quelques mètres à quelques centimètres. L'analyse des données de TOPEX/Poseidon (T/P) en Méditerranée, présentée ici, a permis pour la première fois de déterminer l'évolution temporelle du niveau moyen de la mer. L'amplitude des variations inter-annuelles est de l'ordre de 20 cm avec un maximum en octobre/novembre et un minimum en mars. D'autre part, la combinaison des données de ERS1 et de T/P a permis d'améliorer la résolution spatiale des cartes sans perte de précision, faisant apparaître les principales caractéristiques de la circulation en Méditerranée et ses variations saisonnières.

Mots Clés: satellite artificiel, altimétrie, TOPEX / Poseidon, Méditerranée, niveau moyen, variations saisonnières

Abstract: The sea surface topography, which is directly linked to the shape of the geoid and to oceanic effects, is only measurable thanks to the spatial and temporal resolution of satellite altimetry. The contributions of Seasat (1978), Geosat (1985) followed by ERS-1 (1991) and TOPEX/Poseidon (T/P) (1992) to the study of the Mediterranean have

been considerable. The first maps of the marine geoid, with relative accuracy of 10-20 cm depending on the methods used, have contributed greatly to the understanding of geophysical phenomena. Subsequently, thanks to reductions in orbital errors, improvements in gravitational models, and to the development of pseudo-geometrical orbit computations, the accuracy of determination of the absolute mean sea level has improved from several metres to a few centimetres. The analysis of T/P data in the Mediterranean presented here has allowed seasonal variations in mean sea level to be determined for the first time. Amplitudes are of the order of 20 cm with a maximum in October/November and a minimum in March. Further, the combination of ERS-1 and T/P data has permitted improvements in the spatial resolution of sea surface maps without loss of accuracy, thereby showing the main features of Mediterranean circulation including seasonal variations.

Keywords: artificial satellite, altimetry, mean sea level, seasonal variations, Mediterranean

1. Introduction

L'océan joue un rôle clé sur le climat global de la Planète et son évolution dans le temps. Pour comprendre ce rôle puis développer des techniques de modélisation du climat, notamment à des fins de prédiction, il est nécessaire de comprendre la dynamique de la circulation océanique globale. Cette compréhension implique une observation précise de la circulation et de ses variations dans le temps qui, pour être réaliste, doit être opérée avec suffisamment de résolution spatiale et temporelle par un satellite altimétrique ou, mieux, une série de satellites. La mesure altimétrique est la mesure de distance par radar entre le satellite et la surface de la mer. L'orbite du satellite servant de référence, l'altimétrie permet de déterminer la surface topographique moyenne des océans, dont les hauteurs sont rapportées à un ellipsoïde de référence (Figure 1).

Toutefois, il faut souligner que la surface de la mer varie en permanence sous les effets conjugués des marées, des vents et de la pression atmosphérique. Aussi, est-il toujours nécessaire de préciser l'intervalle de temps sur lequel on considère la moyenne. La surface topographique moyenne révèle avant tout le relief de la mer créé par les inhomogénéités du champ de gravité terrestre, ce qui contribue d'abord à la détermination du géoïde dans les zones océaniques. Elle incorpore également le relief de la "topographie dynamique" de l'océan, qui est lié à la présence des courants et à la densité inhomogène des eaux océaniques. Comme on le démontre en océanographie, les courants océaniques suivent les courbes de niveau de la topographie dynamique avec une vitesse proportionnelle à la pente locale. Aussi, l'analyse de ce relief apporte-t-elle une contrainte importante dans la détermination de la circulation océanique globale (Fu and Cheney, 1995). Ce dernier signal est cependant nettement plus faible que le signal dû au géoïde aux grandes longueurs d'onde: il est en effet presque partout inférieur au mètre et de longueur d'onde supérieure à 30 km. En particulier, la Méditerranée se caractérise par une topographie dynamique de faible amplitude, d'environ 5 à 10 cm.

Pour établir la cartographie des courants à partir de la mesure altimétrique, une connaissance indépendante et très précise du géoïde est donc nécessaire. Or, si le géoïde à grande longueur d'onde (sur plusieurs milliers de kilomètres) est connu à mieux que quelques centimètres, la précision se dégrade en deçà de 1000 km. Ainsi, la précision avec laquelle le géoïde en Méditerranée peut être connu est, aujourd'hui, très sensiblement inférieure à celle avec laquelle la surface topographique moyenne est déterminée, notamment grâce aux données de TOPEX/Poseidon. Au-delà de l'étude de la circulation océanique, se dessine un objectif très ambitieux pour l'altimétrie: l'étude des variations séculaires du niveau moyen absolu des océans (Minster et al., 1995). Dans ce domaine, il s'agit d'extraire de séries pluriannuelles de mesures, des signaux infimes de l'ordre de quelques millimètres à quelques centimètres par an. Dans le contexte d'un réchauffement de la planète, ces tendances, superposées à la variabilité de la topographie dynamique, mettront en évidence l'élévation lente du niveau moyen de l'océan sous l'effet conjugué de la dilatation thermique, de la fonte des glaces et des glaciers, des précipitations, etc.

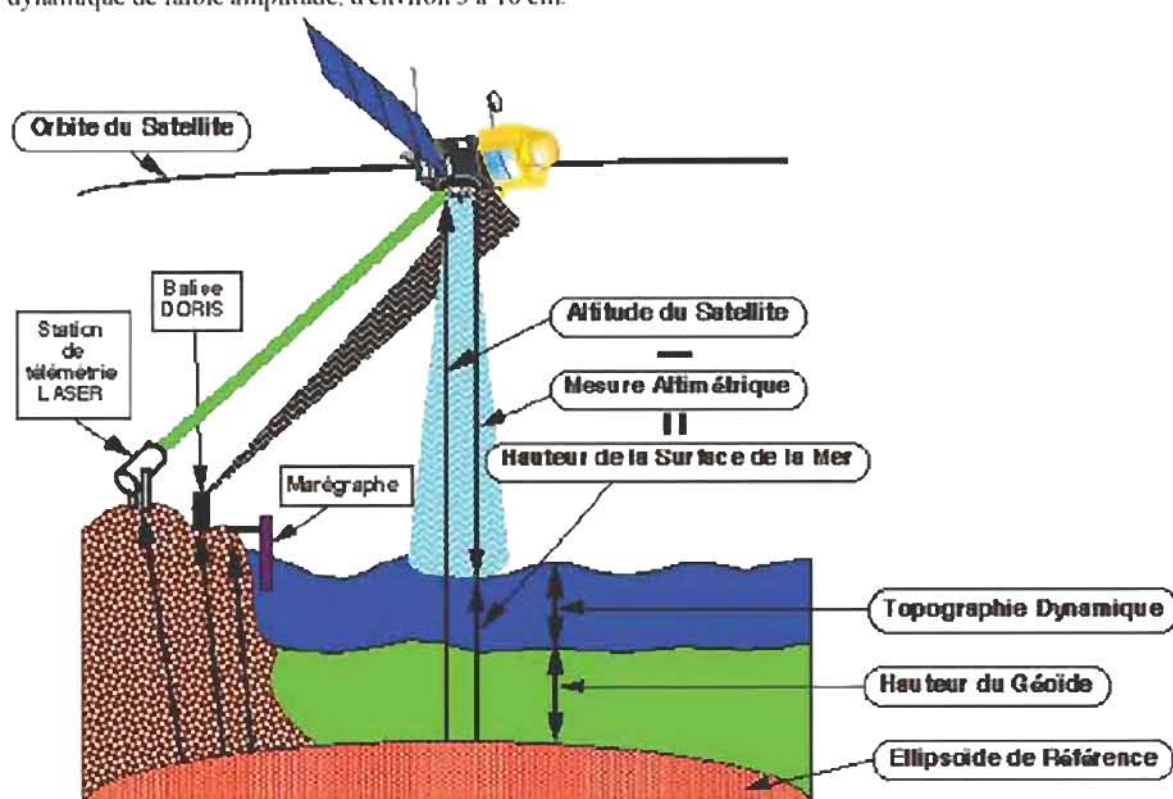


Fig. 1 Principe de la détermination des hauteurs de mer à partir des mesures altimétriques. Par exemple, le zéro du marégraphe de Marseille, référence du nivellement français, est en continuité avec la surface topographique moyenne de la mer.

La mise en évidence des phénomènes océanographiques et géophysiques (zones de fractures, bathymétrie, etc.), qui affectent la forme de la surface de la mer dans l'espace et dans le temps, fait de l'altimétrie un outil puissant pour les sciences de la Terre qu'il est nécessaire de maîtriser du point de vue géodésique. En effet, si le principe de l'altimétrie est simple, la réalisation des mesures et l'exploitation des données restent complexes du fait de la très grande précision nécessaire : la pente de la surface de l'océan peut varier de 1 m sur 100 km à 0.1 m sur 3000 km, et il faut pouvoir la mesurer avec une précision meilleure que dix pour cent (si possible un pour cent). Cela entraîne des contraintes techniques très sévères sur les instruments de mesure ainsi que sur la modélisation des corrections de propagation des signaux. Cela implique aussi un calcul d'orbite très précis et une connaissance approfondie du géoïde, principales sources d'erreurs, qui limitent l'analyse des données altimétriques. Pour réduire ces sources d'erreurs, il convient d'améliorer les modèles orbitographiques de forces perturbatrices, essentiellement d'origine non gravitationnelle, ainsi que la connaissance du champ de gravité de la Terre (Exertier, 1993). Dans l'objectif de la mission d'océanographie spatiale franco-américaine TOPEX/Poseidon (T/P), un effort dans ce sens a été entrepris de façon très large.

C'est ainsi qu'ont été réduits les postes d'erreurs, qui rendaient impossible la mesure des variations du niveau global des océans à partir des missions altimétriques précédentes (Fu et al., 1994). Les progrès réalisés ces dernières années dans la connaissance du modèle dynamique pour le calcul de l'orbite de T/P (coefficients du champ de gravité à grande longueur d'onde et modélisation des forces de surface, essentiellement) ont permis de gagner environ un ordre de grandeur, portant à 3-4 cm l'erreur estimée sur la position radiale du satellite (Nouel et al., 1994 ; Tapley et al., 1994). L'utilisation des systèmes de poursuite laser et DORIS a, bien entendu, beaucoup contribué à ce résultat. D'un autre point de vue, le développement de méthodes de calcul d'orbite à caractère pseudo-géométrique - c'est-à-dire indépendantes des méthodes dynamiques classiques -, qui conduisent à l'utilisation de systèmes de poursuite spatiaux continus comme le Global Positioning System (Yunck et al., 1994), a également joué un rôle important pour le contrôle et la validation de la mission. Dans ce sens, la technique d'arcs courts, qui s'appuie sur des observations de télémétrie laser, a été déterminante pour la calibration des deux altimètres

TOPEX (opérationnel) et Poseidon (expérimental), permettant d'atteindre une précision proche de 2 cm sur la position radiale du satellite (Bonnetfond, 1994).

Le but de notre papier est de montrer l'apport croissant de différentes missions spatiales à l'étude de la Méditerranée et, en particulier, l'apport plus récent des données de T/P particulièrement précises pour la détermination des variations temporelles du niveau de la mer et donc des courants. La section 2 est consacrée à une présentation de Méditerranée, en tant que zone d'étude privilégiée. En effet, satellites d'altimétrie, réseaux de marégraphes et systèmes géodésiques terrestres et spatiaux de positionnement y sont présents pour tenter d'établir une surveillance climatique précise, permanente et à long terme du niveau de la mer. Cette section comporte, en outre, les principaux résultats de l'analyse des données altimétriques de Seasat (lancé en 1978) et Geosat (lancé en 1985) obtenus sur cette zone durant la dernière décennie. La section 3 est dédiée aux résultats de l'analyse de la première année de données de T/P en Méditerranée obtenus en utilisant une méthode géométrique de calcul d'arcs courts d'orbite qui garantit une précision centimétrique des profils altimétriques. Si les variations séculaires ne peuvent être mises en évidence clairement sur une si courte période, l'analyse a permis pour la première fois de caractériser les évolutions saisonnières du niveau moyen absolu par rapport au réseau géodésique régional et de vérifier la cohérence des mesures à mieux qu'un centimètre (Bonnetfond et al., 1995). En outre, grâce à la combinaison des données de T/P et de ERS1 (lancé en 1991) qui permet d'obtenir un échantillonnage spatio-temporel plus dense, nous présentons aussi une première observation des principales caractéristiques de la circulation en Méditerranée, notamment les variations saisonnières (Larnicol et al., 1995).

2. La Méditerranée: une zone privilégiée

La Méditerranée peut être considérée comme une zone test privilégiée des techniques géodésiques appliquées à la géodynamique et à l'océanographie. Du point de vue géodynamique, d'importantes campagnes de mesures ont été réalisées depuis 1985 dans la partie centrale et orientale en utilisant les techniques modernes de géodésie spatiale: la télémétrie laser sur satellites (Satellite Laser Ranging, SLR), l'interférométrie à très longue base (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) et le Système de Positionnement Global (Global Positioning System, GPS).

Les buts principaux de ces campagnes d'observations étaient l'étude des mouvements tectoniques de cette région mais aussi, plus largement, l'établissement d'un réseau d'appui SLR/VLBI en prévision d'une densification future (voir le projet international WEGENER-MEDLAS). Aujourd'hui, grâce notamment aux actions de la sous-commission EUREF (EUropean REference Frame) de l'Association Internationale de Géodésie (AIG), il existe un réseau européen étendu, dont le nombre de stations de poursuite de satellites est relativement important par rapport à d'autres régions du globe. Du point de vue océanographique, dans le cadre des études menées sur les variations du niveau moyen de la mer, un ensemble de données marégraphiques, certes de qualité inhomogène, sont disponibles sur le pourtour méditerranéen depuis longtemps (plus d'un siècle pour Marseille, par exemple). Cependant, compte tenu de l'influence de facteurs locaux à caractères géodynamique et océanique, ces mesures sont entachées d'erreurs. Aussi est-il nécessaire d'établir un réseau de marégraphes sur la base d'une même référence par rapport au centre de masse de la Terre, afin de séparer proprement les effets de variation du niveau moyen de la mer de tout autre effet, comme celui des mouvements de la croûte terrestre. Le projet européen SELF (SEa Level Fluctuations) a été créé dans le but de connecter certains marégraphes méditerranéens au repère de référence terrestre global, qui est basé sur les différentes techniques (SLR, Lunar Laser Ranging, VLBI, GPS) : l'International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Une première campagne a été réalisée en 1992 en utilisant le système GPS comme moyen de rattachement (Baker et al., 1993). Ce projet se poursuit aujourd'hui.

Grâce à l'altimétrie, la surface topographique de la Méditerranée a déjà fait l'objet de plusieurs déterminations. Les premières déterminations marquantes ont utilisé les trois mois de données du satellite Seasat, durant l'été 1978 (Barlier et al., 1982 ; Cruz and Rapp, 1982 ; Bernard et al., 1983 ; Exertier et al., 1987 ; Barriot and Vales, 1988).

Cependant, le facteur d'incertitude majeur de cette mission - l'erreur radiale de l'orbite du satellite - atteignait environ 1.5 m, pour une précision instrumentale certes déjà très bonne de 7 cm. Aussi, les méthodes d'amélioration de trajectoire, dites de correction d'erreur radiale d'orbite, ont été largement développées et appliquées. Par exemple, par ajustement des profils altimétriques aux points de croisement de deux arcs de trajectoire

(la hauteur de la surface de la mer doit y être identique, aux effets océanographiques près), la forme de la surface topographique locale a pu être déterminée avec une précision de l'ordre de 0.2 m. Aussi, le géoïde en Méditerranée a donné lieu à plusieurs interprétations géophysiques, notamment sur la structure de la lithosphère dans la partie occidentale du bassin et en mer Égée (Bernard et al., 1983 ; Genthon and Souriau, 1987). Néanmoins, des erreurs systématiques de l'ordre de un à quelques mètres ont été détectées sur la position absolue de la surface topographique Seasat par rapport à l'ellipsoïde de référence, comme peut le montrer la comparaison des diverses solutions entre elles ou encore la comparaison avec un géoïde gravimétrique (Torge et al., 1982 ; Exertier, 1983 ; Arabelos and Tscherning, 1988). Le satellite altimétrique militaire Geosat de l'U.S. Navy a été placé sur une orbite répétitive de 17 jours, fin 1986, pour démarrer des applications à caractère océanographique. Les 2.5 années de données recueillies ensuite ont formé la première base pluriannuelle de mesures altimétriques. Comme dans le cas de Seasat, la plus importante source d'erreur était l'incertitude sur l'altitude du satellite, de l'ordre de 1-2 m. Cependant, ce chiffre a été largement amélioré par la suite (à 0.3-0.5 m) grâce à l'amélioration du modèle de champ de gravité (Haines et al., 1994). Le calcul d'une surface moyenne de l'ensemble de la Méditerranée, pour des longueurs d'onde supérieures à 330 km, a été réalisée par Mazzega and Houry (1989), à partir de ces données. L'approche a consisté à séparer, le plus objectivement possible, le signal altimétrique de l'erreur d'orbite résiduelle dans une méthode directe inverse. La précision de cette surface moyenne Geosat est estimée à 0.12 m. En outre, une amélioration de cette solution, qui inclut des données marégraphiques, a permis d'augmenter la précision pour atteindre 0.10 m sur l'ensemble du bassin (Houry and Mazzega, 1991). Dans ce travail, les données des sites de Marseille, Bastia et Gênes (Italie) ont été moyennées sur quelques mois pour obtenir des hauteurs moyennes de mer qui, rattachées à l'ITRF par une campagne GPS, ont servi à contraindre les grandes longueurs d'onde de la surface moyenne déduite de l'altimétrie.

Les données altimétriques de Geosat en Méditerranée ont également servi à l'observation de la variabilité de la topographie dynamique dans la partie occidentale (travaux de M.C. Rouquet, CLS/Argos, en France et de Manzella et Marullo en Italie).

Cependant, les analyses ont révélé des difficultés sérieuses provenant : (i) de l'amplitude trop faible du signal nécessitant des mesures et corrections géophysiques encore plus précises, (ii) d'une large proportion de données manquantes due notamment à la présence de nombreuses îles (décrochage de l'altimètre). Enfin, l'assimilation des données Geosat dans des modèles de circulation océanique de la Méditerranée se caractérise essentiellement à travers la modélisation de marées et, en particulier, de la marée M2. Les travaux de P. Vincent (GRGS/Toulouse), notamment, ont permis de fournir une correction de marée océanique plus fiable pour les projets altimétriques des années 1990 (Vincent and Canceill, 1993).

Certaines études océanographiques demandent cependant une couverture spatio-temporelle plus dense que celle obtenue par Seasat et, si possible, une précision accrue par rapport à Geosat. Dans la perspective d'une amélioration significative du géoïde (actuellement d'après les rapports de F. Sanso, à l'Institut Polytechnique de Milan en Italie, la précision serait seulement de 0.2 m) par des apports conjoints du positionnement, de l'altimétrie et de la gravimétrie, on peut aussi espérer dans le futur accéder à la valeur de la circulation géostrophique, au moins dans les zones centrales des bassins. De plus, si le satellite altimétrique a une durée de vie supérieure à un ou deux ans, les signaux les plus accessibles sont la variabilité saisonnière et interannuelle de la surface topographique et des courants. Ces idées ont été à la base du projet d'océanographie spatiale TOPEX/Poseidon lancé en 1992.

3. L'apport des données de TOPEX / Poseidon

La mission T/P est la première mission spatiale où l'on a cherché à obtenir a priori, notamment grâce à une altitude élevée, une très grande précision dans la détermination du mouvement orbital du satellite ainsi que dans le système de mesure altimétrique. C'est par une amélioration très importante de la connaissance du champ de gravité, mais aussi par l'installation sur la plate-forme spatiale de systèmes de poursuite les plus performants (DORIS, SLR, et GPS à titre expérimental), que les spécifications sur l'erreur d'orbite ont été très resserrées par rapport aux missions antérieures (Nerem et al., 1993). Compte tenu aussi de l'évolution récente des méthodes de traitement, le seuil des 5 cm sur le bilan d'erreur local a finalement été franchi, résultant en une exactitude

de 4.7 cm pour la détermination du niveau géocentrique de la mer : 3.5 cm pour l'orbite du satellite, au lieu des 13.4 cm initialement spécifiés, et 3.2 cm pour l'altimètre (Fu et al., 1994). Concernant la mesure, la correction ionosphérique est produite par un altimètre bi-fréquence (TOPEX) ou par le système DORIS pour l'altimètre Poseidon. La correction troposphérique (partie humide) est basée sur les mesures d'un radiomètre à vapeur d'eau embarqué. Néanmoins, il est clair que la qualité recherchée pour l'ensemble du système T/P a nécessité la mesure absolue d'un certain nombre de paramètres, avec un étalonnage extrêmement précis des deux altimètres.

L'étalonnage d'un altimètre exige une détermination de la position du satellite par rapport à la surface de la mer, si possible au niveau centimétrique, et cela par principe indépendant de la mesure altimétrique. Dans ce type d'expérience, le satellite est positionné localement par une ou plusieurs stations de télémétrie laser, le niveau de la surface de la mer étant mesuré par des marégraphes. En conséquence, il faut avoir recours à des techniques géodésiques permettant de repérer dans le même système, par GPS ou positionnement géodésique, le satellite et la surface de la mer. La Méditerranée offre une zone de test idéal pour la calibration et la validation de ce type d'instrument, comme pour évaluer la qualité de la restitution des trajectoires de satellites d'observation. Aussi, plusieurs projets y ont été réalisés récemment. C'est le cas de la validation du système spatial T/P et de la campagne de calibration de l'altimètre radar Poseidon au-dessus de l'île de Lampedusa située entre la Sicile et la Tunisie (Ménard et al., 1994 ; Bonnefond, 1994). Ces expériences particulières ont fortement suscité le développement d'une nouvelle méthode de calcul d'orbite locale répondant à des objectifs de précision et d'exactitude de niveau centimétrique. Cette méthode est basée sur un concept géométrique et s'appuie essentiellement sur les données des systèmes SLR. Sa force réside donc dans sa capacité à s'affranchir d'un modèle de forces complexe, pour établir un calcul d'orbite précis sous des hypothèses relativement simples. Contrairement aux méthodes dynamiques, l'exactitude géocentrique de la position du satellite n'est donc plus rattachée à la validité d'un modèle orbitographique et de ses coefficients. Elle est reliée à la qualité du réseau local des stations de poursuite et de leurs mesures de distance. En revanche, ceci a pour conséquence une nette limitation dans le temps, et donc dans l'espace, de la qualité obtenue par la méthode sur le calcul des arcs d'orbite.

Ceux-ci sont d'environ 10 minutes pour T/P, donc d'environ 3000 km. Un bilan d'erreur a été dressé de façon exhaustive et des comparaisons, sur des arcs courts, de différents calculs d'orbite ont montré que la précision et l'exactitude de la solution géométrique s'établissaient à 2 cm (Bonnetond et al., 1995). Un avantage certain de cette méthode est sa capacité à fournir une même exactitude, quelle que soit la période considérée - début ou fin de la mission -, à condition de disposer de mesures de distance SLR d'une qualité au moins constante pendant la durée de la mission. Elle est donc tout à fait applicable, à long terme, pour l'observation de la variation temporelle du niveau moyen absolu de la mer, par rapport au réseau régional de stations.

Une application majeure de cette méthode a consisté en une expérience de détermination du niveau moyen absolu de la Méditerranée ainsi que de ses variations saisonnière et interannuelle. La surveillance du niveau moyen des mers est certes une application naturelle de l'altimétrie, mais la qualité extrême qu'elle exige des mesures s'est avérée hors d'atteinte des systèmes altimétriques lancés avant T/P. Cette application relève pratiquement de l'altimétrie absolue et requiert des mesures d'une précision nettement sub-décimétrique, d'une

reproductivité exceptionnelle et dépourvues de toute dérive artificielle. Après trois ans d'exploitation en orbite, T/P a prouvé qu'il répondait à ces critères. L'analyse des premiers mois de données altimétriques (de septembre 1992 à fin 1993) révèle déjà toute la potentialité de ce système. L'étude que nous avons menée en mer Méditerranée a permis d'établir, à partir du calcul géométrique des arcs courts d'orbite, une carte très exacte de la surface moyenne de la mer, qui est très proche du géoïde (Figure 2). La précision du niveau moyen est estimée à mieux que 1 cm, permettant de calculer les variations temporelles du niveau instantané par rapport au niveau moyen (Figure 3). C'est la première observation spatiale des variations du niveau de la mer dans cette région à ce niveau de précision (Bonnetond, 1994). Si les variations séculaires ne peuvent être mises en évidence sur une si courte période, l'analyse des variations saisonnières et intra-saisonnières du niveau moyen permet de vérifier la cohérence des mesures. Ces variations ont une amplitude pic à pic d'environ 20 cm, avec un maximum et un minimum respectivement en automne et en hiver : ce phénomène est dû pour une large part à l'expansion/contraction thermique de l'eau (effet stérique) sous l'effet de variations de température.

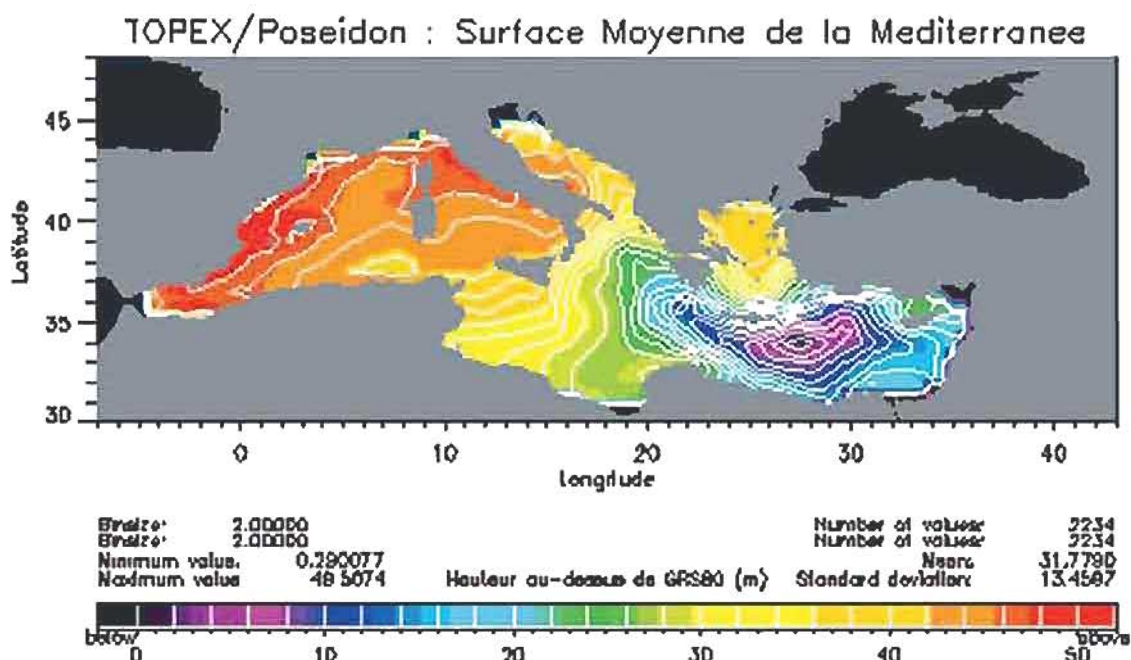


Fig. 2 Surface Moyenne de la Méditerranée référencée à l'ellipsoïde GRS80. Les hauteurs moyennes de la mer au-dessus de l'ellipsoïde sont en mètres. Cette surface a été obtenue à partir des données altimétriques des six premiers mois de la mission de TOPEX/Poseidon (Septembre 1992 à Mars 1993).

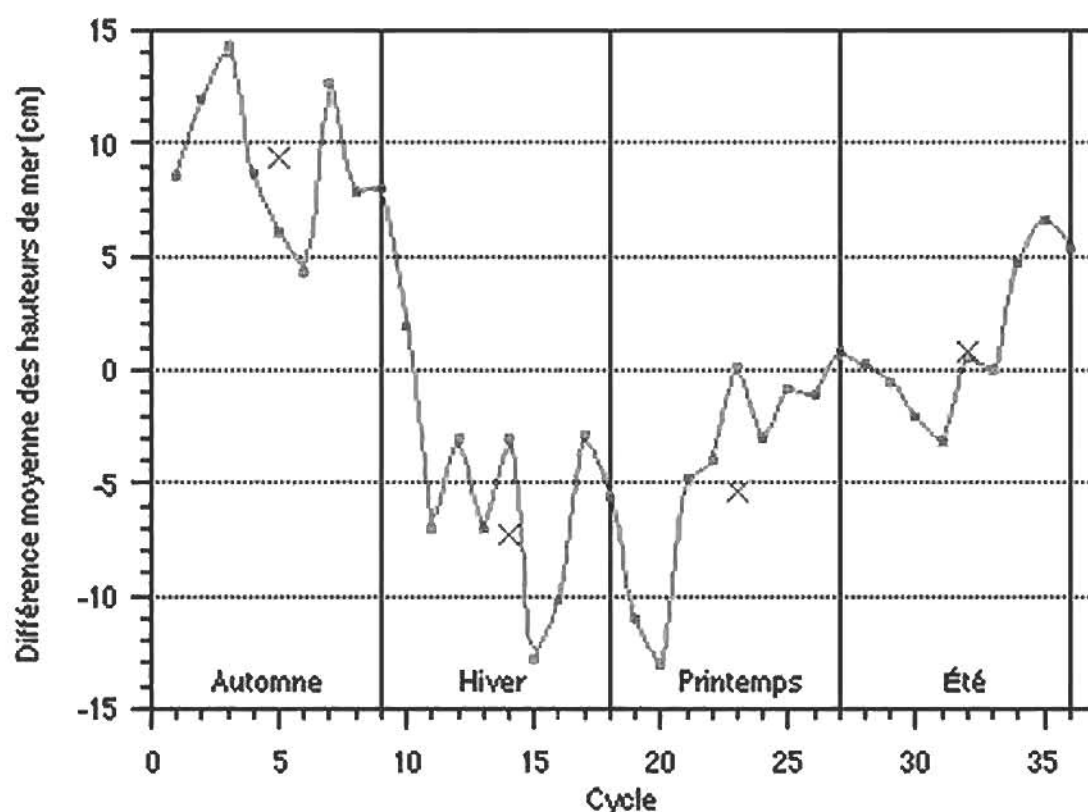


Fig. 3 Différences moyennes par cycle (cercles) des hauteurs de mer issues des profils instantanés de TOPEX/Poseidon par rapport à la surface moyenne annuelle (1-36). Les croix représentent la moyenne des différences de hauteur de mer aux points de croisement des profils moyens issus des surfaces saisonnières par rapport à ceux issus de la surface annuelle (1-36).

Enfin, et dans le but d'augmenter la résolution spatiale des données fournies par T/P, nous avons pu adjoindre à notre analyse les données altimétriques du satellite européen ERS1, lancé en 1991, dont la période de répétitivité est de 35 jours. La grille formée par les profils moyens de T/P a été utilisée pour contraindre les profils moyens issus des données altimétriques du satellite ERS1 en utilisant une technique de points de croisements. Du fait d'une plus grande erreur radiale pour l'orbite initiale du satellite ERS1 (20 cm à comparer à moins de 5 cm pour T/P), la diminution de la dispersion des différences aux points de croisement est très importante : de 26 cm à 6 cm. La résolution de la surface ainsi obtenue est donc

considérablement augmentée (75 km d'intertrace pour ERS1 vs 250 km pour T/P, voir Figure 4), sans altérer la précision globale du positionnement des profils moyens la constituant. Cette augmentation de résolution permet notamment de mettre en évidence certaines structures de la topographie sous-marine (Figure 5). D'autre part, l'analyse conjointe des mesures de TOPEX/Poseidon et ERS1 a permis de déterminer la circulation en Méditerranée avec une précision et une résolution spatiale très importante (Larnicol et al., 1995). Ces travaux, réalisés à CLS/Argos Toulouse, ont permis de cartographier la circulation générale et ses variations saisonnières, tout en mettant aussi en évidence des effets locaux (e.g., le tourbillon de Ierapetra au sud-est de la Crète).

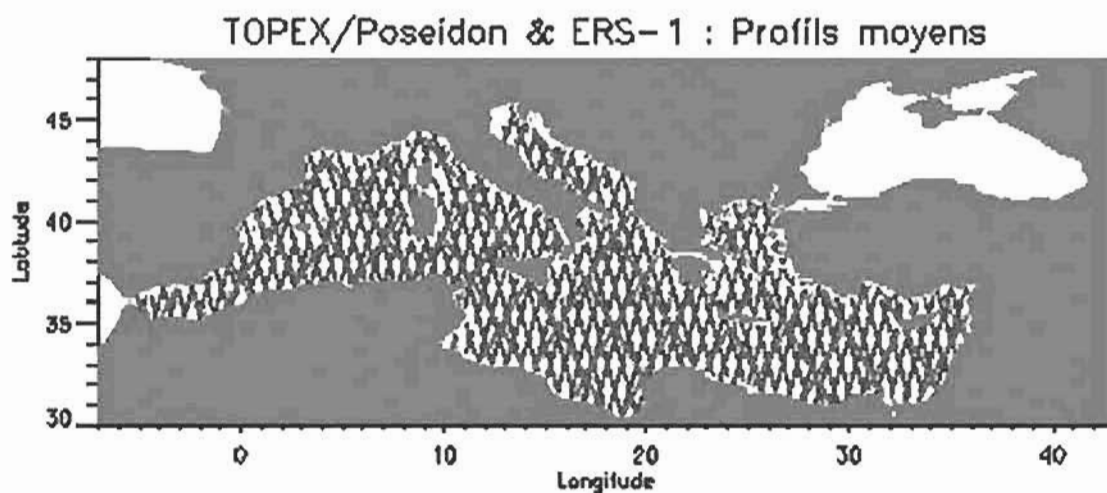


Fig. 4 Profils altimétriques de TOPEX/Poseidon (en rouge) d'ERS-1 (en bleu) en Méditerranée.

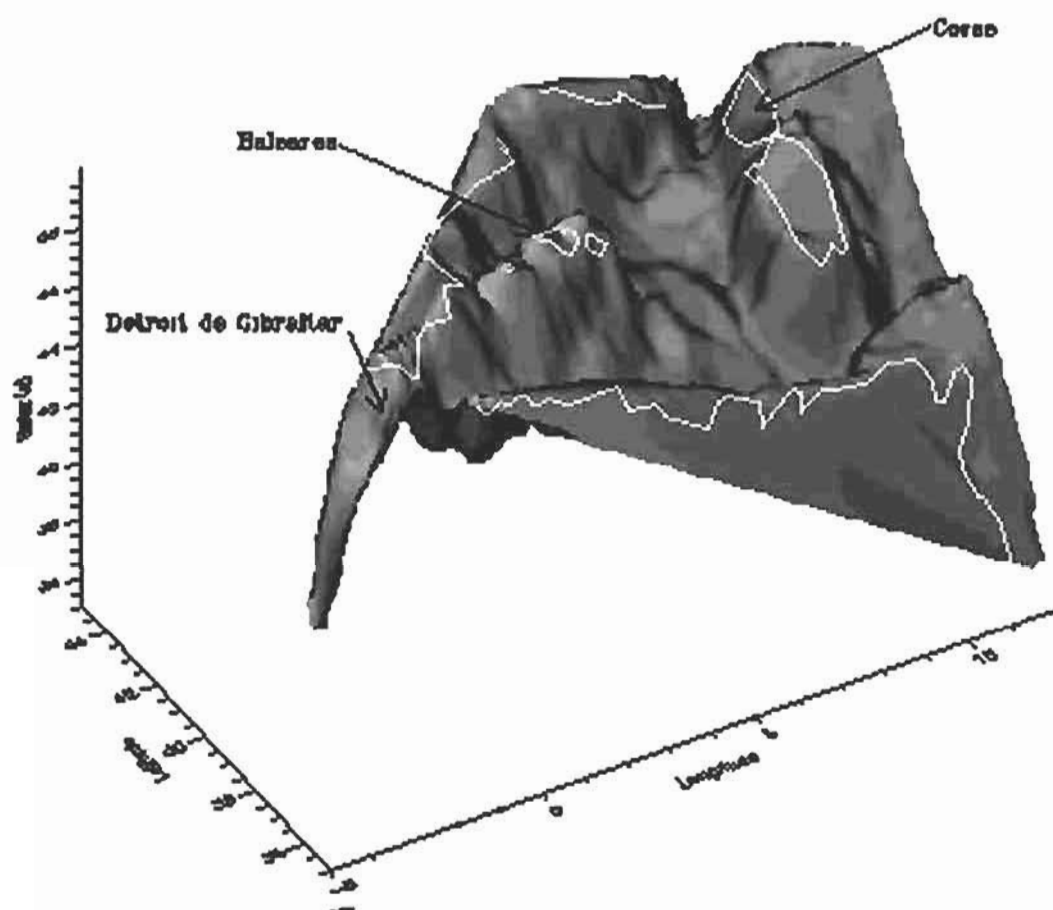


Fig. 5 Surface moyenne de la mer dans le bassin ouest de la Méditerranée obtenue à partir des données altimétriques de TOPEX/Poseidon et ERS1 (référéncée au GRS80).
Surface ombrée dont la source lumineuse est située en haut à gauche.

4. Conclusion

L'amplitude faible des phénomènes océanographiques (± 10 cm) et la signature complexe des phénomènes géophysiques (courtes longueurs d'onde du géoïde) rencontrées en Méditerranée peuvent être observées plus finement qu'ailleurs grâce à la topographie précise de sa surface. Il en résulte que la Méditerranée est une zone d'étude privilégiée pour la géodésie spatiale, compte tenu, au surplus, de l'ensemble des techniques modernes qui y sont affectées. Notamment, elle constitue un test idéal des nouveaux projets d'altimétrie spatiale, comme TOPEX/Poseidon et ERS1, pour la calibration et la validation de leurs données. Dans le but de déterminer la variation temporelle du niveau moyen absolu de la mer par les données de T/P, nous avons développé une méthode de calcul d'orbite locale, à caractère géométrique, qui permet d'obtenir une exactitude centimétrique sur la position du satellite. L'analyse a permis pour la première fois d'observer des amplitudes fortes du niveau moyen, de l'ordre de 20 cm, avec une période caractéristique d'un an. De plus, la combinaison des données d'ERS1 et de T/P a permis d'observer aussi, pour la première fois par altimétrie, les principales caractéristiques de la circulation en Méditerranée et notamment les variations saisonnières.

Sur une échelle de temps plus grande, certainement avec l'apport des quatrième et même cinquième années de données de T/P, des données d'ERS1 et ERS2 (lancé en 1995) et aussi des données des missions à venir, l'altimétrie en Méditerranée permettra d'avoir accès à la variation à plus long terme du niveau moyen absolu, avec une précision millimétrique.

Références

- Arabelos D. and C.C. Tscherning (1988) Gravity field mapping from satellite altimetry, sea-gravimetry and bathymetry in the Eastern Mediterranean, *Geophys. J.*, 92, 195-206.
- Baker, T. et al. (1993) Sea Level Fluctuations: Geophysical Interpretation and Environmental Impact (SELF), *Report of the Commission's Programme on Climatology and Natural Hazards*, Ed. by S. Zerbini, Depart. Physics, Univ. Bologna, Italy.
- Barlier, F. et al. (1982) The geoid of the Mediterranean sea deduced from Seasat data, *AIQ, 2nd Int. Symp. on the Geoid in Europe and in the Mediterranean Sea*, Rome, Italy, pp. 14-35.
- Barriot, J.P. and N. Vales (1988) Détermination Itérative des Géoïdes Altimétriques, *Bull. Géod.*, 62, 17-40.
- Bernard, J. et al. (1983) First Seasat altimeter data analysis on the western Mediterranean sea, *J. Geophys. Res.*, 88(C3) 1581-1588.
- Bonnefond, P. (1994) Méthode Géométrique de Trajectographie par Arcs Courts - Application à l'Analyse des Mesures Altimétriques des Satellites TOPEX/Poseidon et ERS1 en Méditerranée-, *Thèse de doctorat*, Observatoire de Paris.
- Bonnefond, P. et al. (1995) Satellite Altimetry From a Short-Arc Orbit Technique : Application to the Mediterranean, *J. Geophys. Res.*, 100(C12), 25365-25382.
- Cruz, J.Y. and R.H. Rapp (1982) Sea surface heights in the Mediterranean area from SEASAT altimeter data, *AIQ, 2nd Int. Symp. on the Geoid in Europe and in the Mediterranean Sea*, Rome, Italy, pp. 152-156.
- Exertier, P. (1983) Comparaison des Géoïdes Gravimétrique et Altimétrique en Méditerranée. Rapport de stage de DEA, Université de Nice.
- Exertier, P. et al. (1987) L'Altimétrie Seasat en Méditerranée, *Oceanol. Acta*, 14, 73-78.
- Exertier, P. (1993) Geopotential from Space Techniques, *Celest. Mechanics*, 57, 137-153.
- Fu, L.L. et al. (1994) TOPEX/POSEIDON mission overview, *J. Geophys. Res.*, 99(C12), 24369-24381.
- Fu, L.-L. and R.E. Cheney (1995) Application of satellite altimetry to ocean circulation studies : 1987-1994, U.S. national report to international union of geodesy and geophysics, *Reviews of Geophysics*, supplement, 213-223.
- Genthon, P. and M. Souriau (1987) New Constraints on Aegean subduction from Seasat altimetry, *J. Geophys. Res.*, 92(B1), 619-632.
- Haines, B.J., G.H. Born and C.J. Koblinsky (1994) Application of the GEM-T2 gravity field to altimetric satellite orbit computation, *J. Geophys. Res.*, 99(C8), 16237-16254.
- Houry, S. and P. Mazzega (1991) Large Inversions of Altimeter and Tied Tide Gauge Data for the Mediterranean mean surface, *J. Geophys. Res.*, 96(B2), 2417-2429.
- Larnicol, G., P.Y. Le Traon, N. Ayoub, and P. DeMey (1995) Mean sea level and surface circulation variability of the Mediterranean Sea from 2 years of TOPEX/Poseidon altimetry, *J. Geophys. Res.*
- Mazzega, P. and S. Houry (1989) An experiment to invert Seasat altimetry for the Mediterranean and Black Sea mean surfaces, *Geophys. J.*, 96, 259-272.

- Ménard, Y., E. Jeanson, and P. Vincent (1994) Calibration of the TOPEX/Poseidon altimeters at Lampedusa : Additional results at Harvest, *J. Geophys. Res.*, 99 (C12), 24487-24504.
- Minster, J-F., C. Brossier, and P. Rogel (1995) Variation of the mean sea level from TOPEX/Poseidon data, *J. Geophys. Res.*, in press
- Nerem, R.S. et al. (1993) Expected orbit determination performance for the TOPEX/Poseidon mission, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 31 (2), 333-354.
- Nouël, F., et al. (1994) Precise Centre National d'Etudes Spatiales orbits for TOPEX/Poseidon : Is reaching 2 cm still a challenge?, *J. Geophys. Res.*, 99 (C12), 24405-24419.
- Rapp, R.H. (1986) Gravity Anomalies and Sea Surface Heights Derived from a Combined GEOS 3/Seasat Altimeter Data Set, *J. Geophys. Res.*, 91 (B5), 4867-4876.
- Tapley, B.D. et al. (1994) Precision Orbit Determination for TOPEX/Poseidon, *J. Geophys. Res.*, 99 (C12), 24383-24404.
- Torge, W. et al. (1982) Computation of a high resolution european gravimetric geoid, *AIIG, 2nd Int. Symp. on the Geoid in Europe and in the Mediterranean Sea*, Rome, Italy, pp. 437-460.
- Vincent, P., and P. Canceill (1993) Oceanic tides in the Mediterranean Sea, *Int. Geoid Serv. Bull.*, 2, D.I.I.A.R., Polytechnico di Milano, Italy, pp. 84-90.
- Yunck, T.P. et al. (1994) First Assessment of GPS-based Reduced Dynamic Orbit Determination on TOPEX/Poseidon, *Geophys. Res. Lett.*, 21(7), 541-544.
-