

In memoriam : Topex-Poséidon

Disparition d'un fleuron

Regard croisé

Jean-François Minster

Centre national de la recherche scientifique

Dans le numéro 475 de mars 2006, la Revue Maritime a publié un article¹ de la plume de Bernard Dujardin à l'occasion de l'arrêt du fonctionnement de Topex-Poséidon. Comme un des scientifiques impliqués dans ce projet, son histoire et les travaux scientifiques et techniques associés, je voudrais apporter un autre regard et peut-être apporter des éléments de réponse à quelques unes des interrogations que soulève Bernard Dujardin.

Topex-Poséidon : objectifs et contexte initiaux

Il est tout d'abord nécessaire de rappeler quel était l'objectif scientifique prioritaire de Topex-Poséidon au début du projet en 1980. Il s'agissait de déterminer la « topographie dynamique » moyenne de l'océan à l'échelle des bassins océaniques, afin de cartographier les courants moyennés pendant la durée de la mission. Ceux-ci sont répartis de la surface aux fonds des océans ; ils dépendent à la fois des forçages thermodynamiques (flux de chaleur, évaporation, précipitations) et mécaniques (vent, pression atmosphérique) de l'océan et de l'état de l'océan lui-même (température, salinité). Le satellite avait de nombreux autres objectifs comme la variation de topographie dynamique à différentes échelles spatiales, mais les choix techniques de la mission étaient effectués en fonction de l'objectif prioritaire. Ces courants se traduisent par des élévations ou des creux de la surface des mers au-dessus du géoïde (qui est une surface de champ de gravité constant). L'amplitude de ces élévations est de l'ordre du mètre. L'orbite devait être choisie de façon à ce que les marées ne soient pas observées toujours à la même hauteur, afin qu'elles ne soient pas interprétées comme de la topographie dynamique. La précision instantanée de mesure devait être de 13 cm (écart type moyen), ce qui était adapté à l'objectif prioritaire : cette précision était essentiellement limitée par les erreurs d'orbite. On savait déjà que cette erreur était la résultante de nombreux phénomènes géophysiques ou de mesures qui avaient tous des caractéristiques spatiales et temporelles particulières, et que le bilan d'erreur devait donc être un objet d'étude approfondi, à la fois avant et après le lancement du satellite.

L'altimétrie satellite avait déjà à cette époque une assez longue histoire. Tandis que le

¹ Disponible sur le site internet de l'Institut français de la Mer. NDR

concept date de 1965, le colloque fondateur eut lieu à Williamston, en 1969 : à cette occasion, les capacités de l'ensemble des systèmes de mesures spatiaux en cours de développement, à atteindre des objectifs scientifiques nouveaux en physique de la Terre et des Océans a été analysée. L'altimétrie satellite a été jugée une technique prioritaire par sa capacité potentielle à observer des phénomènes géophysiques et océanographiques inobservables autrement. Cette priorité a été à l'origine du lancement de Geos3 en 1975 et de Seasat en 1978.

Topex-Poséidon était un projet en rupture des précédents projets de satellites altimétriques. Cette rupture se déclinait sous cinq éléments. Premièrement, son objectif était lié à la connaissance du rôle climatique moyen des océans, qui était alors un nouvel enjeu de l'océanographie et devait être étudié par ailleurs in situ par le programme WOCE (*World Ocean Circulation Experiment*) du programme mondial d'étude du climat ; à cette époque, le sujet du changement climatique n'était pas le sujet prioritaire qu'il est devenu depuis à juste titre. Par comparaison, les autres satellites altimétriques des années 70 et 80 étaient destinés à la démonstration de la technique, ou à l'étude des variations « mésoéchelles » des océans, ces courants tourbillonnaires qui traduisent la turbulence des océans. Deuxièmement, Topex-Poséidon avait un objectif de précision ambitieux. Un gain d'un facteur 3 à 5 par rapport à la précision atteinte par Seasat, lancé en 1978. Cette précision était compatible avec les objectifs de Topex-Poséidon et jugé accessible au vu des connaissances de l'époque.

Troisièmement, le satellite a été conçu comme un système, optimisé pour un objectif scientifique donné ; la sélection et la conception des instruments étaient faites par l'équipe projet, en relation avec les océanographes, pour atteindre cet objectif. Cette approche a été un facteur clé permettant d'en tirer le meilleur parti. Les mesures de Topex-Poséidon, comme toute mesure scientifique de pointe, devaient s'appuyer sur des technologies poussées à leurs limites (et notamment en matière de mesure du temps, de la vitesse du satellite ou des distances) et prendre en compte un nombre d'autant plus étendu de phénomènes géophysiques que l'objectif de précision était ambitieux.

Nous savions tous que ces phénomènes n'étaient pas tous connus et devaient faire l'objet d'études spécifiques. Ce problème a été abordé en sélectionnant une équipe d'une quarantaine d'investigateurs (appelés PI : pour « *Principal Investigator* ») du monde entier dont une quinzaine de Français ; ces PIs ont été chargés avec leurs équipes de suivre le projet (développé par les ingénieurs de la NASA, du CNES² et de l'industrie), de préparer et de valider l'analyse des données, de vérifier sans cesse l'ensemble de façon itérative avant et après le lancement. En parallèle, il a été décidé très tôt que les données devaient être mises librement à disposition des scientifiques du monde entier à condition que leurs résultats soient librement disponibles (par comparaison, les données des satellites Geos3, puis Geosat, ont été jugées sensibles par les militaires des États-Unis, et leur accès a été limité) : aujourd'hui, on sait identifier plus de mille scientifiques utilisant ces données altimétriques régulièrement. Elles sont devenues une donnée de base dans bien des projets océanographiques. Cette approche a été remarquablement performante et constituait en soi une quatrième rupture en matière de satellite d'observation de la Terre.

Enfin, Topex-Poséidon a été conçu comme une partie d'un ensemble beaucoup plus vaste. WOCE a été la plus importante expérience d'océanographie du xx^e siècle. Elle comportait non seulement des observations hydrographiques et biogéochimiques *in situ*, mais aussi des développements de modèles numériques et d'outils technologiques, ainsi que d'autres satellites. Ceux-ci devaient permettre de compléter l'échantillonnage spatio-temporel d'observation altimétrique (grâce aux satellites ERS-1 et 2 de l'Agence spatiale européenne) ou mesurer d'autres paramètres de l'océan comme la tension du vent ou la température de surface de la mer, nécessaires à l'étude du rôle climatique moyen des océans.

² National aeronautics and space Agency et Centre national d'études spatiales. NDR

À ce sujet, il faut noter que le projet Topex-Poséidon était associé, dès 1980, à un projet de satellite gravimétrique : il fallait en effet connaître indépendamment le géoïde marin à la même précision que le niveau des mers pour distinguer la topographie dynamique due aux courants de la forme du géoïde. On savait que ce dernier n'était pas une surface lisse : sa forme « patatoïdale » avait été décrite dès les années 60, grâce aux satellites géodésiques ; les variations géographiques sur des distances de quelques dizaines à quelques milliers de kilomètres étaient cartographiées en partie grâce aux satellites altimétriques (et l'ont été plus tard en détail grâce à Geosat, puis ERS-1³, simultanément en France et aux États-Unis). Mais la précision de ce géoïde sur des échelles de la centaine de kilomètres était insuffisante pour bien déterminer la topographie dynamique. Un satellite gravimétrique de basse altitude permettait de résoudre la question par des mesures indépendantes. De tels satellites gravimétriques vont bien être lancés... après l'an 2000 !

C'est à l'aune de ces objectifs et des connaissances et enjeux scientifiques des débuts du projet qu'il faut mesurer le bilan de Topex-Poséidon. À l'époque, il était considéré comme possible de détecter les variations des courants, mais à la limite de la précision du satellite et à condition de maîtriser les caractéristiques des erreurs. Il était envisagé d'éliminer le signal de marées par filtrage car les modèles globaux de ces marées étaient très imprécis. Ultérieurement, certains ont parlé de mesurer les variations du niveau moyen des mers, mais ce n'était pas jugé comme un sujet important – et semblait en tout état de cause difficilement accessible.

Quelques éléments de bilan : Les variations des courants à l'échelle des bassins océaniques

Sitôt après le lancement en 1992, l'effort des PIs et des équipes d'ingénieurs portait ses fruits : les données ont été disponibles dans les semaines qui suivaient. Il a alors été démontré que la précision de l'orbite du satellite serait bien meilleure qu'espérée. Cela résultait du travail des équipes d'ingénieurs en matière de technologie (les horloges) ou d'orbitographie (le système DORIS⁴), de la prise en compte de très nombreux processus géophysiques dans le calcul d'orbite, aussi bien que de la validation très approfondie, presque ligne à ligne, des codes de calcul. Cette analyse d'erreur n'est pas théorique, mais résulte d'intercomparaisons (calculs différents basés sur des données indépendantes par des équipes distinctes) autant que d'analyses statistiques de l'estimation d'orbite. Cette approche permet de s'assurer de la validité des chiffres annoncés ; elle permet aussi de détecter les problèmes et surtout de gagner encore en précision par améliorations successives. En effet, la détermination d'orbite est source de connaissances géophysiques, aussi bien que sur le système de mesures, qui peuvent être prises en compte pour de nouvelles améliorations. Cette démarche itérative d'amélioration, toujours ouverte à des données nouvelles, s'est poursuivie pendant toute la vie du satellite et se poursuit aujourd'hui : grâce à cela, les orbites des satellites Jason qui ont succédé à Topex-Poséidon sont calculées à une précision statistique voisine du centimètre. Cette amélioration continue a d'ailleurs concerné tous les aspects de la mesure et toutes les corrections, à partir d'un travail mené en parallèle par des équipes du CNES et la NASA, avec l'appui des PIs. Le progrès accompli, d'un facteur 30 environ depuis Seasat, est assurément un des résultats de Topex-Poséidon et de la démarche de gestion de ce projet. Il est source de résultats océanographiques et géophysiques importants.

Cette précision a permis d'observer les variations temporelles de la topographie dynamique et donc des courants à l'échelle des bassins océaniques. C'est, à mon avis, l'enjeu clé de l'altimétrie précise. Grâce aux données du satellite militaire américain Geosat, dont une partie des données avait été rendue disponible, les outils de traitement des données avaient été mis au point ;

³ *European research satellite*. NDR

⁴ Détermination d'orbite et radiopositionnement intégrés par satellite. NDR

on savait alors qu'on devrait être capable de détecter ces variations climatiques des océans avec Topex-Poséidon, notamment dans les zones tropicales. C'était bien sûr important pour le projet puisqu'on ne disposait pas du satellite gravimétrique permettant d'estimer le géoïde à la précision voulue (et donc d'atteindre l'objectif d'estimation de la topographie dynamique absolue) et qu'il fallait s'assurer que les objectifs initialement secondaires étaient atteints. C'était aussi prendre en compte l'évolution de l'océanographie, qui s'intéressait de plus en plus aux variations du climat – et donc des courants océaniques à l'échelle des bassins. En outre, observer ces phénomènes ne peut se faire que grâce à la mesure, à l'échantillonnage, à la couverture d'observation et à la répétitivité d'un satellite altimétrique. Il n'existe encore aujourd'hui aucune autre méthode d'observation directe et utilisable dans la durée pour observer les variations globales des courants océaniques avec le même échantillonnage que l'altimétrie.

Les phénomènes observés sont étonnamment variés : variations saisonnières et interannuelles du stockage thermique des eaux de surface ; déplacement saisonnier et interannuel des grands courants comme le Gulf Stream ; trains d'ondes tropicales associées au phénomène El Niño ; trains d'ondes dites de Rossby traversant les océans tempérés et déclenchant des méandres des grands courants ; variations dans les hautes latitudes associées aux variations de la pression atmosphérique ; propagations des anomalies de l'océan associées aux fluctuations du climat...

Un troisième élément de bilan réside dans les progrès de l'approche utilisée en océanographie : puisqu'on disposait en même temps d'observations satellites à la mesure du problème, d'observations *in situ* en grand nombre du programme WOCE, et de la puissance de calcul permettant des représentations numériques réalistes des océans, il est devenu possible d'utiliser l'ensemble des outils selon une approche intégrée. Cette démarche était apparue comme très efficace dans les années 70 en ce qui concerne l'étude de la mésoéchelle, mais elle a été rendue possible pour l'échelle des bassins océaniques grâce à Topex-Poséidon. Les modèles numériques pouvaient être comparés aux observations et donc être validés et améliorés. Cela a été accompli par exemple pour la description du phénomène El Niño, ou la propagation des ondes dans l'océan. Les observations (celles de tous les satellites autant que les mesures *in situ*) pouvaient être utilisées conjointement pour se compléter, et décrire les phénomènes océaniques dans leur complexité. Elles pouvaient aussi être interprétées au travers du réalisme des modèles numériques, ce qui permet en retour de contribuer à l'analyse de leur qualité. On ne saurait trop insister à quel point cette conjonction a changé l'approche des océanographes en ce qui concerne l'étude des variations du climat. D'ailleurs, cette approche intégrée a été poussée jusqu'à ajuster les modèles numériques aux observations de sorte que leur réalisme reste valable pour une projection dans le futur : c'est ce qu'on appelle l'océanographie opérationnelle qui consiste en un système permettant des prévisions sans cesse plus fiables des courants. Initialement destinée à la prévision des courants mésoéchelles (dès 1985 par des équipes communes du CNRS et du SHOM⁵), cette approche a montré à quel point la précision des satellites altimétriques améliorait la qualité des prévisions saisonnières de variations climatiques comme celles d'El Niño.

Cette triple logique, celle de la capacité à observer les variations climatiques des océans, celle de la capacité à créer des services de prévision, et le caractère essentiel et unique de l'altimétrie précise pour réaliser cela, a été à la base de l'argumentaire qui a mené au développement et au lancement de Jason en 2000, et de Jason 2 pour 2008. Et qu'on ne s'y trompe pas, s'il fallait observer l'océan aussi densément et systématiquement à partir d'instruments déployés *in situ* (par exemple un ensemble de marégraphes posés au fond des océans), le coût serait beaucoup plus élevé que celui des satellites Jason (sans parler de la difficulté d'accéder en temps réel aux mesures !).

⁵ Service hydrographique et océanographique de la Marine. NDR

Une révolution de la connaissance des marées océaniques

Parmi les grands sujets qui ont été profondément transformés par le projet Topex-Poséidon, on peut sans doute citer celui des marées océaniques. Il faut imaginer qu'en 1980, les marées, si elles étaient bien surveillées près des côtes fréquentées comme les nôtres, n'étaient pas connues avec la même précision partout : en particulier, les marées du large étaient plutôt connues avec une précision de l'ordre du décimètre. On ne savait tout simplement pas où et comment se dissipaient les 3 000 à 4 000 milliards de watts de l'énergie des marées (une énergie comparable à plus du tiers de la production énergétique de l'humanité).

Dès 1981, et donc très tôt dans l'histoire du projet, les équipes françaises ont proposé de développer une nouvelle génération de modèles numériques globaux : il s'agissait d'estimer les ondes principales (pour simplifier, les marées peuvent se décliner comme une somme d'ondes) et soustraire ces estimations aux données altimétriques indépendamment du filtrage des données. Simultanément, d'autres équipes ont développé des méthodes de cartographie des phases et amplitudes des marées à partir des données : il ne s'agissait alors plus d'éliminer l'effet des marées, mais de l'extraire des données.

Lors du lancement de Topex-Poséidon, le modèle numérique et les méthodes de traitement étaient prêts. En fait, ce sujet ancien et, qui ne semblait plus pouvoir progresser au début des années 70, était redevenu l'objet d'une compétition scientifique internationale très active. Avec l'allongement de la période d'observation par le satellite et par comparaison entre modèles et observations, la précision des cartes de marées s'est progressivement améliorée et a été étendue à toutes les ondes significatives. L'approche a alors consisté à mélanger modèles numériques et observations pour tirer parti des bénéfices de chacun et atteindre la meilleure précision possible.

Le résultat en est qu'on ne connaît désormais pas seulement les amplitudes des ondes de marées avec une précision proche du centimètre, ainsi que leurs phases, mais qu'on sait calculer partout les courants des marées. On a appris ainsi que la majeure partie de la dissipation de l'énergie des marées se fait dans l'Océan Atlantique ; que cela ne se produit pas seulement par friction des courants de marées au fond des mers et près des côtes, mais aussi par dissipation dans la masse d'eau ; que cette dissipation contribue au mélange vertical des eaux profondes ; qu'en conséquence, la stratification faible des eaux de l'Atlantique, qui est un facteur déterminant des champs de courants marins – et donc du climat de l'océan – dépendait en partie et de façon totalement inattendue des marées océaniques !

Et le niveau moyen des mers ?

La détermination du niveau moyen des mers n'était pas, on l'a vu, l'objectif de Topex-Poséidon, ni d'ailleurs l'objectif premier des satellites Jason. Cependant, deux ans à peine après le lancement de Topex-Poséidon, on s'est aperçu que le bruit statistique observé des valeurs moyennes tous les 10 jours était remarquablement faible, meilleur que le millimètre (un cycle d'orbite du satellite dure 10 jours, comporte 500 000 points de mesure et se répète très précisément). On sait bien expliquer pourquoi : les caractéristiques de la majorité des facteurs d'erreurs géophysiques aussi bien que celles des mesures sont telles qu'elles se moyennent très bien sur 10 jours (voir encart page suivante).

La détermination de l'élévation du niveau moyen des mers devenait alors un challenge technique, aussi bien qu'une opportunité scientifique. D'une part, compte tenu de la précision recherchée, ce travail a permis de détecter un nombre important de biais, ou d'erreurs de

traitement, au bénéfice de toute la mission. D'autre part, le caractère unique de la mesure altimétrique (elle est absolue par rapport au centre de la Terre, de couverture globale et homogène) permettait potentiellement d'étudier les causes des variations du niveau des mers. Dès le début, on s'est aperçu que l'approche itérative entre analyse de la mesure et analyse du signal géophysique allait jouer à plein pour améliorer les données. Dès le début, on savait que des variations rapides de la dérive du niveau des mers (avec les saisons ou avec le phénomène El Niño par exemple) pourraient masquer d'éventuelles dérives séculaires, mais que c'était là qu'on ferait des découvertes.

L'erreur de mesure en altimétrie satellite : un enjeu majeur

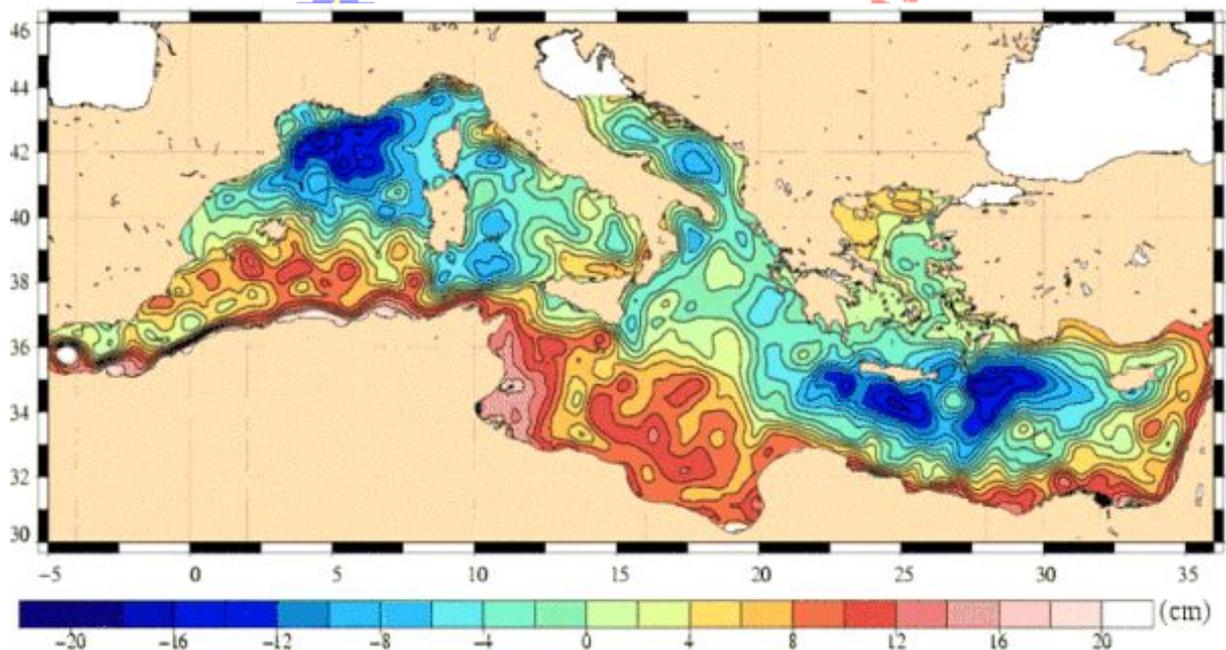
Comme toute mesure physique, la mesure de la hauteur des mers par altimétrie satellite n'est pertinente que si elle est associée à une estimation d'erreur. Et comme souvent, cette estimation est plus difficile à faire que la mesure elle-même. Observer statistiquement que la dérive du niveau moyen de la mer déterminée par Topex-Poséidon présente un bruit de 0,4 mm/an alors que le satellite navigue à 1 300 km d'altitude n'est pas a priori évident ! La mesure de hauteur doit prendre en compte le bruit de mesure de distance entre le satellite et la surface de la mer par le radar, les incertitudes liées aux corrections de propagation de l'impulsion radar dans la ionosphère et la troposphère, les corrections des effets de réflexion de l'écho radar à la surface de la mer dus aux vagues, et les erreurs de l'orbite du satellite, qui sert de référence à la mesure. Les erreurs d'aucun de ces différents effets ne sont des « bruits blancs » et ne s'estiment ni ne se réduisent simplement en moyennant les données. L'exemple le plus frappant concerne l'orbite du satellite : l'ensemble des phénomènes qui sont pris en compte dans le calcul de cette orbite (champ de gravité de la Terre et de la Lune et leurs variations dans l'espace et le temps, friction sur le satellite par l'atmosphère résiduelle, pression de radiation sur le satellite de la lumière du soleil et des nuages, incertitudes sur la position au sol des points de détermination de la position ou de la vitesse du satellite ainsi que sur ces mesures elles-mêmes, déformation thermique ou évolution de la masse du satellite, effets relativistes sur la mesure du temps...) affectent tous l'orbite sur de grandes distances de plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres. Cela signifie que cette erreur d'orbite est essentiellement la même pour tous les points de mesure de hauteur de la mer qui sont proches les uns des autres (le satellite fournit une mesure tous les 7 km environ) et qu'on peut « séparer » les erreurs de la hauteur de la mer sur courte distance de l'erreur d'orbite. En revanche, ces erreurs d'orbite deviennent un facteur important à l'échelle des bassins océaniques, mais elles se moyennent très bien à l'échelle de la planète (par exemple pour estimer le niveau moyen de la mer). Certaines composantes de cette erreur d'orbite ne jouent pas dans le temps (par exemple les incertitudes du champ de gravité), tandis que d'autres sont très sensibles pour un tel suivi temporel (par exemple la dérive de la masse du satellite affecte directement la dérive du niveau moyen de la mer).

Il est donc critique de décomposer l'ensemble complexe des processus pris en compte dans la mesure altimétrique pour déterminer quelle est l'erreur sur un phénomène particulier du niveau de la mer et de ses variations. Cela se fait en recherchant des estimations redondantes, indépendantes, de chacun des phénomènes affectant la mesure, par analyse statistique de ces phénomènes et par simulation numérique. Si les mesures de Topex-Poséidon sont aujourd'hui si largement utilisées sans guère de précaution par autant d'océanographes dans le monde, c'est aux trente années de travail sur les mesures effectuées par les spécialistes de l'altimétrie, qu'ils le doivent.

Et c'est bien ce qui s'est passé. L'article de Bernard Dujardin montre deux figures construites l'une en 2001 et l'autre en 2006 : celle de 2001 n'était pas destinée à étudier la dérive

du niveau des mers mais à faire un bilan d'étalonnage des altimètres de Topex-Poséidon, et à détecter des dérives instrumentales ou de traitement, suite à l'allumage d'un nouvel altimètre sur le satellite. Une fois ces problèmes détectés, des travaux ont été engagés pour les corriger - essentiellement à partir de données indépendantes. La figure de 2006 traduit l'état de l'art : elle est construite à partir de plusieurs altimètres (il y en avait trois à bord de Topex-Poséidon), et de plusieurs satellites (Topex-Poséidon et Jason) ; elle tire partie de corrections estimées systématiquement de plusieurs manières. Comme toute mesure expérimentale, on ne peut bien sûr pas affirmer qu'elle est la réalité et on ne peut exclure que des biais de mesure ne soient pas encore à découvrir. Cependant, le commentaire de Kelley Case cité par Bernard Dujardin (note n° 7) est heureusement à nuancer plus de 10 ans après avoir été écrit, compte tenu du travail accompli et de la cohérence des résultats.

Et d'ailleurs, les variations observées du niveau des mers sont aujourd'hui en grande partie explicables : les fluctuations saisonnières découvertes par Topex-Poséidon sont bien cohérentes avec les variations d'eaux continentales déterminées à la fois par les modèles de climat et les bilans de masse des océans mesurés par gravimétrie ; la carte des dérives du niveau des mers sur quinze ans est très semblable à celle de la dilatation des mers liée à son réchauffement. Il reste un écart entre la courbe moyenne de l'altimétrie et celle de la dilatation, mais cette différence pourrait être due à la fonte des calottes polaires dont on voit des indices par ailleurs. Aujourd'hui, je pense pertinent de chercher à expliquer le résultat d'abord du côté de la géophysique (voir l'article sur le niveau moyen des mers dans le n° 476 de juillet 2006 de la Revue Maritime).



Légende : Carte du niveau de la mer en Méditerranée, déterminée à partir de 7 ans de calcul numérique contraint par les données altimétriques. Les courants tournent dans le sens des aiguilles d'une montre autour des hauts de la topographie dynamique (en rouge) et dans le sens contraire autour du bas (en bleu). Autrement dit, les courants moyens entrent par Gibraltar et suivent la côte d'Afrique du Nord jusque dans la Méditerranée orientale. Ils forment deux boucles cycloniques à l'est et en mer Ligure (la sortie d'eau Méditerranée vers l'Atlantique se fait en profondeur par le détroit de Gibraltar).

Conclusion

Topex-Poséidon a dépassé tous ses objectifs et permis de nombreuses découvertes dans un

contexte de changement profond de l'océanographie, de ses enjeux scientifiques et de ses approches. D'ailleurs, en 2005, un audit de la NASA sur la valeur scientifique de l'ensemble des missions d'observation de la Terre a classé Topex-Poséidon et Jason en numéro 1. Walter Munk - qui n'a pas été associé au projet, mais qui est un des grands océanographes du xx^e siècle - a pu écrire que Topex-Poséidon a été le projet scientifique qui a le plus contribué à la compréhension de l'océan.

Le projet est souvent considéré au sein des agences spatiales comme le prototype de ce qu'il faut faire pour atteindre le meilleur succès. Les équipes françaises - chercheurs et ingénieurs - peuvent être légitimement fières d'y avoir joué un rôle essentiel - au point d'ailleurs que dans le partenariat américano-européen, le *leadership* des séries Jason est clairement positionné en France

Les données de Topex-Poséidon seront inévitablement retraitées à nouveau dans le futur ; le progrès des connaissances géophysiques et océanographiques permettra de prendre en compte l'effet de nouveaux phénomènes sur la mesure et d'améliorer le traitement ; le besoin de placer ces données dans une filière avec les satellites Jason augmente l'exigence de qualité ; les données des nouveaux satellites gravimétriques aussi bien que les progrès des modèles numériques de l'océan vont susciter de nouvelles approches et de nouvelles questions...

On sait aujourd'hui que les satellites altimétriques de grande précision sont un outil de base pour suivre et prévoir les variations climatiques des océans ; c'est d'autant plus le cas qu'on dispose également d'un outil global d'observation en temps réel de l'hydrographie à grande échelle avec les profileurs du programme Argo et qu'on sait utiliser toutes ces données simultanément. En outre, de nouveaux sujets émergent comme l'étude des bilans d'eau sur les continents. L'altimétrie précise est également une référence et un complément d'échantillonnage pour les données des satellites de moindre précision (celles des satellites ERS, Envisat, Geosat follow-on, ou celles des projets Altika ou Sentinel 3) ; elle permet d'utiliser ces dernières de façon optimale pour l'étude des tourbillons et leur prévision opérationnelle, nécessaire aux activités maritimes civiles et militaires.

Le défi du futur de l'altimétrie est donc multiple : continuer à améliorer la précision pour mieux connaître l'océan ; assurer la continuité de l'altimétrie précise au travers de la série des satellites Jason ; continuer à faire progresser les services opérationnels utilisant ces données, en les inscrivant dans le cadre du *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) de l'Europe, et d'une politique maritime européenne. La décision de Jason 3 doit être prise d'urgence si on veut éviter que la série d'observations n'ait pas des trous ; elle dépend aujourd'hui essentiellement de la Commission européenne, d'Eumetsat et de la NOAA⁶ aux États-Unis, outre l'implication des agences spatiales. Les équipes françaises de la recherche et de l'industrie ont le potentiel pour être les *leaders* mondiaux de ce défi. Elles doivent être soutenues politiquement et financièrement pour le relever.

⁶ National oceanic and atmospheric Administration. NDR