



L'observation spatiale de la Terre solide et de ses enveloppes fluides *par Anny Cazenave*

Introduction

Depuis quelques décennies, diverses observations collectées par les satellites artificiels ont relevé quantité d'informations sur la planète Terre (forme complexe de la Terre et champ de gravité, fluctuations de la rotation de la Terre, déformations globales, régionales et locales de la croûte terrestre en relation avec la tectonique des plaques et l'activité sismique et volcanique), sur l'atmosphère et les terres émergées et, depuis quelques années, sur la dynamique des océans et les variations du niveau de la mer, enfin plus récemment sur eaux continentales et les calottes polaires.

Chacun est habitué à voir régulièrement des images de l'atmosphère terrestre prises par les satellites météorologiques. Ces images ainsi que nombre d'autres observations réalisées depuis l'espace, au sol et au sein même de l'atmosphère, alimentent des modèles grâce auxquels les météorologues peuvent prédire le temps qu'il fera. Alors que les cartes météo sont bien connues du grand public, on sait moins souvent que de nombreux domaines relatifs à l'environnement terrestre bénéficient aussi de la surveillance permanente des satellites. Ainsi l'observation depuis l'espace des terres émergées est devenue incontournable pour la surveillance des risques naturels, des ressources en eau, de l'étendue et de l'état des forêts, ainsi que pour la cartographie, l'occupation des sols, l'urbanisation, le suivi des cultures agricoles et même les pollutions. L'observation des océans par satelli-

te a, elle aussi, atteint un degré de maturité tel qu'il est possible aujourd'hui de prédire, comme en météorologie, l'état de l'océan une ou deux semaines à l'avance.

Si l'utilité de l'espace pour l'étude et la surveillance de l'environnement terrestre est devenue incontestable, elle l'est aussi dans de nombreux domaines ayant trait aux recherches sur la structure de la planète et sur les phénomènes dont elle est le siège. La Terre est un système complexe dont les différentes composantes (de la partie la plus interne du globe jusqu'à l'atmosphère et la biosphère) interagissent sur des échelles d'espace et de temps extraordinairement variées.

Pour décrire la globalité des phénomènes observés, les satellites sont devenus des outils irremplaçables. Leurs avantages sont bien connus : ils offrent une vision globale et une résolution spatiale fine. Leurs observations couvrent des régions d'accès difficile, elles sont réalisées de manière quasi continue ou souvent répétées. Leurs mesures sont bien étalonnées et accessibles rapidement.

Dans un grand nombre de cas, les observations sont réalisées à partir de techniques de télédétection, dont la caractéristique est de décrire à distance les propriétés d'objets naturels ou artificiels, à partir des rayonnements qu'ils émettent ou réfléchissent. Mais d'autres approches sont aussi développées, notamment pour déterminer les propriétés physiques à grande échelle du globe terrestre ou encore les déformations de la surface terrestre. Parmi celles-ci, on peut citer l'embar-

quement sur satellites d'instruments permettant la mesure de phénomènes particuliers comme le champ magnétique de la Terre, la mesure de distances ou de vitesses entre le satellite et des balises placées à la surface terrestre, ou encore la mesure des déformations des trajectoires qui renseignent sur les forces maintenant les satellites en orbite, telle la gravité de la Terre.

On présente ci-dessous quelques exemples d'applications scientifiques de l'observation spatiale à l'étude du système Terre.

Le champ de gravité terrestre

L'étude des orbites des satellites géodésiques a permis d'établir des cartes très précises du champ de gravité de la Terre à grandes longueurs d'onde. Le satellite en orbite est en effet soumis à diverses forces : l'attraction gravitationnelle de la terre, de la lune, du soleil et des autres planètes, le freinage de l'atmosphère, la pression du rayonnement solaire et rediffusé par la terre, les effets de marées, etc. Toutes ces forces, dont la plus importante est de loin celle liée au champ de gravité de la terre, contribuent à déformer de façon très complexe l'orbite du satellite au cours du temps. La position et la vitesse du satellite sur son orbite sont déterminées grâce à un modèle des forces agissant sur le satellite ainsi qu'à des observations réalisées entre un réseau de stations géodésiques au sol et le satellite (par exemple des mesures de distance par télémétrie laser ou de vitesses relatives basées sur le décalage Doppler de signaux radioélec-

triques émis par les stations). Le suivi au cours du temps de la trajectoire du satellite permet de déterminer avec grande précision les déformations de celle-ci. L'analyse des déformations d'orbite d'un grand nombre de satellites, sur une longue période de temps (plusieurs années), permet en retour de déduire les forces agissant sur le satellite et en particulier le champ de gravité terrestre.

Plusieurs générations de modèles globaux du champ de gravité terrestre ont été publiées, en particulier par les chercheurs français, à partir d'une trentaine de satellites géodésiques et plusieurs décennies de données. Le champ de gravité terrestre est loin d'être uniforme. Il varie d'un endroit à l'autre de la Terre. Les variations géographiques du champ de gravité résultent de la répartition non uniforme de la matière dans les différentes enveloppes du globe. On peut visualiser ces variations de gravité au moyen d'une surface appelée «géoïde», qui coïncide avec le niveau moyen des océans au repos. A grande échelle, le géoïde présente deux grandes bosses, l'une centrée sur l'Islande, englobant tout l'Atlantique nord, l'autre située au sud de l'Afrique entre Madagascar et l'Antarctique. Quels phénomènes produisent ces déformations permanentes à grande échelle du globe terrestre ? On sait aujourd'hui que les grandes bosses du géoïde coïncident avec les grands courants ascendants de matière chaude qui existent dans le manteau terrestre. Ces courants de matière mantellique ascendants (ou descendants) résultent d'un

phénomène physique qui nous est familier : la convection. Le phénomène de convection résulte du transport vertical de matière dans un milieu fluide chauffé de l'extérieur ou de l'intérieur.

L'atmosphère et l'océan sont le siège de phénomènes de convection. C'est aussi le cas du manteau terrestre qui, à l'échelle des temps géologiques, se comporte comme un fluide. La source de chaleur principale résulte de la désintégration radioactive de certains éléments présents dans les roches du manteau. Les courants de convection à grande échelle dans le manteau terrestre sont responsables du déplacement des plaques lithosphériques à la surface de la Terre et de l'expansion des fonds océaniques, et indirectement de la formation des chaînes de montagnes continentales, de l'activité volcanique et sismique.

De Seasat à Jason : l'altimétrie spatiale appliquée à l'étude de la planète

L'altimétrie radar a été développée dès le milieu des années 1970 pour étudier les océans.

Rappelons brièvement le principe de la mesure altimétrique : le satellite émet vers le nadir une onde radioélectrique au moyen d'un altimètre radar embarqué. Cette onde se réfléchit à la surface de la mer et revient au satellite, ce qui permet de déterminer l'altitude du satellite au-dessus de la surface de la mer par mesure du temps aller-retour du signal. Si on connaît par une

autre méthode (la méthode des perturbations décrite précédemment), l'orbite du satellite, notamment son altitude au-dessus d'une référence (arbitrairement choisie), on peut, par différence, déduire les ondulations de la surface de la mer par rapport à cette référence. Sachant que le satellite effectue une mesure altimétrique tous les 5-7 km le long de son orbite et que les traces de l'orbite sur la surface terrestre peuvent être espacées de quelques km, on voit que l'altimétrie spatiale permet de cartographier directement, avec une très haute résolution, les ondulations de la surface marine.

Le satellite altimétrique Seasat (USA) lancé en 1978 ne fonctionna que 3 mois mais fit une brillante démonstration des potentialités de l'altimétrie spatiale. Plusieurs missions altimétriques lui ont succédé : Geosat (1985-1989, USA), ERS-1 (1991-1996, Esa), ERS-2 (1995, Esa), Topex/Poseidon (1992-2006, CNES-NASA), Jason-1 (2001, CNES-NASA) et Envisat (2002, Esa). Le successeur de Jason-1, Jason-2 doit être lancé en 2008.

Jusqu'au lancement de Topex/Poseidon (qui a marqué le début de l'altimétrie de haute précision), l'altimétrie spatiale a été surtout utilisée pour étudier la Terre solide.

Applications de l'altimétrie spatiale à l'étude de la Terre solide

Les ondulations de la surface marine cartographiées par altimétrie ont deux composantes : une compo-

sante permanente (invariable dans le temps mais qui varie géographiquement), due au champ de gravité terrestre, et une composante qui varie dans le temps, résultant des phénomènes océanographiques (marées, courants, tourbillons, etc.). Pourquoi les ondulations permanentes reflètent-elles les irrégularités du champ de gravité terrestre? Placé dans un champ de gravitation, un fluide a sa surface partout normale à la pesanteur locale. Si la pesanteur varie d'un point géographique à un autre, le fluide (ici la surface moyenne de la mer) qui lui est perpendiculaire, va présenter les ondulations. Ainsi les ondulations permanentes de la surface de la mer, qui coïncident avec le géoïde, reflètent directement les irrégularités du champ de gravité terrestre. Ces ondulations peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres et sont donc supérieures d'un facteur 10 à 100 à celles causées par les phénomènes océanographiques. Grâce à densité de mesures importante conduisant à un quadrillage très fin des régions océaniques (avec une résolution au sol meilleure que 10 km partout, avec les satellites Geosat et ERS-1), l'altimétrie apporte des informations précieuses sur les composantes à haute fréquence spatiales (géographiques) du champ de gravité. Aux échelles spatiales les plus courtes (10-500 km), les ondulations du géoïde marin sont une réplique quasi exacte de la topographie des fonds marins. Pendant des décennies, la bathymétrie a été mesurée par sondage acoustique à partir des navires de commerce, des navires océanographiques ou des bâtiments militaires. Mais de vastes régions océaniques sont restées totalement inexplo- rées, en particulier dans l'hémisphère

re sud. Grâce aux mesures à haute résolution du géoïde marin collectées par l'altimétrie spatiale, la topographie sous-marine a pu être calculée sur tout le domaine océanique avec une résolution de quelques km partout. Cette topographie montre la grande complexité des fonds marins (Figure 1). Outre les grandes structures déjà connues telles les dorsales océaniques, les zones de fractures et les zones de subduction, ou encore les alignements de volcans sous-marins, la topographie globale des fonds marins révèle d'autres structures jusqu'ici insoupçonnées ou incomplètement cartographiées à partir des bateaux. D'innombrables montagnes sous-marines, dont la moitié d'entre elles n'avaient jamais été cartographiées, ont été identifiées. On a aussi découvert quantité de reliefs fossiles, témoins d'une activité tectonique aujourd'hui disparue. Outre leur intérêt majeur pour la géophysique marine, ces données sont aussi très utiles de nombreux domaines comme la navigation sous-marine, la pêche commerciale, l'exploration pétrolière en mer, etc.

L'altimétrie spatiale de haute précision : un nouvel outil pour étudier les océans et mesurer la hausse du niveau des mers

L'altimétrie spatiale de haute précision, développée depuis le début des années 1990 avec les satellites Topex/Poseidon, Jason-1 et Envisat, est aujourd'hui un outil précieux pour l'océanographie. Cette technique permet de mesurer avec une précision remarquable (environ 2 cm) la hauteur des océans par rap-

port à une référence fixe et ses variations avec le temps. En quelques jours seulement (correspondant au cycle orbital), le satellite réalise un quadrillage complet de l'ensemble des océans. D'un cycle à l'autre, le satellite repasse au-dessus des mêmes régions océaniques. Il peut ainsi détecter les variations de la hauteur des océans au cours du temps. Ces données sont utilisées pour mieux connaître :

- les courants marins et leurs variations
- les marées océaniques
- les perturbations climatiques à grande échelle du système couplé océan-atmosphère, tel le phénomène El Nino
- les variations temporelles du niveau moyen de la mer
- la hauteur des vagues et la vitesse du vent à la surface de la mer
- les phénomènes turbulents de l'océan

La topographie dynamique de l'océan

Comme les continents ou les fonds marins, l'océan possède aussi une topographie qui lui est propre. Celle-ci est superposée aux creux et bosses du géoïde marin. Cette topographie, qualifiée de «dynamique», dont la hauteur est seulement de 1 à 2 m, résulte des courants marins. Il existe en effet une relation entre la hauteur de la topographie dynamique et la vitesse des courants. Ces derniers qui suivent des courbes de niveau, ont une vitesse proportionnelle à la pente locale de la surface instantanée de la mer. Ceci résulte d'un équilibre entre la force de Coriolis et la force de pression exercée sur une parcelle d'eau par l'océan environnant. La

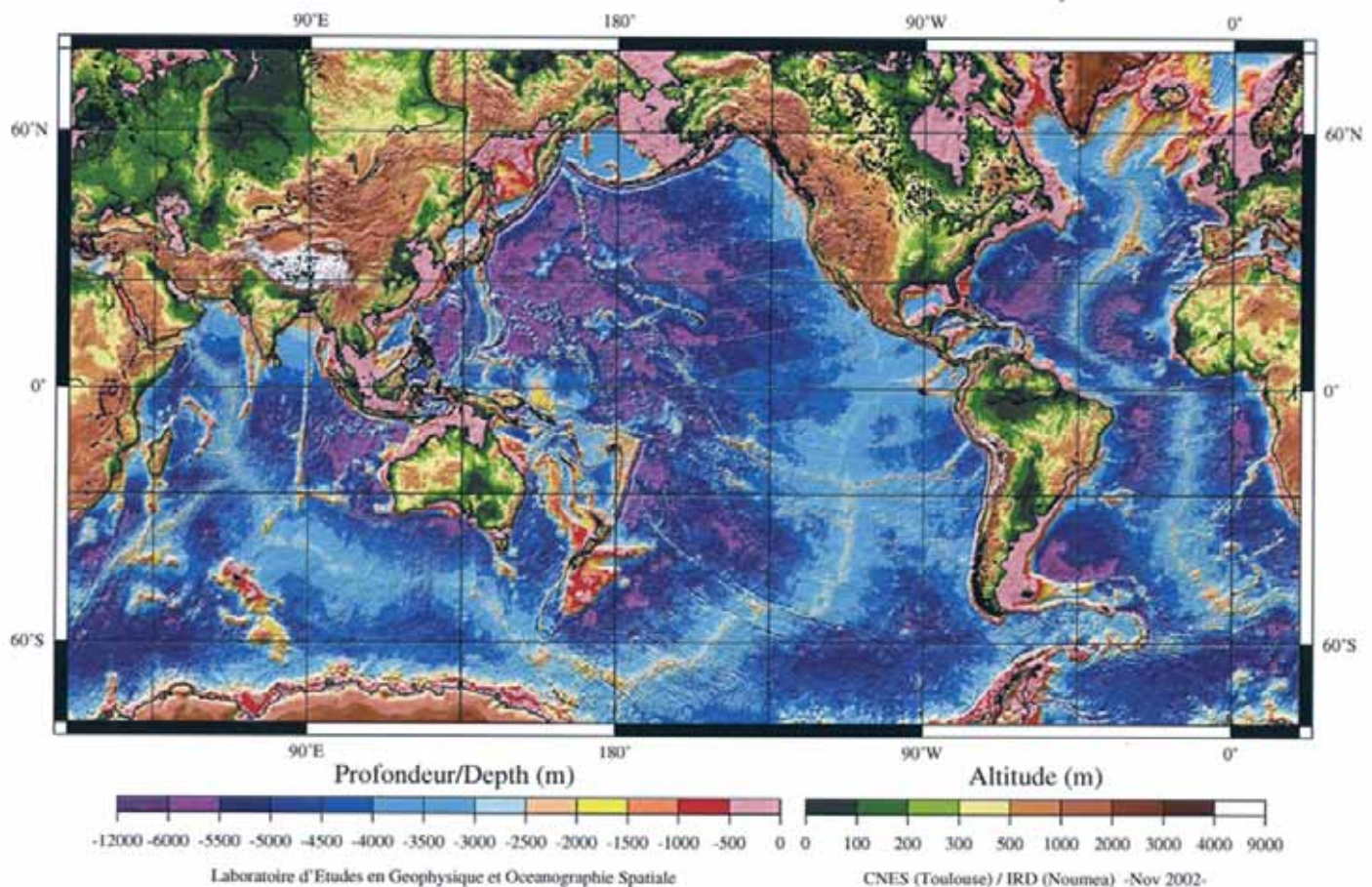


Figure 1 - Topographie des fonds marins déduite des ondulations permanentes de la surface de la mer mesurées par altimétrie spatiale
Seafloor topography determined from the permanent undulations of the sea surface as measured by space altimetry.

mesure de la hauteur instantanée de la mer permet de calculer la vitesse et la direction des courants de surface. Il s'agit d'une information fondamentale pour déduire la circulation profonde en combinant ces observations avec des modèles.

Réchauffement de la planète et hausse du niveau de la mer

Grâce à Topex/Poseidon et maintenant Jason-1, on mesure avec grande précision et surtout avec une couverture globale, l'évolution du niveau moyen de la mer au cours du temps. Depuis début 1993, le

niveau moyen de la mer s'est élevé de 4.5 cm. La vitesse d'élévation moyenne (de 3 mm par an) est un peu supérieure à celle mesurée par les marégraphes au cours du 20^e siècle (1.8 mm par an) (Figure 2a). Un résultat inattendu de l'altimétrie spatiale est la découverte que cette élévation est loin d'être uniforme (Figure 2b) : dans certaines régions, la mer a monté avec une vitesse 5 fois supérieure à la hausse moyenne ; dans d'autres régions, la mer a baissé. L'élévation du niveau de la mer résulte de plusieurs phénomènes : le réchauffement de l'océan et la fonte des glaces continentales.

Grâce à des données de température de l'océan collectées par des bateaux au cours des 50 dernières années, on sait à présent qu'environ la moitié de la hausse du niveau de la mer des 15 dernières années est causée par la dilatation thermique de l'océan (qui se réchauffe). Ce phénomène est aussi responsable de l'hétérogénéité régionale des vitesses de variation du niveau de la mer. D'autres observations permettent quant à elles d'estimer la contribution des glaciers de montagne : le recul quasi global des glaciers de montagne enregistré depuis quelques décennies contribue pour environ 1 mm/an à la

hausse du niveau de la mer. En raison de leur situation reculée, les calottes polaires (Groenland et Antarctique) bénéficient avantageusement des observations par satellites. Certaines techniques spatiales (altimétrie radar et laser, interférométrie radar et gravimétrie spatiale : voir plus bas) permettent d'estimer leur bilan de masse. On observe ainsi qu'en moyenne le Groenland et l'Antarctique de l'ouest perdent de la glace (en moyenne 150 gigatonnes par an chacun au cours des dernières années), ce qui contribue pour environ 0.8 mm/an à la hausse actuelle du niveau de la mer. Cette perte de masse de glace résulte principalement de l'écoulement extrêmement rapide de certains glaciers côtiers vers la mer, sous l'effet d'instabilités dynamiques dont les mécanismes ne sont pas encore bien compris. La mesure globale et continue de l'évolution du niveau de la mer par altimétrie spatiale et une bonne compréhension des différentes causes de cette évolution sont d'un intérêt considérable pour l'amélioration des modèles de climat utilisés pour calculer la hausse future du niveau de la mer.

Autres applications de l'observation spatiale à l'étude du système Terre

Déformations de la croûte terrestre et tectonique des plaques

Au cours de la dernière décennie, la mesure depuis l'espace des déformations crustales à différentes échelles spatiales a complètement révolutionné cette discipline. L'imagerie optique des satellites d'observation de la Terre (par ex. Spot, Landsat, etc.)

a permis la cartographie globale des failles actives continentales avec une résolution de quelques mètres. Les déformations des régions sismiques actives situées aux frontières des plaques tectoniques ont été largement étudiées à l'aide du système de positionnement GPS avec une précision de l'ordre du mm par an. Depuis une quinzaine d'années, une autre technique, l'interférométrie radar à partir des satellites radar imageurs à ouverture synthétique (par ex. ERS, Radarsat, JERS) s'est avérée extrêmement puissante pour l'étude des déformations crustales co- et post sismiques, des déformations volcaniques, des déformations des gla-

ciers, des glissements de terrain, des subsidences du sol dues au pompage de l'eau, du pétrole ou du gaz, etc.. Un autre résultat important dans ce domaine est la détermination par les techniques de positionnement spatial des mouvements actuels à grande échelle des plaques tectoniques et la découverte que ces mouvements sont identiques à ceux des trois derniers millions d'années.

Variations temporelles de la gravité terrestre

Depuis peu, une nouvelle mission de gravimétrie spatiale (appelée Grace, lancée en 2002), permet de mesurer les

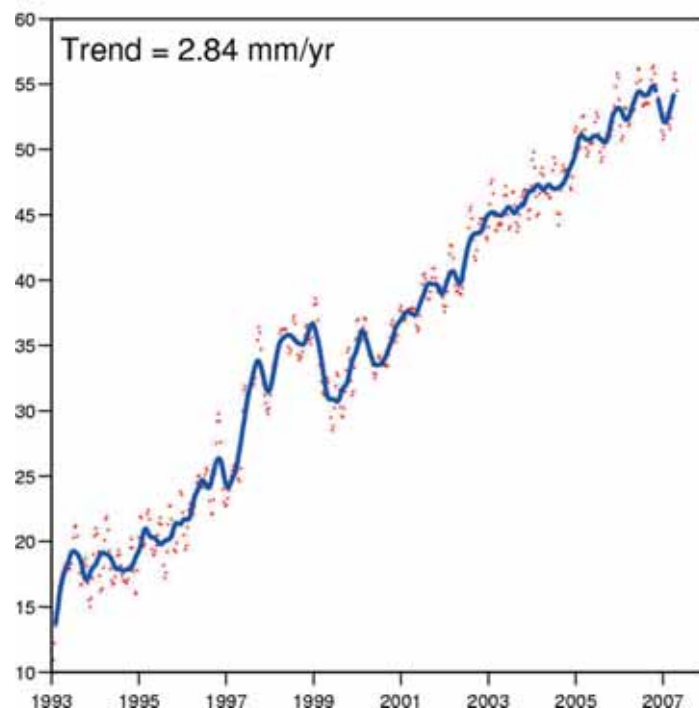


Figure 2a : Courbe d'évolution du niveau moyen de la mer mesuré par les satellites Topex/Poseidon et Jason-1 depuis 1993.

Change of mean sea level measured since 1993 by the Topex-Poseidon and Jason-1 satellites.

LEGOS/CNES (Dec 2006) (trends hbi 1d CLS resample 0.5d)

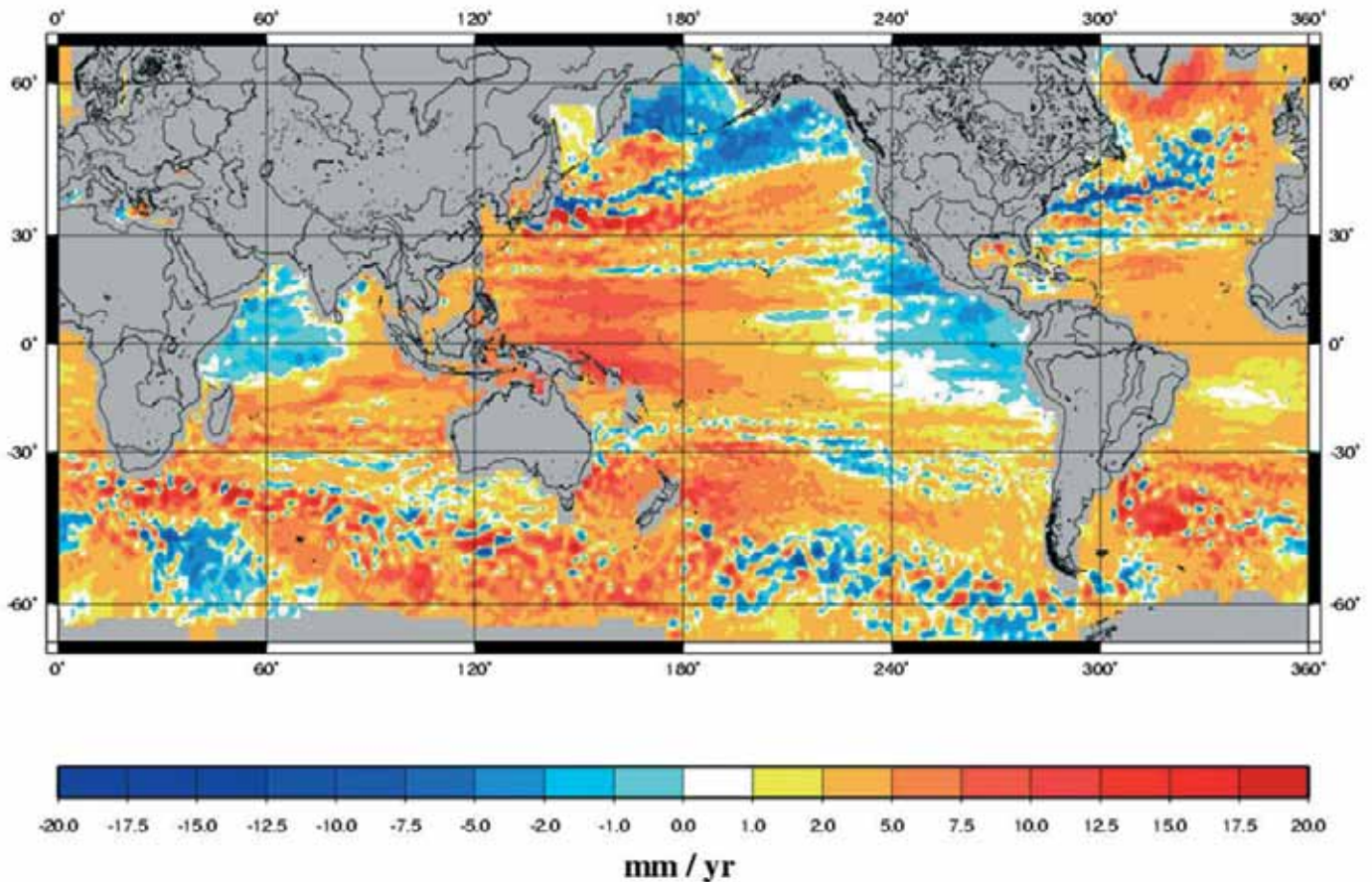


Figure 2b : Carte de la distribution géographique des vitesses de variations du niveau de la mer mesurées par les satellites Topex/Poseidon et Jason-1 entre 1993 et 2006. Les zones rouges sont des régions où la mer a monté avec une vitesse ~ 5 fois supérieure à la vitesse moyenne. Les zones bleues sont les régions où la mer a baissé durant cette période (bien qu'en moyenne sur le domaine océanique, c'est bien une hausse qu'on observe).

Fig. 2b –Geographical distribution of changes in sea level between 1993 and 2006, measured by Topex-Poseidon and Jason-1. Shown in red are areas where the rate of sea level rise was ~ 5 times greater than the global mean. The blue areas are those where sea level fell during this period (although on average over the world oceans, sea level rose).

variations temporelles du champ de gravité avec une précision et une résolution sans précédent, sur des échelles de temps du mois à plusieurs années. Sur de telles échelles de temps, les variations de la gravité sont dues à des redistributions de masses d'air dans l'atmosphère et d'eau dans les océans, l'atmosphère, les réservoirs continentaux et les

calottes glaciaires. Elles résultent aussi de transferts d'eau entre ces enveloppes. Une des principales applications de la mission Grace est de quantifier les variations spatio-temporelles des stocks d'eaux continentales (eau des sols, réservoirs souterrains et manteau neigeux) pour lesquelles il n'existe pas d'observation au sol à l'échelle globale.

Seuls des modèles hydrologiques globaux développés ces dernières années nous renseignent sur ces paramètres. Les observations de la mission Grace permettent pour la première fois de quantifier les fluctuations des stocks d'eaux continentales à l'échelle de la planète, avec d'importantes applications à l'étude du climat et à l'inventaire des ressources en eau (Figure 3).

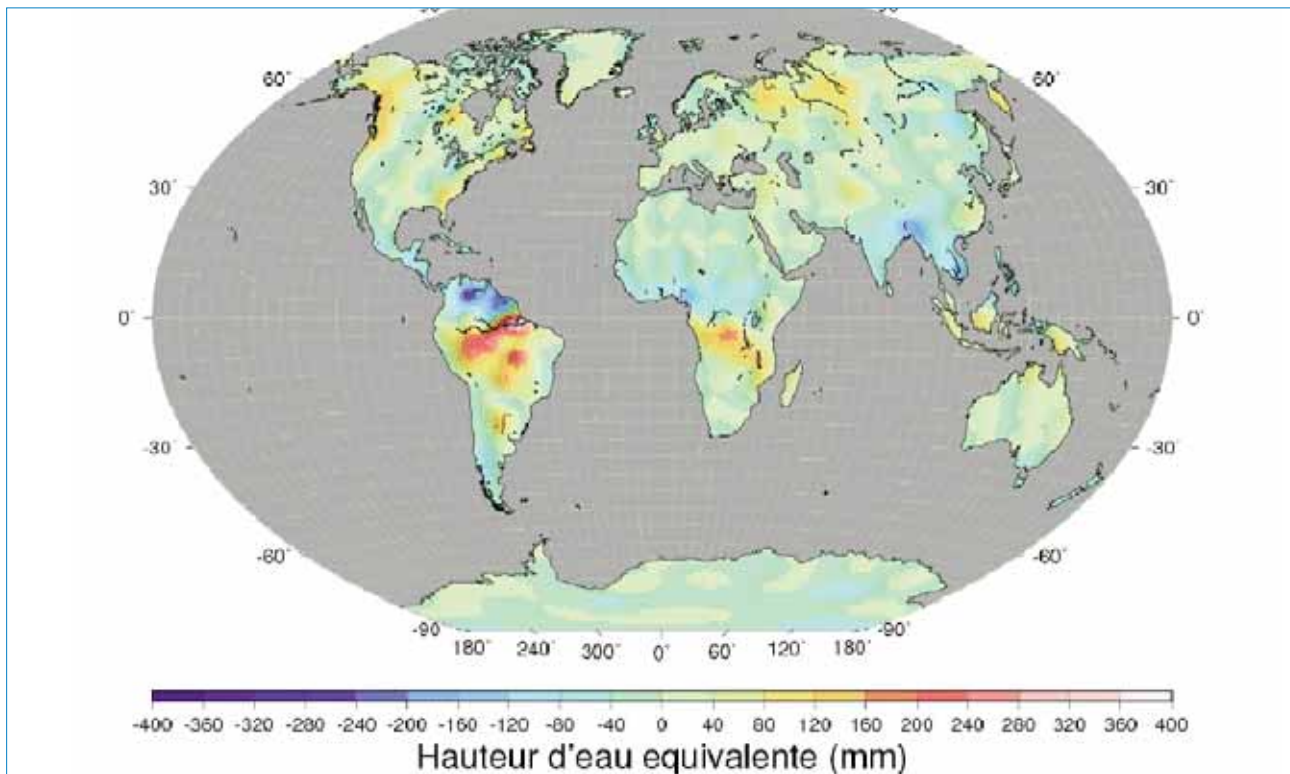
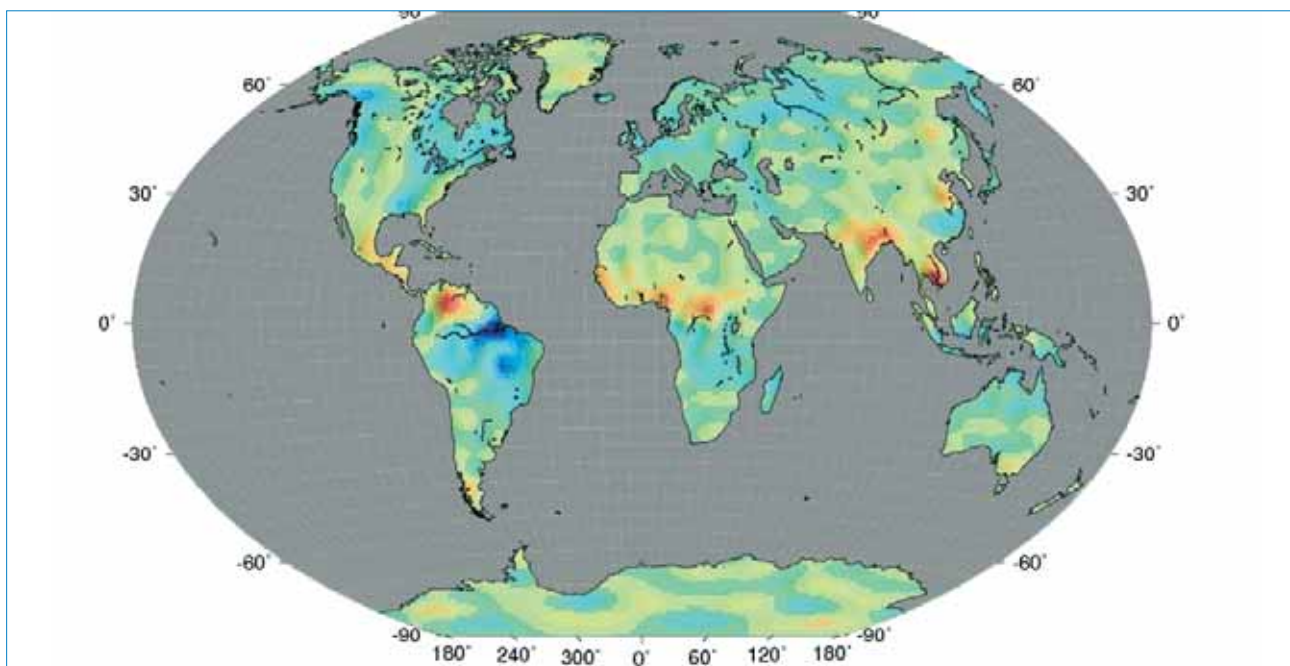


Figure 3 : Stocks d'eaux continentales (eaux de surface, eaux des sols, eaux souterraines et manteau neigeux) mesurés par le satellite GRACE pour les mois d'avril 2003 (en haut) et octobre 2003 (en bas) exprimés en hauteurs d'eau équivalente (unités : mm). Une moyenne pluriannuelle a été soustraite de façon à mettre en évidence les anomalies. La couleur rouge correspond à un excès d'eau (par rapport à la moyenne pluriannuelle) ; et la couleur bleue à un déficit d'eau. Les différences les plus fortes correspondent aux déplacements des zones tropicales de précipitations entre saison sèche et saison humide (mousson).

Continental water stocks (surface water, soil water, underground water, and snow cover on land) measured by the GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) satellite in April (Fig. 3a) and October (Fig. 3b) 2003, and given in mm liquid water equivalent thickness. The average over several years has been subtracted so as to reveal anomalies, with red corresponding to an excess of water, blue to a deficit. The strongest differences correspond to dry- to wet-season (monsoon) shifts of precipitation in the tropics.



Grace permet aussi de mesurer le bilan de masse des calottes polaires (voir plus haut).

Conclusion

Ce bref survol (non exhaustif) de l'apport du spatial à l'observation de la Terre solide et de ses enveloppes fluides montre combien les satellites sont précieux pour étudier la planète et suivre ses évolutions, notamment celles liées aux risques naturels, au changement climatique et à la pression anthropique. Ces nouvelles préoccupations, devant permettre une meilleure gestion de l'environnement terrestre, comptent parmi les enjeux du programme européen GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) dont la mission générale est de développer des services de fourniture d'informations dans le

domaine de l'environnement à l'usage de la société, fondés sur l'utilisation de données in situ et spatiales. La communauté française et ses partenaires européens peuvent - et doivent- se mobiliser pour valoriser les produits issus de l'espace (dont certains très nouveaux comme ceux liés à la ressource en eau) dans les différents domaines de l'environnement terrestre. Il s'agit d'un défi important nécessitant une organisation optimisée regroupant chercheurs, industriels et utilisateurs venant d'horizons très divers.

Sites internet :

- <http://www.legos.obs mip.fr/fr/equipes/gohs/>
- <http://www.legos.obs mip.fr/soa/hydrologie/hydro web/>

- www.ipcc.ch
- <http://www.cnes.fr/web/108/mediatheque.php>

Ouvrages sur le sujet :

- *Satellite Altimetry and Earth Sciences. A handbook of Techniques and Application*, Lee L. Fu & A. Cazenave Editors, Academic Press, International Geophysics Series, Vol. 69, San Diego, USA, 463 pages, 2001.
- *Formes et mouvements de la Terre : satellites et géodésie*, A. Cazenave et K. Feigl, 160 pages, CNRS Editions, Belin, Paris, 1994.
- *La Terre vue de l'espace*, A. Cazenave et D. Massonnet, 125 pages, Bibliothèque Pour la Science, Belin, Paris, 2004.

Anny Cazenave