

## Les marées terrestres, la dynamique du manteau et la sismicité

**Comment les marées solides et la gravimétrie influent sur la sismicité. Compte-rendu d'une conférence de Laurent Métivier, du laboratoire Lareg de l'IGN.**

Le phénomène le plus apparent qu'exercent les attractions combinées du Soleil et de la Lune sur le globe sont naturellement les marées liquides. Le niveau des océans évolue selon un cycle à peu près semi-diurne, compte-tenu du mouvement combiné de la Terre et de son

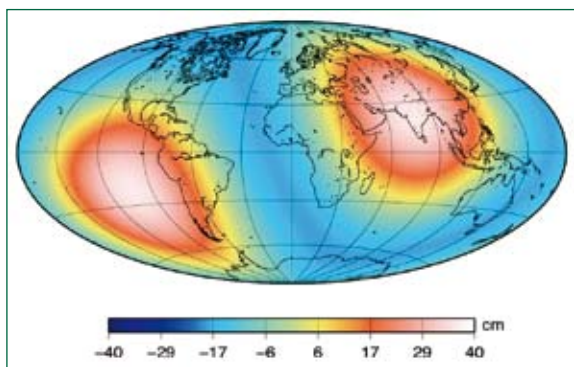
### Modélisation des marées solides

Cette marée solide a été modélisée par un certain nombre de travaux scientifiques. Elle se traduit essentiellement par des variations périodiques du champ de pesanteur terrestre, tel que mesuré par les gravimètres. Ces derniers sont d'ailleurs de technologies hétérogènes. Les plus précis, réservés aux laboratoires, et mettant en œuvre des matériaux supraconducteurs, ont une précision qui atteint le nGal <sup>1</sup> (soient des variations de l'ordre de  $10^{-12}$  par rapport au champ de pesanteur standard !) alors que les gravimètres à ressort ne dépassent pas le  $\mu$ Gal de précision. Les modèles de marées donnent des résultats à peu près satisfaisants, mais n'arrivent pas à expliquer certains résidus constatés, par exemple, en Asie du Sud-Est, qui sont de l'ordre d'une centaine de nanogals. Alors que l'on a d'abord

pensé à une mauvaise modélisation des marées océaniques, il semble que ce soit plutôt le phénomène de marée solide, dont l'amplitude atteindrait 40 cm, qui soit à l'origine de ces disparités.

Car la plupart des modèles de marées solides reposent sur les hypothèses simplificatrices que la Terre est une planète sphérique composée de trois couches elles-mêmes homogènes, la croûte, le manteau et le noyau. Or, la structure de la Terre est bien plus complexe que cela, notamment en raison des courants de convection du manteau, de variations locales latérales de densité, etc. Tous ces paramètres, dont certains ont des cycles de plusieurs millions d'années, influent sur la réponse gravimétrique.

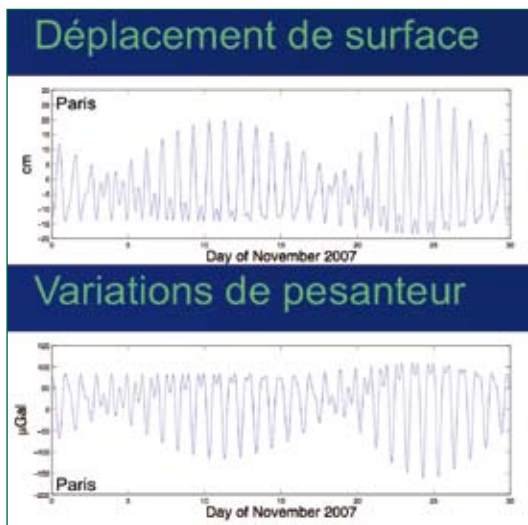
Il faut donc renouveler les modèles de Terre et de marée. L'une des pistes consiste à explorer les données issues de la tomographie sismique, qui, grâce à l'analyse de la vitesse de propagation des ondes sismiques, donne des profils de densité mantellique et permet d'élaborer une représentation plus précise. Une fois cette configuration statique élaborée, elle est réintroduite dans un modèle de convection dynamique pour en étudier l'évolution. Cette méthode permet d'expliquer les



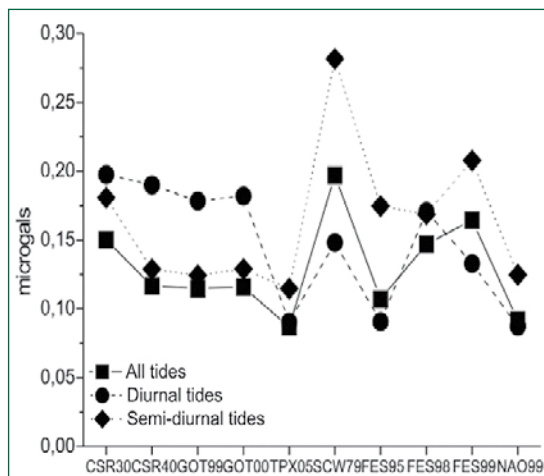
Amplitude des marées solides à la surface terrestre.

satellite. Mais cette oscillation n'est pas la seule : soumis aux mêmes forces, le manteau terrestre, malgré sa viscosité importante, présente également une réponse gravitationnelle qui se traduit par un léger mouvement vertical des continents.

<sup>1</sup> Le gal est une unité du vieux système CGS qui mesure l'intensité de l'accélération due à la pesanteur ; 1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 0,01 m/s<sup>2</sup>. L'intensité standard de la pesanteur est donc de l'ordre de 981 Gals.



Amplitudes des marées solides relevées à Paris.



Résidus inexpliqués observés dans les laboratoires d'Asie après application du modèle de correction des marées. D'après Boy et al., 2003.

anomalies du plateau sud-africain ou encore du Pacifique.

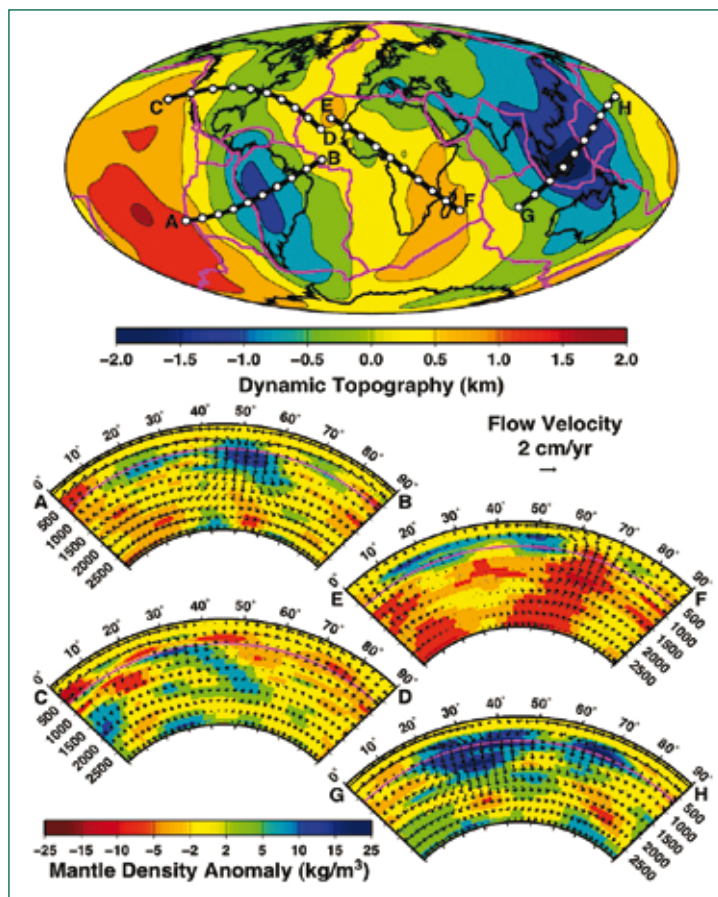
Autre constatation : le géoïde auquel on aboutit grâce à ce modèle semble « trop écarté » ; il faut donc lui appliquer des contraintes supplémentaires afin d'obtenir des courbes équipotentielles plus correctes – sans pouvoir cependant arriver à une parfaite concordance avec le géopotentiel mesuré. Sur ce géoïde, on applique le modèle de déformation planétaire, que l'on analyse dans le domaine spectral grâce à une méthode d'éléments finis hautement parallélisable. Les résultats obtenus sont intéressants pour deux ou trois questions, dont les marées solides.

En ce qui concerne ces dernières, on obtient une perturbation supplémentaire de l'altitude de l'ordre de 0,25 mm, donc encore indétectable même avec les meilleures observations GNSS. En revanche, en termes de marées gravimétriques, les oscillations atteignent plusieurs dizaines de nanogals, donc sont parfaitement détectables par les gravimètres de laboratoire ; elles évoluent selon les paramètres astronomiques, et présentent deux résonances principales : à Bornéo (150 nGal) et à Santiago du Chili (100 nGal), avec des périodes différentes, ces

deux régions étant localisées à l'aplomb de zones de subduction. D'autres réponses importantes se situent à Djibouti (100 nGal), sur le rift est-africain, à Hawaii et en Islande (80 nGal), c'est-à-dire à l'aplomb de points chauds du manteau. En France, la réponse maximale est enregistrée à Nice,

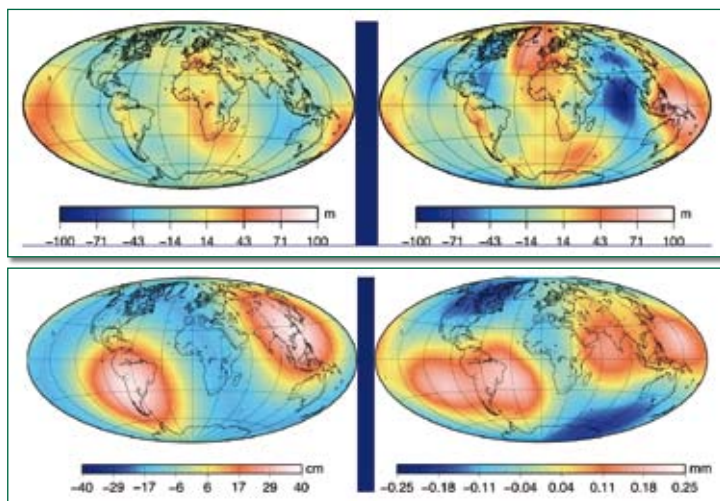
elle est de l'ordre de 50 nGal lors du solstice d'hiver.

Quelles sont les propriétés du manteau qui se détectent le mieux ? En réalité, elles se divisent en deux grandes catégories : les hétérogénéités du manteau inférieur qui provoquent des anoma-



Variations latérales de densité et coupes tomographiques du manteau. Métivier et Conrad, 2008.

Contrainte du géoïde.  
À gauche, le géoïde  
calculé avec les contraintes  
dynamiques, à droite,  
le géoïde réellement observé.



Déplacements altimétriques  
des aux marées.  
À gauche, modèle standard  
dit PREM.  
À droite, les perturbations  
induites par les hétérogénéités  
mantellaires.

lies aux grandes longueurs d'ondes et les inhomogénéités du manteau supérieur qui occasionnent des anomalies plus localisées.

Conclusion : le modèle classique de marée solide est insuffisant. En revanche, le nouveau modèle affiné prédit des perturbations de l'ordre de 150 nGal au solstice d'hiver (période où la Terre est la plus proche du Soleil) qui sont compatibles avec les mesures.

## Corrélation entre marées solides et sismicité

La marée solide, qui perturbe la dynamique de la Terre, et occasionne des mouvements superficiels, aurait-elle des effets sur la

sismicité ? La question n'est pas sans objet, puisque si les tensions dues aux frictions entre plaques à la veille d'un séisme avoisinent les  $10^5$  à  $10^7$  Pa, la marée engendre des déplacements verticaux qui équivalent à des pressions de l'ordre de  $4 \cdot 10^3$  Pa. Si la marée est maximale, la contrainte verticale diminue au profit de contraintes tangentielles : est-ce une condition suffisante au déclenchement du tremblement de Terre ?

Le problème n'est pas récent, puisque les premières études ont été réalisées à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle par des techniques statistiques. À cette époque, aucune corrélation significative n'avait pu être mise en évidence, mais les observations étaient sommaires et de précision limitée. Depuis, et jusqu'en 1997, plus de trente études ont tenté d'étudier ce phénomène : dans

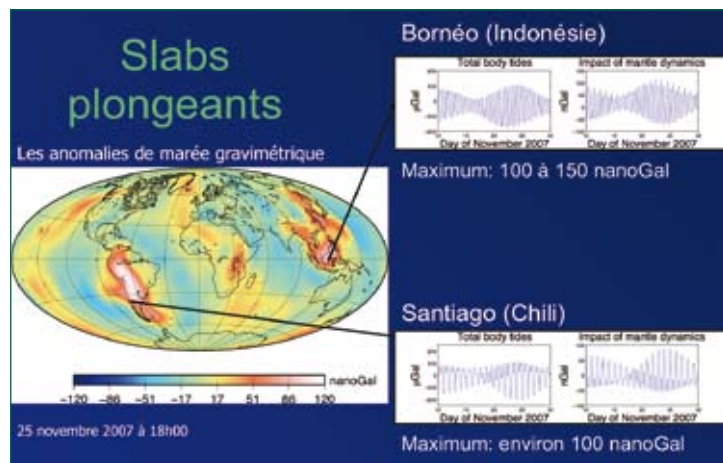
40 % des cas, elles conduisent à l'absence de corrélation, à corrélation dans 26 % des cas et ne se prononcent pas dans 35 %. En 1998, une étude de Vidale portant sur 13 000 séismes répertoriés en Californie conclut à une légère corrélation, mais non statistiquement significative. D'autres études, qui portent sur les 9 000 séismes mondiaux les plus importants, révèlent une corrélation avec les marées océaniques. Dans tous les cas, une conclusion définitive semble au mieux délicate.

L'intérêt de telles études a été renforcé par les découvertes de certaines sondes spatiales, qui ont montré que, notamment parmi les satellites de Jupiter et de Saturne, les phénomènes sismiques étaient fortement corrélés avec les effets de marée.

Toutes ces études portent sur plusieurs milliers de tremblements de Terre. Cependant, une expérience de laboratoire étudiant les roches sous pression a mis en évidence que la corrélation, si elle existe, ne saurait porter sur plus d'un pour cent des séismes. Cela signifie qu'il faut passer au crible au moins 13 000 séismes pour espérer obtenir un résultat significatif.

Le problème a donc été repris à zéro. Il s'est d'abord agi de rechercher un catalogue des séismes le plus exhaustif, l'USGS NEIC Earthquake catalog : celui-ci dénombre 442 412 séismes de magnitude 2,5 à 9. On récupère ensuite le lieu et l'heure, de façon à pouvoir extrapoler le mouvement de marée correspondant.

Au total, on s'aperçoit qu'il existe peut-être un léger excès de séismes correspondant aux phases 0 et 180 du mouvement vertical dû à la marée. Cette anomalie semble davantage marquée pour les séismes faibles et superficiels, mais elle se limite à 0,6 % seulement. Vu ce faible taux, on est



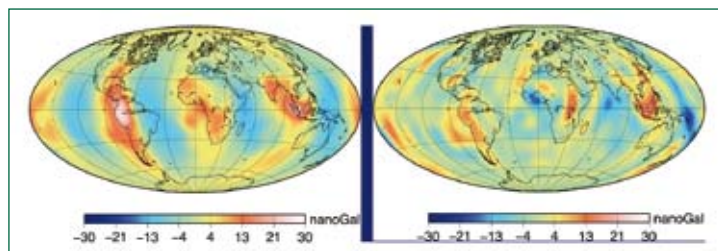
en droit de se poser la question de la signification statistique. Mais, il ressort que pour les faibles séismes superficiels, le taux de confiance est de 100 %, et supérieur à 99 % dans les cas restant. À plus grande profondeur (supérieure à 20 km), le taux de certitude descend en dessous de 95 %, qui est le seuil universellement adopté en-dessous duquel on admet que les résultats ne sont pas significatifs.

Si l'on considère donc comme factuelle cette légère anomalie, quel phénomène est en jeu ? Est-ce la marée solide pure, la surcharge océanique, ou bien un phénomène combiné ? Pour essayer de trancher, on étudie les séismes ayant lieu loin des côtes, dont on trouve qu'ils présentent la même anomalie de distribution de phase. Peut-on, par le même procédé, juger d'une effet de marée océanique ? Non, car la base de données sismique n'est pas complète : en effet, les séismes de faibles magnitudes se concentrent en Amérique et en Europe à cause de la présence de sismomètres très sensibles, ce qui induit un biais continental rendant impossible l'exploitation de la base. Mais l'effet de marée solide reste possible, sous la forme d'une augmentation de la probabilité d'un séisme de l'ordre de 0,6 à 1 %. Quant à l'impact océanique, il demeure inconnu.

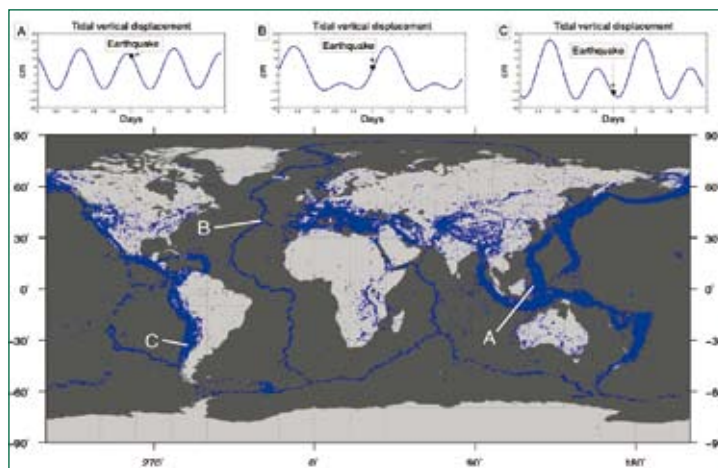
En conclusion, il est indispensable de faire évoluer le modèle de marée solide. Pour le positionnement type GNSS, il est probable que les anomalies altimétriques engendrées demeurent indétectables, quoiqu'un modèle particulier prédise jusqu'à un millimètre d'amplitude. En revanche, la modélisation des surcharges des enveloppes fluides paraît nécessaire pour obtenir une future version de l'ITRF encore plus précise : même si les déplacements sont petits, les effets sur le géoïde pourraient être significatifs. Il faudrait également considérer

l'effet des charges hydrologiques, particulièrement dans les régions soumises à la mousson, mais les mesures sont difficiles et mettent en jeu des paramètres séculiers. Ils pourraient cependant être à l'ori-

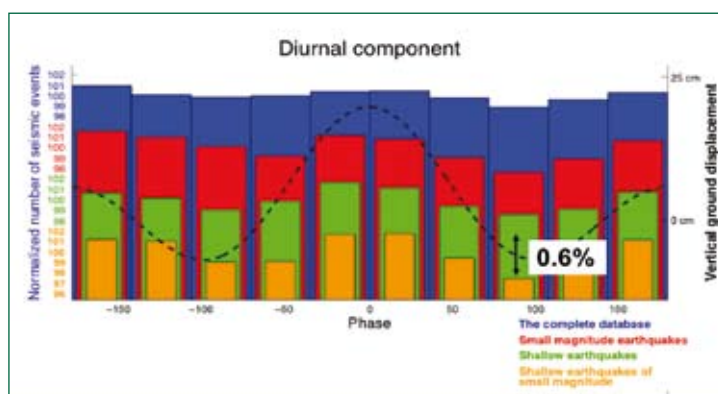
gine des cent mètres de différence que l'on observe par endroits en Inde entre le géoïde mesuré et le géoïde modélisé, à moins qu'il ne s'agisse d'effets lithosphériques superficiels. ■



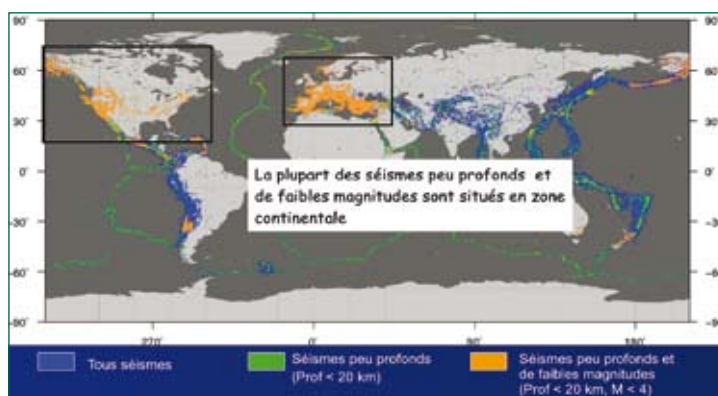
Anomalies de marée gravimétrique. À gauche, contribution du manteau inférieur ; à droite, contribution du manteau supérieur.



Représentation géographique du catalogue de séismes USGS NEIC.



Résultat de l'analyse statistique des séismes.



Mise en évidence du biais dû à la non équirépartition des sismographes.