

*Olivier de Viron & Michel Van Camp*<sup>1</sup>

# Mesurer la Terre pour la comprendre

## Introduction

En Sciences de la Terre, la géodésie, originellement focalisée sur la forme de la Terre, s'est étendue à l'étude de son orientation dans l'espace et de son champ de pesanteur. Intrinsèquement, la géodésie s'intéresse à des quantités a priori insaisissables: la Terre n'est en rien commensurable à l'homme et les variations des grandeurs sont relativement faibles. Ce n'est qu'au prix d'une patience infinie, de grandes prouesses théoriques, méthodologiques et instrumentales, puis grâce à l'avènement des satellites géodésiques, que les géodésiens ont pu atteindre une précision de l'ordre de quelques parts pour un milliard. La forme de la Terre et ses fluctuations sont déterminées avec une précision voisine du millimètre, à comparer aux 6371 kilomètres de rayon du globe. Par ailleurs, la rotation de la Terre et son orientation dans l'espace sont connues au dixième de milliseconde de degré et de temps, ce qui correspond à quelques millimètres à la surface de la Terre, et son champ de pesanteur au microgal, soit au milliardième de la pesanteur  $g$ . Bien entendu, pour mesurer de telles quantités, il n'y a que deux méthodes: soit on dispose d'un outil très précis, soit on amplifie le signal en observant longtemps ou sur une grande distance. Par exemple, si on s'intéresse à des processus tectoniques, un mouvement d'un millimètre par an n'est pas simple à mettre en évidence, mais si on attend 10 ans, 100 ans voire 1000 ans, on finira bien par le détecter.

Comprendre et modéliser les fluctuations des observables géodésiques constitue un vrai défi, car la Terre est un système qui réagit de façon complexe et couplée aux sollicitations qui lui sont appliquées de

l'extérieur, par exemple par les autres astres, et de l'intérieur, liées à sa dynamique interne ou climatique (Figure 1). L'analyse de ces fluctuations constitue donc une mine d'information sur la dynamique de la Terre et de ses différentes composantes.

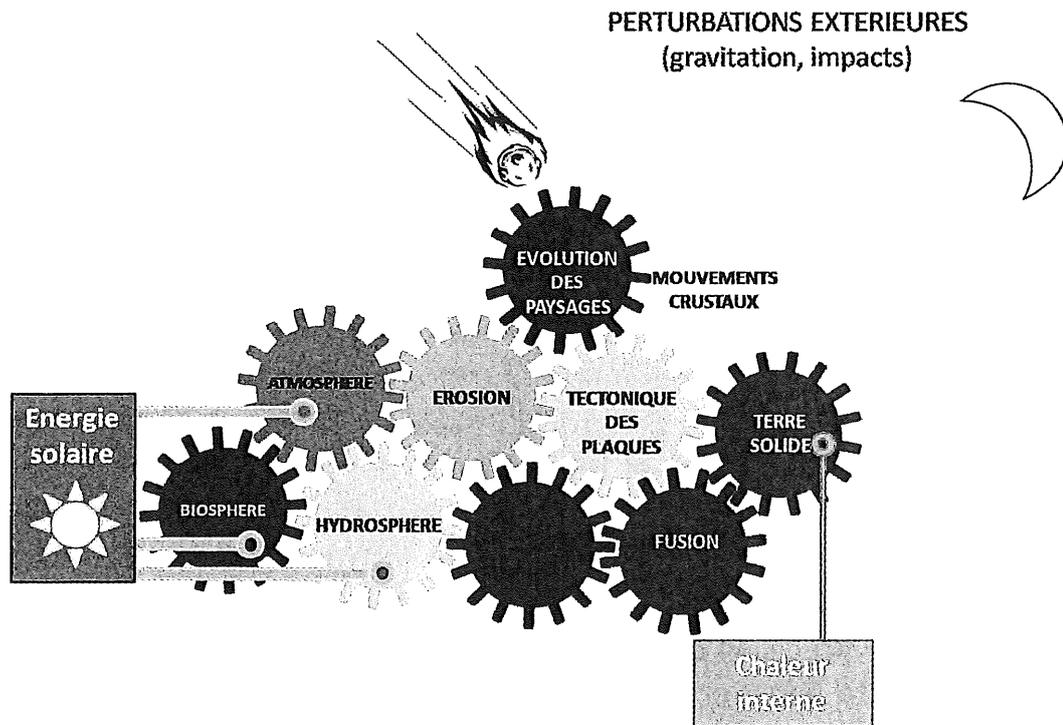


Figure 1 : La Terre, un système couplé sous influence

## La mesure géodésique

Pour mesurer les déformations de la surface terrestre, la meilleure méthode à l'heure actuelle est fondée sur le temps de trajet entre un objet en vol, qu'il soit dans l'espace ou dans l'air, et le sol. La mesure de la rotation de la Terre demande d'orienter la Terre dans l'espace, c'est-à-dire de positionner un ensemble de points qui matérialisent la surface de la Terre par rapport à des objets supposés fixes ou de position connue. Quant à la mesure de la pesanteur, on utilise les positions et mouvements de satellites orbitant autour de la Terre ou les mesures de gravimètres. Les satellites donnent une couverture globale, mais sont moins précis que les mesures ponctuelles des gravimètres, qu'ils

soient au sol, aéroportés ou marins. Les mesures de la déformation et de l'orientation sont très semblables: on a besoin d'objets de référence fixes ou de positions connues, et de points à la surface de la Terre, qui matérialisent sa surface, dont on mesure la distance par rapport à cette référence. Historiquement, les fluctuations de la rotation de la Terre, surtout de sa vitesse de rotation, ont été difficiles à mettre en évidence. En effet, une variation de la longueur du jour se traduit par le fait qu'un astre sera légèrement en avance, ou en retard, par rapport à ce que l'on aurait attendu en se fondant sur l'hypothèse que les objets sont fixes dans le ciel. Comme les variations de rotation sont faibles, cela demande de disposer d'une horloge qui soit plus fiable que la rotation de la Terre, ce qui ne se produira qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

## **Tout est dans tout, et inversement**

Bien qu'elle paraisse solide, la Terre est un corps déformable d'élasticité voisine de celle de l'acier pour les phénomènes correspondant à des échelles de temps de l'instantané à quelques dizaines d'années. Aux plus longues périodes de la centaine d'années au million d'années, notre globe obéit à des lois viscoélastiques, et aux échelles de temps encore plus longues, à des lois fluides. En outre, l'attraction gravitationnelle que la Terre exerce sur elle-même est du même ordre que les forces élastiques ou visqueuses, c'est d'ailleurs ce qui explique la sphéricité de la Terre et autres corps célestes. Sa forme, à un instant donné, résulte d'un équilibre entre les différentes sollicitations auxquelles elle est soumise, dont son autogravitation et l'effet centrifuge liée à sa rotation sur elle-même. La pesanteur à la surface résulte de l'attraction de toutes les masses qui constituent la Terre, et donc de sa forme, et de l'effet centrifuge, et partant, de sa rotation. Enfin, la rotation de la Terre sera perturbée par une variation de la répartition globale de sa masse, liée à sa forme et à sa pesanteur.

Les fluctuations des observables de la géodésie – forme, pesanteur et rotation de la Terre – ne sont donc pas indépendantes. En outre, ces fluctuations résultent de la réponse de la Terre à une excitation interne ou externe, et la plupart de celles qui perturbent une des

observables perturberont également les autres. Par conséquent, les variations des quantités géodésiques sont inextricablement liées les unes aux autres. Prenons un exemple: l'augmentation du nombre de barrages à la surface de la Terre affecte la répartition locale des masses, mais réduit également le volume d'eau qui retourne vers l'océan. Il s'ensuit un changement de la masse d'eau douce qui arrive dans l'océan, ce qui affecte les transferts de chaleur et la répartition de la salinité, qui se traduira par un changement des courants océaniques, qui peut affecter le climat. D'une part, toutes les conséquences de ce fait, qui semble mineur, entraîneront, outre des déformations et une variation de la pesanteur au voisinage des barrages, des variations à l'échelle globale de la masse en surface, et donc de la déformation sous le poids des masses. Via un changement du tenseur d'inertie (je resterais moins heuristique: via une nouvelle répartition des masses), la rotation de la Terre en sera également affectée, ce qui se traduira également par un effet sur la distribution des masses et la déformation par une variation de l'effet centrifuge, etc. Bien entendu, à l'exception du premier effet, local, toute cette chaîne de conséquence, si elle est effectivement correcte, aura un effet qui sera probablement du même ordre ou inférieur à la précision des observations, et sera presque sûrement impossible à séparer d'autres effets climatiques mal connus.

## **Bon, d'accord, mais quels phénomènes entraînent des variations ?**

### **La pesanteur**

Commençons par le plus simple: l'accélération de la pesanteur. D'une part, n'importe quelle distribution inhomogène de masse implique une pesanteur qui varie spatialement et tout phénomène associé à un déplacement de masse perturbera la pesanteur. Pratiquement, tous les phénomènes géophysiques et astronomiques en proche banlieue de la Terre entraîneront, directement et indirectement, des variations de la pesanteur. En outre, les mouvements verticaux du gravimètre ou du satellite entraînent également une variation de la pesanteur. La Figure 2 montre l'impact des différents effets

sur l'accélération de la pesanteur. Considérer une Terre sphérique et homogène suffit à obtenir mieux que quatre-vingt dix-neuf pour cent de la valeur de  $g$  en n'importe quel point de la Terre ; ajouter la rotation et l'aplatissement de la Terre qui y est associé joue à l'ordre du pour cent, qui explique le changement de pesanteur de  $9,78 \text{ m/s}^2$  à l'équateur à  $9,83 \text{ m/s}^2$  aux pôles. La différence entre continents et océans et les grandes topographies jouent au niveau du pour mille, les inhomogénéités de masse internes au niveau d'une part pour dix mille, les grands bassins hydrologiques à une part pour cent mille, les marées terrestres à une part pour un million, et les plus grandes constructions humaines à une part pour dix millions. Par exemple, entre l'observatoire de Nice et celui de Calern, distant d'une quarantaine de kilomètres, on observe une différence de  $0,003 \text{ m/s}^2$ , qui s'explique essentiellement par les quelques 1250 mètres de différence d'altitude. Entre Nice (Alpes Maritimes) et St Amand-les-Eaux (Nord), distants d'un peu plus de 850 kilomètres, pour une même altitude la différence de pesanteur est d'environ  $0,006 \text{ m/s}^2$ , principalement explicable par près de 7 degrés de différence de latitude.

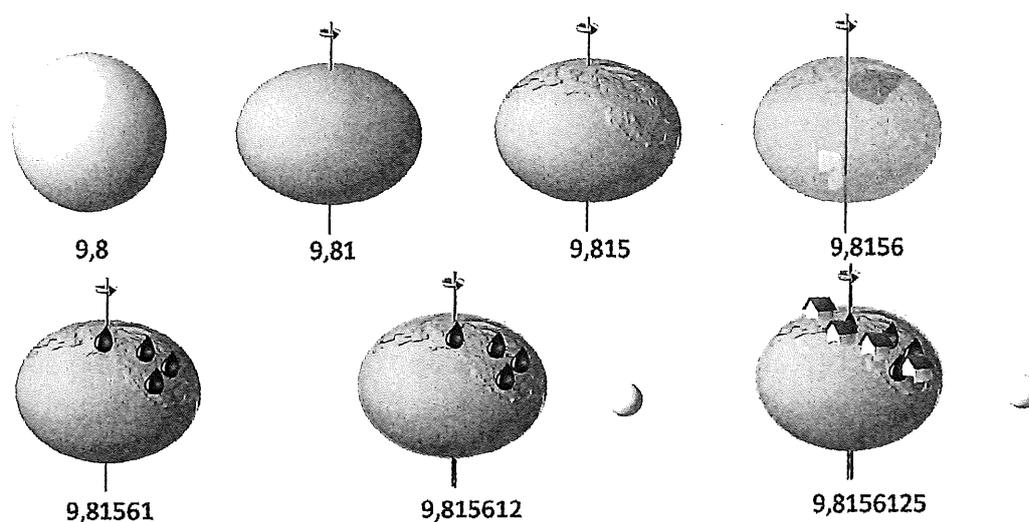


Figure 2 : Les variations de la pesanteur, les causes et leur impact

Les mesures des variations de la pesanteur sont un outil de recherche géologique et de prospection minière, car les roches et les

ressources naturelles telles que le pétrole, le gaz et les minéraux, n'ont pas toujours les mêmes densités. Elles permettent également des cartographier des failles ou d'investiguer des phénomènes de géophysique interne tels le rebond postglaciaire, les processus tectoniques, ainsi que des phénomènes climatiques et hydrologiques.

### **Les déformations de la Terre**

La Terre se déforme sous l'action des forces internes et externes. Le manteau est en convection, évacuant l'excès de chaleur pour partie lié à sa formation et pour partie à la désintégration des matériaux radioactifs du manteau. Cette convection est associée, au niveau de la croûte cassante qui le couvre, à la tectonique des plaques, qui est la cause principale des déformations de la Terre, avec des mouvements horizontaux de l'ordre du centimètre par an et les déformations associées aux séismes atteignant jusqu'à plusieurs dizaines de mètres. À la tectonique des plaques viennent se rajouter des phénomènes à plus petite échelle temporelle ou spatiale, par exemple la déformation du sol sous le poids des charges en surface, surtout liés au déplacement des masses atmosphériques, océaniques, cryosphériques et hydrologiques, mais aussi des phénomènes de subsidence causés par les pompes des aquifères ou de nappes de pétrole.

### **La rotation de la Terre**

La rotation de la Terre varie sous l'effet des forces qui agissent sur elle. Comme le montrent l'expérience courante et la Figure 3, n'importe quelle force ne fait pas tourner : il est nécessaire qu'elle s'applique à une certaine distance de l'axe de rotation et qu'elle ne soit pas orientée vers l'axe de rotation. Sur la Figure, une force orientée vers l'axe de rotation, selon la flèche noire, ne pourra pas faire tourner la barre métallique, alors qu'une force orientée perpendiculairement, selon la flèche blanche, sera très efficace. En mécanique classique, l'on dira que son moment n'est pas nul. Agissent sur la rotation de la Terre les fluides géophysiques, c'est-à-dire l'atmosphère, l'océan, la cryosphère, l'hydrosphère, ainsi que tous les corps proches ou très massifs : la Lune, le Soleil, Mars, Vénus, Jupiter... La Terre réagit à ces effets en fonction de sa forme et de sa structure (voir

Figure 4). En outre, la dynamique du noyau liquide, commandée par les processus thermodynamiques et hydromagnétiques qui y ont cours, bien que ne modifiant pas la rotation de la Terre dans son ensemble, influence celle du manteau et donc de la croûte, qui est la seule quantité qui soit accessible à la mesure.



Figure 3 : L'intérieur de la Terre, de l'extérieur vers l'intérieur : la croûte, le manteau, le noyau et la graine

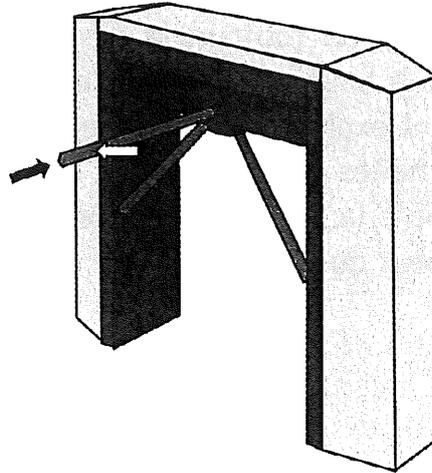


Figure 4 : Orientation des forces et rotation

## Interprétation des variations des observables géodésiques et dynamique du système Terre

Comme nous l'avons signalé, l'ensemble des phénomènes qui ont cours dans le système Terre génère du signal sur une ou, le plus souvent, sur toutes les observables géodésiques. Ce qui veut dire que l'évolution de ces observables dans le temps et dans l'espace résulte de la combinaison pas toujours linéaire de signaux multiples, avec des comportements fréquentiels et spatiaux qui ne sont pas toujours indépendants. L'interprétation géophysique reviendra alors à séparer les signaux et à attribuer la bonne cause à chaque effet. Pendant longtemps, on a utilisé une approche purement fréquentielle, telle qu'illustrée ci-contre pour la longueur du jour dans la Figure 5. Si on regarde à l'échelle de la centaine de millions d'années le temps que met la Terre à faire une rotation sur elle-même, on constate qu'on est

passé d'une journée de vingt-deux heures il y a quatre cent millions d'années à vingt-quatre heures de nos jours. Cette augmentation de la longueur du jour s'explique par l'attraction de la Lune sur le bourrelet de marée qu'elle occasionne sur la Terre, mais qui est légèrement en retard parce que la déformation de la Terre n'est pas immédiate. C'est ce même effet sur la Lune qui explique que la Lune a fini par nous présenter toujours la même face. À l'échelle du siècle, les variations de la longueur du jour, de l'ordre de quelques millièmes de secondes, sont expliquées par l'interaction entre noyau et manteau. Enfin, à des échelles de temps plus courtes, c'est essentiellement l'interaction entre la Terre et l'atmosphère qui explique les fluctuations de longueur du jour, de l'ordre du millième de seconde de degré.

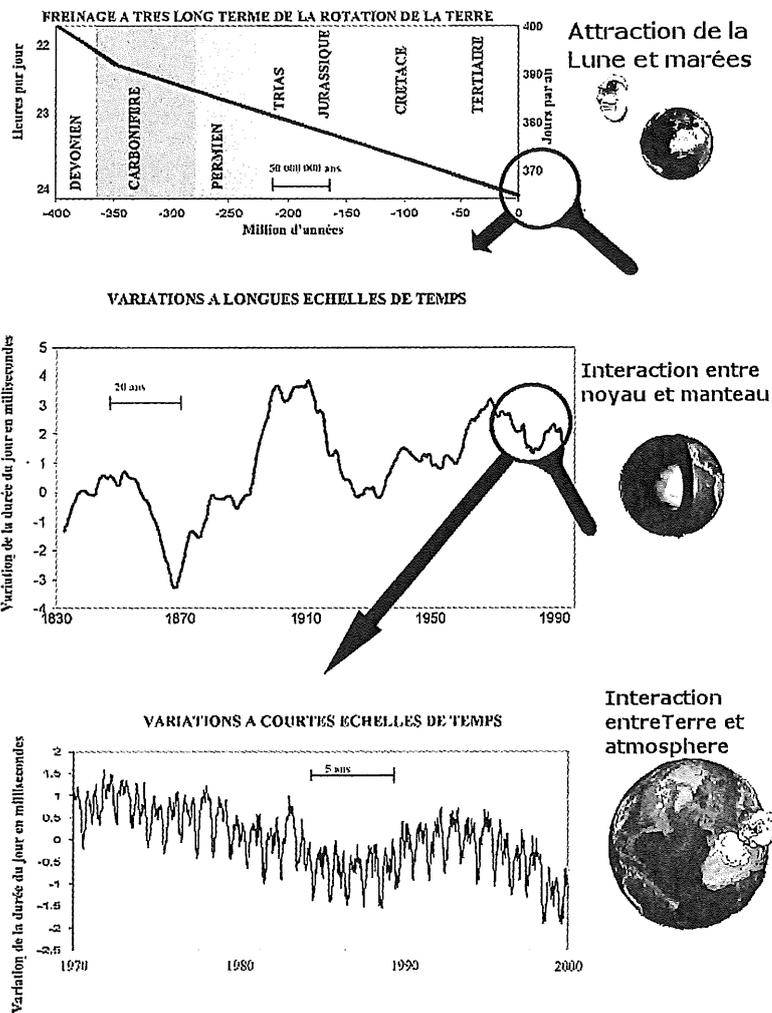


Figure 5: Variations de la longueur du jour et les causes principales

Penchons-nous un instant sur les ordres de grandeur. La longueur du jour a augmenté de deux heures en quatre cent millions d'années ; cela implique un changement de l'ordre de  $2 \times 10^{-5}$  seconde par an, alors qu'une variation de l'ordre de sept millisecondes en quarante ans représente une variation de l'ordre du  $1 \times 10^{-4}$  seconde par an. À l'heure actuelle, les techniques de géodésie spatiale mettent la limite observationnelle à quelque  $10^{-4}$  seconde. Donc, détecter les effets à très long terme n'est possible que si l'on observe longtemps : dix ans permettraient de mettre en évidence un changement de  $2 \times 10^{-5}$  dans la longueur du jour, s'il n'y avait que ce signal. Or, à l'échelle de dix ans, l'interaction, mal connue, entre noyau et manteau entraînera une variation de l'ordre de la  $10^{-3}$  seconde, et l'interaction atmosphère-terre solide créera des fluctuations de l'ordre de quelques dixièmes de millisecondes. Donc, il faudra observer encore plus longtemps pour avoir une chance de séparer la tendance à long terme causée par l'effet astronomique des fluctuations à moyen et court terme causées par les effets géophysiques. En pratique, c'est parce qu'on dispose de séries d'observations suffisamment longues, en particulier à partir d'information géologique, qu'il a été possible de mettre en évidence ces effets à très long terme.

## Où les choses se compliquent un peu plus

En réalité, la situation est plus complexe encore, car nous n'avons mentionné ici que les effets dominants, et il n'y a aucune raison que les effets atmosphériques et du noyau se limitent aux échelles de temps où ils sont dominants. En outre, de multiples autres effets vont se combiner à toutes les échelles de temps : par exemple le rebond postglaciaire, la fonte des calottes polaires et autres grands glaciers, la dynamique de l'océan, les fluctuations hydrologiques, etc. influencent la longueur du jour avec une amplitude supérieure à la précision des observations. En outre, à chaque nouveau pas vers des données plus précises, l'ensemble des sources détectables, au sens où leur amplitude est supérieure à la précision de l'observation, augmente en proportion du gain de précision, et les ennuis 100 fois plus... Interpréter les observations en termes de physique est donc toujours plus complexe.

Heureusement, la physique des phénomènes est connue : c'est de la mécanique classique et de la mécanique des milieux continus. On peut donc, pour une source connue, en calculer l'effet... enfin presque... La modélisation des observables géodésiques se conçoit comme la combinaison d'une source d'excitation et d'une fonction de transfert, qui représente la réponse de la Terre à cette excitation qui peut être astronomique, climatique, etc. Toute méconnaissance de la source d'excitation ou de la fonction de transfert se traduit par une erreur dans la modélisation de l'effet de cette source sur l'observable géodésique. La mécanique céleste, c'est-à-dire essentiellement la modélisation des mouvements des corps célestes sous l'effet de la gravitation, est très précise pour les échelles de temps que nous pouvons observer, et en tout cas d'une précision tout à fait suffisante pour les besoins de la géodésie. En revanche, l'excitation par la dynamique du climat et du noyau est moins bien connue, et ne l'est que via des modèles numériques qui ont été conçus à des fins autres que la géodésie, ce qui entraîne des erreurs sur les impacts géodésiques pouvant aller jusqu'à 100 % dans bien des cas. Enfin, la réponse de la Terre dépend d'un modèle de l'intérieur de la Terre qui, s'il a bien progressé dans le dernier demi-siècle, ne permet pas encore une modélisation fine des observables géodésiques. Par conséquent, les écarts entre le modèle et l'observation sont souvent importants et, dans la mesure où aucune source n'est jamais observée seule, il est toujours difficile de déterminer si ces différences résultent d'une source mal connue ou d'une réponse de la Terre incorrecte.

## Où l'on apprend avec soulagement que tout n'est pas fichu

Nous ne voudrions pas laisser le lecteur attentif terminer sa lecture avec l'impression que la géodésie est une cause perdue, et qu'il a eu bien raison de ne pas choisir ce domaine lors de son orientation professionnelle. C'est un peu exagéré... Il y a bien des cas où une information peut être déduite des observations géodésiques.

Prenons par exemple la nutation de la Terre : c'est un mouvement de l'axe de rotation de la Terre dans l'espace causé, essentiellement, par l'action gravitationnelle de la Lune, du Soleil et des planètes sur le

bourrelet équatorial. Dans ce cas précis, l'excitation est connue avec une précision très suffisante par la mécanique céleste ; il y a bien une contribution des fluides géophysiques, mais elle est très faible et limitée à quelques fréquences particulières. Ce mouvement est observé avec une très grande précision par les mesures des radiotélescopes des faisceaux radio émis par les quasars, ces objets extragalactiques, véritables phares de l'espace. Entre l'observation et la source d'excitation, il y a la réponse de la Terre. Cette réponse est certes complexe, mais on peut en faire un modèle assez précis qui dépendra d'assez peu de paramètres, une dizaine environ, qui reflètent les propriétés de déformation de la Terre et de ses couches internes, ainsi que les couplages aux interfaces entre manteau, noyau, et graine. Donc, en comparant excitation et observation, on peut déduire la valeur des paramètres de l'intérieur de la Terre. Ainsi, l'on a obtenu des valeurs pour des paramètres importants qui ne sont accessibles par aucune autre mesure, par exemple la valeur du champ magnétique à l'interface noyau-graine.

Un autre exemple est l'étude des séismes : lorsqu'un événement sismique se produit, la déformation est soudaine, ce qui crée une signature marquée analysée à l'envi par les géodésiens, que ce soit au niveau de la déformation ou du champ de pesanteur associé. L'étude de ces données a permis une meilleure compréhension du cycle sismique, de la géodynamique locale, et des propriétés de déformation viscoélastique des roches.

En outre, il est aussi possible de combiner les sources d'information, puisqu'un même phénomène est perçu par différentes techniques. Comparer la réponse de la Terre en déformation, en rotation, et en gravitation est un moyen de mieux comprendre cette réponse, mais aussi de déterminer des propriétés de la Terre.

## Perspectives

Il est raisonnable d'attendre pour le futur une amélioration des techniques de mesure, que ce soit par des améliorations technologiques ou par des traitements de données plus pointus et plus appropriés. Il est aussi raisonnable de penser que le volume de données

croîtra dans des proportions plus ou moins déraisonnables. Par conséquent, on s'attend à obtenir, via la géodésie, une foule de données qui, par exemple, permettront d'appréhender les phénomènes climatiques, non seulement dans leur globalité, mais aussi dans leurs effets à l'échelle d'une région voire d'un village.

**(Notes)**

1 Université de Paris 7 Diderot – Institut de Physique du Globe.