



INSTITUT DE FRANCE  
**Académie des sciences**

---

*Séance solennelle de remise des Prix le 25 novembre 2008*

**L'apport de l'Espace à la connaissance de la planète Terre**

par **Anny Cazenave, Membre de l'Académie des sciences**

**LEGOS-CNES, Toulouse**

**Introduction**

Nous sommes tous habitués 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, le 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 ; Citons par exemple la surveillance des risques naturels, de l'étendue et l'état des forêts, de l'occupation des sols, le suivi des cultures agricoles et même des pollutions. L'observation de l'océan par satellite a atteint maintenant un degré de maturité tel qu'il est possible de prédire, comme en météorologie, l'état de l'océan quelques jours à l'avance. L'observation spatiale est aussi essentielle pour étudier l'intérieur de la planète et les phénomènes dont elle est le siège, comme la convection mantellique et le champ magnétique du noyau.

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

Dans un grand nombre de cas, les observations sont réalisées au moyen de techniques dites de télédétection, dont la caractéristique est de décrire à distance les propriétés d'objets naturels à partir des rayonnements qu'ils émettent ou réfléchissent. Mais d'autres approches sont aussi développées pour déterminer les propriétés physiques à grande échelle du globe terrestre ou les déformations de la surface terrestre ; par exemple, l'embarquement sur satellite d'instruments particuliers, l'analyse des déformations de l'orbite du satellite ou encore la mesure de distances entre le satellite et des balises placées à la surface terrestre.

Je vais à présent présenter quelques exemples d'applications scientifiques de l'observation spatiale du système Terre.

### **La forme de la Terre et son champ de gravité**

Ronde ou aplatie ? Depuis Newton et les expéditions en Laponie et au Pérou organisées par l'Académie des sciences au 18<sup>ème</sup> siècle, nous savons que la Terre est aplatie aux pôles. Mais il a fallu attendre le début de l'ère spatiale dans les années 1960, pour découvrir que la Terre est un ellipsoïde bosselé. Sa surface irrégulière est dominée par deux grandes bosses, s'étalant sur plusieurs milliers de km, l'une centrée sur l'Islande, englobant tout l'Atlantique nord, l'autre située au sud de l'Afrique entre Madagascar et l'Antarctique. Un grand creux situé au sud de l'Inde est aussi observé. Ces grands creux et bosses du globe terrestre ont un dénivelé d'environ 200 mètres. Ils reflètent la gravité non uniforme de la Terre associée aux grands courants ascendants et descendants de matière dans le manteau terrestre. L'analyse des orbites des satellites géodésiques a permis d'établir des cartes très précises du champ de gravité et de la forme de la Terre. Le satellite en orbite est soumis à diverses forces comme l'attraction gravitationnelle de la terre, de la lune, du soleil et des planètes, le freinage de l'atmosphère résiduelle, la pression du rayonnement solaire, les effets de marées, etc. Toutes ces forces, dont la plus importante est celle liée à la gravité de la terre, contribuent à déformer de façon très complexe l'orbite du satellite au cours du temps. A l'aide de méthodes d'orbitographie précise aujourd'hui bien maîtrisées, on peut déterminer les déformations de l'orbite et par des procédés itératifs en déduire les forces agissant sur le satellite, dont le champ de gravité terrestre.

Plusieurs générations de modèles du champ de gravité à grande échelle ont été produites par cette méthode, en particulier par des chercheurs français. Ces modèles analysés conjointement à des mesures de sismologie ont permis de contraindre les variations de la viscosité du

manteau avec la profondeur, donc la structure de la convection, phénomène responsable de l'expansion des fonds océaniques, du déplacement des plaques tectoniques et indirectement de la formation des chaînes de montagnes et de l'activité sismique et volcanique.

Sur de plus courtes distances, disons inférieures à 1000 km, la forme de la Terre présente aussi des ondulations. Mais cela on l'a découvert plus tard, non pas par l'étude des trajectoires des satellites mais grâce à une autre technique, l'altimétrie spatiale.

L'altimétrie spatiale a été développée dès le milieu des années 1970 pour étudier les océans. Cette technique permet de cartographier directement la topographie de la surface de la mer à l'aide d'un radar altimètre embarqué sur le satellite. Une couverture complète des océans est obtenue en quelques jours seulement, avec un quadrillage très fin.

Mettons de côté pour l'instant les oscillations temporelles de la surface océanique liées aux phénomènes océanographiques – on y reviendra plus loin-. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la surface moyenne de la mer n'est pas plane mais ondulée. Elle présente des creux et bosses permanents dont la hauteur est de l'ordre de quelques mètres. Leur extension spatiale est de l'ordre de la centaine de kilomètres. Ces creux et bosses de la surface marine sont une véritable image des reliefs sous marins. Au dessus d'une montagne sous marine, la mer se bombe de quelques mètres. Au dessus d'une fosse océanique, elle se creuse. Les reliefs sous marins produisent des variations géographiques de la gravité de la Terre qui se traduisent par des ondulations permanentes de la surface de la mer. En cartographiant ces ondulations, les satellites altimétriques nous ont fourni des informations précieuses sur la topographie sous marine. Pendant des décennies, la topographie des fonds marins a été mesurée par sondage acoustique à partir de navires. Mais de vastes régions océaniques sont restées totalement inexplorées, en particulier dans l'hémisphère sud. Grâce à l'altimétrie spatiale, on a pu établir des cartes à haute résolution de l'ensemble des fonds marins, et ainsi affiner la position des chaînes de volcans sous marins, des dorsales océaniques, des zones de fractures et des zones de subduction. Mais on a aussi découvert d'autres structures jusqu'ici insoupçonnées ou incomplètement cartographiées à partir des bateaux : par exemple d'innombrables montagnes sous-marines dont la moitié n'avaient jamais été cartographiées et quantité de reliefs fossiles témoins d'une activité tectonique aujourd'hui disparue. Ces données se sont avérées très utiles non seulement pour les géophysiciens, mais aussi pour la navigation sous-marine, la pêche commerciale et l'exploration pétrolière en mer.

Un autre domaine où les satellites ont apporté des informations majeures est celui du positionnement précis. Il y a 30 ans on savait positionner un point à la surface de la Terre à 1 mètre près ; aujourd'hui, c'est à quelques millimètres près. Ce gain en précision d'un facteur presque 1000 a été rendu possible par les progrès de la technologie. Il permet aujourd'hui de surveiller les déformations de la croûte terrestre dans les régions sismiques. Grâce au système de positionnement GPS, on sait mesurer les mouvements de la croûte avec une précision meilleure que le millimètre par an. Une autre technique s'est avérée révolutionnaire dans ce domaine. C'est l'interférométrie radar. En comparant deux images radar d'une région survolée à deux dates différentes par un satellite radar imageur, on peut par différence des images, détecter les mouvements du sol survenus dans l'intervalle de temps, avec une résolution au sol de l'ordre de 10 mètres et une précision très fine. Des chercheurs français ont joué un rôle pionnier dans ce domaine. L'interférométrie radar est maintenant combinée au positionnement GPS dans la plupart des régions sismiques du globe pour mesurer les déformations co-sismiques, post et inter sismiques. Ces observations sont précieuses pour comprendre la genèse des tremblements de terre et les caractéristiques de la rupture de la croûte terrestre. On les utilise aussi pour mesurer les déformations du sol dans les régions volcaniques, l'écoulement des glaciers, les glissements de terrain et les subsidences du sol dues au pompage de l'eau, du pétrole ou du gaz.

## **L'océan**

Bien que l'altimétrie spatiale ait été développée dès les années 1970, ce n'est qu'au début des années 1990, avec le lancement du satellite franco-américain Topex/Poseidon, que l'océanographie spatiale a réellement vu le jour. Il a fallu attendre presque 20 ans pour que la précision de mesure de la topographie de surface de la mer devienne suffisamment fine pour détecter le signal océanographique. Ce signal est en effet 10 à 100 fois plus faible que celui des ondulations permanentes de la surface marine dont j'ai parlé auparavant. La précision de mesure de la hauteur de la mer par altimétrie spatiale est aujourd'hui de l'ordre du centimètre.

L'océan est le siège de mouvements complexes à petites et grandes échelles spatiales agissant sur des échelles de temps extrêmement variées.

Grâce à l'altimétrie, on a découvert que l'océan –tout comme l'atmosphère- est un système hautement turbulent. Il est le siège de tourbillons très énergétiques de petites longueurs d'ondes et courte durée de vie. La description fine de cette circulation turbulente, aujourd'hui

possible avec l'altimétrie, est essentielle pour comprendre la dynamique de l'océan y compris la circulation à grande échelle avec laquelle elle interagit. C'est aussi très important pour les applications opérationnelles de l'océanographie.

Les phénomènes océaniques de grande échelle spatiale et longue durée de vie (plusieurs années à quelques décennies) caractérisent le climat de l'océan. Nous savons aujourd'hui que l'océan est un extraordinaire régulateur du climat planétaire grâce à sa capacité à stocker la chaleur et à la transporter sur de grandes distances au moyen d'une circulation océanique complexe, avant de la restituer à l'atmosphère. Grâce à l'observation spatiale de l'océan on peut suivre l'évolution de la position et de l'intensité des grands courants océaniques de surface. La circulation océanique dans l'Atlantique nord est l'objet d'une attention toute particulière car c'est dans cette région que les eaux froides et salées plongent en hiver vers l'océan profond. Ce mécanisme entretient la circulation à grande échelle de l'océan, dont le Gulf Stream n'est qu'une des branches superficielles. Ce courant contribue à la douceur du climat européen en transportant la chaleur des tropiques vers le nord. Mais on s'attend à ce que l'apport accru d'eau douce dû à la fonte des glaces arctiques ralentisse la circulation dans l'Atlantique Nord, avec des conséquences possibles sur le climat européen.

L'altimétrie spatiale nous a permis aussi de décrire les grandes perturbations du système climatique comme le phénomène El Nino qui survient tous les 4 ou 5 ans dans l'océan Pacifique tropical mais dont les répercussions climatiques affectent la planète entière, avec des sécheresses, des précipitations intenses et des inondations selon les régions.

Un autre exemple : la hausse du niveau des mers que l'on mesure aujourd'hui globalement avec les satellites altimétriques Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2. La hausse moyenne actuelle est entre 3 et 4 millimètres par an. Elle est 2 fois plus rapide que celle mesurée par les marégraphes au cours des 50 dernières années. En plus cette élévation n'est pas uniforme : dans certaines régions comme l'ouest du Pacifique, la hausse est 5 fois plus rapide que la moyenne.

La hausse actuelle du niveau de la mer résulte du réchauffement de l'océan et de la fonte des glaces continentales.

Grâce à des mesures de température de l'océan collectées par des bateaux et des bouées dérivantes, on a découvert que depuis une trentaine d'années, l'océan s'est beaucoup réchauffé. Résultat : la mer se dilate et son niveau monte. Ce phénomène explique environ la moitié de la hausse du niveau de la mer mesurée par les satellites altimétriques depuis 15 ans.

L'autre moitié résulte de l'apport d'eau douce à l'océan causé par la fonte des glaciers de montagne et la perte de glace de certaines régions du Groenland et de l'Antarctique. En raison de leur situation reculée, les calottes polaires bénéficient avantageusement de l'observation spatiale. Plusieurs techniques comme l'altimétrie et l'interférométrie radar dont j'ai déjà parlé, ainsi qu'une toute nouvelle technique, la gravimétrie spatiale, permettent d'estimer les variations de masse de glace des calottes polaires. On a ainsi détecté qu'au cours des 5 dernières années, le Groenland et l'Antarctique de l'ouest ont perdu chacun environ 150 milliards de tonnes de glace par an (soit une hausse du niveau de la mer proche de 1 millimètre par an si on considère la contribution des deux calottes). On a aussi découvert que cette perte de masse de glace résulte principalement de l'écoulement très rapide des glaciers côtiers vers la mer sous l'effet d'instabilités dynamiques dont les mécanismes ne sont pas encore totalement 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 et étudier les impacts dans les régions côtières basses et hautement peuplées de la planète. Dans ces régions se conjuguent les effets du réchauffement climatique via la hausse du niveau de la mer et les effets de subsidence du sol liés à des phénomènes naturels ou à des facteurs anthropiques comme le pompage des eaux souterraines ou du pétrole. C'est le cas par exemple du golfe du Mexique où le sol s'enfonce à une vitesse proche de un centimètre par an à cause de l'exploration pétrolière. La hausse du niveau de la mer vient alors amplifier la vulnérabilité des zones côtières de cette région.

Nous avons vu que l'océan est le principal réservoir de chaleur du système climatique. Il joue un autre rôle important dans l'évolution du climat en absorbant annuellement 1/3 du carbone émis par les activités humaines. Ce pompage du carbone atmosphérique par l'océan résulte majoritairement de la dissolution du gaz carbonique dans les eaux superficielles de la mer et à un moindre degré de l'activité biologique du phytoplancton. Grâce aux capteurs spatiaux mesurant la couleur de l'océan, on peut étudier l'activité chlorophyllienne du phytoplancton et ainsi estimer la part de carbone atmosphérique absorbé par la photosynthèse. L'acidification actuelle des eaux océaniques, avec son impact négatif sur les écosystèmes marins, est de nature à modifier cette contribution biologique au cycle océanique du carbone. Et là encore l'observation spatiale est précieuse pour mieux comprendre ces évolutions.

## **Les eaux continentales**

Pour terminer, je voudrais évoquer une nouvelle application de l'espace à une thématique importante pour les sciences de l'environnement et du climat: il s'agit de l'étude des eaux continentales.

Les eaux continentales représentent moins d'1% du montant total de l'eau sur Terre mais elles ont un impact majeur sur la vie terrestre et les besoins des humains. Elles jouent également un rôle important dans la variabilité du climat. La description précise du cycle de l'eau sur les terres émergées permet une meilleure prévision du climat et un contrôle affiné des ressources en eau de la planète nécessaire, entre autres, à l'agriculture, l'urbanisation ou la production d'énergie hydroélectrique.

Mais pour décrire le cycle de l'eau continental à l'échelle des grands bassins fluviaux, on manque terriblement d'observations au sol. Dans de nombreuses régions du monde, en particulier les pays du sud, les réseaux de mesure in situ sont en chute libre pour des raisons économiques. Quand ces réseaux sont encore maintenus, leurs mesures sont souvent inaccessibles pour des raisons politiques ou stratégiques. Depuis quelques années, certaines techniques spatiales telles que l'imagerie, la radiométrie, l'altimétrie et la gravimétrie, permettent d'accéder à des paramètres importants en hydrologie continentale. On est capable à présent de mesurer les variations du niveau d'eau des fleuves, du volume d'eau des lacs et des plaines inondées, l'humidité des sols et les variations des stocks d'eaux souterraines. Les produits hydrologiques issus de l'observation spatiale ont de nombreuses applications : par exemple, l'estimation du bilan hydrique des grands bassins fluviaux, du débit des fleuves, la prédiction des crues dans les petits bassins versants ou encore l'estimation à grande échelle des ressources en eau, en particulier dans les réservoirs souterrains. Dans certaines régions du monde, la diminution de la ressource hydrique associée à une pression anthropique croissante constitue un enjeu géopolitique majeur. La vision à grande échelle des ressources disponibles pourrait contribuer à mieux appréhender ces questions.

## **Conclusion**

Dans le domaine des géosciences, et dans d'autres domaines dont je n'ai pas parlé comme les sciences de l'atmosphère, l'astronomie et la planétologie, la communauté scientifique française a joué et joue encore un rôle important. Ce n'est probablement pas un hasard mais

sans doute le résultat de sa participation de longue date aux efforts déployés par la France dans le domaine de la recherche spatiale, de l'existence d'une agence spatiale nationale, le CNES, et de l'attitude très ouverte de ses dirigeants successifs pour les applications scientifiques de l'espace. Parmi ceux-ci, plusieurs membres de cette académie ont joué un rôle éminent.

Le bref survol que nous venons d'effectuer montre que les systèmes spatiaux ont la capacité de mesurer un grand nombre de phénomènes terrestres à des échelles spatiales et temporelles variées, avec un échantillonnage sans précédent. Avec les progrès attendus de la technologie, nous ne sommes qu'à l'aube d'une connaissance plus approfondie de la planète. Aujourd'hui, grâce à l'espace, nous ne décrivons plus seulement une terre statique mais une terre dynamique en évolution permanente sous l'effet de phénomènes naturels et de la pression anthropique. Les données collectées servent aussi à alimenter des modèles de prévision mis au service de la société et des décideurs politiques en vue d'une meilleure gestion de la planète. Mais dans le domaine de la science, rien n'est jamais figé. La recherche de base doit pouvoir progresser de concert avec les applications opérationnelles ; un message pas toujours très facile à faire passer, en particulier au plan européen...