

## **Développement durable : environnement, énergie et société**

M<sup>me</sup> Anny CAZENAIVE, membre de l'Institut  
(Académie des sciences),  
chercheur au LEGOS-CNES de Toulouse,  
professeur invité sur chaire annuelle

ENSEIGNEMENT : LA TERRE ET L'ENVIRONNEMENT OBSERVÉS DEPUIS L'ESPACE

### **Introduction**

Depuis cinq décennies, diverses observations collectées par les satellites artificiels ont relevé quantité d'informations sur la planète Terre (composition et dynamique de l'atmosphère, forme du globe solide 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), et, depuis quelques années, sur la dynamique des océans, les variations du niveau de la mer et le climat, les glaces et les eaux continentales. L'observation par satellite des terres émergées est aussi devenue incontournable pour connaître l'occupation des sols et ses changements, l'étendue et l'état des forêts, les zones urbaines, ainsi que pour la cartographie, le suivi des cultures agricoles, des pollutions et même des désastres majeurs.

Pour décrire la globalité des phénomènes observés, les satellites sont en effet 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 l'étude des déformations des orbites des satellites ou l'emport d'instruments dédiés, permettant la mesure des propriétés physiques et chimiques des différents compartiments du globe, des déformations de la surface terrestre et de la gravité de la Terre.

Dans cet enseignement, j'ai présenté l'état actuel des connaissances dans un certain nombre de domaines des sciences de la planète pour lesquels l'espace joue un rôle important : la forme de la Terre et son champ de gravité, la rotation et les déformations du globe, la dynamique des océans (courants, température et salinité

de surface, hausse du niveau de la mer), la fonte des glaces continentales en réponse au changement climatique, le cycle global de l'eau et les ressources en eau. Certaines applications relevant plus spécifiquement du domaine de l'environnement ont aussi été abordées, comme le suivi et l'aide à la gestion des catastrophes majeures, la surveillance des terres émergées, des changements d'occupation des sols, la déforestation et le cycle du carbone anthropique, et, enfin, le suivi de l'état des cultures et la sécurité alimentaire. Chacun des cours a été suivi d'une conférence sur un thème en relation avec le cours<sup>a</sup>.

### **Leçon inaugurale**

Lors de la leçon inaugurale, donnée le 21 mars 2013, j'ai présenté une synthèse des différents thèmes abordés en détail par la suite dans les cours<sup>b</sup>.

### **Forme de la Terre, gravité et géodésie : 50 ans d'observation spatiale**

*Cours du 25 mars 2013*

L'étude des orbites des satellites géodésiques a permis d'établir des cartes très précises de la forme de la Terre et du champ de gravité 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 de celui 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 radioélectriques émis par les stations – système DORIS – ou depuis d'autres satellites – système GPS). 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 mieux connaître les forces agissant sur le satellite et en tout premier lieu le champ de gravité terrestre. Plusieurs générations de modèles globaux du champ de gravité terrestre ont été publiées depuis quatre décennies. Le champ de gravité terrestre est loin d'être uniforme. On peut visualiser ses variations géographiques au moyen d'une surface appelée « géoïde » qui coïncide avec le niveau moyen des océans au repos (c'est la « figure » de la Terre). À grande échelle,

---

a. Les cours et les conférences ont été filmés et traduits. Les vidéos sont téléchargeables sur le site Internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/anny-cazenave/> [Ndlr].

b. La leçon inaugurale a fait l'objet d'une publication sous forme imprimée (Collège de France/Fayard) et numérique : [books.openedition.org/cdf/3286](http://books.openedition.org/cdf/3286). Elle est également disponible sous forme audio et vidéo sur le site Internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/anny-cazenave/inaugural-lecture-2012-2013.htm> [Ndlr].

le géoïde présente deux grandes bosses, l'une centrée sur l'Islande, englobant tout l'Atlantique nord, l'autre centrée sur l'ouest du Pacifique. Un creux situé au sud de l'Inde est aussi observé. On sait aujourd'hui que les grandes bosses du géoïde coïncident avec les grands courants ascendants de la convection à grande échelle qui anime le manteau terrestre. Depuis 2009, le satellite gradiométrique GOCE mesure directement les composantes de la gravité avec une précision sans précédent.

À plus petite échelle spatiale, le géoïde présente aussi des ondulations. Celles-ci ont été mises en évidence par des satellites embarquant un radar altimètre destiné à mesurer la topographie de la surface marine. Les ondulations de la surface marine cartographiées par altimétrie ont deux composantes : une composante permanente (invariable dans le temps mais qui varie géographiquement) due au champ de gravité terrestre, d'amplitude 1-10 m, et une composante qui varie dans le temps, résultant des phénomènes océanographiques (marées, courants, tourbillons, etc.), d'amplitude 1-100 cm. Les ondulations du géoïde marin sont une réplique quasi exacte de la topographie des fonds marins. Grâce aux mesures à haute résolution du géoïde marin collectées par altimétrie spatiale, la topographie sous-marine a pu être calculée sur tout le domaine océanique avec une résolution de quelques kilomètres partout. Cette topographie montre la grande complexité des fonds marins. 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 dans de nombreux domaines comme la navigation sous-marine, la pêche commerciale, l'exploration pétrolière en mer, etc.

Ce cours a été suivi par un séminaire : « Le champ magnétique de la Terre vu de l'espace » présenté par Mioara Mandéa (CNES).

### **Rotation de la Terre, déformations de la croûte terrestre et marées mesurées depuis l'espace**

*Cours du 8 avril 2013*

Grâce aux mesures de poursuite entre des stations au sol et les satellites (télémétrie laser, système DORIS, GPS), il est possible de mesurer aujourd'hui les positions et vitesses des stations au sol avec une précision de quelques millimètres et millimètres par an. Ce niveau de précision permet d'étudier les déformations de la Terre aux échelles globale, régionale et locale ; par exemple les marées terrestres, les mouvements horizontaux de la croûte terrestre dus à la tectonique des plaques, aux phénomènes sismiques et volcaniques aux frontières des plaques, les déformations verticales dues au phénomène de rebond postglaciaire, aux effets de charge de l'atmosphère, de l'océan et des eaux continentales, etc. On mesure aussi les subsidences du sol dues au pompage de l'eau dans les nappes et à l'extraction du gaz et du pétrole. Au cours des deux dernières décennies, 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 millimètre par an, ce qui a complètement révolutionné cette discipline. Depuis une quinzaine d'années, une autre technique, l'interférométrie radar à partir des satellites radar imageurs à ouverture synthétique, s'est avérée extrêmement puissante pour l'étude des déformations crustales co- et post-sismiques, des déformations volcaniques, des déformations des glaciers, 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 des mouvements actuels à grande échelle des plaques tectoniques et la découverte que ces mouvements sont globalement identiques à ceux des trois derniers millions d'années à l'exception de quelques plaques qui ralentissent actuellement.

Ce cours a été suivi par un séminaire : « La rotation de la Terre et des planètes » présenté par Véronique Dehant (Observatoire royal de Belgique).

### **Les océans sous l'œil des satellites**

*Cours du 15 avril 2013*

Depuis deux ou trois décennies, différents capteurs spatiaux mesurent de façon globale et répétitive plusieurs paramètres de l'océan : la température de surface de l'océan, la salinité de surface, les variations de masse de l'océan et la topographie de surface de la mer (de laquelle on peut déduire nombre d'autres paramètres).

L'altimétrie spatiale de haute précision, développée depuis le début des années 1990 avec les satellites Topex/Poséidon, Jason-1 et 2, Envisat et, depuis peu, SARAL/AltiKa, permet de mesurer avec une précision remarquable (environ 1-2 cm) la topographie de surface de l'océan par rapport à une référence fixe et ses variations avec le temps. En quelques jours seulement (correspondants 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 dans le 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 Niño ;
- les variations temporelles du niveau moyen de la mer ;
- la hauteur des vagues ;
- les phénomènes turbulents 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 mètres, résulte des courants marins. À cause de l'équilibre géostrophique (qui existe aussi dans l'atmosphère), les courants marins ont une vitesse proportionnelle à la pente locale de la topographie dynamique de l'océan. La mesure de la hauteur instantanée de la mer permet donc 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.

Grâce à l'altimétrie spatiale, on mesure aussi avec grande précision et une couverture globale l'évolution du niveau moyen de la mer en lien avec le réchauffement climatique. Depuis le début de 1993, la vitesse d'élévation moyenne

de la mer est de plus de 3 mm par an, valeur significativement supérieure à celle mesurée par les marégraphes au cours du XX<sup>e</sup> siècle (1,7 mm par an). Un résultat inattendu de l'altimétrie spatiale a été la découverte que cette élévation est loin d'être uniforme : dans certaines régions, la mer a monté avec une vitesse trois à quatre fois supérieure à la hausse moyenne, en particulier dans le Pacifique tropical, avec des impacts déjà visibles sur certains atolls de cette région du monde.

Ce cours a été suivi par un séminaire : « Les applications sociétales de l'océanographie opérationnelle » présenté par Pierre Bahurel, directeur de Mercator-Océan.

### **Glaces continentales, niveau de la mer et climat**

*Cours du 22 avril 2013*

La hausse actuelle du niveau de la mer résulte du réchauffement de l'océan et de la fonte des glaces continentales. Grâce à des données de température de l'océan collectées par des bateaux au cours des dernières décennies, et depuis 10 ans par les flotteurs automatiques Argo, on sait que l'océan se réchauffe. En raison de sa grande inertie thermique, l'océan stocke 90 % de l'excès de chaleur accumulée dans le système climatique depuis 50 ans en réponse aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre. L'expansion thermique de l'océan due à ce réchauffement explique 30 % de la hausse du niveau de la mer des deux dernières décennies (depuis 1993). L'expansion thermique non uniforme de l'océan est aussi responsable de l'hétérogénéité régionale des vitesses de variation du niveau de la mer.

Depuis le début des années 1990, on dispose de différents systèmes d'observations spatiaux permettant d'estimer la contribution des glaces continentales à la hausse actuelle de la mer. Le recul quasi global des glaciers de montagne enregistré depuis quelques décennies (et aujourd'hui de plus en plus observé par satellite) contribue pour environ 30 % à la hausse du niveau de la mer des vingt dernières années. En raison de leur situation reculée, les calottes polaires (Groenland et Antarctique) bénéficient avantagement des observations par satellite. Certaines techniques spatiales (altimétrie radar et laser, interférométrie radar et gravimétrie spatiale de la mission GRACE) permettent d'estimer leur bilan de masse. On observe qu'en moyenne le Groenland et l'Antarctique de l'Ouest perdent de la glace, ce qui contribue pour environ 25 % à la hausse actuelle du niveau de la mer. Cette perte de masse de glace résulte principalement de l'écoulement rapide de certains glaciers côtiers vers la mer sous l'effet d'instabilités dynamiques en lien avec le réchauffement des eaux côtières. 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.

Ce cours a été suivi par un séminaire : « Nuages, aérosols et changement climatique ; modélisation du climat » présenté par Hervé Le Treut, directeur de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL).

## L'espace et les catastrophes naturelles

*Cours du 13 mai 2013*

Les catastrophes liées à la météorologie et au climat ont doublé depuis 20 ans. La gestion des urgences représente un défi humanitaire majeur pour lequel l'espace est devenu aujourd'hui une composante incontournable. Il y a une douzaine d'années, une coopération internationale entre différentes agences spatiales (appelée « charte internationale Espace et catastrophes majeures ») a été établie pour mettre à disposition des organismes de sécurité civile et des Nations unies des informations basées sur l'imagerie satellitaire afin de faciliter l'organisation des opérations de secours. Dès qu'une catastrophe majeure se produit quelque part dans le monde, la charte est activée. L'opération consiste à programmer l'acquisition d'images optiques ou radar de la zone concernée à partir de tous les satellites en orbite disponibles, de traiter en urgence les images pour fournir des informations facilement interprétables et de générer des cartes de référence (situation avant la catastrophe) et de crise. La cartographie détaillée des dégâts durant la période de crise et l'identification des regroupements de survivants – permises aujourd'hui grâce aux images de résolution submétrique – fournissent des informations essentielles pour l'organisation rapide et efficace des secours sur le terrain. Depuis sa création en 2000, la charte a été activée 368 fois, notamment lors du séisme d'Haïti en janvier 2010, de celui du Japon en mars 2011 (et du tsunami qui en a résulté) et de l'ouragan Sandy en octobre 2012.

Ce cours a été suivi par un séminaire : « Surveillance des zones sismiques depuis l'espace » présenté par Jean Bernard Minster, université de Californie à San Diego (États-Unis).

## Satellites et ressources en eau

*Cours du 27 mai 2013*

L'eau sur Terre est continuellement recyclée par les précipitations, l'évaporation et l'écoulement à la mer. La description précise du cycle de l'eau, en particulier sur les terres émergées, est fondamentale pour la gestion des ressources en eau de la planète (pour la consommation domestique, l'industrie et l'irrigation des cultures), pour la prévision météorologique et l'étude du climat. D'autres applications concernent la prévision des inondations et des sécheresses, la navigation fluviale, etc. Cependant, notre connaissance des variations spatiales et temporelles des flux et stocks d'eaux continentales, des échanges d'énergie et de masse entre la basse atmosphère et les sols, des phénomènes hydrodynamiques à l'échelle des bassins versants, est encore très limitée. Des réseaux d'observation *in situ* (niveaux d'eau, débits, humidité des sols) ont été mis en place au cours des dernières décennies dans certains bassins hydrographiques mais leur distribution reste hétérogène et, depuis une vingtaine d'années, certains réseaux ne sont plus maintenus, en particulier dans les pays en développement. En outre, lorsque les données existent, leur accessibilité est problématique. Des modèles hydrologiques régionaux et globaux ont été développés pour étudier, à l'échelle des bassins versants, les échanges de masse et d'énergie à l'interface sol-atmosphère, les flux et stocks d'eau dans les différents réservoirs et le transfert dans les réseaux hydrographiques. La

modélisation est en effet essentielle pour comprendre les processus physiques et biologiques à l'œuvre dans le cycle de l'eau et pour la prévision de l'évolution future des flux et stocks d'eau. Mais, pour leur fonctionnement et leur validation, les modèles ont besoin de données. Depuis quelques années, plusieurs techniques spatiales de télédétection (imagerie visible, radar, radiométrie, altimétrie, gravimétrie spatiale, etc.) apportent des informations essentielles sur les variations spatio-temporelles de nombreux paramètres hydrologiques : précipitations, humidité des sols, extension et épaisseur du manteau neigeux, distribution des plaines inondées, variations des masses d'eau dans les grands bassins fluviaux, niveaux d'eau des fleuves, lacs et plaines inondées, etc.

La description précise des variations spatio-temporelles des eaux continentales depuis l'espace est aujourd'hui considérée comme un objectif majeur avec un double enjeu :

- scientifique (détermination des volumes d'eau échangés entre les différents réservoirs, des vitesses d'échange, de la capacité des réservoirs, du taux de renouvellement de l'eau dans les réservoirs ; applications à la prédiction climatique, à la compréhension des processus hydrodynamiques des bassins fluviaux, etc.) ;
- socio-économique (inventaire et gestion des ressources en eau, projections futures dans le contexte du changement climatique global et de l'augmentation de la démographie – à noter que la composante « eau souterraine », très mal connue, joue un rôle essentiel dans les régions arides et semi-arides très peuplées, pour la prédiction des crues et des sécheresses, etc.).

Une nouvelle mission spatiale, SWOT, en cours de développement par le CNES (Centre national d'études spatiales) en France et la NASA aux États-Unis, et prévue d'ici 2020, devrait révolutionner notre connaissance des eaux de surface.

Ce cours a été suivi par un séminaire : « Eau, démographie et nourriture au XXI<sup>e</sup> siècle » présenté par Ghislain de Marsily (Académie des sciences).

## **Changements globaux et modifications de l'environnement : l'espace « utile »**

*Cours du 3 juin 2013*

L'observation de la Terre depuis l'espace, c'est aussi l'acquisition d'images dans différents domaines de longueurs d'onde (visible, infrarouge, micro-ondes). Dans le domaine de l'imagerie optique, la résolution des images s'est améliorée d'un facteur 100 en quarante ans. Aujourd'hui, cette résolution est de l'ordre de 50 cm ; c'est le cas des satellites Pléiades développés et lancés récemment par la France. De très nombreux domaines relatifs à l'environnement terrestre bénéficient de l'imagerie satellitaire, notamment la surveillance de l'étendue et de l'état des forêts, de l'occupation des sols, le suivi des cultures agricoles, etc. Les images satellites sont interprétées (on parle de classification) de façon à associer à chaque mesure radiométrique d'un pixel de l'image une information interprétable dans le domaine de l'environnement. Cette classification permet par exemple de déterminer la nature de la surface terrestre (marécages, champs cultivés, forêts, zone urbanisée, plans d'eau, etc.). On peut en déduire aussi un certain nombre d'indices, par exemple des indices de végétation caractérisant le type de végétation ou de cultures et leur bon état. L'imagerie spatiale permet aussi d'étudier les forêts et en particulier la déforestation des régions tropicales, responsable d'un déstockage de CO<sub>2</sub> dans

l'atmosphère qui se superpose aux émissions de gaz à effet de serre résultant de la combustion des énergies fossiles. Les images satellites sont aujourd'hui largement utilisées pour quantifier la source de CO<sub>2</sub> liée à la déforestation. Dans les régions boréales, la forêt s'étend. Sa biomasse agit alors comme un puits de carbone. Mais celle-ci est extrêmement mal connue et estimée, aujourd'hui, uniquement par différence entre les émissions totales et le puits océanique. Une nouvelle mission spatiale appelée « Biomass », destinée à la mesure directe de la biomasse de la végétation et de son évolution, vient d'être décidée. Elle permettra de mesurer pour la première fois le puits de carbone anthropique dû à la végétation. C'est un objectif important pour la modélisation du climat qui a besoin de connaître le plus précisément possible les sources et puits de carbone anthropique.

Une autre application importante de la télédétection est l'agriculture de précision. L'imagerie satellitaire joue aujourd'hui un rôle grandissant dans ce domaine en fournissant des informations permettant l'amélioration et l'optimisation des rendements agricoles, avec pour conséquence une meilleure planification de la production agricole locale, régionale et nationale. L'acquisition d'images à des étapes clés de la croissance des cultures permet en effet d'estimer les divers paramètres biophysiques qui caractérisent l'état de la plante : la surface foliaire, la teneur en chlorophylle, le niveau de stress hydrique de la plante, d'éventuelles anomalies de croissance, etc. Ces données sont injectées dans des modèles de croissance des plantes développés par type de culture. Ceci permet de prévoir la récolte à venir. De plus, ces informations permettent d'ajuster et d'optimiser l'irrigation et la fertilisation (apport d'engrais) des cultures durant la phase de croissance.

Ce cours a été suivi par un séminaire : « Les impacts du changement climatique sur la production agricole » présenté par Bernard Seguin (INRA).

COLLOQUE : CHANGEMENT CLIMATIQUE, HAUSSE DU NIVEAU DE LA MER  
ET VULNÉRABILITÉ CÔTIÈRE ; IMPACTS SOCIÉTAUX

**Sous forme d'un workshop international en langue anglaise,  
les 10-11 juin 2013**

La hausse du niveau de la mer constitue une menace sérieuse pour de nombreuses régions côtières basses et souvent très peuplées de la planète. Or, sous les effets conjugués de pressions anthropiques et de phénomènes naturels, ces territoires sont déjà devenus très vulnérables aux risques d'érosion et de submersion marine. De plus, à la hausse moyenne globale du niveau marin se superpose une importante variabilité régionale qui, dans certaines régions, amplifie le phénomène. Lors de ce *workshop*, les meilleurs experts français et étrangers ont exposé l'état des connaissances scientifiques sur la hausse actuelle et future de la mer en insistant sur l'importance de la variabilité régionale. Les différents mécanismes à l'origine de l'évolution des zones côtières ont été présentés et les causes de l'érosion des

côtes au cours du XX<sup>e</sup> siècle ont été discutées. Le colloque a aussi abordé en détail les conséquences économiques et sociétales de la hausse future de la mer ainsi que les possibles stratégies d'adaptation à ces futurs changements<sup>c</sup>.

Liste des présentations :

- « Sea Level Changes Since 21,000 Years » (Le niveau de la mer depuis 20 000 ans), Édouard Bard (Collège de France) ;
- « Present-day Global Mean Sea Level Rise; Observations and Causes » (La hausse actuelle de la mer; observations et causes), Anny Cazenave (LEGOS) ;
- « Regional Variability: Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes » (Variabilité régionale de la hausse du niveau de la mer ; observations et causes), Detlef Stammer (Université de Hambourg, Allemagne) ;
- « Regional Sea Level Variations Due to Post Glacial Rebound and Solid Earth Response to Ongoing Land Ice Melt » (Variabilité régionale induite par le phénomène de rebond post glaciaire sur le niveau de la mer), Giorgio Spada (Université d'Urbino, Italie) ;
- « Vertical Crustal Motions of the Earth's Crust: Processes and Observations » (Effet des mouvements verticaux de la croûte terrestre sur la mesure du niveau relatif de la mer: processus et observations), Guy Woppelmann (Université de La Rochelle, France) ;
- « Apparent Sea Level Rise and Earthquakes » (Variations relatives du niveau de la mer induites par les séismes), Valérie Ballu (Université de la Rochelle, France) ;
- « Total Relative Sea Level Changes since 1950 in Different Regions of the World Ocean » (Hausse totale relative de la mer depuis 1950 dans différentes régions du monde), Benoit Meyssignac (LEGOS, France) ;
- « The Driving Factors of Coastal Evolution – Toward a Systemic Approach » (Les mécanismes à l'origine de l'érosion côtière ; une approche systémique), Manuel Garcin (BRGM, France) ;
- « Sea Level Rise Effects on Coastal Erosion: Review of Observations for the Past Few Decades » (Niveau de la mer et érosion côtière : synthèse des observations pour les dernières décennies), Gonéri Le Cozannet (BRGM, France) ;
- « Sea Level Projections (Global and Regional) for the 21st Century » (Projections climatiques de la hausse de la mer au XXI<sup>e</sup> siècle), David Salas (CNRM – Météo - France, France) ;
- « Contributions of Greenland and Antarctica to Future Sea Level Rise » (Les contributions du Groenland et de l'Antarctique à la hausse future de la mer), Catherine Ritz (LGGE, France) ;
- « Modelling the Future Total Relative Sea Level of the 21st Century at Regional/ Local Scale » (Hausse totale relative de la mer au XXI<sup>e</sup> siècle aux échelles globale et régionale), Roderik van de Wal (Université de Utrecht, Pays-Bas) ;
- « Forecasting Climate and Sea Level Changes on Decadal Time Scale; State of the Art and Limitations » (Variabilité et prévisibilité décennale du climat et du niveau de la mer: état de l'art et limitations), Philippe Rogel (CERFACS, France) ;

---

c. Les enregistrements vidéo du colloque sont disponibles sur le site Internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/anny-cazenave/symposium-2012-2013.htm> [Ndlr].

- « Extreme Sea Levels; Past and Future » (Niveau de la mer et évènements extrêmes ; le passé et le futur), Svetlana Jevrejeva (National Oceanography Center, Royaume-Uni) ;
- « Sediment Dynamics and Coastal Zone Management » (Dynamique sédimentaire des zones côtières et aménagement du territoire), Patrice Walker (CREOCEAN, France) ;
- « Coastal Vulnerability of Asian Mega Deltas: Natural Delta System versus Human-influenced Recent Changes » (Vulnérabilité côtière des grands deltas d'Asie: phénomènes naturels et facteurs anthropiques), Yoshiki Saito (Geological Survey of Japan, Japon) ;
- « Rising Sea Level: the Dutch Strategy on how to Cope with Climate Change in the 21st Century » (Hausse du niveau de la mer au XXI<sup>e</sup> siècle : la stratégie des Pays-Bas), Marcel Stive (CITG, Université de Delft, Pays-Bas) ;
- « Risk Management: an Opportunity for Adaptation to Climate Change and Sea Level Rise in Coastal Zones » (Risques et aménagement du territoire : comment s'adapter au changement climatique et à la hausse du niveau de la mer ?), Jean-Pierre Savard (OURANOS, Canada) ;
- « Coastal Adaptation to Climate Change: from Observations to Public Policies in France » (Adaptation des régions littorales françaises au changement climatique; observations et politiques publiques), Nicole Lenôtre (BRGM, France) ;
- « The French Coastal Environment: Land Use, Coastal Conservation, Demographic Pressure, Risks and Consequences of Climate Change » (L'environnement côtier en France : pression anthropique et changement climatique), Sébastien Colas (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, France) ;
- « From Climate Change Hypothesis to the Sizing of Coastal Infrastructures » (Dimensionnement des infrastructures côtières dans un contexte de changement climatique), Michel Benoit (Laboratoire Saint Venant-EDF, Cetmef, École des ponts et chaussées, France) ;
- « Societal and Economic Impacts of Sea Level Rise » (Les enjeux économiques et sociétaux de la hausse du niveau de la mer), Vincent Viguié (CIRED, France).

#### RECHERCHES ACTUELLES

Mes recherches actuelles portent sur la dynamique de l'océan à l'aide des observations des missions d'altimétrie et de gravimétrie spatiales, et tout particulièrement sur la hausse du niveau de la mer en lien avec le changement climatique : mesure par altimétrie spatiale et étude des causes (réchauffement de l'océan à l'aide des données des flotteurs Argo, fonte des glaces continentales et bilan de masse des calottes polaires à l'aide des données de gravimétrie spatiale de la mission GRACE, contribution des eaux continentales, etc.). Les nouveaux thèmes abordés récemment portent sur les questions de « détection-attribution » (les variations observées résultent-elles de la variabilité interne/naturelle du système climatique ou du forçage anthropique ?) et sur les impacts côtiers de la hausse actuelle et future du niveau de la mer. Un autre volet de mes recherches porte sur l'hydrologie continentale à l'aide de différentes techniques spatiales, en particulier l'étude du cycle global de l'eau, la quantification des masses d'eau continentales et leurs variations temporelles en réponse à la variabilité climatique et à la pression anthropique.

## PUBLICATIONS

**Publications (sélection de quelques articles récents)**

Cazenave A. et Le Cozannet G., « Sea level rise and its coastal impacts », *Earth's Future*, sous presse, 2013.

Church J.A., Clark P.U., Cazenave A. *et al.* « Sea Level Change ». In : *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2013, sous presse.

Stammer D., Cazenave A., Ponte R. et Tamisiea M., « Contemporary Regional Sea Level Changes », *Annual Review Marine Sciences*, 5, 2013, 21-46.

Le Cozannet G., Garcin M., Petitjean L., Cazenave A., Becker M., Meyssignac B., Walker P., Devilliers C., Lebrun O., Lecacheux S., Baills A., Bulteau T., Yates M. et Wöppelmann G., « Exploring the Relation Between Sea Level Rise and Shoreline Erosion Using Reconstructions: an Example in French Polynesia », *J. Coastal Research*, 65, 2013, sous presse ; doi : 10.2112/SI65-361.1.

Wöppelmann G., Le Cozannet G., de Michele M., Raucoules D., Cazenave A., Garcin M., Hanson S., Marcos M. et Santamaría-Gómez A., « Is Land Subsidence Increasing the Exposure to Sea Level Rise in Alexandria, Egypt? », *Geophys. Res. Lett.*, vol. 40, 2013, 1-5 ; doi : 10.1002/grl.50568.

Peng D., Palanisamy H., Cazenave A. et Meyssignac B., « Sea Level Change and Variability in the South China Sea », *Marine Geodesy*, 36:2, 2013, 164-182 ; doi : 10.1080/01490419.2013.771595.

Hollmann R. *et al.* (including Cazenave A.), « The ESA Climate Change Initiative: Satellite Data Records for Essential Climate Variables », *Bull. American Meteor. Soc.*, mars 2013 ; doi : 10.1175/BAMS-D-11-00254.

Cazenave A., Henry O., Munier S., Meyssignac B., Delcroix T., Llovel W., Palanisamy H. et Becker M., « ENSO Influence on the Global Mean Sea Level Over 1993-2010 », *Marine Geodesy*, 35(S1), 2012, 82-97.

Rahmstorf S., Foster G. et Cazenave A., « Comparing Climate Projections to Observations: an Update », *Environmental Res. Lett.*, 7, 044035, 2012 ; doi : 10.1088/1748-9326/7/4/044035.

Munier S., Palanisamy H., Maisongrande P., Cazenave A. et Wood E., « Global Runoff over 1993-2009 Estimated from Coupled Land-Ocean-Atmosphere Water Budgets and its Relation with Climate », *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 16, 2012, 3647-3658 ; doi : 10.5194/hess-16-3647-2012.

Henry O., Prandi P., Llovel W., Cazenave A., Jevrejeva S., Stammer D., Meyssignac B. et Koldunov N., « Sea Level Variations since 1950 along the Coasts of the Arctic Ocean », *J. Geophys. Res.*, 117, C06023, 2012 ; doi : 10.1029/2011JC007706.

Meyssignac B. et Cazenave A., « Sea Level: a Review of Present-day and Recent-past Sea Level Change and Variability », *J. Geodyn.*, 58, 2012, 96-109.

Meyssignac B., Salas-Melia D., Becker M., Llovel W. et Cazenave A., « Spatial Trend Patterns in Observed Sea Level: Internal Variability and/or Anthropogenic Signature ? », *Climate of the Past*, 8, 2012, 787-802 ; doi : 10.5194/cp-8-787-2012.

Meyssignac B., Becker M., Llovel W. et Cazenave A., « An Assessment of Two-dimensional Past Sea Level Reconstructions over 1950-2009 Based on Tide Gauge Data and Different Input Sea Level Grids », *Surveys in Geophysics*, 2012 ; doi : 10.1007/s10712-011-9171-x.

Prandi P., Ablain M., Cazenave A. et Picot N., « A New Estimation of Mean Sea Level in the Arctic Ocean from Satellite Altimetry », *Marine Geodesy*, 35(S1), 2012, 61-81.

Becker M., Meyssignac B., Llovel W., Cazenave A. et Delcroix T., « Sea level Variations at Tropical Pacific Islands during 1950-2009 », *Global and Planetary Change*, 80/81, 2012, 85-98.

Palanisamy H., Becker M., Meyssignac B. et Cazenave A., « Regional Sea Level Change and Variability in the Caribbean Sea since 1950 », *Int. J. Geosci.*, 2, 2, 2012, 125-133 ; doi : 10.2478/v10156-011-0029-4.

### **Autres publications**

Cazenave A., « Contemporary Sea Level Rise », *PAGES*, 2012.

Cazenave A., « Les ressources en eau », *Magazine de l'Université Paul Sabatier*, Toulouse, 2012.

Cazenave A., Dieng H.B., Munier S., Henry O., Meyssignac B., Palanisamy H. et Llovel W., « Influence d'El Niño et la Niña sur le niveau de la mer », *Journal La Météorologie*, 79, novembre 2012.

Cazenave A., *La Terre et l'environnement observés depuis l'espace*, Collège de France/ Fayard, coll. « Leçons inaugurales du Collège de France », 2013, à paraître.

## AUTRES ACTIVITÉS

### **Conférences invitées**

2012 : ERCA (European Research Courses on Atmospheres, Grenoble) ; Center for Ice and Climate (Summer school sur le thème « Sea level », Copenhague) ; Shanghai Astronomical Observatory (Summer school sur le thème « Space Geodesy », Shanghai) ; Ministère italien de la Recherche (colloque « From Sandy to Doha: the challenge of climate change », Venise) ; Département des Géosciences de l'Université de Princeton.

2013 : Institut français de Madrid ; École polytechnique ; ETH (Zurich) ; Symposium COSPAR (Bangkok) ; Université de Liverpool.

### **Responsabilités nationales et internationales en cours**

- Directeur à temps partiel pour les sciences de la Terre à ISSI (International Space Science Institute, Berne, Suisse) ;
- Membre du GIEC (Groupement intergouvernemental d'experts sur le climat), auteur principal du chapitre sur le niveau de la mer du 5<sup>e</sup> rapport paru en 2013 ;
- Membre du Joint Scientific Committee du WCRP (World Climate Research Programme) ;
- Vice-présidente du Conseil supérieur des programmes de l'Éducation Nationale ;
- Présidente du conseil scientifique de Météo-France ;
- Responsable scientifique du projet « Sea Level » du programme Climate Change Initiative (CCI) de l'ESA (European Space Agency) ;
- Coordinatrice scientifique du projet de l'agence nationale de la recherche « CECILE » (Changements environnementaux côtiers : impacts de l'élévation du niveau de la mer).