

# Espace & Climatologie

## Les satellites, observateurs du climat

p. 2

Que peuvent faire les satellites depuis leurs lointaines orbites ?

- Les moyens d'observation depuis l'espace
- Les instruments

Les satellites ont-ils d'autres utilités liées au changement climatique ?

- Catastrophes naturelles et satellites
- La Charte Internationale « Espace et Catastrophes Majeures »
- GMES

Le soutien du CNES à l'ensemble de la filière spatiale

## Trois approches du changement climatique

p. 6

Trois approches

Principales missions spatiales du CNES

## Exemples de mesures climatologiques effectuées depuis l'espace

p. 11

Détection du réchauffement global

Glace et neige

Niveau de la mer

Aérosols et nuages

Gaz à effet de serre

## Les satellites, observateurs du climat

Les apports du spatial dans l'étude du climat sont primordiaux ; ils sont au cœur de la politique spatiale que mène le CNES aux niveaux européen et international. L'intérêt des données spatiales pour la climatologie est formalisé par le programme international GCOS\*, la référence dans le domaine.

Qu'il s'agisse des satellites d'Eumetsat\*\* ou des Earth Explorer de l'ESA\*\*\* qui surveillent le réchauffement global de la planète Terre, les techniques spatiales offrent une palette exceptionnelle de solutions pour l'observation du climat et le suivi des paramètres qui témoignent de son évolution. Quelques exemples : l'étude de la neige et de la glace avec les satellites Sentinelle du programme Copernicus, le suivi du niveau des mers avec les satellites Jason, l'étude de l'atmosphère avec Iasi NG, le suivi des eaux douces avec SWOT, des conditions de vague et de vent dans les océans avec CFOSAT...

Le spatial bénéficie aujourd'hui plus que jamais de l'attention de l'ensemble de la communauté internationale qui reconnaît l'expertise déterminante du CNES à travers ses satellites mais aussi des instruments qui participent à des missions définies dans le cadre de coopérations internationales.

\* *Global Climate Observing System*

\*\* *Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques*

\*\*\* *Agence spatiale européenne*

## QUE PEUVENT FAIRE LES SATELLITES DEPUIS LEURS LOINTAINES ORBITES ?

En matière de climatologie, les satellites sont devenus des pièces maîtresses par leur capacité à effectuer des mesures d'une grande précision sur l'ensemble de la planète, en complément des relevés accomplis au sol, mais forcément plus ponctuels que ceux-ci.

### Les moyens d'observation depuis l'espace

Les satellites observent toute la planète. Ils fournissent des données homogènes (effectuées par le même instrument sur tous les points du globe), répétitives (sur de longues durées) et automatiques. Seules des mesures précises et sur de longues durées sont pertinentes dans le domaine de la climatologie. Les satellites mesurent certains paramètres accessibles seulement depuis l'espace : flux du rayonnement solaire réfléchi, du rayonnement infrarouge émis par la Terre et son atmosphère, données fondamentales du système climatique.

Les satellites et les instruments de demain se préparent aujourd'hui avec les agences spatiales. Deux axes de recherche sont privilégiés : la mise au point d'instruments qui assurent des mesures plus précises car ils « voient » mieux sur des temps plus longs et des satellites plus légers, plus agiles, capables de transmettre toujours plus d'informations indispensables à la surveillance du climat.

### Les instruments

Pourquoi utiliser plusieurs satellites qui observent les mêmes phénomènes ?

Suivant les satellites ou les instruments utilisés, on obtient des données différentes et complémentaires. Par exemple : pour mesurer la hauteur de l'eau des océans, le satellite Jason utilise une maille large (une large superficie) et une forte répétitivité tandis que le satellite Sentinel travaille sur une maille étroite et une moindre répétitivité ; la combinaison des deux résultats permet d'établir des moyennes significatives. Autre exemple : en altimétrie, il faut au moins quatre

satellites pour détecter les tourbillons de l'eau compte tenu de leur taille, de la couleur de l'eau, de la vitesse à laquelle évoluent ces tourbillons ...

Les satellites météorologiques et ceux consacrés à la recherche climatique embarquent un grand nombre d'instruments (passifs, actifs ou spéciaux) :

Les radiomètres, spectromètres et interféromètres sont des instruments passifs qui mesurent les caractéristiques des rayonnements naturels reçus par le satellite. On en déduit des informations sur l'état physique et la composition de l'atmosphère, de la surface de la Terre (océan, glaces, continents) ou du rayonnement solaire incident, réfléchi ou émis par la surface.

Les altimètres, diffusiomètres et radars à synthèse d'ouverture sont des capteurs actifs qui émettent des ondes radio. Les échos de ces ondes renseignent sur la topographie de la surface des océans, de la banquise et des calottes glaciaires ainsi que sur la vitesse et la direction du vent et des vagues à la surface de l'océan. Les lasers et les lidars émettent des ondes dans le domaine visible pour mesurer l'altitude du sommet des nuages, leur structure verticale, les caractéristiques des aérosols et autres poussières atmosphériques, les précipitations ou encore la vitesse du vent dans la profondeur de l'atmosphère.

Il existe aussi des récepteurs spéciaux qui recueillent les caractéristiques de propagation dans l'atmosphère de ces signaux pour en déduire la température et l'humidité.

Que fait-on des mesures récoltées?

Toutes ces mesures sont centralisées dans des bases de données spécifiques ou bien réparties dans un grand nombre de stations, laboratoires ou institutions pour analyse et traitement. Les climatologues leur appliquent ensuite éventuellement des corrections pour établir des séries temporelles homogènes exploitables et combler d'éventuelles lacunes.

## **LES SATELLITES ONT-ILS D'AUTRES UTILITES LIEES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?**

### **Catastrophes naturelles et satellites**

Les satellites sont particulièrement précieux lors des catastrophes naturelles. En effet, l'une des conséquences majeures du changement climatique est de favoriser la survenue d'événements extrêmes (tempêtes, inondations, incendies...), plus intenses et plus violents que par le passé.

Lors de ces catastrophes, les satellites offrent une aide capitale, avant, pendant et après l'évènement, dans les domaines de l'imagerie, des télécommunications, pour mesurer l'étendue des dégâts et organiser au mieux les secours sur site.

Les premières cartes d'un territoire, établies avant l'évènement, servent d'éléments de comparaison à celles établies pendant. Ces cartes sont ensuite un support aux secours, à la reconstruction, aux plans de prévention mais aussi d'outil pédagogique et administratif incontestable.

### **La Charte Internationale « Espace et Catastrophes Majeures » Un véritable élan de solidarité venu de l'espace**

Les satellites font des rondes quotidiennes autour de la Terre ; ayant une « bonne vue », ils ont été mis au service de la gestion des catastrophes pour offrir aux pays concernés une vision claire de la situation dans les zones sinistrées. Cette idée, émise en 1999 par les agences spatiales française, européenne et canadienne, a donné naissance à la Charte « Espace et catastrophes majeures. » Ainsi, à chaque catastrophe de grande ampleur, cyclone, séisme, inondation, ou tout autre évènement, les 14 pays membres de la Charte envoient gratuitement en quelques heures des

images aux pays sinistrés, leur permettant ainsi d'évaluer les dégâts et de savoir où aller pour aider les survivants. Le déclenchement de la Charte, et l'activation par le CNES des satellites Pléiades, sont la démonstration parfaite du rôle du spatial dans les problématiques liées au changement climatique. Grâce au concours des satellites Pléiades, des images optiques de crise peuvent être fournies ; leur résolution de 70cm aide les équipes de secours à s'organiser au mieux grâce à une meilleure visibilité du terrain.

Entre 2000 et 2014, la Charte a été activée 424 fois :

- 89 phénomènes purement terrestres (tremblements de terre, glissements de terrain, éruptions volcaniques...),
- 20 phénomènes technologiques (nappes d'huile...),
- 315 phénomènes climatiques dont certains sont liés au changement climatique (tempêtes, ouragans, phénomènes neigeux, incendies...).

## Copernicus

Le système Copernicus (ex GMES) est un réseau de collecte et de diffusion d'informations pour l'environnement et la sécurité fondé sur la surveillance spatiale et au sol de la Terre. Pour assurer ses fonctions, Copernicus dispose de satellites spécifiques, les Sentinelles.

En Europe, Copernicus associe l'Union européenne, Eumetsat, l'ESA et les Etats membres. Ce programme ne concerne pas que le climat mais prévoit aussi de collecter des données utiles pour la sécurité civile, la gestion des ressources ou l'aménagement du territoire. Toutefois, la logique d'infrastructure qui en découle, et qui repose en partie sur les satellites, doit permettre de disposer de mesures prises depuis l'espace de façon continue et pérenne.

Cette initiative vise à rationaliser les activités et moyens européens dans le domaine de l'observation de la Terre. Elle permettra de fournir aux pouvoirs publics, aux chercheurs européens et aux entreprises, des informations libres, gratuites, fiables et indépendantes dans les domaines de l'environnement et de la sécurité.

Le système Copernicus repose sur quatre composantes : la fourniture de services aux décideurs publics et aux particuliers, les observations à partir de l'espace, les observations *in situ* (y compris les systèmes aéroportés) et la capacité d'intégration des données et de gestion des informations.

Les services d'information fournis par Copernicus sont mis en place de manière progressive en fonction des priorités, du niveau de développement de ces services, de leur utilisation effective et de la continuité à long terme de l'offre et de la demande.

Ce système apportera un soutien à l'évaluation et à la mise en œuvre des politiques européennes ayant un impact sur l'environnement, notamment dans les domaines suivants : les engagements environnementaux de l'Europe, l'agriculture, le développement régional, la pêche, les transports, la politique étrangère et de sécurité commune, y compris la politique européenne de sécurité et de défense ainsi que d'autres politiques à touchant la sécurité des citoyens européens comme la surveillance des frontières.

Certains services sont déjà opérationnels, d'autres sont prévus concernant la pollution atmosphérique, l'aide humanitaire, la prévention des feux de forêt et des inondations ainsi que les changements globaux. Ils seront définis en fonction des priorités politiques et de critères spécifiques tels que les avantages économiques et sociaux à en attendre, leur intérêt paneuropéen et la disponibilité des outils de surveillance nécessaires.

## LE SOUTIEN DU CNES A L'ENSEMBLE DE LA FILIERE SPATIALE

Le CNES participe au suivi du changement climatique de bout en bout, en amont en soutenant la filière instrumentale et, en aval, en participant à des initiatives internationales.

Le CNES travaille au quotidien avec des chercheurs spécialistes du climat. Toutes les missions d'observation de la Terre du CNES participent, à des degrés divers, à l'étude de l'évolution du climat. Dans le domaine de la qualité des images et de l'altimétrie, le CNES possède une expertise reconnue notamment par l'ESA, la Commission européenne et Eumetsat. Il apporte ainsi son support technique pour les missions Sentinel 2, 3 et 6 (Jason-CS) ainsi que 3MI qui va succéder à Polder et sera à bord de Metop-SG.

Le CNES fait partie du CEOS (Committee on Earth Observation Satellite), une coordination entre agences spatiales internationales pour l'échange de données et de bonnes pratiques sur les programmes d'observation de la Terre par satellite, dans le but notamment d'améliorer les observations du changement climatique. Il participe au CGMS\* notamment au groupe d'inter-calibration des données. Il participe au groupe de travail conjoint CEOS-CGMS sur le climat, avec les grandes agences spatiales et services météorologiques opérant des satellites pour la surveillance du climat.

Au niveau européen le CNES intervient dans la *Climate change initiative* de l'ESA qui a pour mission de suivre 10 variables climatiques (niveau des océans, aérosols, nuages...). L'objectif de ces groupes internationaux est de construire une architecture mondiale spatiale pour la surveillance du climat.

\* *Coordination Group of Meteorological Satellites*

### TROIS APPROCHES

D'après le dernier rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec) publié en 2014, la poursuite au rythme actuel des émissions par l'activité humaine de gaz à effet de serre devrait accentuer le réchauffement de la planète au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Le système climatique en serait profondément modifié : réchauffement supplémentaire de 1,8 à 4°C, élévation du niveau des mers de 18 à 60 cm, retrait des banquises et fonte des glaciers continentaux, etc., possibles emballements dus à une modification brutale de la circulation thermohaline\* ou des émissions de méthane. Les conséquences anticipées de ce changement climatique sur les sociétés humaines et sur les écosystèmes (ce qu'on appelle généralement les impacts) sont aussi analysées en détail dans le rapport 2007 du Giec.

\* Circulation thermohaline : Circulation à grande échelle dans l'océan mondial liée à la température et à la salinité des masses d'eau.

Dans ce contexte, quel peut être le rôle des missions spatiales d'observation de la Terre, en soutien des politiques publiques, pour lutter contre le réchauffement climatique ? Cette lutte peut être déclinée selon trois grands domaines d'action : compréhension, atténuation et adaptation.

#### Comprendre et prévoir

Comprendre et prévoir l'évolution du climat est la tâche des scientifiques. Les rapports du Giec fournissent l'état de l'art dans ce domaine à intervalles réguliers. Pour cela, les climatologues s'appuient sur les observations *in situ* et spatiales et sur l'étude du passé lointain (la paléoclimatologie). Ils s'appuient aussi et surtout sur la modélisation numérique car c'est le seul moyen pour reproduire la complexité des mécanismes du système climatique (l'atmosphère, les océans, les glaces, les surfaces continentales, le soleil). La modélisation numérique est aussi le seul moyen de prévoir l'évolution future du climat, à partir des divers scénarios socio-économiques qui permettent d'évaluer les futures actions anthropiques.

En ce qui concerne les observations spatiales, il faut reconnaître que, malgré les évolutions récentes, leur apport à la compréhension et à la surveillance du climat n'a pas encore la place qu'elles méritent ; ceci est sans doute dû au manque de séries de données homogènes sur des durées suffisamment longues. De plus, la tâche est parfois ardue : il est beaucoup plus difficile depuis l'espace de mettre en évidence une très faible variation décennale de la température moyenne de la basse atmosphère que de « photographier » un cyclone tropical ou de témoigner du recul des forêts tropicales.

#### Atténuer

Pour atténuer le réchauffement climatique et ses impacts, deux méthodes sont possibles.

L'une consiste à contrecarrer les effets des émissions de gaz à effet de serre en refroidissant artificiellement l'atmosphère terrestre. Comment ? Par le positionnement dans l'espace d'écrans solaires géants ou encore par l'injection dans la stratosphère de composés soufrés ; ils y formeront des aérosols sulfatés capables d'absorber ou de réfléchir une partie du rayonnement solaire incident. Cependant ces propositions de « géo-ingénierie » apparaissent extrêmement périlleuses dans la mesure où l'on ignore tout de leurs effets secondaires.

L'autre approche consiste à imposer des limitations volontaires et strictes aux rejets anthropiques de gaz à effet de serre, afin de stabiliser leurs concentrations dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Cela peut se faire au

travers d'accords internationaux, tels que le Protocole de Kyoto ; des mesures nationales ou locales peuvent aussi être prises ; les choix individuels de comportement (modes de transport, d'habitat ou de consommation) ont aussi un rôle important à jouer.

## S'adapter

Quel que soit l'effet des mesures d'atténuation, elles seront très certainement insuffisantes pour renverser totalement les tendances en cours ; le climat changera de façon plus ou moins importante et l'homme devra s'y adapter.

S'adapter aux changements climatiques signifie prendre des mesures pour réduire les risques et les dommages liés aux dérèglements climatiques futurs (voire, le cas échéant, pour tirer parti des avantages possibles).

Parmi les exemples de mesures envisageables, on peut citer l'utilisation plus rationnelle des ressources en eau, le renforcement des digues face à l'élévation du niveau de la mer, l'adaptation des normes et règlements du secteur de la construction aux futures conditions climatiques, la mise au point de cultures tolérant la sécheresse, l'élaboration de plans d'aménagement des territoires réduisant leur vulnérabilité, etc.

Les stratégies d'adaptation se déclinent au niveau européen, national ou régional, mais peuvent aussi se traduire par des mesures concrètes au niveau des entreprises, des associations ou des individus.

## PRINCIPALES MISSIONS SPATIALES DU CNES

### CRYOSPHERE

#### CRYOSAT-2

##### Observer les glaces

Cryosat-2 est une mission d'altimétrie principalement dédiée à l'observation des glaces : glaces de mer et calottes, lancée en 2010. Elle permet de mesurer l'évolution saisonnière et à long-terme de la couverture de banquise et l'évolution des calottes polaires.

Les mesures Cryosat sur les océans complètent en outre la constellation altimétrique pour l'océanographie opérationnelle.

#### GRACE & GOCE

##### Suivre la fonte des calottes glaciaires

Quantifier précisément les transferts de masse d'eau liés à la fonte des glaces est un élément-clé pour comprendre l'évolution en cours et à venir du climat et du niveau des mers. Malheureusement, de grandes incertitudes demeurent sur ces transferts en raison de notre méconnaissance du Rebond PostGlaciaire (RPG) induit par la dernière déglaciation. Ce rebond génère encore aujourd'hui des déformations du sol et interfère avec l'estimation des pertes de glace. Pour ces raisons, la modélisation du RPG est aujourd'hui un enjeu majeur pour l'étude du changement climatique.

Avec le satellite Goce, opérationnel en 2013, les scientifiques visent une meilleure compréhension du champ de gravité à l'intérieur de la Terre, donnée capitale pour bien interpréter les mesures altimétriques.

### MERLIN

#### Savoir où et combien de méthane relâché dans l'atmosphère

En 2019, le satellite franco-allemand MERLIN\* sera mis en orbite terrestre. Sa mission est double : mesurer la concentration en méthane atmosphérique à l'échelle planétaire et mieux comprendre les sources d'émission de ce gaz à effet de serre qui joue un rôle déterminant dans le changement climatique.

Mesurer avec précision la quantité de méthane dans l'atmosphère constitue un enjeu majeur dans la compréhension de la machine climatique. Quantifier et localiser localement les sources d'émission et leurs variations sont des éléments nécessaires à la compréhension du phénomène, la concentration atmosphérique en méthane ayant plus que doublé depuis le début de l'ère industrielle, l'effet de serre atmosphérique additionnel responsable de la hausse de la température planétaire a lui aussi augmenté.

\*Methane Remote Sensing Lidar Mission

### CALIPSO

#### Etudier le bilan radiatif terrestre

La mission CALIPSO\* joue un rôle pionnier dans la mise en place et l'exploitation de nouvelles observations atmosphériques (nuages, particules...) pour l'étude du bilan radiatif terrestre à partir de l'espace. Ce thème fait partie des objectifs scientifiques initiaux de la mission établis à la fin des années 90. La mission CALIPSO issue d'une collaboration bilatérale entre la NASA et le CNES a été lancée en avril 2006, et la plateforme est un élément-clé de la « constellation » de satellites (ou A-Train) ayant chacun leur spécificité d'observation de l'atmosphère et de la surface terrestre.

\* Cloud and Aerosol Pathfinder Satellite Observations

### IASI et IASI-NG

#### Cartographier l'atmosphère avec précision et continuité

Embarqués sur les satellites météorologiques MetOp et dédiés à l'amélioration des prévisions météorologiques à moyen terme, les instruments IASI et IASI Nouvelle Génération assurent aussi une cartographie précise et continue de paramètres clés de l'évolution du climat (température, humidité...) et des phénomènes de pollution atmosphérique. Grâce à leurs techniques innovantes, les sondeurs successifs depuis 2006 et ceux prévus jusqu'en 2035 fournissent et fourniront quotidiennement des cartes d'une dizaine de gaz (ozone, monoxyde et le dioxyde de carbone, de méthane...). Ils sont également capables de traquer l'ammoniac atmosphérique, l'occurrence de panaches volcaniques ou de grands incendies et donner l'alerte en cas d'incidence sur l'aviation ou la santé.

### MEGHA-TROPIQUES

#### Surveiller et comprendre le climat tropical

Lancé le 12 octobre 2011 depuis l'Inde, le premier satellite franco-indien Megha-Tropiques est destiné à la recherche sur la circulation atmosphérique, le cycle hydrologique et l'évolution du climat dans les régions tropicales. Ce satellite défile sur une orbite peu inclinée sur l'Equateur ; les données recueillies permettront d'améliorer les connaissances sur la contribution du cycle de l'eau à la dynamique de l'atmosphère tropicale et la compréhension des processus liés à la convection tropicale.



## TERRES EMERGÉES

### BIOMASS

#### Estimer les quantités de carbone stockées

Cartographier la biomasse des forêts afin d'estimer les quantités de carbone stockées et suivre leurs variations, telle sera la mission du satellite Biomass à partir de 2020. Un objectif capital pour comprendre le rôle des forêts dans le cycle du carbone, leurs interactions avec le climat et leurs impacts socio-économiques à l'échelle mondiale.

## OCEANS

### JASON-2

#### Mesurer la topographie de la surface des océans

L'objectif principal de la mission Jason-2 est de mesurer la topographie de la surface des océans car elle reflète la structure de la circulation océanique à grande échelle. Cette circulation est un élément essentiel de la *machine climatique* de notre planète ; elle permet le stockage, le transfert et la redistribution de l'énergie à des échelles de temps plus longues que l'atmosphère (des mois/années plutôt que des jours/semaines).

Jason-2 assure la continuité de la série historique d'altimétrie de précision initiée en 1993 avec Topex/Poséidon, puis Jason-1. La précision extrême obtenue sur la mesure de l'évolution du niveau moyen des mers depuis 1992 fait de la série Topex/Jason la quintessence du *Climate Data Record*. Jason-3 sera lancé à l'été 2015.

### SWOT

#### Mesurer le niveau des océans

La mission Swot représente une première scientifique. Elle s'inscrit dans le prolongement de la coopération historique entre la France et les Etats-Unis sur la mesure du niveau des océans et des eaux continentales avec une résolution et une couverture inégalées à ce jour. Elle permet de comprendre de petits phénomènes de circulation dans les échanges entre l'eau et l'atmosphère. Le lancement de Swot est prévu en 2020.

### SMOS

#### Mesurer la salinité de surface des océans et de l'humidité

Smos est une mission dédiée à la mesure de la salinité de surface des océans et de l'humidité de surface des terres émergées : deux clés pour la compréhension des processus d'échanges avec l'atmosphère en particulier et du cycle de l'eau en général.

Les variations de salinité sont aussi l'un des mécanismes principaux réglant la circulation globale des océans et le comportement des grands courants océaniques.

### CFOSAT

#### Mesurer les vagues (mission complémentaire de Swot)

Mené en coopération entre la France et la Chine pour la mesure des vagues, la mission CFosat (lancement prévu en 2018) est un élément important du suivi du changement climatique pour deux raisons. D'une part, la faculté des océans d'absorber une très grande partie de l'excédent de chaleur générée puis de le stocker en profondeur est directement liée aux vagues, plus la mer est agitée plus ces échanges sont forts. D'autre part, les phénomènes de surcôte entraînent des inondations des zones côtières comme l'ont montré les événements dramatiques de Sandy à New York (USA) et Xynthia en Charente (France).

## SARAL

### Mesurer le niveau des mers

Saral est une mission d'altimétrie franco-indienne lancée en 2013. C'est l'un des quatre satellites nécessaires (avec Jason, Sentinel, et Envisat) pour suivre les phénomènes à moyenne échelle. Saral-Altika est un satellite d'observation chargé d'une mission d'altimétrie satellitaire. Il mesure le niveau des mers pour étudier la circulation océanique après le satellite Jason-1. Son instrument *AltiKa* est un altimètre-radiomètre qui fonctionne en bande Ka. Il constitue une première en altimétrie satellitaire et devrait fournir des informations beaucoup plus précises que les instruments qui l'ont précédé. C'est un élément essentiel du système d'observation des océans utilisé par l'océanographie opérationnelle et la météorologie pour réaliser des prévisions océaniques et climatiques à moyen terme.

### Détection du réchauffement global

La température de la mer est l'un des indicateurs nécessitant des capteurs spatiaux comme l'instrument AVHRR. AVHRR est présent à bord des satellites météorologiques opérationnels américains et européens en orbite polaire. Dans le cadre du programme européen Copernicus, il est complété par d'autres capteurs à bord d'Envisat et bientôt de Sentinel-3. La température dans l'épaisseur de l'atmosphère peut être analysée grâce à de longues séries de données d'instruments passifs micro-onde (MSU, AMSU) et infra-rouge (HIRS, AIRS, IASI) embarqués sur les mêmes satellites météorologiques.

Ces données ont complété efficacement les longues séries d'observation en surface de la température.

### Glace et neige

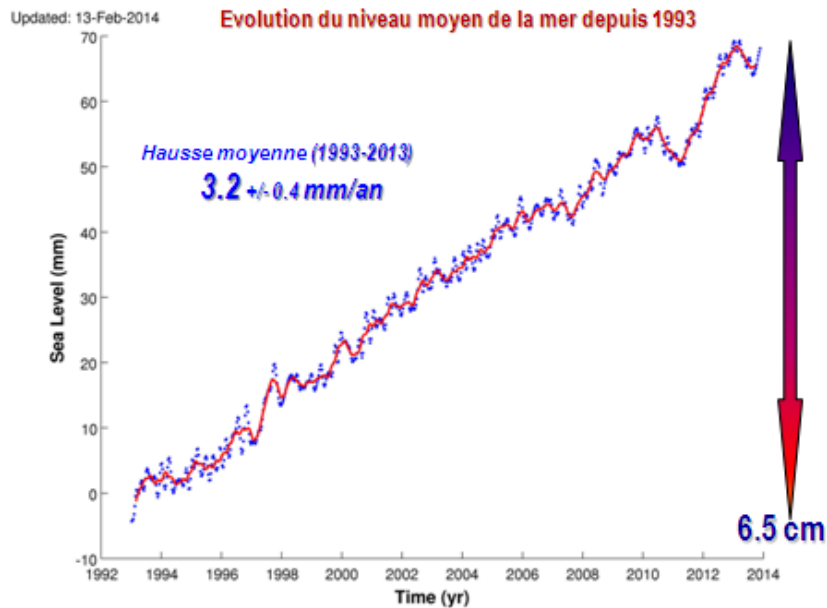
Les régions polaires sont particulièrement vulnérables à l'évolution du climat. La glace de mer (banquise) est surveillée principalement par des instruments micro-onde (longues séries de l'instrument américain SSM-I, radars à synthèse d'ouverture sur Envisat, Radarsat, etc.). Cela permet de mettre en évidence les fontes spectaculaires de la banquise arctique en été. Les pertes de masse des calottes polaires peuvent être estimées par les mesures altimétriques (ERS, Envisat, Icesat, Cryosat) ou par la mesure précise de la gravité (Grace).

L'évolution des glaciers peut être suivie par un instrument comme Aster (sur le satellite américain Terra) et par les images des satellites français de la série Spot. Le CNES a d'ailleurs contribué à l'Année Polaire Internationale par la fourniture d'images Spot. Les Sentinel 1 et 2, dans le cadre de Copernicus, permettront de pérenniser la production des images des radars à synthèse d'ouverture et des images dans le visible respectivement.

### Niveau de la mer

L'élévation du niveau moyen des mers est l'un des indicateurs les plus évidents du réchauffement climatique. Sa mesure est assurée par la série de satellites embarquant des radars altimétriques : d'abord la mission Topex-Poseidon (coopération NASA/CNES) puis la série des Jason 1 et 2, bientôt Jason 3, avec de nouveaux partenaires (Eumetsat, NOAA). Une première série entièrement opérationnelle Jason-CS (Continuité de Service) devrait être opérationnelle à l'horizon 2020, dans le cadre du programme européen Copernicus, en coopération avec la NOAA\* et la NASA, et Eumetsat.

*\*National Oceanic and Atmospheric Administration(USA)*



## Aérosols et Nuages

Les aérosols (particules solides en suspension) et les nuages jouent un rôle majeur dans le bilan radiatif de la Terre et dans le cycle de l'eau. Plusieurs missions spatiales ont été consacrées à ces sujets, dont l'A-Train (*Afternoon Train*) ; c'est un ensemble d'une demi-douzaine de satellites en formation dans un intervalle de 30 secondes à 2 minutes, issu de la collaboration de la NASA, du CNES et de la JAXA. Deux de ces satellites sont équipés d'instruments actifs (radar nuages *CloudSat* de la NASA, lidar nuages *Calipso* de la NASA et du CNES). Ils permettent d'étudier les propriétés microphysiques et radiatives des nuages et des aérosols et de vérifier le fonctionnement des modèles de climat. C'est actuellement la principale source d'incertitude de ces modèles, déterminants pour la construction de scénarios du changement climatique. La mission Earthcare de l'ESA permettra d'assurer une suite sur la période 2018-2022.

## Gaz à effet de serre

Le dernier rapport du GIEC a clairement établi un lien de cause à effet entre le réchauffement climatique observé et l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre de longue durée ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$ ) dans l'atmosphère d'une part, et, d'autre part, le fait que la poursuite des émissions de gaz à effet de serre au rythme actuel ou à un rythme supérieur provoquerait un réchauffement supplémentaire qui entraînerait de nombreuses modifications du système climatique mondial au XXI<sup>e</sup> siècle, sans doute plus importantes que celles observées au XX<sup>e</sup> siècle. Aujourd'hui, l'estimation des flux de carbone au niveau mondial repose à la fois sur les relevés nationaux d'émissions, sur quelques réseaux de mesures scientifiques effectués au sol ou depuis des avions ainsi que sur des modèles globaux du système Terre. Les premières mesures depuis l'espace, qui ont l'avantage d'être globales, denses et homogènes, ont été obtenues en 2009 par le satellite *GOSAT* de la JAXA ; la relève est assurée par le satellite *OCO-2* de la NASA lancé en 2014. L'Europe étudie plusieurs concepts (*Microcarb/CNES*, *Carbonsat/ESA*) pour la mesure du  $\text{CO}_2$  depuis l'espace mais aucune mission n'est encore décidée. Avec le projet *Merlin*, la France et l'Allemagne devrait offrir les premières mesures de méthane par lidar depuis l'espace d'ici 2020.