

## Satellites, océan et climat

Conférence de Jean-Louis Fellous

Directeur exécutif du Comité Mondial de la Recherche Spatiale  
COSPAR, Paris



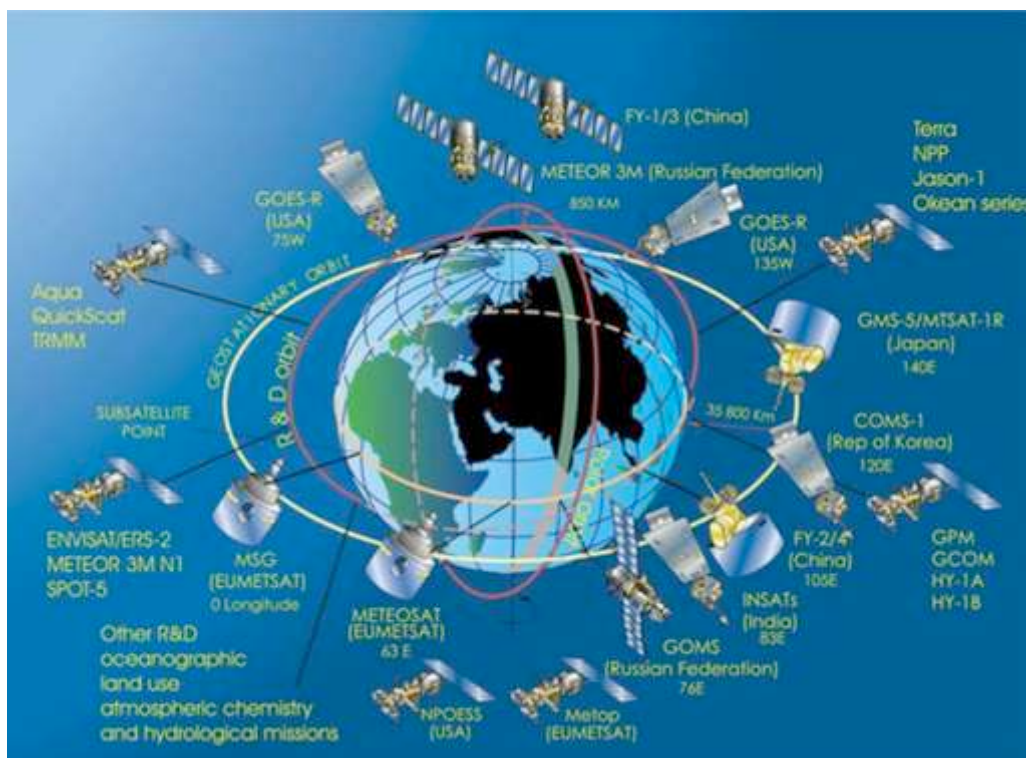
Jean-Louis Fellous

L'année 2007 a été l'occasion d'évaluer le niveau actuel de connaissance des évolutions climatiques et de stimuler la prise de conscience de l'influence grandissante de l'activité humaine dans ces évolutions. L'attribution du Prix Nobel de la Paix au GIEC, groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, et à l'ancien Vice-président des USA, Al Gore, pour ses démarches de sensibilisation aux risques environnementaux induits par l'homme, en constitue un point d'orgue.

La célébration des 50 ans de la conquête spatiale est un autre temps fort de cette année qui rappelle combien l'ère spatiale a permis de développer la connaissance des phénomènes qui régissent les équilibres physiques de notre planète et particulièrement le climat avec les nombreux facteurs sensibles qui s'y rattachent.

Le passage du stade scientifique au stade politique, opération difficile, a donné des résultats positifs en 2007. Le GIEC a produit son 4<sup>ème</sup> rapport d'évaluation basé sur les travaux et consultations de quelques 2600 chercheurs. Un « résumé pour les décideurs » a été adopté et il a sérieusement contribué à l'obtention, lors de la conférence intergouvernementale de Bali, d'un accord sur le contenu et le calendrier de ce qui prendra la suite du protocole de Kyoto.

Comme l'a suggéré un chercheur, la Terre entre dans une nouvelle ère, « l'anthropocène », ère où le climat de la planète n'est plus seulement la conjugaison complexe de nombreux phénomènes naturels mais la résultante de cette conjugaison et des apports tangibles de l'activité humaine énergétique, industrielle, agricole et de transports.



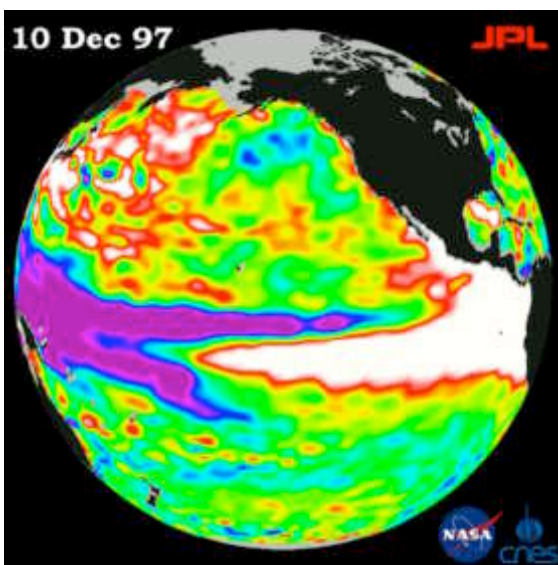
▲ L'apport de l'ère spatiale à la météorologie et à la climatologie

## L'apport de l'ère spatiale -

Depuis le lancement de Spoutnik 1 en octobre 1957 bien des applications spatiales ont pris place au nombre desquelles l'observation de la Terre a connu un essor important. La météorologie, l'océanographie et diverses contributions à l'étude et la prévision du climat ont suscité des missions satellitaires dont les fondements et l'interprétation reposent sur des bases scientifiques. De TIROS 1, lancé par les USA en 1960, à METOP A lancé par l'Europe en 2005, la capacité de sonder le couvert terrestre (atmosphère, océan et terres émergées) a intensément crû en résolution spatiale et spectrale ainsi qu'en fréquence de revisite. Sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale, une veille météorologique permanente a été établie ; les satellites européens Météosat (9 exemplaires lancés en 30 ans) y tiennent une place de qualité.

Une panoplie d'instruments spécialisés a peu à peu été développée faisant appel à des technologies optiques ou micro-ondes et agissant soit sous forme de capteurs passifs (imageurs et radiomètres) soit sous forme de sondeurs actifs de type radar ou lidar. Les demandes de données scientifiques répondent à deux objectifs opérationnels conjugués : approcher les phénomènes observables avec plus d'acuité, et pérenniser l'acquisition des données primordiales sur le long terme. A l'échelle globale, celle des satellites, le relevé des variations climatiques et la surveillance des phénomènes de grande intensité apportent des données utilisées par la prévision météorologique, à court et moyen termes. Ces données, et d'autres recueillies in situ, constituent des paramètres témoins des évolutions climatiques.

Ainsi, la température de surface des océans est l'un des paramètres majeurs constamment mesuré par les satellites. Compte tenu de l'étendue considérable des océans notre planète bleue est qualifiable de « planète Océan ». Il existe un lien physique particulièrement fort entre l'état océanique et l'état climatique. L'océanographie spatiale a débuté en 1978 avec la mission Seasat (USA) qui a apporté les premiers relevés globaux systématiques (température de surface associée à la hauteur des mers, vitesse et direction des vents, étendue des glaces, typologie des vagues etc.). Depuis, notamment grâce aux missions franco-américaines (CNES-NASA) Topex-Poséidon (à partir de 1992) et Jason 1 (à partir de 2002), l'altimétrie océanographique (précision centimétrique) accède à la topographie dynamique des océans dont on déduit les courants à grande échelle et leurs variations. D'autres missions, parmi lesquelles ERS1, ER2 et Envisat (Europe ESA), ont introduit la surveillance des glaces et de l'état superficiel des mers et océans y compris leur contenu minéral ou biologique (richesse en phytoplancton, pollution, salinité, dispersion des effluents fluviaux etc.). Les phénomènes climatiques majeurs dus au couplage des océans et de l'atmosphère sont suivis de près par les satellites et leur déclenchement devient prévisible. C'est le cas de l'oscillation du Pacifique Sud connue sous le nom de phénomène « El Niño - La Niña » qui peut, par périodes, bouleverser le climat des côtes andines et créer des sécheresses intenses dans l'est de l'Australie.



▲ Paroxysme El Niño 1997/98 - Les eaux chaudes de surface ont basculé vers les côtes orientales de l'Amérique (données TOPEX-Poséidon)



▲ Panaches symptomatiques de l'efflorescence d'algues dans le Golfe de Gascogne (données Envisat-Meris de mai 2004)

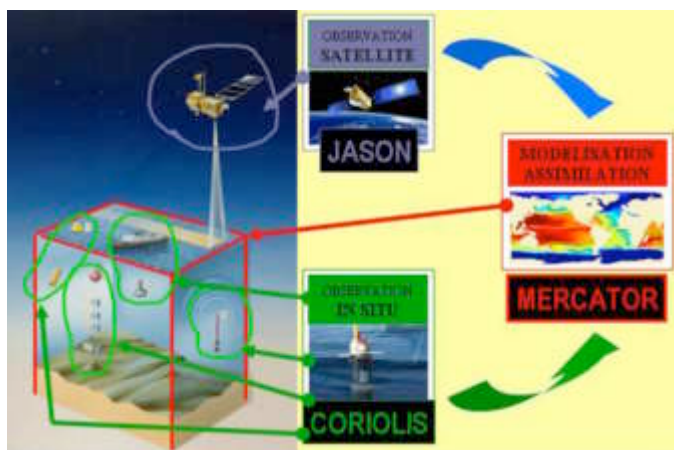
### La conjonction des missions spatiales et des missions in situ -

La demande en matière de données géophysiques spatiotemporelles afin d'établir et d'entretenir les modèles dynamiques atmosphériques et océaniques est croissante. La diversité des mesures, leur fréquence, l'accès libre aux mesures et la rapidité d'acquisition de données fraîches exploitables, telles sont les requêtes des scientifiques pour améliorer les modèles et passer au stade prévisionniste. De cette façon, la communauté scientifique favorise la coopération internationale pour l'accès ouvert aux mesures de chaque mission tout en suscitant l'émulation des équipes de chercheurs. La coordination internationale des missions spatiales d'observation est devenue une nécessité reconnue et les principales agences spatiales se réunissent en comité (CEOS) pour concerter leurs projets respectifs et tenter de maintenir la permanence de collecte des données. Au-dessus et avec l'appui des Nations Unies il existe une volonté d'établir un système global et coordonné pour l'observation scientifique de la Terre (GEOSS).

Les données spatiales ne font pas tout et se complètent avec les données recueillies dans le milieu atmosphérique, marin et terrestre. A cet égard, l'océan qui est le grand régulateur du climat ne peut pas être modélisé avec les seules données des satellites car elles ne peuvent attester de l'état océanique en profondeur. Un grand projet d'océanographie complémentaire a ainsi été décidé et mis en place en vue de la dissémination d'automates marins, dénommés flotteurs-profileurs, capables de plonger à différentes profondeurs pour y effectuer des mesures, les mémoriser puis, après retour en surface, les retransmettre via des liaisons satellitaires. L'objectif 2007 de 3000 profileurs répartis dans le réseau ARGO a été atteint et la dissémination se poursuit pour satisfaire l'objectif global de 5000 unités actives. Le flux des données spatiales joint au flux des données marines intègre un modèle numérique d'assimilation qui reproduit l'état dynamique tridimensionnel des océans et qui évolue pour devenir un modèle prévisionnel. L'océanographie opérationnelle devient réalité, comme l'est depuis longtemps la météorologie, avec la publication périodique de bulletins.

### L'océan régulateur du climat et témoin des évolutions -

L'énorme réservoir thermique de l'océan associé à la circulation des principaux courants est le grand facteur régulateur du climat avec des échelles temporelles importantes que l'on retrouve dans les cycles successifs de glaciation et de réchauffement du climat, eux-mêmes en correspondance avec les variations périodiques de l'orbite et de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre.



▲ Combinaison des données d'altimétrie JASON et des données marines CORIOLIS au profit du modèle océanique MERCATOR

**L'océan régule le climat**

- L'inertie thermique de l'océan en fait le grand régulateur du climat
  - L'océan conserve pendant des centaines d'années la trace des perturbations qui l'affectent
- La circulation océanique forme un « tapis roulant » qui boucle son circuit en 1000 ans.
- L'observation continue de l'océan est indispensable pour la surveillance et la prévision de l'évolution du climat

The slide includes a map of the world's oceans with a white line tracing the path of ocean circulation.

▲ La circulation océanique associe eaux de surface et eaux profondes par les effets (thermohalins) de variation de densité dus à la température et/ou à la salinité des eaux.

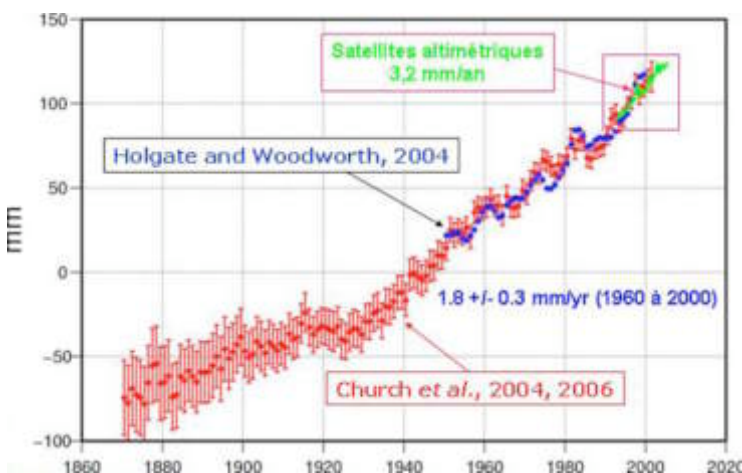
L'observation des diverses glaces (continent antarctique, banquises polaires, grands glaciers) reflète le cycle climatique annuel et témoigne des évolutions climatiques, y compris l'évolution de la composition atmosphérique depuis plusieurs centaines de milliers d'années. On peut de la sorte recomposer une histoire du climat et la relier avec les apports scientifiques, ceux systématisés à partir du XIXème siècle et ceux de plus en plus abondants acquis dans l'ère spatiale. La



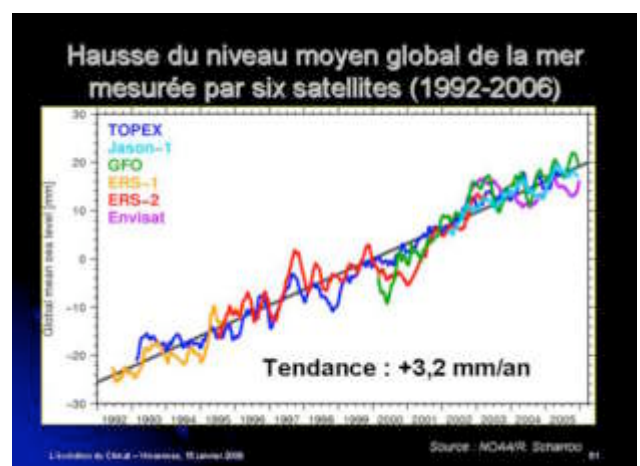
préoccupation concernant le changement climatique forcé par l'activité humaine (forçage anthropique) se réfère à cet historique pour établir du mieux possible ce qui appartient à la variabilité naturelle du climat et ce qui relève des effets induits par l'homme dans l'âge industriel et énergétique contemporain, couplé à l'énorme croissance démographique.

**Élévation de température due aux gaz à effet de serre et son observation par le niveau des mers -**

Le 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC établit avec un haut degré de confiance ( 90%) qu'un changement climatique est en cours et que le réchauffement des dernières décennies démontre une amplification nette due à l'activité humaine qui, parmi ses divers effets, a comme composante principale l'élévation du taux de certains gaz à effet de serre dans l'atmosphère et notamment le gaz carbonique CO2 suivi par le méthane CH4. L'effet de serre consiste en ce que ces gaz retiennent une partie importante du rayonnement infrarouge émis de la Terre vers l'espace et qu'en conséquence l'équilibre radiatif global de la Terre avec l'espace s'établit sur un niveau de température moyen plus élevé. Nous bénéficions de cet effet car sans ces gaz, dont le plus important quantitativement reste de très loin la vapeur d'eau naturelle, l'équilibre radiatif planétaire s'établirait avec une température moyenne de -18°C. L'attente du public et des décideurs auprès des scientifiques consiste naturellement en ce qu'ils élaborent un diagnostic aussi exact que possible des paramètres agissant sur le climat et qu'ils en dérivent un modèle prévisionnel concordant avec l'état présent et les observations à venir. C'est là un enjeu crucial et maintenant reconnu tendant pour l'avenir de l'humanité à faire infléchir les politiques économiques et les démarches sociétales vers un double objectif : atténuer la tendance au réchauffement et s'adapter aux conditions résultantes prévisibles.



Restitution de l'historique du niveau moyen de la mer et raccordement avec les données d'altimétrie spatiale



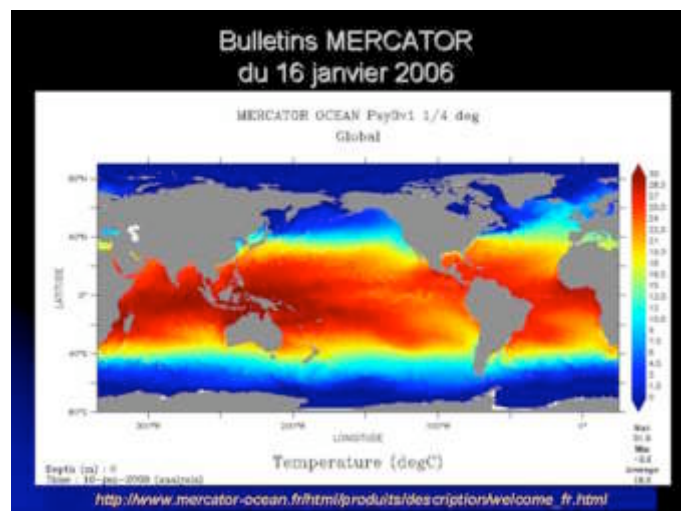
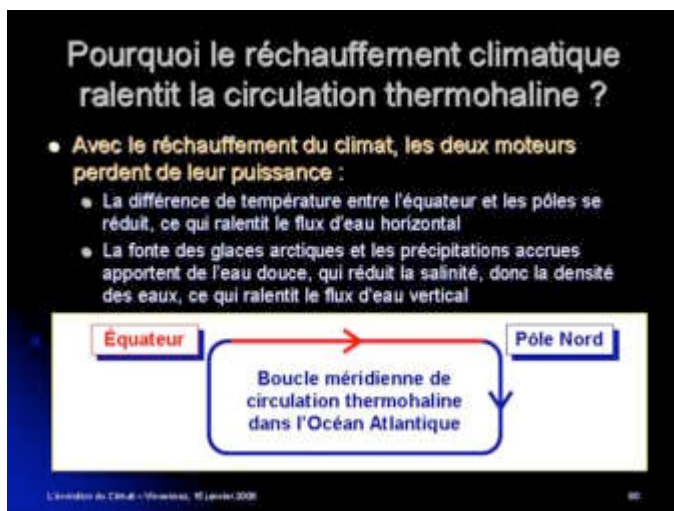
La tendance actuelle de l'élévation telle qu'établie à partir des mesures de six missions spatiales

Il existe un constat scientifiquement indubitable qui est l'élévation du taux de CO2 dans l'atmosphère, lequel est passé d'un niveau de 280 ppm (partie par million) au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle à la valeur actuelle de 380 ppm. C'est l'apport de la civilisation industrielle et aussi des nombreuses pratiques de gestion des sols conduisant à la déforestation. Une part du CO2 émis est réabsorbée dans le cycle du carbone qui s'étale sur une trentaine d'années (végétation et biotope, absorption océanique) mais l'excédent s'accumule dans l'atmosphère augmentant ainsi l'effet de serre. Une bonne corrélation est établie entre l'élévation du taux de CO2 et la montée du niveau des océans relevée par les stations côtières marégraphes et maintenant par l'altimétrie spatiale sur la globalité des océans. L'élévation moyenne des températures provoque la dilatation du volume d'eau océanique, donc du niveau moyen des mers. Cet effet s'additionne avec l'apport d'eau douce résultant de la fonte globale du volume des glaciers.

L'analyse des relevés permet de constater une accélération du phénomène ; alors que la hausse annuelle moyenne du niveau des mers était de 1 mm par an dans la période de 1860 à 1940, elle est maintenant de 3,2 mm par an. Le phénomène n'a pas encore atteint son équilibre et de plus, même si l'apport anthropique en restait au niveau actuel (soit annuellement environ 7 milliards de tonnes équivalent Carbone), la température moyenne continuerait de croître ; c'est pourquoi la

modification des pratiques humaines dans un meilleur sens, celui qualifié de durable, ne peut aboutir qu'à une modération du phénomène de réchauffement et non pas à son arrêt dans le siècle à venir.

Des modèles prévisionnistes ont été élaborés par plusieurs équipes scientifiques. Ces modèles sont ainsi mis en concurrence objective et confrontés aux évolutions mesurées. Le recul temporel n'est pas encore suffisant pour fixer quel est le meilleur modèle. En outre, il faut garder une très grande modestie tant il est ardu de modéliser des systèmes aussi complexes que le climat et le bilan radiatif de la Terre dont toutes les lois ne sont pas linéaires et dont beaucoup d'effets relèvent d'une « mathématique chaotique », c'est-à-dire, pour simplifier, que, en réponse à une perturbation donnée, le système complexe peut engendrer une multiplicité de solutions possibles. On comprend de la sorte que les modèles divergent autant (facteur 3) sur l'élévation de température moyenne à l'horizon 2050 - 2100. Il n'en est pas moins patent que tous les modèles concordent sur la très forte élévation des températures dans les régions arctiques ce que confirment les diverses observations in situ de ces régions (températures moyennes, épaisseur et étendue saisonnière de la banquise, dégel du permafrost de la toundra, évolution du biotope).



📍 Perturbations des grands courants océaniques (ici le Gulf Stream) par l'effet du réchauffement climatique

📍 La température de surface des océans délivrée par le bulletin MERCATOR. L'effet du Gulf Stream est très visible.

Les conséquences du réchauffement global sont largement débattues et médiatisées avec un long cortège de risques : engloutissement de territoires insulaires et côtiers, renforcement de phénomènes extrêmes tels que inondations, sécheresses, cyclones, tornades. Les conséquences humaines et économiques pourront être redoutables dans certaines régions déjà sensibles.; si le niveau d'émission de CO2 était stabilisé au niveau actuel le taux de CO2 atmosphérique atteindrait 550 ppm (le double de ce qu'il était avant l'ère industrielle) et l'élévation de température moyenne serait dans ce cas de 2°C, cette élévation étant bien entendu hétérogène selon les latitudes. Le risque existe d'un emballement de la machine climatique.

Concernant l'océan, hormis l'élévation du niveau des mers déjà décrit, la crainte porte sur deux effets de long terme : d'une part le ralentissement des grands courants océaniques dont le Gulf Stream, et d'autre part la moindre absorption du CO2 par les eaux océaniques froides ajoutée à la désorption du CO2 par les eaux océaniques chaudes (>28°C).

### Les missions satellitaires et leurs perspectives -

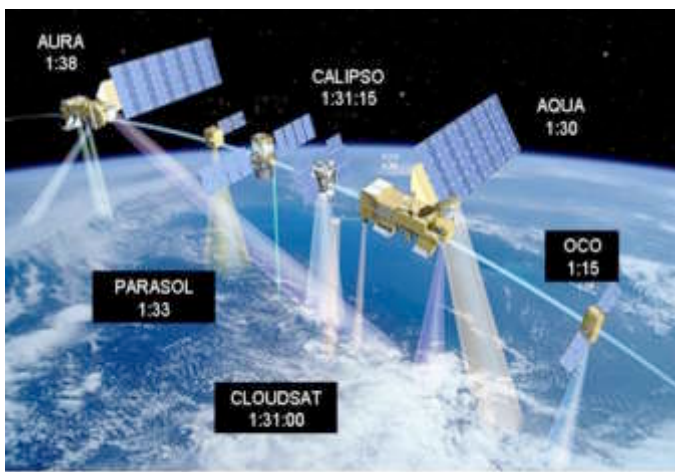
Comme il est d'usage, plus la connaissance progresse plus elle pose de questions nouvelles ou révèle des aspects imprévus qu'il faut tenter d'expliquer. Le domaine climatique ne peut y échapper tant il est vaste et recèle de paramètres physiques influents. La demande scientifique est forte, pousse à la constitution d'un système global d'observation envisagé comme un système de systèmes coopératifs avec de nombreux « produits » de données accessibles.

L'Europe a défini, pour son propre effort, une approche rationnelle qui se résume en trois axes d'action complémentaires :

- poursuivre avec les agences spatiales des missions satellitaires innovantes et exploratrices (nouveaux thèmes - nouveaux instruments), à l'exemple des satellites de type Earth Explorer (ESA) ou des minisatellites du CNES ;
- assurer des missions opérationnelles continues en collaboration entre la communauté spatiale et les communautés utilisatrices existantes (météorologie, océanographie), ajoutant aux missions actuelles de EUMETSAT de nouvelles missions baptisées Sentinelles avec un financement mixte issu des membres de l'ESA et de l'Union Européenne. La poursuite de missions océanographiques s'effectue dans ce cadre avec la mission Jason 2 (EUMETSAT-CNES) puis Sentinelles 3 ;
- appuyer l'essor de nouvelles utilisations à but environnemental en investissant dans le domaine des services applicatifs bénéficiant de l'apport des missions spatiales. C'est l'objectif recherché par le programme GMES (Global Monitoring of Environment & Security) soutenu par les fonds du Programme Cadre de Recherche (PCRD) de l'Union Européenne.

Dans le cadre international, la coopération s'établit autour de thèmes et de nécessités, les thèmes ayant une dominante sur la physique du milieu observé et les nécessités intervenant soit par l'urgence (surveillance d'évènements exceptionnels) soit par des carences opérationnelles (fin de mission ou défaillance en orbite) ou programmatiques (conjugaisons budgétaires).

Il existe de bons exemples de cette coopération. Les thèmes de la météorologie spatiale comme de l'altimétrie océanographique en constituent des précurseurs. Le thème climatique est maintenant servi par une formation de satellites positionnés sur la même orbite, à faible intervalle temporel, de façon à conjuguer (corrélation spatiotemporelle) toutes les mesures recueillies sur un même site survolé ; c'est la formation « The-A-Train », dont le titre s'inspire d'une célèbre composition rythmique de jazz, opérationnellement coordonnée par la NASA et le CNES.



**Formation A- TRAIN en orbite**

### les Sentinelles de l'ESA

	<b>Sentinelle 1 – Radar à synthèse d'ouverture (SAR)</b> Imagerie tous temps, jour et nuit, interférométrie
	<b>Sentinelle 2 – Imagerie optique super-spectrale</b> Continuité des données Landsat, SPOT & VEGETATION
	<b>Sentinelle 3 – Surveillance océanique</b> Imagerie de la « couleur de la mer », température et topographie de la surface marine
	<b>Sentinelle 4 – Surveillance atmosphérique en orbite GEO</b> Composition atmosphérique, pollution transfrontalière
	<b>Sentinelle 5 – Surveillance atmosphérique en orbite LEO</b> Composition atmosphérique

▲ Cinq et prochainement six satellites se suivent sur la même orbite à quelques minutes les uns des autres afin de pouvoir fusionner les données des sites observés.

▲ Le développement des satellites SENTINELLES va débuter dans le cadre du programme Observation de la Terre de l'ESA. La mission Sentinelles 3 sera dédiée à la surveillance océanique.

Dans le domaine de l'urgence pour les cas d'évènements naturels ou d'accidents de portée catastrophique, un système de mobilisation rapide des moyens d'observation spatiaux a été établi, sur une initiative européenne connue sous le nom de « La Charte - Espace et catastrophes majeures », et s'appuie sur les moyens de 6 agences spatiales. Elle répond à un souhait des Nations Unies et l'activation du système peut être demandé par chacun de ses Etats Membres. En 2007, 43 activations ont eu lieu dont la moitié pour des cas d'inondations catastrophiques, le reste se partageant entre cyclones, éruptions volcaniques, tremblements de terre, incendies et accidents maritimes avec déversement d'hydrocarbures.

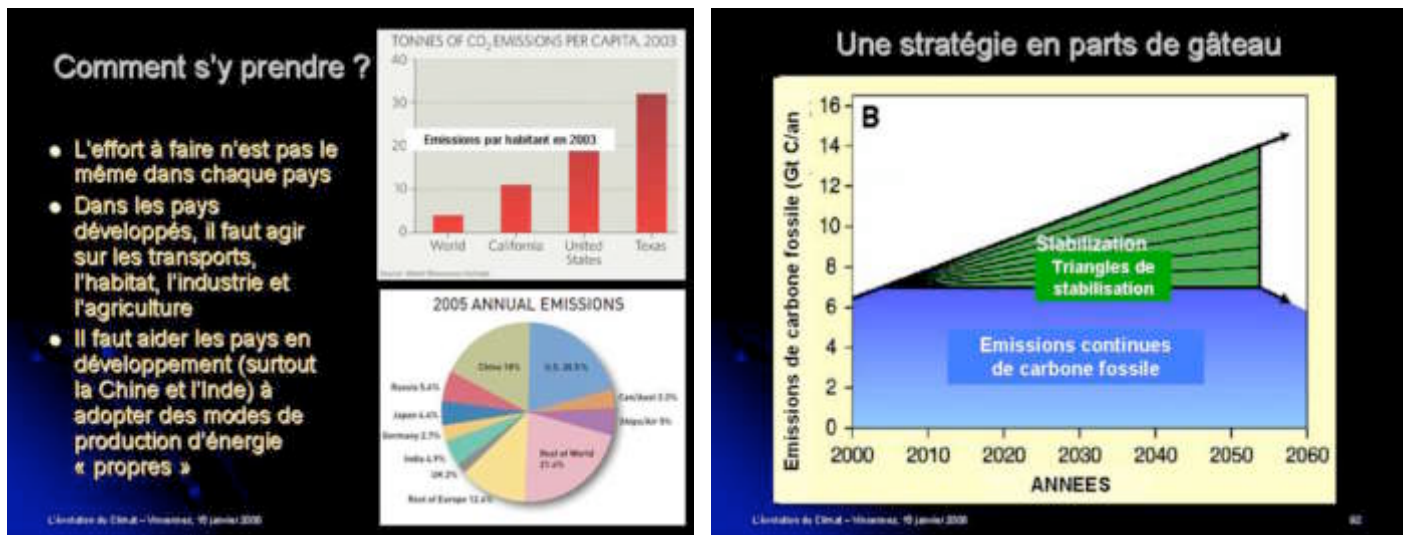


## Les principales recommandations dérivées des travaux du GIEC -

Même globalisée l'économie mondiale n'implique pas que sa gouvernance soit harmonisée au mieux de la santé de la planète tant sur le plan climatique que sur le plan de la biodiversité naturelle. Néanmoins les travaux scientifiques et les données observationnelles doivent être connus et portés aux plus hauts niveaux politiques afin d'aider à prendre des décisions qui en tirent partie dans le meilleur sens possible. La gestion énergétique et l'utilisation des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz hydrocarbonés) constituent évidemment les enjeux les plus forts en même temps que les plus sensibles du XXIème siècle, même si, bien entendu, ils ne sont pas les seuls.

Sans comptabiliser le coût des événements catastrophiques, un économiste, prenant en compte ce qu'il faudrait mettre en place comme mesures drastiques pour en rester au taux actuel d'émission de carbone issu de l'activité humaine, a trouvé un coût de 1% du Produit Intérieur Brut (PIB) mondial.

A cet égard on doit mettre en regard les scénarios énergétiques (ceux que l'on souhaiterait régulés) et les prévisions correspondantes du réchauffement climatique induit en fonction de ces divers scénarios.



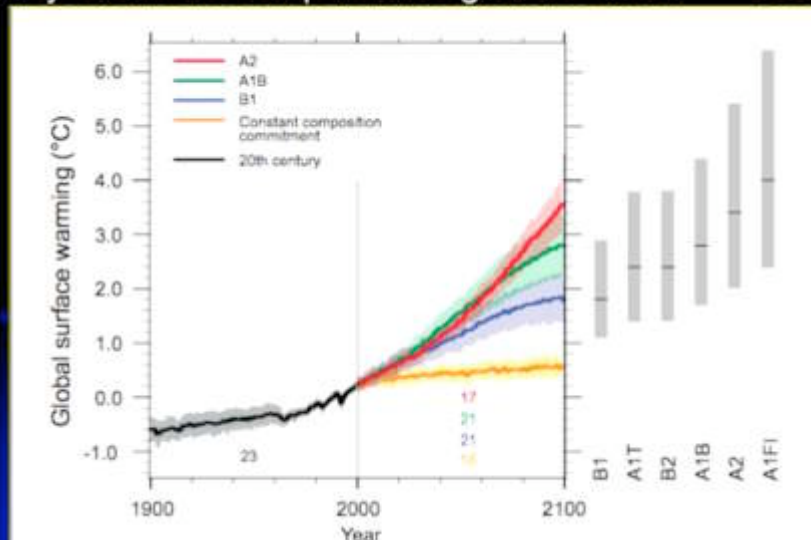
▲ *Le panorama géo-économique des émissions de CO<sub>2</sub> en 2005*

▲ *Stabiliser l'émission au niveau actuel suppose un gros effort*

Ne rien entreprendre aurait un coût bien supérieur par ses conséquences et entraînerait une hausse encore plus grande et durable des températures. Une stratégie, définie par une série de couches complémentaires (ou triangles) de mesures de stabilisation des émissions de CO<sub>2</sub>, est proposée avant que la raréfaction et l'épuisement des ressources fossiles n'intervienne dans un siècle ou un peu plus selon la modération de la dépense énergétique.

Une des clés économiques consisterait pour les pays développés à diminuer considérablement le recours aux énergies fossiles de Carbone en diminuant le besoin et en utilisant les énergies renouvelables (solaire, éolien, géothermique, etc), et pour les pays en développement à les aider à acquérir des pratiques et des technologies de production du meilleur stade environnemental. Obtenir une meilleure séquestration du carbone en améliorant et respectant le couvert végétatif des continents fait partie de la série des mesures envisagées.

## Projections des températures globales au 21<sup>ème</sup> siècle



▀ L'élévation de température globale varie selon les effets de modulation de l'utilisation des ressources fossiles en carbone prévus dans différents scénarios.

La limite basse serait celle de la stabilisation immédiate au niveau actuel, scénario hypothétique.

Il est probable que la réalité corresponde à une évolution de 2°C sur l'ensemble du XXI<sup>e</sup> siècle, voire davantage si les mesures de modulation tardaient à venir pendant l'essor des nouvelles puissances économiques Chine, Inde, Brésil.

Dans ce contexte la poursuite des programmes d'observation de la Terre, dont les programmes spatiaux représentent une part majeure, demeure impérative. Avec les perfectionnements envisagés concernant la mesure du contenu atmosphérique il deviendra possible de mieux suivre les sources d'émission et la circulation des aérosols, et partant de vérifier l'efficacité locale des mesures d'amélioration proposées comme c'est déjà le cas pour la couche d'ozone protectrice présente dans la stratosphère. La surveillance des océans doit être permanente car elle fournit la vérification globale de l'évolution et prévient de l'imminence et de l'amplitude des grands phénomènes climatiques ; les modèles de la dynamique océanique seront perfectionnés et ils contribueront très significativement à l'amélioration des modèles climatologiques.

*Jean-Louis Fellous*

✓ La conférence de Jean-Louis Fellous a eu lieu le 22 janvier 2008 à Cannes, auditorium Spacecamp Thales-Alenia Space

Sources : Diverses sources dont les résultats des travaux GIEC et de nombreuses données issues des agences spécialisées (météorologiques, océanographiques et spatiales)

Pour en savoir plus sur les thèmes abordés...

Des livres :

- J.-L. Fellous : *Avis de tempêtes - La nouvelle donne climatique* (Odile Jacob, 2003)
- J.-L. Fellous et Catherine Gautier : *Comprendre le changement climatique* (Odile Jacob, 2007)
- Sylvie Joussaume : *Climat d'hier à demain* (CNRS-CEA Science au Présent, 1993)
- José Achache : *Les sentinelles de la Terre* (Hachette - littératures, 2004)

Des sites Internet :

- <http://cosparhq.cnes.fr/>
- <http://www.cnes.fr>
- <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/index.htm>
- <http://www.meteofrance.com/FR/climat/index.jsp>
- <http://www.unep.org>
- <http://www.esa.int>
- <http://www.eumetsat.int>
- <http://www.nasa.gov>
- <http://www.jpl.nasa.gov>
- <http://www.noaa.gov>
- <http://www.igbp.kva.se>



Ont contribué à la réalisation de cette Lettre : Jean-Louis Fellous, Jean-Jacques Dechezelles, Guy Lebègue et Jean Lizon-Tati