

Scruter l'océan pour comprendre le changement climatique



© Ikerz Smvika

La glace estivale de mer pourrait devenir un spectacle bien plus rare

L'Année internationale de la physique entrera également dans le livre des records pour ses extrêmes climatiques. L'année 2005 a connu le plus grand nombre d'ouragans jamais enregistré dans le secteur Atlantique – dont l'un a battu le record des basses pressions de surface – qui ont laissé des milliers de morts dans leur sillage en Amérique du Nord et en Amérique centrale. Dans l'océan Arctique, la couverture de glace de mer de l'été boréal a été particulièrement mince et, dans l'état indien du Maharashtra les précipitations ont atteint des records d'abondance pendant la mousson. La forêt amazonienne, source du fleuve ayant le plus fort débit du monde, connaît sa pire sécheresse depuis les premières mesures jamais enregistrées. Les cinq années les plus chaudes du palmarès sont actuellement 1998, 2002, 2003, 2004 et 2005. Tous ces événements climatiques ont un lien avec l'océan.

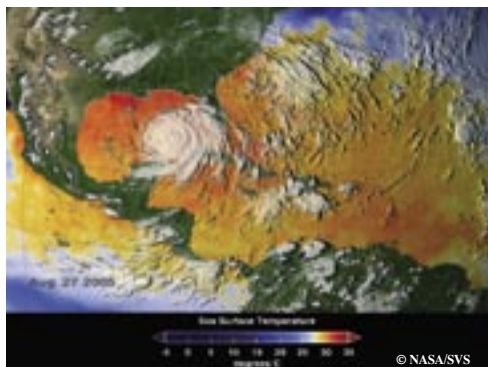
Il est scientifiquement impossible de lier l'un ou l'autre des événements extrêmes à l'évolution du climat mondial, mais la tendance actuelle confirme le fait qu'un changement planétaire est à l'œuvre. Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec), chargé d'évaluer les recherches sur le climat, a déclaré en 2001 que « le bilan des preuves » suggérait que les activités humaines avaient une influence sur le climat. Des études scientifiques récentes, qui seront incorporées au prochain rapport du Groupe en 2007 (voir *dos de couverture*), renforcent cette certitude, et ses preuves essentielles proviennent des océans.

Les océans couvrent plus de 70 % de la surface du globe. Élément prédominant du système climatique, ils entrent en interaction avec l'atmosphère et la terre. Dans le système climatique, les océans ont la particularité d'avoir une grande capacité d'emmagasiner de la chaleur : comparée à l'air, l'eau de mer absorbe quatre fois plus d'énergie par kilogramme pour se réchauffer d'1 degré Celsius, et l'eau est environ 800 fois plus dense que l'air à la surface. L'énergie thermique contenue dans les 3 m supérieurs des océans équivaut donc à celle que contient la totalité de l'atmosphère. C'est pourquoi les océans sont une voie essentielle du transport de la chaleur dans le système climatique.

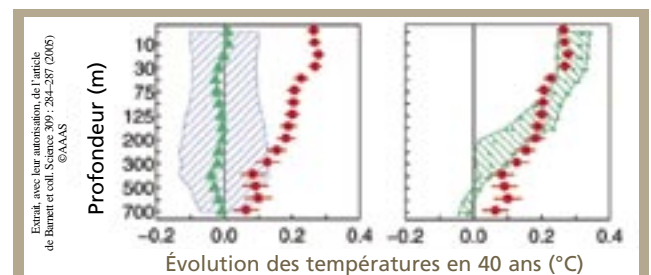
L'observation de l'océan subsuperficiel n'a sérieusement débuté qu'après la Seconde guerre mondiale, en se limitant à des zones très fréquentées par la navigation, comme l'Atlantique Nord. Mais son histoire est déjà assez longue pour permettre de calculer les tendances des températures subsuperficielles sur de vastes étendues d'océans, avec un degré raisonnable de confiance scientifique.

L'océan subsuperficiel est un endroit approprié pour rechercher des preuves irréfutables du changement climatique induit par les activités humaines. Un changement du forçage du système climatique, comme celui qui est dû aux gaz à effet de serre, oblige l'ensemble du système climatique à trouver un nouvel équilibre, lorsqu'une Terre plus chaude émet vers l'espace un rayonnement thermique plus important, à titre de compensation. Les océans sont les plus grands récepteurs de cet excès de chaleur. Du fait que les océans sont moins « bruyants » sous la surface qu'en surface, qui est soumise au temps qu'il fait et aux

Les eaux chaudes océaniques alimentent les ouragans ; or, les eaux étaient anormalement chaudes en 2005 dans l'Atlantique tropical. L'ouragan Katrina est visible ici, le 27 août 2005, sur une image satellite des nuages superposée à une carte de température de surface de la mer



© NASA/SVS



Extrait, avec leur autorisation, de l'article de Barnett et coll. Science 309: 204-207 (2005) © NACS

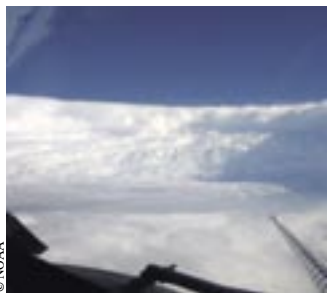
Le graphique de gauche montre la moyenne (triangles verts) et l'amplitude (hachures bleues) des modèles de climat représentant la variabilité climatique naturelle sur des centaines d'années, indépendamment de l'influence humaine. Le graphique de droite montre la variabilité dans un modèle climatique incluant la durée historique de l'apport humain en matière de gaz à effet de serre (hachures vertes et points) ; les points rouges des deux graphiques indiquent la moyenne, sur l'Atlantique Nord, des changements de température de l'océan sur les 40 dernières années. Ce sont les eaux de surface qui se sont le plus réchauffées, d'environ 0,25°C. Le graphique de droite concorde bien mieux avec les observations que celui de gauche, et témoigne parfaitement de l'influence humaine sur le climat.

saisons, c'est d'eux que proviennent les signaux les plus significatifs des changements à long terme du climat.

Preuve concluante administrée par les océans

Dans un article publié en juillet 2005 dans *Science*, Tim Barnett et ses collègues ont démontré que les tendances au réchauffement de l'océan, observées ces 40 dernières années ne pouvaient s'expliquer par la variabilité naturelle mais qu'au contraire elles concordent avec les prévisions climatiques prenant en compte les effets de l'activité humaine sur le climat (voir figure p. 34) ; ces conclusions ne concordent pas avec des mesures prises ailleurs.

Cette étude a contribué à confirmer la fiabilité scientifique quant à l'aptitude des modèles actuels du climat – englobant la terre, l'océan et l'atmosphère – à simuler le changement climatique. Le débat scientifique sur la question de savoir si l'activité humaine a provoqué le changement climatique ne se pose pratiquement plus ; la question reste cependant posée de savoir avec précision comment il va changer.



Cette vue de la spirale des orages entourant l'œil de l'ouragan Katrina (le mur de l'œil) a été prise de la cabine de pilotage d'un avion de chasse des ouragans de la NOAA, la veille du jour où la puissante tempête est venue s'écraser sur le rivage. C'est dans le mur de l'œil que se concentrent les pluies et les vents les plus violents, qui puisent leur énergie dans la chaleur de l'océan

Même si les émissions de gaz à effet de serre dus à l'activité humaine devaient cesser aujourd'hui, le climat mondial continuerait à changer pendant les décennies à venir en raison de la quantité de gaz à effet de serre déjà présente dans l'atmosphère et de l'inertie thermique du système climatique. Le climat ne pourra retrouver son équilibre que lorsque la Terre se sera suffisamment réchauffée ou que les gaz à effet de serre auront été absorbés dans d'autres parties du système climatique. Les océans ont absorbé environ 50 % de la production historique de gaz à effet de serre, ce qui pourrait avoir une incidence considérable sur les écosystèmes océaniques (voir p. 41).

Impact des océans sur le climat

Toute prévision des variations à court terme du climat – perceptible sur des journées ou des mois – dépend étroitement de l'interaction entre l'océan et l'atmosphère. Pour comprendre au mieux les relevés climatiques de l'année en cours, il faut utiliser des modèles qui intègrent la physique de la circulation océanique. Ce sont en effet les paroxysmes de précipitations et de température qui affectent le plus les êtres humains, en provoquant des inondations, des glissements de terrain, des sécheresses et des décalages de saisons qui ont des incidences sur la production alimentaire et le tourisme.

Une saison record pour les ouragans

En 2005, la chaleur anormale de l'Atlantique tropical a contribué à la puissance des ouragans pendant leur saison, la plus



© K. Nizam/US XCast/Quart Digital

Les vents furieux et l'extrême dépression de l'ouragan Katrina ont soulevé d'énormes ondes de tempête qui ont inondé un territoire grand comme la moitié de la France. Elles ont rompu plusieurs digues protégeant la ville côtière de La Nouvelle-Orléans, presque entièrement bâtie en dessous du niveau de la mer. Plus d'un million de personnes ont dû être évacuées, comme les enfants de cette photo, et plus de 1 200 personnes y ont laissé la vie. On estime que la reconstruction coûtera aux États-Unis plus de 100 milliards de dollars

destructrice dans l'histoire du recensement. L'ouragan Katrina de la fin août a dévasté la côte états-unienne du golfe du Mexique (voir images). En octobre, les pluies qui ont accompagné l'ouragan Stan ont déclenché des inondations et des glissements de terrain catastrophiques qui ont tué près de 2 000 personnes au Guatemala et dans d'autres pays d'Amérique centrale. Sept des 14 ouragans qui se sont formés étaient très puissants et trois étaient de la plus grande magnitude¹². Les météorologues se sont, pour la première fois, trouvés à court de noms pour l'Atlantique et ont dû recourir à l'alphabet grec, pour terminer l'année sur l'ouragan Epsilon.

Les vents violents d'un ouragan font s'évaporer d'énormes quantités de vapeur d'eau à partir de la surface de l'océan. L'énergie provenant de la chaleur latente libérée lorsque cette vapeur se condense ensuite en gouttes de pluie est injectée dans la tempête, ce qui en accroît d'autant la violence. L'évaporation de l'eau de mer atteint son maximum lorsque les réserves de chaleur sont au plus haut. Les modèles de changement climatique qui intègrent les ouragans montrent un renforcement de l'intensité des ouragans – mais non de leur nombre – en fonction du réchauffement de l'océan. On continue à discuter pour savoir si le réchauffement actuel de l'Atlantique tropical est dû à un changement du climat ou à la variabilité naturelle, mais le réchauffement de la planète a déjà fait monter la température de l'océan.

Une Amazonie assoiffée

Alors que l'Amérique centrale et l'Amérique du Nord étaient inondées, la forêt amazonienne connaissait la sécheresse la plus sévère de tous les temps. Les lacs et les lagunes se sont asséchés, les chenaux fluviaux ne sont plus navigables, l'agriculture et la pêche sont interrompues,



© Ana Cristina Vieira Felha

Marais à mangroves asséchés à Bragança, au Brésil, au début de 2005. L'Amazonie connaît une sécheresse alarmante due, elle aussi, à la chaleur de l'Atlantique tropical

12. La catégorie 5, où les vents dépassent les 249 km/h

Le tapis roulant de l'océan

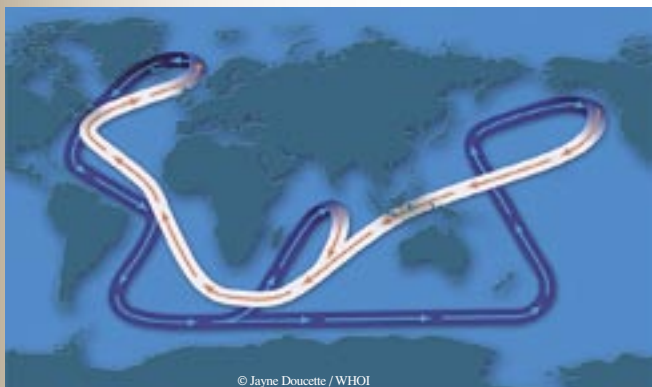
La température moyenne entre l'équateur et les pôles diffère en raison de l'inclinaison relative de la surface de la Terre par rapport au soleil. Cependant, cette différence est bien plus faible que ce à quoi on s'attendrait. C'est parce que les océans et l'atmosphère transportent de la chaleur vers les pôles, ce qui établit un équilibre plus agréable (du moins pour les êtres humains) en rafraîchissant les températures à l'équateur et en les réchauffant aux pôles.

L'océan transporte environ la moitié de sa chaleur via des courants, de faible et de grande profondeur, groupés sous l'appellation collective de tapis roulant (circulation thermohaline, voir carte). L'une des routes océaniques les plus fréquentées est le Gulf Stream, ou Courant de l'Atlantique Nord, poussé par les vents, qui réchauffe l'est de l'Europe. Ces courants de surface transportent vers le nord des dizaines de millions de mètres cubes d'eaux chaudes tropicales par seconde. Du fait que les systèmes météorologiques des latitudes moyennes suivent généralement une trajectoire ouest-est, New York, aux Etats-Unis, est plus frais que Naples, en Italie, alors que ces deux villes sont à la même distance de l'équateur.

L'évaporation dans l'atmosphère laisse derrière elle une eau plus salée et plus fraîche (donc plus dense). Les eaux circulant sous la couche supérieure partout dans le monde sont les plus denses, les plus froides et les plus salées des eaux qui se forment, surtout dans l'Atlantique Nord polaire, par suite de l'extrême évaporation hivernale et de la perte de chaleur ; sous la surface, la majeure partie de l'océan se trouve à peine à quelques degrés au-dessus du point de congélation.

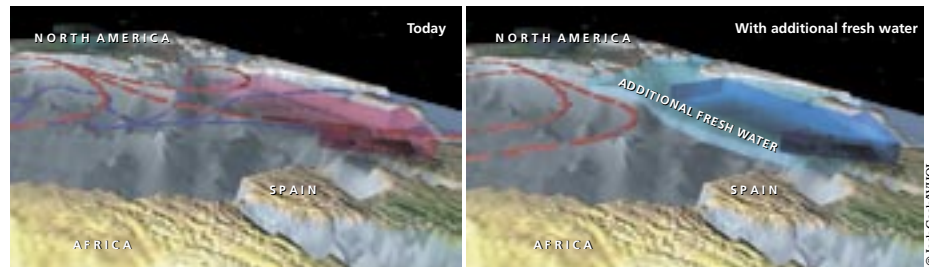
Transportée loin de sa source par des courants orientés vers le sud et finalement dispersée dans les autres océans après des milliers d'années, cette eau profonde est finalement ramenée à la surface par le vent et les marées. Là, elle est réchauffée par le soleil et rafraîchie par la pluie. Elle retourne enfin vers les pôles dans l'océan superficiel pour recommencer le cycle.

Les modèles climatiques dont les scénarios prennent en compte le changement induit par l'homme montrent presque toujours que le tapis roulant océanique ralentira avec le réchauffement du climat.



© Jayne Doucette / WHOI

Le cheminement du tapis roulant océanique



© Jack Cook/AVISO

À gauche, l'eau chaude superficielle de l'Atlantique Nord s'écoule vers le Nord (traits rouges) et remplace le flux, dirigé vers le sud, d'eau froide profonde (traits bleus). Ce faisant, elle transporte de la chaleur vers le Nord et réchauffe les vents soufflant vers l'est sur l'Europe (grosse flèche rouge). Un apport supplémentaire massif de glace terrestre en fusion (à droite) empêcherait l'eau de mer de plonger dans l'Atlantique Nord. Le transfert de chaleur océanique vers le Nord pourrait alors cesser et rafraîchirait les vents soufflant sur l'Europe, en dépit du réchauffement planétaire (grosse flèche bleue)

les délicates forêts pluviales tropicales brûlent et l'eau stagnante restée dans le lit des fleuves suscite la prolifération de moustiques vecteurs de maladies. Ce même réchauffement de l'Atlantique tropical en serait responsable, du fait que l'intensification de l'évaporation et la montée de l'air au-dessus de l'océan ont forcé l'air au-dessus de l'Amazonie à descendre, ce qui a déplacé les pluies.

Les moussons dépendent de la chaleur de l'océan

C'est un équilibre similaire entre l'évaporation océanique et terrestre qui produit la mousson, vent périodique que l'on peut assimiler à une très forte brise de mer. La mousson atteint son maximum dans la partie nord de l'océan Indien, où les vents soufflent du sud-ouest pendant une moitié de l'année et du nord-est pendant l'autre moitié.

Les pluies des moussons tropicales sont dues à la différence de capacité thermique des océans et des terres. En été, sous un soleil ardent, la température de la terre s'élève bien plus rapidement que celle de la surface de la mer. L'air s'élève au-dessus des terres, ce qui attire vers l'intérieur des terres l'air océanique humide et provoque de fortes précipitations. La quantité de chaleur stockée dans l'océan et la différence de température entre l'océan et la terre agissent ensemble sur l'intensité des moussons.

La glace fond et la mer monte

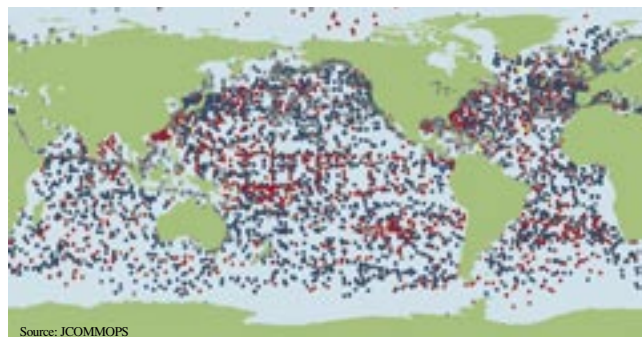
Les océans jouent certes un rôle central dans l'élévation du niveau de la mer, qui provient aussi bien de l'expansion des eaux océaniques chaudes que de la fusion des glaciers (voir encadré, p.10). et des calottes glaciaires. Le niveau moyen mondial de la mer est monté d'environ 2 mm par an, d'après les mesures enregistrées par les marégraphes et les satellites. Mais l'élévation n'est pas absolument uniforme ; en même temps que le climat changeait, les caractéristiques des vents et de la circulation océanique ont également changé, ce qui a entraîné des changements localisés du niveau de la mer.

Comment les choses vont-elles évoluer à l'avenir ? Les régions tropicales connaîtront-elles des ouragans plus violents ? Quelle est la probabilité pour que l'Europe se refroidisse ? La disparition de la glace va-t-elle finir par ouvrir à la navigation le légendaire Passage du Nord-Ouest ? Tuvalu va-t-il disparaître

sous les vagues ? Le puissant fleuve Amazone sera-t-il réduit à un filet d'eau ? Et le climat pourrait-il changer brusquement ? (voir encadré)

Le Programme mondial de recherches sur le climat

La Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO, avec ses partenaires de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et du Conseil international pour la science (CIUS), parraine un Programme mondial de recherches sur le climat (PMRC), qui s'efforce d'apporter des réponses à ces questions. Son principal objectif est de déterminer les limites de la prévisibilité du système climatique, d'une part, et l'influence de l'activité humaine sur le climat, d'autre part. La publication des articles produits par le PMRC constitue la principale contribution au corpus de connaissances sur le sujet qui sont périodiquement évaluées par le GIEC.



Source: JCOMMOPS
Vers une couverture mondiale : plates-formes in situ fournissant des données disponibles en temps réel. Ces données proviennent principalement des balises Argo (en bleu foncé), de navires occasionnels (en gris clair, bleu clair et jaune), de bouées fixes et dérivantes (en rouge). Les océans à banquise posent encore des problèmes techniques

Les scientifiques se heurtent encore à la difficulté de faire la part entre le changement climatique induit par les activités humaines et la variabilité naturelle du climat. Il semble, de fait, que même cette dernière soit en train de changer, en faisant des écarts plus accentués au-delà du champ des conditions « normales ». C'est déjà un signe de changement climatique. Le projet du PMRC sur la Variabilité et la prévisibilité du climat nous aide à mieux prévoir et modéliser les paroxysmes climatiques à l'échelle de journées, de mois et d'années.

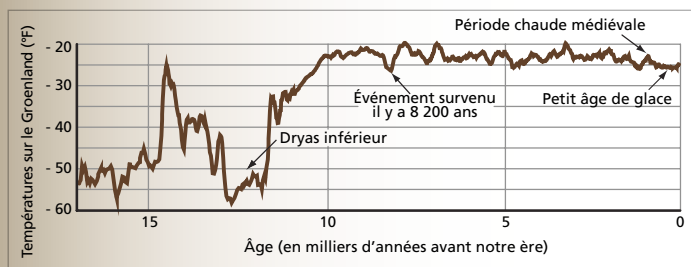


Le climat pourrait-il changer brusquement ?

L'étude du climat passé, fondée sur l'examen des fossiles et des carottes de glace, montre que, par le passé, le climat a connu des sautes brutales (voir figure).

La plus récente saute du climat a eu lieu à la fin du dernier âge glaciaire, il y a environ 12 000 ans, alors que les êtres humains s'installaient sur le continent américain et qu'ailleurs débutait l'agriculture. La fusion des plaques de glace de l'Amérique du Nord a libéré une grande quantité d'eau douce dans l'Atlantique Nord. L'eau douce est moins dense que l'eau salée, si bien que la formation normale d'eau profonde dans l'Atlantique Nord polaire s'est brutalement arrêtée (voir Le tapis roulant de l'océan). Il s'en est suivi un effondrement de la circulation thermohaline, ce qui a fait chuter les températures moyennes de la région de l'Atlantique Nord de 5°C en moins de dix ans.

Certains scientifiques craignent que la fusion de la calotte glaciaire du Groenland n'entraîne un rafraîchissement semblable de l'Atlantique Nord et une saute du climat. Poussé à l'extrême, ce scénario a récemment inspiré un film catastrophe à Hollywood. Alors, quel est le seuil d'un changement brutal du climat ? Nos modèles actuels ne sont pas encore assez perspicaces pour nous le dire. Mais les incidences d'une saute brutale du climat sur les écosystèmes et sur la société humaine seraient rien moins que catastrophiques.



Les carottes de glace extraites de la couche de glace de 3 km d'épaisseur du Groenland font apparaître plusieurs changements brusques du climat dans le passé, sur des périodes d'à peine dix ans. La plus remarquable est la période du Dryas inférieure, où les températures moyennes de la région de l'Atlantique Nord ont brusquement chuté et sont restées basses pendant 1 300 ans avant de remonter rapidement¹³

On perçoit déjà des signes de ralentissement sur certaines portions du tapis roulant. Pas plus tard que le mois dernier, des scientifiques ont indiqué qu'en Atlantique Nord, le flux profond d'eau froide vers le sud, mesuré par cinq expéditions sur cinq décennies, avait diminué de 30 % entre 1957 et 2004¹⁴. Devons-nous attribuer cela à un cycle de variabilité naturelle, ou bien cette diminution signale-t-elle un changement à plus long terme du tapis roulant de l'océan ? Seul le temps – combiné avec une observation soutenue – nous le dira.

13. Toutes les illustrations provenant de la Woods Hole Oceanographic Institution sont tirées, avec autorisation, de la brochure Abrupt climate change: should we be worried?, recueil préparé à l'intention du Forum économique de Davos, en Suisse, en 2003 : www.whoi.edu/institutes/occi/currenttopics/ct_abruptclimate.htm

14. Ces conclusions ont été publiées par Harry Bryden et collègues dans le numéro du 1er décembre 2005 de Nature

Conséquences d'une grave inondation de mousson, le 26 juillet 2005, à Mumbai, en Inde, où il est tombé 1 m de pluie en moins de 24 heures, soit près du double du record précédent dans cette ville. L'inondation et les glissements de terrain ont coûté la vie à plus de 1 000 personnes. L'intensité de la mousson dépend de la quantité de chaleur stockée dans l'océan Indien et d'autres facteurs, comme la phase dans laquelle se trouve El Niño dans le Pacifique

Donnant-donnant : des rétroactions climatiques en opposition

Les scientifiques aux prises avec le problème complexe du système climatique ont trouvé une façon simple de décrire, en termes de rétroactions, les modèles des interactions qu'ils ont observées. Les rétroactions peuvent soit conforter l'état actuel du système climatique, soit le mener à une course incontrôlée.

Exemple de rétroaction stabilisante (rétroaction négative) donné par l'interaction entre le rayonnement solaire, la température de surface de la mer et les nuages sous les tropiques : l'océan se réchauffe sous l'effet du soleil, ce qui réchauffe et humidifie l'atmosphère au-dessus de lui ; moins dense, l'air s'élève et finit par atteindre le point où la vapeur d'eau qu'il contient se condense pour former des nuages ; ceux-ci constituent un écran à la surface de l'océan, qui se rafraîchit. Le système climatique crée ainsi un barrage naturel contre un réchauffement illimité de l'océan. L'inverse n'en est pas moins vrai : sur des océans plus frais, il y a moins de nuages ; un plus fort rayonnement atteint donc la surface de la mer. Une rétroaction négative ramène les conditions vers l'équilibre.



Sous les tropiques, des nuages de convection projettent leur ombre sur un océan réchauffé

Exemple de rétroaction de renforcement (dite rétroaction positive) fourni par l'interaction entre le rayonnement solaire et la glace des régions polaires : la glace réfléchit de façon très efficace la lumière du soleil, renvoyant dans l'espace une fraction significative de son énergie ; si la glace qui fond est remplacée par un océan ou des surfaces terrestres plus sombres, une moindre fraction de la lumière solaire est reflétée dans l'espace, ce qui réchauffe la surface ; à son tour, le réchauffement fera fondre la glace. C'est ce qui rend les régions polaires particulièrement sensibles au changement climatique.

L'équilibre des rétroactions et la possibilité qu'une rétroaction positive prenne temporairement le pas sur les effets négatifs stabilisants, tel est le tableau que présentent l'évolution et la variabilité naturelle du climat.

Le cas le mieux étudié d'interaction entre des rétroactions climatiques impliquant l'océan est celui d'El Niño, déplacement temporaire des eaux les plus chaudes, du Pacifique tropical vers l'est, accompagné d'un mouvement ascensionnel de l'atmosphère, suivi de pluies, ce qui provoque la sécheresse en Indonésie et en Australie, un excès de précipitations au Pérou et en Équateur et une modification du régime des tempêtes sur une bonne partie du globe. El Niño changera-t-il en même temps que le climat planétaire ? Nombreux sont les scientifiques qui croient que oui, ou qu'il l'a déjà fait, mais prévoir El Niño reste une tâche ardue.



© ESA

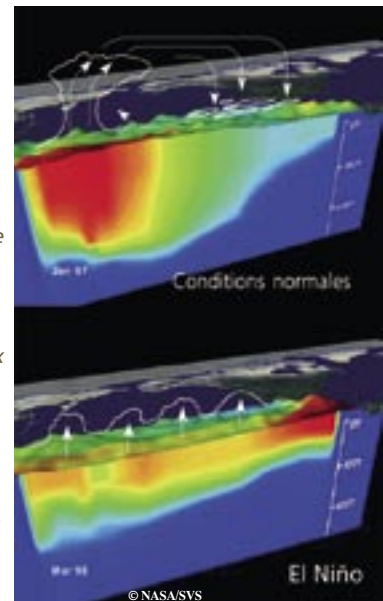
Les satellites assurent une couverture mondiale des océans et constituent un élément clé du GOOS. Voici une vision d'artiste du satellite européen SMOS qui va mesurer la salinité de surface à partir de 2007

Observer les océans pour les comprendre

La COI de l'UNESCO, avec son programme phare, le Système mondial d'observation de l'océan (GOOS) constitue l'instrument dont disposent les Nations unies pour observer l'océan mondial sur le long terme. Un groupe d'experts de la COI, le Panel d'observation de l'océan pour le climat (OOPC), contribue à déterminer les normes et les objectifs de l'élément « climat mondial » du GOOS, ainsi que les moyens à employer pour surveiller et évaluer le système.

En participant avec l'OMM à une commission technique mixte d'océanologie et de météorologie maritime (JCOMM), la COI coordonne par ailleurs de façon active ces réseaux mondiaux grâce à un Centre d'appui aux plates-formes *in situ* (dans l'eau), le JCOMMOPS situé à Toulouse, en France, qui surveille en continu les milliers de sondes, de navires et de bouées amarrées transmettant les données océanographiques.

Coupe des températures dans le Pacifique équatorial selon une direction est-ouest, en regardant vers le nord, composée d'après l'ensemble des données des bouées amarrées dans le Pacifique tropical. Normalement, l'air s'élève au-dessus d'une concentration des eaux les plus chaudes, dans le Pacifique occidental (en haut), attirant des vents de surface venus de l'est, ce qui entretient cette concentration, en y accumulant les eaux chaudes. Dans un épisode d'El Niño (en bas), quelque chose affaiblit les vents de surface, ce qui permet aux eaux chaudes de s'étaler vers l'est. Les masses d'air ascensionnel suivent le mouvement vers l'est, ce qui affaiblit davantage le vent de surface et permet à l'eau chaude de s'affaïsser encore plus, en une rétroaction positive. Il en résulte un changement dans le Pacifique tropical, côté océan, et des changements planétaires dans la circulation atmosphérique



© NASA/SVS

Les satellites ne font qu'égratigner la surface

Les missions effectuées par les satellites océaniques ont révolutionné l'océanographie ; ils sont indispensables pour assurer l'observation mondiale de la température de surface, les tourbillons océaniques (systèmes climatiques de la mer), les vents de surface et la couleur de l'océan, qui dénote l'activité biologique.

Les océans constituent cependant un sérieux obstacle aux observations par satellites. Comme la conductivité de l'eau salée les rend presque insensibles au rayonnement électro-magnétique, seule « la peau » de l'océan est visible de l'espace. Pour bien observer les océans mondiaux, il faut pouvoir prendre des mesures à l'intérieur des océans, à partir de plusieurs types de plateformes autonomes et de navires de recherche.



© Canada DFO-MPO

Un profileur Argo est largué à bord du navire des garde-côtes canadiens John P. Tully dans le golfe de l'Alaska

Sentinelles robotisées des profondeurs

Parmi les réseaux, celui qui connaît la croissance la plus rapide est le réseau de profileurs Argo. Ce sont des instruments de mesures océanographiques robotisés et autonomes. Inversant leur position, elles remontent en surface tous les dix jours par pompage d'huile entre elles et un réservoir externe. Tout

au long de l'ascension elles effectuent des relevés de température et de salinité (certaines mesurent également la teneur en oxygène), qu'elles transmettent à la surface par satellite.

À la fin de l'année 2005, le projet Argo avait parsemé l'océan, en quatre ans d'existence, de plus de 2 000 bouées, les deux tiers de son objectif initial de 3 000, soit environ une tous les 100 000 km². Lorsque les batteries s'épuisent, au bout de quatre ans environ, les bouées ne peuvent remonter à la surface : elles sombrent le plus souvent. Les balises Argo sont très largement réparties dans tous les océans, grâce à la coordination des efforts de plus de 20 pays participants. Dans certaines zones, les balises envoient en un an plus d'informations sur l'océan subsurface qu'on ne peut en trouver dans toute la base des données historiques datant d'avant Argo.

Une moderne bouteille à la mer

S'inspirant des survivants de naufrages qui lançaient parfois dans les vagues des messages scellés, le scientifique et homme d'État Benjamin Franklin a pu dresser, au milieu du 18^{ème} siècle, un atlas des courants de la côte est de l'Amérique du Nord en jetant à la mer des bouteilles porteuses de messages.

En 1929, des savants allemands ont lancé dans le sud de l'océan Indien un message que l'on pouvait lire sans briser la bouteille. Il a été lu et relâché plusieurs fois. Pris dans le puissant courant circumpolaire, il avait parcouru en 1935 plus de 25 000 km.



© NOAA

L'une des 70 bouées amarrées dans le Pacifique tropical, qui surveillent et aident à prévoir les apparitions d'El Niño dans le cadre du système mondial d'observation de l'océan. Le dernier épisode d'El Niño a eu lieu en 2002-2003

Aujourd'hui, ces messages dans une bouteille en version moderne – les bouées dérivant en surface – parcourent tous les courants de surface de la planète en transmettant des relevés électroniques concernant la surface : température, courants et parfois pression barométrique. Ces bouées fournissent une vérité de terrain qui confirme les estimations par satellite de la température de surface de la mer et sont les meilleurs témoins des courants océaniques de surface, puisqu'elles sont effectivement poussées par les vents et les tourbillons océaniques. Elles contribuent également à améliorer les prévisions des conditions atmosphériques en enregistrant la pression à la surface.

Pour le réseau de bouées dérivant en surface, l'objectif visé par l'OOPC était d'en avoir une par cellule de 300 000 km² de l'océan, soit 1 250 au total. L'objectif a été atteint en septembre 2005, lorsque le Global Drifter 1 250 a été largué au cours d'une cérémonie spéciale pendant la deuxième session de la JCOMM à Halifax, au Canada. C'est le premier des réseaux mondiaux d'observation *in situ* de l'océan à atteindre l'objectif pour lequel il avait été conçu – tout un événement.

Mais les scientifiques ne sauraient crier victoire et rentrer chez eux ; le réseau de bouées dérivantes a constamment besoin de renouvellement, dans la mesure où les bouées s'épuisent et dérivent en quittant les régions de divergence des courants. En outre, le programme du réseau mondial d'observation *in situ* de l'océan, constitué de capteurs, de profileurs, de bouées amarrées, de marégraphes et de navires occasionnels et de recherche, n'en est encore qu'à 55 % de sa réalisation.



© NOAA

Message dans une bouteille : le Global Drifter 1 250 complète symboliquement la première phase du Système mondial d'observation de l'océan. Il est largué en septembre 2005 dans les eaux canadiennes



Un stage de gestion des données océanographiques, au Bureau du programme d'Échange des données et de l'information océanographiques (IODE) de la COI à Ostende, en Belgique. Ces stages donnent aux pays les capacités nécessaires pour qu'ils participent aux systèmes d'observation de l'océan, et en bénéficient

Les scientifiques font une promenade en mer

Le navire marchand Skogafoss, cargo porte-conteneurs de 100 m de long, quitte tous les mois le port de Reykjavik, en Islande, pour livrer en Amérique du Nord des conteneurs de poisson surgelé. Il retourne deux semaines plus tard, refaisant le même trajet d'une année sur l'autre. Il emprunte la route régulière la plus septentrionale de l'Atlantique Nord, en contournant les icebergs qui dérivent vers le sud, portés par le courant du Labrador alors que le printemps est déjà bien avancé.

Mais le Skogafoss est aussi un navire d'observation volontaire. Il largue périodiquement des radiosondes (profileurs atmosphériques) à partir d'un laboratoire automatisé monté sur le pont arrière. Il dispose de systèmes automatiques d'enregistrement de la météorologie de surface et de température de surface de la mer, ainsi que de mesure du carbone de l'atmosphère et de l'océan. Selon des intervalles de quelques heures, l'officier de service sort sur un pont latéral, charge un bathythermographe jetable (XBT) dans un lanceur et appuie sur la détente. L'XBT tombe dans l'océan et mesure un profil de température, renvoyant ses données sur un segment de fil de cuivre déroulant plus fin qu'un cheveu humain. Ces observations, qui constituent une partie importante du système mondial, sont coordonnées par l'Équipe des navires d'observation de la JCOMM. Le capitaine et la compagnie maritime offrent gratuitement leurs services, sous forme de temps et d'espace à bord.

C'est une véritable aubaine pour les scientifiques, car les navires modernes de recherche sont d'un fonctionnement extrêmement coûteux. Les dépenses en carburant, les équipes de trois-huit d'officiers, de techniciens et de marins se chiffrent entre 20 000 et 50 000 dollars des États-Unis par jour. Ces navires occasionnels volontaires sont aussi l'un des principaux agents du déploiement de balises Argo et de bouées dérivantes de surface, qui couvrent les lacunes du réseau d'observation au fur et à mesure qu'il s'en produit.

Informations mondiales pour décisions locales

La composante mondiale du GOOS a été conçue pour la surveillance, la prévision et la recherche sur le climat, mais elle contribue également à améliorer la prévision météorologique et marine. Les données océanographiques (provenant actuellement de près de 70 pays) sont gérées et diffusées mondialement, de façon coordonnée, et transformées en modèles océaniques et climatiques, et autres produits.

La COI a, par ailleurs, assumé un grand rôle dans la coordination de l'alerte mondiale aux risques naturels en rapport avec l'océan, notamment en ce qui concerne les tsunamis. Les plates-formes d'observation qui alimentent ces systèmes d'alerte sont

souvent les mêmes : bouées amarrées et marégraphes sont aussi bien au service des systèmes d'observation du climat que des tsunamis. La COI s'efforce d'optimiser la synergie entre les deux systèmes.

Les données océaniques brutes, qui intéressent les scientifiques, peuvent être incompréhensibles aux responsables politiques et autres décideurs chargés de réagir au changement climatique, de gérer les pêcheries ou de sécuriser la navigation. Le GOOS et le PMRC s'emploient à mettre au point des modèles océaniques et climatiques pouvant apporter davantage d'informations ciblées pour la prise de décisions.

La prévision à long terme reste rare

Les océans mondiaux, qui couvrent une si grande portion de notre Terre, sont le bien commun de toutes les nations – mais très peu de personnes vivent sur les océans. Alors que presque tous les pays, riches ou pauvres, possèdent une agence météorologique nationale chargée d'observer l'atmosphère et d'émettre des prévisions, bien peu d'entre eux possèdent des agences océanographiques nationales ayant pour mission d'observer l'océan, et moins encore d'observer l'océan mondial.

Le réseau d'observation de l'océan a pu se construire grâce aux travaux constants des chercheurs en océanographie. Mais cela même donne lieu à d'autres problèmes : les courantomètres de subsurface, par exemple, surveillent depuis plus d'une décennie une partie de la circulation thermohaline de l'Atlantique (voir *Le tapis roulant de l'océan*), mais un certain nombre d'entre eux ne seront pas renouvelés, du fait que les agences nationales de recherche préfèrent financer des nouveautés et qu'il ne se trouve personne pour prendre le relais une fois que cette surveillance a cessé.

La réticence des gouvernements du monde à s'engager dans des observations prolongées est la conséquence d'une vue à court terme. Face à la lenteur de l'action politique pour lutter contre l'accroissement de la production de gaz à effet de serre, il est clair que le climat poursuivra son évolution, et même à un rythme accéléré.

Les observations et la recherche scientifique sont indispensables pour nous permettre de comprendre comment le climat régional va changer, afin d'affiner nos prévisions sur les modifications à court terme des conditions climatiques locales, de faire progresser des connaissances insuffisantes sur la façon dont la chimie et les écosystèmes océaniques pourraient évoluer, et afin de fournir aux gouvernements et aux citoyens du monde de meilleures informations qui les aideront à prendre des décisions quant à l'avenir.

Les êtres humains ont provoqué une perturbation sans précédent du climat de la planète. Pour faire face à ces conséquences, il nous faut réunir le plus grand nombre possible d'informations.

Albert Fischer¹⁵

Pour en savoir plus : <http://ioc.unesco.org/iocweb/climateChange> ; e-mail a.fischer@unesco.org

15. Spécialiste de programme à la COI de l'UNESCO et océanographe physique