



L'Organisation
des Nations unies
pour l'éducation,
la science et la culture



Rétrospective sur le changement climatique

Bulletin trimestriel
d'information sur les
sciences exactes et naturelles

Hors série (Édition révisée)
Octobre 2007

Planète SCIENCE

5ème anniversaire

SOMMAIRE

- 2 L'UNESCO et Johannesburg
- 6 La crise de l'eau : comment en sommes-nous arrivés là ?
- 10 Prendre la température de la montagne
- 14 Fonte des glaciers et faiblesse des politiques font le malheur des eaux vives d'Asie centrale
- 16 Repenser l'avenir des terres arides
- 23 S'assumer avec le solaire
- 26 L'ère des énergies renouvelables a commencé
- 28 Un système pour gérer la planète, d'ici à 2015
- 34 Scruter l'océan pour comprendre le changement climatique
- 41 Un puits de carbone qui sature ?
- 45 Les petites îles sous les projecteurs
- 50 Des satellites à la rescousse des tombes gelées de Sibérie
- 55 Coup de chaleur sur les forêts australiennes
- 59 Lectures complémentaires
- 60 Aperçu de notre monde futur

ÉDITORIAL

Limiter les dégâts

En février dernier, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) s'est réuni à l'UNESCO afin de d'approuver les bases scientifiques de son rapport 2007. C'est, à ce jour, le plaidoyer le plus vigoureux en faveur d'une planète dont le réchauffement est en grande partie imputable aux activités humaines.

« Le réchauffement du système climatique est sans équivoque », signale le rapport approuvé par tous les gouvernements du monde. Il prévoit, d'ici la fin du siècle, une élévation de la température moyenne de la planète de l'ordre de 1,8 à 4 °C, en fonction des différents scénarios socio-économiques adoptés. Ce rapport confirme que « la majeure partie de l'augmentation observée des températures, ramenée à une moyenne mondiale, depuis le milieu du 20ème siècle est très probablement due à l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre d'origine anthropique », et que « l'influence humaine décelable s'étend désormais à d'autres aspects du climat, comme le réchauffement de l'océan, la température moyenne des continents, les extrêmes de température et le régime des vents ».

L'Année polaire internationale lancée en mars consacrera les deux prochaines années à observer l'un des derniers domaines d'incertitude du rapport du Giec, les régions polaires. Le rapport peut prévoir que l'élévation du niveau de la mer atteindra 60 cm à la fin du siècle, par exemple, mais pas quelles répercussions seront provoquées sur le niveau de la mer par les changements dans les flux dynamiques de la glace du Groenland et de l'Antarctique. L'Année polaire tentera de combler certaines lacunes dans la connaissance de ces processus, d'autant que la dernière fois que la température polaire moyenne dépassait de 3 à 5 °C l'actuelle, il y a 125 000 ans, la diminution du volume de la glace polaire avait fait monter de 4 à 6 m le niveau de la mer.

Le changement climatique n'affecte pas seulement notre environnement mais aussi nos modes de vie. Trouver des solutions pour en atténuer les conséquences négatives et s'adapter à un monde en évolution – la dernière page du présent numéro donne une vue d'ensemble de ce que l'avenir nous réserve – exigera une approche associant un savoir scientifique fiable et objectif avec des considérations sociales et culturelles. L'UNESCO est, à cet égard, un forum idéal, car elle réunit sous son toit non seulement les disciplines essentielles de la climatologie – géologie, hydrologie, écologie, océanographie, physique, chimie et biologie – mais aussi l'éducation, les sciences sociales et humaines et la culture.

Plus de 30 programmes traitent, à l'UNESCO, d'un ensemble de questions en rapport avec le climat, comme la fonte des glaciers, la perte de biodiversité, l'élévation du niveau de la mer, l'acidification de l'océan, l'économie et la séquestration du carbone, l'infiltration du sel dans les eaux côtières et les nappes phréatiques, la gestion de la sécheresse et des inondations, l'utilisation des énergies renouvelables, l'éducation relative au développement durable, les répercussions des changements climatiques sur le patrimoine mondial et sur les réserves de biosphère, ou encore la surveillance du climat par les systèmes mondiaux d'observation.

Ce numéro spécial anniversaire de *Planète Science* est une collection d'articles sur le climat publiés dans la revue ces cinq dernières années. Cette rétrospective vise à illustrer le rôle que joue – et devra continuer à jouer – l'UNESCO pour aider les pays à observer le changement climatique, en atténuer les effets et s'y adapter.

Le débat sur l'influence de l'homme sur le climat est clos. Ce dont le monde a besoin désormais, c'est de limiter les dégâts par la réduction de l'émission des gaz à effet de serre et la découverte de stratégies d'adaptation. Si l'UNESCO ne relève pas ces défis, bon nombre de ses programmes pourraient perdre leur raison d'être.

W. Erdelen
Sous-directeur général pour les sciences exactes et naturelles

L'UNESCO et Johannesburg

Une Décennie consacrée à l'éducation pour le développement durable : « un formidable défi pour l'UNESCO »

On pourrait dire que le résultat le plus spectaculaire du Sommet mondial pour le développement durable (Johannesburg, Afrique du Sud, 26 août – 4 septembre 2002) pour l'UNESCO est la décision de recommander à l'Assemblée générale des Nations Unies « d'envisager de proclamer une Décennie consacrée à l'éducation pour le développement durable, commençant en 2005 » (paragraphe 117d du Plan de mise en œuvre). Cette mesure est une bonne nouvelle pour l'UNESCO, qui a, la première, proposé l'idée à la réunion préparatoire finale du Sommet de Bali (Indonésie) en mai dernier.

La prochaine étape consistera à présenter la recommandation à l'Assemblée générale des Nations Unies en 2003 pour adoption. L'UNESCO se prépare à jouer le rôle de chef de file

Nous faisons de grands efforts pour utiliser les technologies satellitaires et l'Internet. Beaucoup de gens en Mongolie [...] aimeraient que l'information et les programmes diffusés par les grands pays développés privilégient l'apprentissage et l'éducation.

Président Bagabandi (Mongolie)

dans la Décennie, en liaison étroite avec une grande diversité de partenaires des communautés intergouvernementales et non gouvernementales. La Décennie « constitue un formidable défi pour l'UNESCO », selon les termes d'Andras Szöllösi-Nagy, Sous-Directeur général adjoint pour la science à l'UNESCO.

Pour donner sans attendre suite au Sommet, l'UNESCO et le gouvernement français ont pris l'initiative d'étudier la possibilité de créer une université virtuelle pour le développement durable à l'Université de Lyon (France).

L'accès à des installations sanitaires promis à un milliard de personnes d'ici à 2015

Comme prévu, la crise mondiale de l'eau a été la question traitée en priorité lors du Sommet. De nos jours, plus d'un milliard de personnes n'ont pas accès à de l'eau potable et plus de 2,4 milliards ne disposent pas d'installations sanitaires adéquates. L'un des objectifs les plus ambitieux du Plan de mise en œuvre est de réduire de moitié d'ici à 2015 la proportion de personnes qui n'ont pas accès à ces produits et services de première nécessité. Etant donné l'ampleur du défi, « les ressources en eau et les écosystèmes sur lesquelles elles reposent » devront très certainement rester la principale priorité de l'UNESCO dans le domaine des sciences exactes et naturelles en 2004-2005.

L'objectif est d'améliorer la gestion des ressources en eau et la compréhension scientifique du cycle de l'eau. Les nouveaux centres UNESCO de gestion des ressources en eau et l'Institut UNESCO-IHE pour l'éducation relative à l'eau de Delft aux



Des porteuses d'eau à Antigua, au Guatemala. Lacs et fleuves ne stockent que 0,26% de toute l'eau douce du monde. Le reste se présente soit sous forme de nappes phréatiques (30%), soit sous forme de glace ou de neige

Pays-Bas, offrent à l'Organisation une occasion à nulle autre pareille de prouver l'importance pratique de ses programmes scientifiques sur les ressources en eau.

Il se peut également que l'UNESCO soit priée d'élargir son action lors du Forum mondial de l'eau en 2003. Les résultats préliminaires de la plus vaste opération jamais entreprise par les Nations Unies pour évaluer les ressources mondiales en eau douce ont été présentées au Sommet de Johannesburg et seront publiées dans le Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau qui devrait être publié en 2003. L'UNESCO est le chef de file du Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau auquel participent 24 institutions des Nations Unies.

Bientôt des rapports périodiques sur le milieu marin

Le paragraphe 34 du Plan de mise en œuvre confirme clairement le mandat actuel de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) qui est d'étudier les incertitudes scientifiques relatives aux changements climatiques et autres changements planétaires et d'examiner de plus près les tendances nouvelles, surtout en ce qui concerne la gestion intégrée des zones côtières. Par le biais de la COI, l'UNESCO contribuera à la mise en place d'ici à 2004 d'un système mondial de notification et d'évaluation périodiques de l'état du milieu marin.

La COI est membre de plusieurs partenariats de type 2 sur les océans et les zones côtières, dont le « Processus africain ».

L'un des objectifs de la Déclaration du Millénaire de l'ONU (2000)¹ est d'« intégrer les principes du développement durable dans les politiques nationales et d'inverser la tendance actuelle à la déperdition des ressources environnementales ». Dans le Plan de mise en œuvre, les gouvernements s'engagent à réaliser

La construction du nouveau paradigme [de développement durable] ne consiste pas à inventer de nouvelles expressions mais de nouvelles façons d'agir.

Kader Asmal,
Ministre de l'éducation,
Afrique du Sud

Nations Unies sous la présidence du Secrétaire général de l'Organisation des Nations Unies, afin d'élaborer des plans efficaces de mise en œuvre permettant de réaliser les objectifs du Millénaire.

Inverser la tendance à la dégradation des ressources naturelles

Dans le Plan de mise en œuvre, les gouvernements s'engagent à réduire d'ici à 2010 le rythme de l'appauvrissement de la biodiversité et à inverser la tendance actuelle à la dégradation des ressources naturelles. Ils s'engagent en outre à améliorer d'ici là l'accès des pays en développement à des produits de substitution respectueux de l'environnement pour remplacer les substances chimiques qui appauvrissent la couche d'ozone. Ils invitent également le Fonds pour l'environnement mondial (FEM) à envisager de classer la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification parmi les domaines privilégiés de financement.

On pourrait dire que le programme de l'UNESCO sur L'homme et la biosphère (MAB) favorisait le développement durable longtemps avant l'invention de ce terme. Depuis 30 ans, le MAB encourage dans le cadre de ses réserves de biosphère, actuellement au nombre de 408 réparties dans 94 pays, l'utilisation durable et la conservation de la diversité biologique tout en s'efforçant d'améliorer les rapports entre populations et environnement (voir aussi p.12).

Nous devons saisir les liens entre les différentes modalités selon lesquelles les cultures façonnent leur environnement et réciproquement.

Koïchiro Matsuura,
Directeur général
de l'UNESCO

Le Plan de mise en œuvre souligne la nécessité de protéger les droits des communautés locales et autochtones et de respecter leurs systèmes traditionnels de connaissance et de gestion des ressources. A travers le projet Systèmes de savoirs locaux et autochtones (LINKS), l'UNESCO s'attache à favoriser des partenariats entre autochtones et scientifiques, afin d'incorporer le savoir et les visions du monde traditionnels dans le processus de conservation de la biodiversité².

L'UNESCO aurait aimé que le Sommet mette davantage l'accent sur le respect de la diversité culturelle, qui est un facteur essentiel du développement durable, mais elle se félicite néanmoins de voir que cette question est nettement mieux connue qu'auparavant.

1. www.developmentgoals.org/

2. S'adresser à : d.nakashima@unesco.org

Le Sommet innove avec des partenariats de «type 2»

Le Sommet a produit trois documents officiels : la Déclaration de Johannesburg sur le développement durable, un Plan de mise en œuvre des résultats du Sommet (adopté par tous les gouvernements et appelé résultats de type 1) et, pour la première fois, des propositions d'initiatives de partenariat dans le cadre même du Sommet. Ces partenariats de type 2, comme on les appelle, ont été conclus à Johannesburg seulement entre les parties directement concernées.

Plusieurs initiatives de type 2 ont été rendues publiques à Johannesburg. Par exemple, les Etats-Unis d'Amérique ont annoncé qu'ils investiraient 970 millions de dollars des Etats-Unis sur les trois prochaines années dans des projets d'alimentation en eau et d'assainissement, tandis que l'Union européenne présentait l'initiative «L'eau et la vie», dont les partenaires se sont engagés à atteindre des objectifs précis en matière d'eau et d'assainissement principalement en Afrique et en Asie centrale. Avant la fin du Sommet, des pays avaient promis de reconstituer le FEM pour un montant total de 3 milliards de dollars des Etats-Unis.

Une série d'accords ont été conclus entre neuf grandes compagnies d'électricité de pays du G-7 et l'ONU en vue de faciliter la coopération technique pour la réalisation de projets d'alimentation durable en énergie dans des pays en développement. L'Union européenne a annoncé une initiative de partenariat en matière d'énergie pour un montant de 700 millions de dollars des Etats-Unis et les Etats-Unis ont signalé qu'ils investiraient jusqu'à 43 millions de dollars des Etats-Unis en 2003. Le Service public d'énergie sud-africain Eskom a annoncé un partenariat visant à assurer des services modernes de fourniture d'énergie aux pays voisins.

Une vingtaine d'initiatives de type 2 convenues à Johannesburg comportent la participation de l'UNESCO. Voir, par exemple, les encadrés sur l'IGOS et GRASP.

«Les succès collatéraux» du Sommet

Indépendamment des partenariats spécifiques de type 1 et de type 2, Johannesburg a eu d'autres retombées positives «collatérales». C'est au Sommet que la Russie a promis de ratifier le Protocole de Kyoto, prévoyant la réduction des émissions de gaz à effet de serre (aux niveaux d'avant 1990 d'ici à 2012), décision qui permettrait l'entrée en vigueur de l'accord quinquennal. La promesse russe s'est accompagnée de l'annonce faite par la Thaïlande et par la Chine qu'elles venaient de ratifier le Protocole et de l'engagement pris par le Canada de soumettre le Protocole à son Parlement pour ratification avant la fin de l'année.

Autre «succès collatéral», la promesse faite par plusieurs pays à Johannesburg d'accroître l'aide publique au développement, qui était tombée au cours de la dernière décennie de 0,33 % à 0,22 % du PNB du pays donateur, soit bien au-dessous de l'objectif de 0,7 % convenu à Rio de Janeiro. C'est d'autant plus significatif que le quart des documents de Johannesburg qui attendaient toujours une approbation à l'ouverture du Sommet le 26 août étaient pour beaucoup consacrés à des questions financières et commerciales.

Lorsque petit rime avec vulnérable

Ceux qui ont assisté au Sommet de Johannesburg se souviendront du pathétique appel à l'aide lancé par l'Etat de Tuvalu (26 km²), petit groupe d'atolls du Pacifique Sud, peuplé de 12.000 habitants, qui sombre lentement dans la mer. D'après un rapport publié l'année dernière par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, le niveau de la mer pourrait s'élever d'un mètre dans les 50 à 100 prochaines années, alors que l'altitude moyenne de Tuvalu est de 1,5 m.



Un père et ses enfants lors d'une cérémonie de danse traditionnelle à Vanuatu

L'UNESCO donne la parole aux petits Etats insulaires par le biais du projet La voix des petites îles qu'elle a lancé en 2002. L'Organisation est heureuse de constater l'importance qui a été accordée au développement durable des petits Etats insulaires à Johannesburg.

Prévention des catastrophes

Un autre thème sur lequel l'accent a été mis à Johannesburg et qui intéresse manifestement l'UNESCO est le développement et le renforcement des activités visant à améliorer la prévention des catastrophes naturelles et la capacité d'y faire face.

Personne ne dénonce le piratage biologique mais c'est un véritable problème pour nous. Nos ressources nous sont arrachées sans aucun paiement, au mépris total des droits des populations locales.

Professeure Catherine Odora-Hoppers,
Université de Pretoria,
Afrique du Sud

En guise de suivi au Sommet, l'UNESCO se penchera sur la question des risques naturels et d'origine humaine dans les mégapoles et les zones urbaines. Outre les secours d'urgence et la reconstruction, elle se consacrerait davantage encore à la prévention des catastrophes en privilégiant les pays vulnérables. Grâce aux efforts internationaux d'observation et de recherche, les pays se familiariseront avec de nouvelles

techniques de surveillance au sol et seront encouragés à utiliser et à diffuser des données obtenues par satellite.

L'IGOS ou la nouvelle course à l'espace

La course à l'espace est entrée dans une nouvelle phase. L'objectif qui continue de la motiver aujourd'hui est infiniment plus crucial que du temps de la guerre froide – il s'agit de chercher à comprendre les systèmes nécessaires à la vie sur notre planète. Peut-être existe-t-il plusieurs initiatives mondiales d'observation du climat ou des océans, mais aucune institution ou organisation n'a les moyens de mettre en place l'un de ces systèmes à elle seule. C'est là qu'intervient le Partenariat pour la Stratégie d'observation mondiale intégrée (IGOS).

Organisme de coordination, l'IGOS réunit 14 partenaires parmi lesquels l'UNESCO, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Comité sur les satellites d'observation de la terre (CEOS) qui représente 23 agences spatiales.

L'IGOS est en train d'établir un réseau mondial afin de collecter les données fournies par les divers satellites et des observations terrestres, de les comparer, et d'en réaliser la synthèse. Son but est de parachever le système dans les deux prochaines années afin de préparer le lancement d'un groupe de neuf satellites de mesure des précipitations à l'échelle mondiale qui sera capable de mesurer les précipitations en n'importe quel point du globe toutes les trois heures.

L'IGOS élabore une stratégie analogue pour étudier l'impact des émissions croissantes de dioxyde de carbone. Le CO₂ est le plus dangereux des gaz à effet de serre car il peut rester dans l'air pendant des dizaines, voire des milliers d'années, en piégeant la chaleur dans l'atmosphère. Pour prévoir comment la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère et le climat sont susceptibles de changer à l'avenir, nous devons comprendre où et comment varie ce que l'on appelle le cycle mondial terre-mer-atmosphère du carbone.

Pour plus de renseignements sur cette initiative du type 2, aller sur : www.igospartners.org ou s'adresser à : r.missotten@unesco.org ; voir aussi p. 28.

L'UNESCO lance, dans le cadre d'un Consortium international pour l'étude des glissements de terrain, un nouveau Programme international sur les glissements de terrain englobant à la fois la science, l'éducation et la culture. De plus, face aux dégâts toujours croissants dus aux inondations, le Conseil du Programme hydrologique international (PHI) de l'UNESCO a récemment adopté une résolution proposant de lancer un Programme conjoint UNESCO/OMM sur les inondations.

Pas d'objectif en matière d'énergie renouvelable

Kofi Annan, Secrétaire général des Nations Unies, et le Gouvernement du Brésil faisaient partie des partisans du relèvement à 10 % de la part de marché des énergies renouvelables. L'énergie solaire ne représente peut-être actuellement que 0,1 % de la demande en énergie, mais elle est aussi l'une des sources d'énergie renouvelable dont le taux de croissance est le plus élevé au monde. D'après le FEM, le marché de l'énergie solaire d'origine photovoltaïque, par exemple, augmente de 15 % par an grâce, en grande partie, à l'abaissement des coûts imputable à la recherche (voir aussi p. 23 à 27).

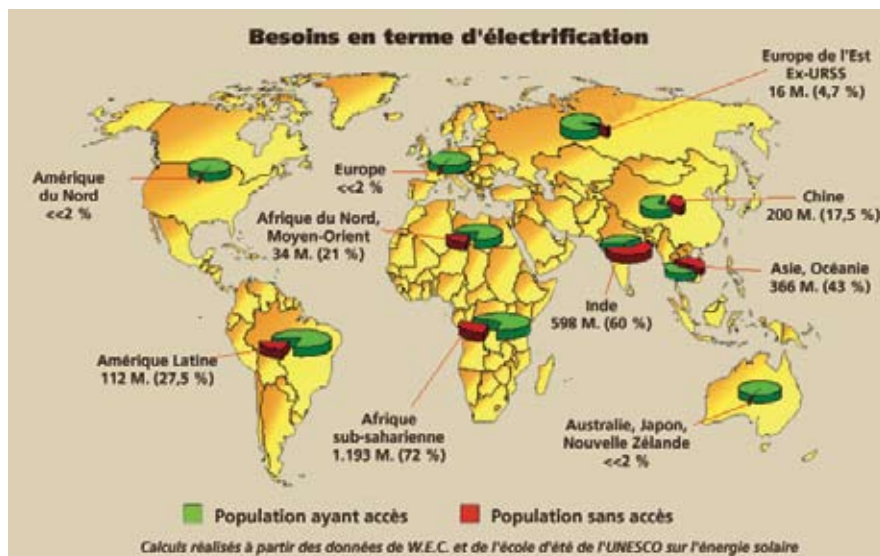
Bien que l'objectif espéré ne figure finalement pas dans le Plan de mise en œuvre, certains gouvernements s'engagent à accroître l'accès à des services énergétiques modernes afin d'augmenter l'efficacité énergétique et de favoriser l'utilisation des énergies renouvelables. Ils acceptent aussi, quand besoin est, d'éliminer progressivement les subventions visant l'énergie.

L'engagement pris par les gouvernements de soutenir l'objectif du NEPAD³ de garantir l'accès à l'énergie à 35 % au moins de la population africaine d'ici à 30 ans intéresse au plus haut point l'UNESCO. L'Organisation a lancé en 1996, pour une durée de 10 ans, le Programme solaire mondial afin d'aider l'Afri-

que notamment à accéder à l'énergie. Ce programme inclut le Programme mondial d'éducation et de formation en matière d'énergies renouvelables (GREET) qui est particulièrement actif en Afrique subsaharienne où 15 % de la population urbaine et 92 % de la population rurale manquent d'électricité (données UNESCO).

* * *

L'UNESCO met actuellement au point son propre plan d'action transdisciplinaire, qui rassemble non seulement les sciences exactes et naturelles mais aussi les sciences sociales, l'éducation, la culture et la communication. Les domaines



Perspectives des énergies renouvelables dans le monde, calculées par l'UNESCO et présentées lors d'une exposition pour le Sommet de Johannesburg

qui présentent un intérêt particulier pour l'UNESCO et qui ont été soulignés à Johannesburg sont ceux de l'éducation pour le développement durable, l'eau douce et les océans, la gestion des écosystèmes, les énergies renouvelables et les dimensions éthiques du développement durable.

L'UNESCO aspire à travailler avec ses partenaires intergouvernementaux et non gouvernementaux pour donner suite au Sommet mondial pour le développement durable.

Susan Schneegans⁴

Pour en savoir plus : j.damlamian@unesco.org

3. Nouveau partenariat pour le développement de l'Afrique : www.nepad.org
4. Redactrice en chef, Planète Science.

Projet pour la sauvegarde des grands singes (GRASP)

Au rythme actuel, l'orang-outan risque de disparaître des forêts de la planète dans les 10 ans à venir. C'est une victime muette de la destruction de l'habitat et des feux qui ravagent régulièrement les forêts de Bornéo, son principal habitat. Et il n'est pas le seul dans ce cas. Les chimpanzés, les gorilles et les bonobos sont également menacés d'extinction. En Afrique, le braconnage et les conflits armés sont les deux principaux dangers qui menacent leur survie.

Comme il est urgent de sauver les plus proches parents d'*Homo sapiens sapiens*, l'UNESCO et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUÉ) ont lancé le projet GRASP (Great Ape Survival Project – Projet pour la sauvegarde des grands singes) en partenariat avec un certain nombre d'organisations non gouvernementales (ONG) et en ont fait une initiative de type 2. Par le biais de ce projet, l'UNESCO utilise son Réseau mondial de réserves de biosphère et de sites inscrits sur la Liste du patrimoine mondial pour contribuer à conserver l'habitat des grands singes en Afrique et en Asie.

Pour plus de renseignements, aller sur : www.unesco.org/mab/grasp/home.shtml
ou s'adresser à : s.mankoto@unesco.org



« Boris », un chimpanzé du zoo de Chester (Royaume-Uni) dessiné par le professeur Aterini. Sa mère avait été abattue dans la nature alors qu'il n'était qu'un bébé

La crise de l'eau : comment en sommes-nous arrivés là ?

L'enseignement le plus marquant de l'Année internationale de l'eau douce est la mise en évidence d'une crise mondiale de l'eau qui prendra une ampleur sans précédent dans les années à venir si aucune mesure n'est prise pour enrayer l'actuelle « inertie des dirigeants ».

C'est le sombre pronostic établi par le *Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau – L'eau pour les hommes, l'eau pour la vie*, publié par l'UNESCO cette année au nom de 24 agences des Nations Unies. Le rapport prévoit « une augmentation du déficit d'eau par habitant dans de nombreux endroits du monde en développement » en raison de la croissance démographique, de la pollution et du changement climatique prévu.

« Les réserves d'eau s'amenuisent alors que la demande par habitant augmente de façon dramatique. Au cours des 20 prochaines années, on s'attend à une diminution d'un tiers, en moyenne, de l'eau disponible par personne dans le monde » a souligné le Directeur général de l'UNESCO, Koichiro Matsuura. « Aucune région ne sera épargnée par l'impact de cette crise qui touche tous les aspects de la vie, de la santé des enfants à la capacité des pays à nourrir leurs citoyens ».

Comment en sommes-nous arrivés là ? Tout simplement parce que, malgré les preuves irréfutables de la crise, la volonté politique nécessaire pour inverser les tendances fait cruellement défaut. Au cours des 25 dernières années, des conférences internationales ont été consacrées à de nombreux sujets concernant l'eau, notamment les différentes manières d'assurer, à l'avenir, les besoins élémentaires en eau et en assainissement. Plusieurs objectifs ont été définis pour améliorer

la gestion des ressources en eau mais « aucun n'a vraiment été atteint. L'inertie des dirigeants, ajoutée à l'insuffisance de la prise de conscience, par la population mondiale, de l'importance réelle du problème, fait que nous ne menons pas, en temps utile, les actions correctives nécessaires ».

De nombreux pays et territoires déjà en crise

Le rapport classe plus de 180 pays et territoires selon les ressources renouvelables en eau disponibles par individu, c'est-à-dire l'eau circulant en surface, sous la surface ou plus profondément (*voir tableau pour les valeurs extrêmes*).

Vers 2050, 7 milliards de personnes dans 60 pays (hypothèse pessimiste) ou 2 milliards dans 48 pays (hypothèse optimiste) seront confrontés à une pénurie d'eau, cette fourchette variant selon des critères tels que la croissance démographique et les décisions politiques. Le changement climatique expliquera environ 20 % de l'augmentation de la pénurie d'eau dans le monde. Les zones humides recevront probablement davantage de pluies, alors que les précipitations sont censées diminuer et devenir plus irrégulières dans de nombreuses régions sujettes aux sécheresses, voire dans certaines régions tropicales et subtropicales. La qualité de l'eau va se dégrader en raison de l'augmentation de la pollution et de la température de l'eau.

La crise de l'eau « est destinée à empirer bien que l'existence même d'une telle crise fasse débat ». Un litre d'eau usée pollue environ huit litres d'eau douce. Environ 12 000 km³ d'eau dans le monde sont pollués, ce qui représente plus que toute l'eau des dix plus grands bassins fluviaux du monde, quelle que soit l'époque. Si la pollution suit le rythme de la croissance démographique, la planète va perdre 18 000 km³ d'eau douce d'ici à 2050 – soit près de neuf fois la totalité de ce que les pays utilisent chaque année pour l'irrigation, qui est de loin l'activité la plus consommatrice en eau, puisqu'elle représente 70 % des prélèvements d'eau.

Les eaux usées retraitées pourraient résoudre partiellement la crise de l'eau. Des fermiers utilisent déjà cette ressource pour 10 % des terres irriguées dans les pays en développement et pourraient en utiliser davantage (*voir sur la page suivante Quelques astuces pour améliorer la disponibilité de l'eau*).

En matière de qualité de l'eau, les pauvres continuent d'être les plus touchés avec « 50 % de la population des pays en développement exposés à des sources d'eau polluées ». Les rivières d'Asie sont les plus polluées du monde, avec trois fois plus de bactéries provenant des déchets générés par l'homme que la moyenne mondiale. De plus, ces rivières contiennent 20 fois plus de plomb que celles des pays industrialisés.

« L'avenir de nombreuses parties du monde paraît bien sombre », note le rapport en référence à la croissance



Ci-dessus : Bateaux échoués dans l'ancien port en eau profonde au sud-ouest du Kazakhstan. La mer d'Aral, lieu d'un désastre écologique, a non seulement perdu la moitié de sa surface, mais ce qui en reste est très pollué (voir aussi p.14)
Page suivante : Mise en culture dans le désert

Valeurs extrêmes en matière de disponibilité de l'eau

démographique prévue, qui restera l'élément moteur de la crise. L'eau disponible par individu a baissé d'un tiers entre 1970 et 1990. Même si les taux de natalité ralentissent aujourd'hui, la population mondiale devrait malgré tout atteindre les 9,3 milliards d'individus en 2050.

« La consommation d'eau a presque doublé au cours des 50 dernières années et la qualité de l'eau se dégrade inexorablement [...]. Chaque jour, 6 000 personnes, pour la plupart des enfants de moins de cinq ans, meurent de maladies diarrhéiques. Ces chiffres illustrent l'étendue des problèmes auxquels le monde est confronté en matière de ressources en eau, ainsi que les disparités impressionnantes dans leur utilisation ».

« Au plan mondial, le défi consiste à faire naître la volonté politique de mettre en œuvre les engagements concernant l'eau ». Les professionnels de l'eau ont besoin de mieux comprendre le vaste contexte social, économique et politique, et les hommes politiques doivent être mieux informés sur les questions concernant l'eau. Sinon, l'eau continuera d'être l'objet de la rhétorique politique et de promesses grandioses en lieu et place des actions d'urgence qui s'imposent.

Santé et économie

La qualité et la gestion de l'eau constituent le problème majeur du 21^{ème} siècle. « Plus de 2,2 millions de personnes meurent chaque année de maladies dues à l'eau contaminée et à un mauvais système sanitaire. Les maladies liées à l'eau font aussi beaucoup de victimes : près d'un million de personnes meurent chaque année de malaria et plus de 200 millions souffrent de schistosomiase. Pourtant, ces pertes terribles, avec les dommages et les souffrances qu'elles représentent, peuvent être évitées ».

La communauté internationale s'est engagée dans les objectifs de développement pour le millénaire des Nations Unies (2000) et lors du Sommet mondial sur le développement durable (Johannesburg, 2002) à réduire de moitié d'ici 2015 la proportion de personnes sans accès à une eau potable de qualité et à un système d'assainissement minimal. Pour atteindre ces objectifs d'ici là, il faudra fournir un meilleur accès à l'eau à un milliard et demi de personnes supplémentaires, soit plus de 100 millions de personnes de plus chaque année (274 000 par jour) entre 2000 et 2015.

« Le défi sanitaire est encore plus impressionnant. 1,9 milliards de personnes supplémentaires auront besoin de meilleures prestations, ce qui représente 125 millions de personnes de plus chaque année (soit 342 000 par jour) de 2000 à 2015 ». Le rapport explique qu'aux difficultés logistiques et financières inhérentes à la fourniture d'un système sanitaire correct s'ajoutent les facteurs culturels.

Si le niveau actuel des investissements est maintenu, toutes les régions du monde devraient atteindre ou approcher les deux objectifs, à l'exception de l'Afrique subsaharienne.

Les 20 pays et territoires les plus riches en eau* (en m ³ par personne et par an)	
Guyane française.....	812 121
Islande.....	609 319
Guyane.....	316 689
Suriname.....	292 566
Congo.....	275 679
Papouasie Nouvelle Guinée	166 563
Gabon.....	133 333
Iles Salomon.....	100 000
Canada.....	94 353
Nouvelle Zélande.....	86 554
Norvège.....	85 478
Belize.....	82 102
Libéria.....	79 643
Pérou.....	74 756
Bolivie.....	74 743
Laos.....	63 184
Paraguay.....	61 135
Chili.....	60 614
Guinée équatoriale.....	56 893
Panama.....	51 814

Les 20 pays et territoires les plus pauvres en eau (en m ³ par personne et par an)	
Koweït.....	10
Bande de Gaza.....	52
Emirats arabes unis.....	58
Bahamas.....	66
Qatar.....	94
Maldives.....	103
Jamahiriya arabe libyenne.....	113
Arabie saoudite.....	118
Malte.....	129
Singapour.....	149
Jordanie.....	179
Bahrein.....	181
Yémen.....	223
Israël.....	276
Barbade.....	307
Oman.....	388
Djibouti.....	475
Algérie.....	478
Tunisie.....	482
Burundi.....	566

* À l'exception du Groenland (10 767 857 m³) et de l'Alaska (1 563 168 m³)

Mais « dans l'absolu, les besoins en investissement de l'Asie dépassent de loin ceux de l'Afrique, de l'Amérique latine et des Caraïbes confondues ». Les premières interventions coûteraient environ 12,6 milliards de dollars.

Des questions demeurent quant à la source de cet investissement. « Le financement des objectifs de développement pour le millénaire sera probablement l'un des plus importants défis auquel la communauté internationale aura à faire face au cours des quinze prochaines années ».

Le rapport met également l'accent sur les débats concernant le prix de l'eau et sa privatisation. « Bien qu'il semble essentiel



© Yann Arthus-Bertrand/UNESCO

Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau - l'eau pour les hommes, l'eau pour la vie (2003)

Quelques astuces pour améliorer la disponibilité de l'eau

Saviez-vous que vous pouvez aider la nature à reconstituer les nappes phréatiques en laissant simplement l'eau s'infiltrer à travers les berges d'un fleuve ? Ou bien en alimentant les nappes souterraines en eau au moyen de puits de stockage ? Ce sont deux exemples de méthodes éprouvées qui ont démontré leur pérennité.

La méthode qui consiste à infiltrer de l'eau est actuellement utilisée dans les grandes villes comme Berlin (Allemagne) où les deux tiers de l'eau potable proviennent de la filtration sur berges. Ce même procédé, utilisé à Berlin avec le *ne plus ultra* des méthodes de surveillance*, est couramment utilisé dans les zones rurales en Inde et en Afrique du Sud. Dans ces régions, des puits creusés à la main et des barrages sont utilisés pour capter les eaux de crue ou le débit fluvial saisonnier et le stocker à l'abri de l'évaporation sous la forme d'eaux souterraines susceptibles d'être pompées. Ces structures simples et bon marché peuvent réduire la pénurie d'eau dans les régions arides des pays en développement grâce au stockage des rares excédents d'eau.

Le sol agit comme un filtre naturel des particules en suspension dans l'eau, en décomposant les impuretés telles que les produits pharmaceutiques. En outre, l'eau purifiée lors de son passage à travers le sol, capte des nutriments bénéfiques qui améliorent sa qualité. Les aquifères ont même la capacité de neutraliser les micro-organismes nocifs tels que les virus, une prouesse qui fait l'objet d'une recherche intensive. Grâce aux processus biologiques, chimiques et physiques naturels se produisant dans les nappes souterraines, les eaux usées épurées et régénérées peuvent être utilisées en toute sécurité pour la plupart des usages n'exigeant pas une eau potable, avantage certain pour les zones arides en particulier où l'eau se fait rare.

Dans le cadre d'un projet lancé avec ses partenaires en 2002, l'UNESCO-PHI a édité une brochure sur la façon de reconstituer les nappes phréatiques, intitulée *Managing Aquifer Recharge (Gestion des systèmes de recharge des aquifères)* : <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001278/127843e.pdf> (en anglais seulement).

Vous trouverez toutes les précisions utiles sur les méthodes utilisées plus particulièrement dans les régions les plus arides du monde dans un opuscule en cours de préparation par l'UNESCO, en coopération avec l'Association internationale des hydrogéologues, intitulé *Wise Strategies for Recharge Enhancement in Arid and Semi-arid Areas (Stratégies avisées pour la promotion de la recharge des aquifères dans les régions arides et semi-arides)*, disponible sur : <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001438/1438419e.pdf>.

* www.kompetenz-wasser.de

d'impliquer le secteur privé dans la gestion des ressources en eau, celui-ci doit être considéré comme un catalyseur financier – et non pas comme une condition préalable – lors de l'élaboration du projet [...] Le contrôle des actifs devrait rester entre les mains du gouvernement et des usagers ».

Toute privatisation ou système de fixation du prix de l'eau doit inclure des mécanismes de protection des plus pauvres. « Il est choquant de constater que les plus pauvres qui ont le

moins accès à l'eau doivent payer beaucoup plus pour celle-ci ». A Delhi (Inde), par exemple, des marchands font payer aux pauvres 4,89 de dollars le m³, alors que les familles qui sont raccordées au réseau de distribution ne paient le m³ que 0,01 de dollars, selon une étude publiée dans le rapport. A Vientiane (République démocratique populaire lao), des marchands font payer 14,68 de dollars le m³ contre 0,11 de dollars pour les tarifs municipaux.

D'ici 2030, les chances sont faibles de diminuer de moitié la faim...

Près de 25 000 personnes meurent chaque jour de faim. Environ 815 millions de personnes souffrent de malnutrition : 777 millions dans les pays en développement, 27 millions dans les pays en transition et 11 millions dans les pays industrialisés. Le nombre absolu de personnes sous-alimentées diminue à un rythme très faible, malgré une « production alimentaire qui satisfait la demande du marché à des prix historiquement faibles ».

La communauté internationale s'est engagée dans les objectifs de développement pour le millénaire des Nations Unies à diminuer de moitié d'ici 2015 la proportion de personnes souffrant de faim. Pourtant, en faisant une distinction entre les cultures irriguées et celles qui bénéficiaient de la pluie (distinction absente des estimations antérieures), le rapport présente des projections plus précises des besoins en eau pour le monde d'aujourd'hui et de demain : il arrive à la conclusion que ce résultat pourrait ne pas être atteint avant 2030. Selon ces nouveaux calculs, 45 millions de nouveaux hectares seront irrigués d'ici 2030 dans 93 pays en développement, qui connaîtront la plus forte croissance démographique. Près de 60 % des terres potentiellement irrigables seront utilisées. Cela nécessitera une augmentation de 14 % des volumes d'eau destinés à l'irrigation.

Des quelque 170 pays et territoires étudiés, 20 utilisent déjà pour l'irrigation plus de 40 % de leurs ressources renouvelables en eau, « niveau auquel il peut devenir difficile de choisir entre l'agriculture et le secteur urbain ». Seize autres pays en utilisent plus de 20 %, « ce qui laisse pronostiquer une immense pénurie d'eau. En 2030, l'Asie du Sud aura en moyenne atteint le niveau des 40 %, et le Proche Orient ainsi que l'Afrique du Nord pas moins de 58 % ».

Par contre, l'Afrique subsaharienne, l'Amérique latine et l'Asie de l'Est devraient rester bien en deçà du seuil critique. Ces régions vont connaître la majeure partie de l'expansion agricole au cours des 30 prochaines années.

Les pâtures et les terres cultivées couvrent 37 % de la surface émergée du globe. L'irrigation est particulièrement inefficace – près de 60 % de l'eau utilisée est gâchée. En outre, près de 10 % des terres irriguées du monde ont été endommagées – terrains détremés et salinisation – en raison de pratiques de drainage et d'irrigation inadéquates. Les besoins d'améliorer efficacement le financement d'une meilleure technologie et de promouvoir de meilleures pratiques de gestion se font pressants.

... même si la sécurité alimentaire s'améliore

De façon plus positive, la sécurité alimentaire, au plan mondial, s'améliore. La consommation alimentaire par individu dans les pays en développement est passée de 2 054 kcal par jour en 1965 à 2 681 en 1998. Les rendements moyens des céréales

ont doublé entre 1962 et 1996, passant, par récolte, de 1,4 à 2,8 tonnes à l'hectare. Ceci signifie que pour faire pousser la même quantité de céréales, il faut aujourd'hui un peu moins de la moitié de la surface de terre arable nécessaire auparavant. « En 2030, il est prévu que 80 % de la production supplémentaire récoltée proviendront de rendements plus élevés, d'un accroissement de la rotation des cultures et d'une réduction des périodes de jachère ».

« Vers 2050, le monde pourrait avoir accès à l'alimentation pour tous. Le fait que 815 millions de personnes sont aujourd'hui touchées par une malnutrition chronique n'est pas dû à l'incapacité de produire la nourriture nécessaire, mais aux contextes sociaux, économiques et politiques mondiaux et nationaux qui permettent à des niveaux de pauvreté inacceptables de se perpétuer, quand ils n'en sont pas la cause ».

Nous détruisons les écosystèmes sans vergogne

D'ici 2025, on prévoit que les prélèvements d'eau auront augmenté de 50 % dans les pays en développement et de 18 % dans les pays développés.

Le rapport décrit un cercle vicieux entretenu par des besoins croissants en eau. En épuisant et en polluant les fleuves, lacs et zones humides, nous détruisons des écosystèmes qui jouent un rôle essentiel dans le filtrage et la formation des ressources en eau douce. Aux Etats-Unis, selon un bilan datant de 1998, 40 % des plans d'eau n'étaient pas propices à des activités de loisirs en raison d'une pollution aux métaux ou d'origine agricole. Par ailleurs, seuls 5 fleuves sur 55 en Europe sont considérés comme propres, tandis qu'en Asie, tous les fleuves qui traversent des villes sont très pollués. Sur les 227 plus grands fleuves du monde, 60 % sont fortement compartimentés par des barrages, dérivations et canaux qui dégradent les écosystèmes.

« A propos de la faune des eaux continentales, 24 % des mammifères et 12 % des oiseaux sont menacés. Seuls 10 % environ des espèces de poissons du monde, la plupart habitant les eaux continentales, ont pu être étudiés en détail, et pourtant un tiers est menacé. Jusqu'à 80 espèces de poissons ont disparu depuis la fin du 19^{ème} siècle.

L'urbanisation sauvage, une menace pour la vie

« Lorsque les services et les infrastructures hydrauliques font défaut, les villes deviennent les environnements de la planète les plus dangereux pour la vie de leurs habitants ». Selon une étude portant sur 116 villes, les zones urbaines en Afrique sont les plus mal équipées, avec seulement 18 % de foyers raccordés aux égouts suivies par l'Asie, où ce taux dépasse à peine les 40 %.

« Les populations pauvres de ces villes sont les premières victimes des maladies liées au système sanitaire, aux inondations et même au taux grandissant des maladies liées à l'eau comme la malaria, qui fait désormais partie des principales causes de maladie et de mortalité dans de nombreuses zones urbaines ». En Asie du Sud, par exemple, le moustique *Anophèle stephensi* a adapté ses habitudes de ponte en fonction des réservoirs d'eau, placés un peu partout sur les toits.

« Dans une perspective de santé publique, il est préférable de fournir à toute la population d'une ville une eau de qualité à tra-

vers des robinets situés dans un rayon de 50 mètres des foyers que de fournir l'eau courante aux seuls 20 % de foyers les plus riches ».

Le rapport insiste également sur plusieurs raisons qui militent en faveur d'une priorité à accorder aux villes plutôt qu'aux zones rurales, quand un tel choix s'avère nécessaire. Premièrement, les coûts unitaires des infrastructures nécessaires sont inférieurs car les zones urbaines font réaliser d'importantes économies d'échelle et de proximité. Deuxièmement, de nombreuses villes fournissent une base économique plus prospère que les zones rurales, et des possibilités accrues d'augmenter les revenus de la distribution de l'eau. Troisièmement, « les zones urbaines ne font pas que concentrer les individus et les entreprises, elles concentrent également leurs déchets ».



La douche dans la cour (Haïti)

© UNICEF/N. Toussaint

Les pays industriels produisent 80 % des déchets dangereux

Aujourd'hui, l'industrie représente 22 % de l'utilisation totale de l'eau dans le monde : 59 % dans les pays à revenus élevés, 8 % dans les pays à faibles revenus. Le rapport prévoit que ce taux atteindra 24 % en 2025, quand l'industrie utilisera environ 1 170 km³ d'eau par an. Chaque année, 300 à 500 millions de tonnes de métaux lourds, solvants, boues d'épandage toxiques et autres déchets issus de l'industrie s'accumulent dans les réserves d'eau. Plus de 80 % des déchets dangereux du monde sont produits aux Etats-Unis et dans les autres pays industriels.

L'exploitation du potentiel hydroélectrique : le pour et le contre

L'énergie hydroélectrique est l'une des principales (et des plus utilisées) sources d'énergie renouvelables, avec environ 19 % de la production totale d'électricité en 2001. Les pays industrialisés exploitent à environ 70 % ce potentiel électrique, contre 15 % dans les pays en développement. Le Canada est le plus gros producteur suivi par les Etats-Unis et le Brésil. Des ressources hydroélectriques non exploitées sont encore abondantes en Amérique latine, en Inde et en Chine.

« En développant la moitié de ce potentiel, nous pourrions réduire les émissions de gaz à effet de serre d'environ 13 % ». Néanmoins, le rapport montre aussi les nombreux impacts négatifs de la construction de barrages, tels que le déplacement des populations locales et les dégâts sur l'environnement, dont la perte de la biodiversité et de zones humides.

Amy Otchet



© UNESCO/Roger

Prendre la température de la montagne

À l'avenir, le réchauffement climatique devrait se faire particulièrement sentir dans les milieux froids, comme les montagnes et les climats nordiques. Durant les deux dernières années, 350 scientifiques ont collaboré à un projet sur le Changement planétaire dans les régions de montagne (GLOCHAMORE), impliquant l'UNESCO et le *Mountain Research Institute (MRI)* dont le siège est en Suisse. Ces scientifiques ont mis en place un réseau de sites sélectionnés dans diverses réserves de biosphère de montagne, afin d'observer et d'étudier, au fil du temps, les empreintes du changement planétaire sur la nature et son impact sur les habitants de ces régions. Coordonné par l'Université de Vienne en Autriche et financé par l'Union européenne, le projet regroupait 14 partenaires de 8 pays européens, plus l'Inde. Lorsque le projet a pris fin en octobre dernier, quelque 28 réserves de biosphère du monde entier avaient été sélectionnées et les bases avaient été jetées pour la surveillance à long terme des changements dans ces sites alpins.



© D. Fagere

Le quart de la superficie des terres émergées de notre globe se compose de régions montagneuses qui procurent, à près de la moitié de l'humanité, des biens et des services comme par exemple une eau douce de qualité. En dépit de l'aspect robuste des montagnes, leur

environnement est en réalité très exposé à la dégradation, ainsi qu'il apparaît à quiconque a observé les ravages causés par les mines à ciel ouvert ou le déboisement systématique des versants. En milieu alpin, les principaux moteurs du changement sont le climat, le mode d'exploitation des terres et les dépôts azotés.



© T. Schaaf

Jeunes gens dans la Réserve de biosphère de Issyk-Kul, au Kirghizstan

Le changement climatique va entraîner des pénuries d'eau pour les millions de personnes tributaires des glaciers

Pour les millions de personnes dont l'approvisionnement en eau douce dépend, en Asie et en Amérique latine, de la fonte de la neige et des glaciers le changement climatique entraînera de grandes pénuries, selon un article publié dans *Nature* le 17 novembre par une équipe de chercheurs dirigée par Tim Barnett, du *Scripps Institute of Oceanography*, situé aux Etats-Unis.

Dans de nombreuses régions du monde, les glaciers fondent à une vitesse sans précédent. La partie du Pérou qui est couverte de glaciers s'est réduite de 25 % en l'espace de 30 ans. Toutefois, selon les auteurs, « la région où la disparition des glaciers affectera peut-être le plus l'approvisionnement en eau dans les quelques décennies à venir est la Chine et certaines parties de l'Asie, y compris l'Inde, qui constituent ensemble la région Hindu Kouch-Himalaya », peuplée d'environ 50 à 60 % de la population mondiale.

La région Hindu Kouch-Himalaya recèle plus de glace que tout autre lieu de la terre, exception faite des régions polaires. Les auteurs déclarent qu'« il ne fait aucun doute que les glaciers de la région Hindu-Kouch-Himalaya fondent et que ce phénomène est concomitant avec une élévation à long terme des températures de l'air près de la surface ». Après 25 ans de travaux, *l'Inventaire des glaciers de Chine*, qui vient d'être rendu public, signale une fusion substantielle de pratiquement tous les glaciers, le recul le plus marqué (750 m) pendant ces 13 dernières années étant notamment celui du glacier qui alimente l'une des principales sources du fleuve Yangtze, le plus grand de Chine... Les auteurs ajoutent que la fusion semble aller en s'accéléralant.

« Le cycle hydrologique de la région est affecté par la mousson d'Asie mais il n'est pas douteux que la fusion des glaciers fournit à la région une source d'eau essentielle dans les mois d'été : jusqu'à 70 % du débit estival du Gange et 50 à 60 % de celui des autres fleuves. En Chine, 23 % de la population vit dans les régions de l'ouest, où la fonte des glaces constitue le principal apport d'eau en saison sèche ».

Les auteurs concluent : « il semble que certaines parties des régions les plus peuplées du globe soient menacées de manquer d'eau en saison sèche si les tendances actuelles du réchauffement et de la fonte des glaces se poursuivent pendant encore quelques décennies. Il est peut-être encore temps de planifier une stratégie à long terme qui permettrait à la région de faire face à ce problème ».

Source : *Nature* 438, 303 (2005) et M. Shanahan pour *SciDev.net*



Dans la chaîne de montagne Cordillera Blanca d'Amérique latine, la zone couverte par les glaciers a sensiblement rétréci depuis 30 ans. Vue du glacier Yanamarey, en régression accélérée, dans la Réserve de biosphère du Huascarán, au Pérou



© INRENA

Signes manifestes du changement climatique

Dans une étude menée en 2004 dans le cadre du projet GLOCHAMORE, les gestionnaires des réserves de biosphère de montagne ont relaté leur expérience vécue du réchauffement planétaire. En tête de leurs préoccupations figure l'impact économique des modifications du milieu naturel. Dans la Réserve de biosphère de Kosciusko en Australie, par exemple, où quatre stations de ski procurent à la région un revenu annuel d'environ 190 millions de dollars australiens, la saison hivernale tend à se raccourcir. Dans la Réserve de biosphère de Changbaishan, en Chine, la diminution du couvert neigeux se traduit pour les paysans par une réduction de la quantité d'eau disponible pour l'agriculture. Dans la Réserve de biosphère du mont Kenya, des crues subites et autres phénomènes hydrologiques sont en train d'envaser les systèmes hydrauliques et les canalisations servant à l'irrigation. Les communautés locales souffrent également de pénurie d'eau, comme dans la Réserve de biosphère de Kruger to Canyons, en Afrique du Sud.

C'est sur la végétation que se manifeste le plus nettement l'impact du réchauffement du climat. La Réserve de biosphère de Changbaishan a signalé que « le bouleau alpin *Betula ermannii* s'est déplacé en altitude ces 20 dernières années vers l'écosystème de toundra. On a constaté que chez certaines espèces, comme le *Larix olgensis* et l'*Abies nephrolepis*, la biomasse semble avoir augmenté avec le réchauffement du climat ». Autrement dit, ces deux espèces végétales prolifèrent en raison de l'élévation de la température, phénomène qui finira par entraîner un déséquilibre écologique.

Voici une liste non exhaustive des effets du changement climatique dans les réserves de biosphère de montagne. Les signes énumérés ci-dessous sont souvent liés entre eux, ce qui suggère que tout effet du changement climatique peut déclencher des réactions en chaîne, à la fois dans la sphère physique et sociale :

- Intensification du rayonnement ultraviolet du soleil
- Fonte des glaciers
- Dégel des pergélisols, entraînant une intensification de l'érosion (éclatement des roches et autres minéraux à la surface ou juste en dessous du au changement de température ou d'humidité, etc.)
- En raison de l'intensification de l'érosion, sols plus secs, subsidence, envasement, glissements de terrains etc.
- Fréquence et violence accrues des tempêtes, inondations, incendies, glissements de terrains et avalanches
- Modification de la distribution et du nombre des espèces végétales et animales
- Allongement de la période de croissance de la végétation, dans la mesure où ses divers étages se déplacent en hauteur dans la montagne
- Diminution des chutes de pluie et de neige (précipitations)
- Assèchement de l'étage forestier par suite de la diminution des précipitations
- Augmentation des risques d'incendie, par suite de l'assèchement de l'étage forestier
- Intensification des rivalités chez les populations humaines des basses terres pour s'approprier des ressources naturelles en diminution.



© Li Yang

Station météorologique du lac Céleste, à 2 600 m d'altitude, dans la Réserve de biosphère de Changbaishan, en Chine. D'autres stations étudient les facteurs hydrologiques et l'activité sismique et volcanique

Des scientifiques font des relevés glaciologiques dans le manteau neigeux de la montagne afin de reconstituer l'histoire du climat à partir des couches sédimentaires et des carottes de glace. Ils se trouvent dans le Parc national des glaciers de l'État du Montana, aux É-U

Les paysages de montagne sont parmi les écosystèmes les plus complexes et les plus fragiles de la planète. Leur verticalité même impose une variété considérable d'habitats dont la juxtaposition est saisissante au regard des faibles différences d'altitude. En régions tropicales ou subtropicales, cette variété se manifeste par la présence de palmiers dans les étages inférieurs et de glaciers en hauteur ou, ce qui est moins frappant, les différences dans les espèces d'insectes, à mesure que vous escaladez le flanc de la montagne.

Pour calculer et prévoir les effets des changements climatiques dans ces milieux, l'investigation scientifique doit disposer d'une vaste expertise. Les participants au projet GLOCHAMORE ont donc mis au point une stratégie de recherche couvrant des domaines aussi divers que les modifications de l'utilisation des terres, la cryosphère (paysages gelés en permanence, d'après le terme grec *Kruos*, froid), les régions enneigées, les systèmes hydrologiques, les prairies et la toundra, les forêts et les systèmes aquatiques, la vie sauvage, les espèces végétales et animales exogènes et les risques naturels (inondations, incendies, glissements de terrains etc.) pour n'en citer que quelques uns.

Parmi les recommandations des scientifiques participant au GLOCHAMORE, l'une concerne les mécanismes d'« alerte rapide » à mettre en place, afin de déceler l'arrivée d'organismes envahisseurs et leur impact sur l'environnement. Avec l'élévation annuelle des températures sur le long terme due au réchauffement planétaire, des espèces non endogènes de végétaux, d'insectes et d'autres animaux, par exemple, peuvent être plus susceptibles d'envahir de nouveaux écosystèmes dès lors que leur comportement n'est pas surveillé. L'absence de contrôle et de réaction peut être fatale à la structure et aux fonctions des écosystèmes de montagne. Des bestioles hostiles pourraient attaquer les plantes et les herbes qui maintiennent le sol sur la pente, par exemple. Retirez cet ancrage et vous aurez une sérieuse érosion avec glissements de terrains et des réactions en chaîne sur les habitants des communautés locales.

Un réseau de postes d'observation alpins

Le projet GLOCHAMORE a mis en place un réseau de postes d'observation pour mesurer les effets des changements sur la nature mais aussi sur les personnes qui vivent dans ces climats plutôt froids. En l'espace de deux ans, le projet a élaboré un plan d'observation de l'environnement et de la vie sociale en régions montagneuses qui facilite l'établissement de stratégies de recherche sur le changement planétaire dans certaines réserves de biosphère de l'UNESCO (voir tableau, p. 13). Rien n'empêche d'appliquer un jour la stratégie de recherche de GLOCHAMORE à d'autres réserves de biosphère de montagne – on en compte 150 en tout – ou au site du patrimoine mondial du mont Kilimandjaro en République unie de Tanzanie. Certains sites alpins se sont même vu accorder la double qualification ; c'est le cas du bassin de l'Uvs Nuur en Mongolie et du mont Kenya, qui sont à la fois réserves de biosphère et sites du patrimoine mondial. Or, il se trouve que l'impact du changement climatique sur les derniers

sites du patrimoine mondial fera l'objet d'une réunion à l'UNESCO les 16 et 17 mars prochains.

Au cours des deux années écoulées, GLOCHAMORE a défini des indicateurs pour détecter et analyser les signaux du changement dans ces régions de haute altitude et analyser les relations directes de cause à effet qui affectent chacun des écosystèmes, grâce à des marqueurs soigneusement sélectionnés. Ces indicateurs ont été gradués selon leur facilité d'emploi.



© T. Schaeff

Traversée d'une rivière dans la Réserve de biosphère de Katunsky dans l'Altaï, Fédération de Russie

20^{ème} siècle a déjà eu un effet certain sur les glaciers et les marges périglaciaires des montagnes. Si cette tendance devait se poursuivre, les experts prévoient que les petits glaciers de montagne pourraient fondre, de même que le pergélisol, et que l'espace occupé par les régions alpines pourrait diminuer.

Concrètement, le réseau des réserves de biosphère sélectionnées observe les indicateurs cryosphériques tels que le couvert neigeux, les glaciers, le pergélisol et la solifluxion (l'effet du gel et de la fonte du sol,

qui fait glisser sa couverture), les écosystèmes de haute montagne et d'eau douce et l'hydrologie des bassins versants, et enfin les écosystèmes terrestres, notamment la vie végétale des montagnes et certains animaux qui s'abritent sous la terre. Il a déjà mis au jour des preuves troublantes du changement climatique (*voir encadré, p.11*).

Preuves troublantes du changement planétaire

Dans la mesure où ils sont tous sensibles aux variations de la température atmosphérique, les glaciers, les zones de sol gelé (le pergélisol) et les régions alpines servent de révélateurs du changement climatique planétaire. Le réchauffement durant le

Laboratoires vivants du développement durable

Si les réserves de biosphère de montagne de l'UNESCO ont été choisies comme sites de surveillance du projet GLOCHAMORE, c'est parce qu'elles présentent l'énorme avantage de permettre de faire des comparaisons à l'échelle mondiale ; d'autre part, parce que le « concept de biosphère » se prête remarquablement à la recherche intégrée de l'observation des changements qui affectent les milieux naturels aussi bien que socioéconomiques.

En effet, le concept de biosphère admet que les êtres humains et la nature cohabitent et que cette réalité doit être prise en compte dans les pratiques de préservation de la nature. Le concept de réserve de biosphère obéit à une démarche de découpage en zones : aires centrales de protection rigoureuse, entourées de zones tampon où la protection de l'environnement est considérée comme importante mais où la population vit et travaille également, le tout étant entouré d'une zone de transition où le développement durable est encouragé.

C'est le rapport Brundtland, *Notre avenir à tous*, qui a proposé en 1987 la définition du développement durable qui est désormais admise par tous comme la norme :

Un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs.

Le rapport Brundtland a contribué à déclencher chez les Nations unies une série d'initiatives dont les « Sommets Terre » de Rio (Brésil, 1992) qui a adopté l'Action 21, et de Johannesburg (Afrique du Sud, 2002), ainsi que la Convention cadre sur les changements climatiques, à laquelle s'est ajouté en 1997 le Protocole de Kyoto.

Au Sommet Terre de Rio, les Nations unies ont mis en lumière le vaste réseau, créé par l'UNESCO, des réserves de biosphère en tant que laboratoires vivants pour les efforts de protection. Ce Sommet a marqué le début d'une prise de conscience croissante de l'importance des montagnes. Une décennie plus tard les Nations unies allaient désigner 2002 comme Année internationale des montagnes. La principale contribution de l'UNESCO serait de lancer le projet GLOCHAMORE. Il est intéressant de noter que les recherches sur la montagne ont également gagné du terrain cette dernière décennie dans l'Union européenne.

Sur l'Année internationale de la montagne, voir Planète Science 1(2) de janvier 2003



© Javier Sánchez Gutiérrez



© T. Schaeff/UNESCO

Dans la Réserve de biosphère de la Sierra Nevada (en Espagne), la population vit tout près de la montagne, source de revenus grâce au tourisme et autres activités de loisirs. Une station de ski se situe dans la zone tampon, sur les pentes inférieures ; la zone de transition est occupée par l'agriculture et les villages

Assurer la viabilité à long terme de la surveillance des montagnes

Le choix des sites de montagnes ne s'est pas fait au hasard. Ils ont été sélectionnés dans divers pays en fonction de critères de représentativité géographique, socioéconomique et culturelle. Il fallait également vérifier si le site disposait de l'infrastructure nécessaire pour participer au projet.

Les études entreprises sur les emplacements choisis devaient intégrer des facteurs naturels et sociétaux, faisant donc appel à plusieurs disciplines scientifiques. « Par la surveillance, il est possible d'élaborer un plan qui cible les indicateurs résultant de l'activité humaine, et qui permette aux gestionnaires des réserves de biosphère de fixer par exemple des seuils de viabilité et de s'efforcer de les respecter ». C'est ce que suggère le rapport de la première réunion thématique du projet à Vienne, en 2004. Mais, conclut le rapport, « pour réaliser une étude parfaitement intégrée de ce qu'on appelle le « système nature-société », encore faut-il trouver des dénominateurs communs, et même créer un nouveau vocabulaire qui soit intelligible aux praticiens des sciences naturelles et des sciences sociales ».



Parc national des glaciers aux É.-U.

La Déclaration de Perth déplace des montagnes

En deux ans d'activité, le GLOCHAMORE a pu organiser cinq ateliers internationaux spécialisés. Ces ateliers scientifiques portaient en général sur les moteurs du changement planétaire et l'impact de ces changements sur les écosystèmes, sur les biens et les services fournis par ces écosystèmes, sur l'économie, la santé et les dispositifs institutionnels de chacune des régions. Les actes de ces ateliers ont été publiés en une série de recueils.

Les scientifiques ont examiné les aspects les plus inquiétants du changement climatique observés dans les paysages de montagne, tels l'exploitation durable des terres, la gestion des ressources naturelles, l'évaluation des relations entre les activités humaines et les modifications du milieu, et la modélisation destinée à planifier les futurs effets du réchauffement planétaire dans les montagnes.

Le projet a abouti à une Conférence scientifique multidisciplinaire sur les changements mondiaux en région montagneuse, qui s'est tenue à Perth (Écosse), du 2 au 6 octobre. Elle capitalisait les acquis des réunions de Vienne (Autriche) et de L'Aquila (Italie) en 2004, de Grenade (Espagne) et de Samedan (Suisse) en 2005 et de la réunion « de coup d'envoi » du projet, tenue dans la Réserve de biosphère d'Entlebuch (Suisse) en novembre 2003.

La Conférence scientifique multidisciplinaire a réuni 250 délégués de 47 pays pour passer en revue les travaux du projet et définir la suite à lui donner. Les scientifiques ont profité de la conférence pour lancer un appel vibrant – la *Déclaration de Perth* – aux gouvernements, aux agences de financement et au secteur privé pour qu'ils apportent leur soutien à un nouvel effort de recherche sur les effets du changement climatique dans les écosystèmes de montagne et sur la gestion durable des milieux montagneux et des communautés établies au pied des montagnes.

Pour lire la *Déclaration de Perth* : www.unesco.org/mab/mountains/news.htm; et les *Actes des réunions de GLOCHAMORE* : www.unesco.org/mab/mountains/publications.htm

Réserves de biosphère de montagne retenues pour le projet	Altitude par rapport au niveau de la mer	
Afrique		
Tassili N'Ajjer (Algérie)	1 150	– 2 158
Mount Kenya	1 600	– 5 199
Oasis du Sud (Maroc)	680	– 4 071
Kruger to Canyons (Afrique du Sud)	200	– 2 050
Asie-Pacifique		
Kosciuszko (Australie)	213	– 2 228
Changbaishan (Chine)	720	– 2 691
Issyk-Kul (Kyrgyzstan)	1 609	– 7 439
Nanda Devi (Inde)	1 800	– 7 817
Uvs Nuur Basin (Mongolie)	759	– 3 966
Katunskiy (Fédération de Russie)	765	– 4 506
Sikhote-Alin (Fédération de Russie)	0	– 1 600
Teberda (Fédération de Russie)	1 260	– 4 047
Europe		
Gossenköllersee (Autriche)	2 413	– 2 828
Gurgler Kamm (Autriche)	1 900	– 3 400
Berchtesgaden Alps (Allemagne)	471	– 2 713
Sierra Nevada (Espagne)	400	– 3 482
Lake Torne (Suède)	340	– 1 610
Entlebuch (Suisse)	600	– 2 350
Swiss National Park (Suisse)	1 500	– 3 174
Amérique Latine		
Araucarias (Chili)	800	– 3 124
Torres del Paine (Chili)	20	– 3 050
Cinturón Andino (Colombie)	1 700	– 5 750
Huascarán (Pérou)	2 500	– 6 768
Amérique du Nord		
Mount Arrowsmith (Canada)	300	– 1 817
Parc national des glaciers (É.-U.)	972	– 3 185
Niwot Ridge (É.-U.)	2 866	– 3 780
Denali (É.-U.)	122	– 6 194
Olympic (É.-U.)	0	– 2 428

Les gestionnaires des réserves de biosphère de montagne auront un rôle crucial à jouer dans la viabilité à long terme de la surveillance des montagnes. Ils deviendront dépositaires de l'information et des données recueillies par le corps des scientifiques nationaux et étrangers qui vont, dans les dix prochaines années aller et venir dans ces régions. Surveiller l'évolution du climat est, par définition, une entreprise à long terme qui exige une observation *in situ* généralisée et constante. Sera également cruciale la participation d'autres parties prenantes telles que les communautés locales, afin de maintenir durablement un « poste d'observation » des changements climatiques.

Cet article est le fruit d'une collaboration d'auteurs du Consortium GLOCHAMORE ; pour en savoir plus : t.schaaf@unesco.org



Igor Vasilievich Severskiy

Fonte des glaciers et faiblesse des politiques font le malheur des eaux vives d'Asie centrale

Igor Vassilievich Severskiy faisait partie, en novembre dernier, des 60 experts de 13 pays qui lancèrent un appel pour la création d'un centre régional de recherche sur les glaciers, lors d'un atelier organisé à Almaty (Kazakhstan) par l'UNESCO et ses partenaires. Le Prof. Severskiy dirige le laboratoire de glaciologie de l'Institut de géographie du Kazakhstan ainsi que le Comité national kazakh au sein du Programme hydrologique international de l'UNESCO. Il explique pourquoi, ensemble, les scientifiques et les décideurs d'Asie centrale ont tout à gagner à l'établissement d'un centre régional de recherche sur les glaciers.

A quelle vitesse les glaciers reculent-ils en Asie centrale ?

Plusieurs études présentées à l'atelier de novembre démontrent qu'en Asie centrale les glaciers des régions montagneuses de l'Alatau de Dzoungarie et du Pamir-Alai fondent très rapidement. Entre 1955 et 2000, ils ont perdu 0,6 à 0,8% de leur superficie par an et 0,8 à 1% de leur volume. Ces chiffres ne laissent place à aucun doute : c'est le réchauffement de la planète qui explique la déglaciation et le rétrécissement des surfaces enneigées et glacées d'Asie centrale.

L'observation des glaciers est-elle satisfaisante en Asie centrale ?

Elle présente de grosses lacunes. L'atelier de novembre a fait le constat que c'est l'absence d'un système de surveillance des glaciers en Asie centrale qui explique le manque d'information sur leur dynamique de masse. C'est un grave problème, car les glaciers sont des indicateurs clés du changement climatique planétaire.

Il n'existe pratiquement aucun système d'observation, par exemple, pour la couverture neigeuse de l'étage de haute montagne au-delà de 3 000 à 3 200 m ; or, c'est là que, selon nos recherches, se concentre environ la moitié de la neige. C'est cette neige qui constitue la principale source de ruissellement en Asie centrale. La plupart des pays de la région n'effectuent même pas d'observations systématiques des pergélisols. L'absence de données factuelles sur les processus et les phénomènes naturels des régions de haute altitude et des montagnes froides oblige les scientifiques à utiliser des données secondaires, des méthodes indirectes et à recourir à des hypothèses pour construire leurs modèles de prévision. Ce qui explique les divergences d'opinions entre scientifiques quant à l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de la région en général, et des glaciers en particulier.

Je crois vraiment que c'est ce qui a incité les participants à lancer un appel pour la création en Asie centrale d'un centre régional de recherche sur les glaciers, sous les auspices de l'UNESCO. Le centre favoriserait et coordonnerait l'observation afin de faire avancer notre connaissance des change-

ments dus au climat pour tout ce qui concerne la masse de neige et de glace des glaciers, le pergélisol et le système de ruissellement reliant l'eau de fonte aux fleuves et aux lacs des basses terres.

Les glaciers vont-ils disparaître au milieu du siècle ?

La perspective d'une disparition des glaciers au milieu du siècle actuel est présentée de façon angoissante dans la littérature scientifique. Notre recherche esquisse cependant, un scénario plus optimiste. Par exemple, le recul du glacier du versant nord du Tianshan a atteint son point maximum vers le milieu des années 1970, avant de commencer à baisser au début des années 1980. La chaîne du Gissar-Altaï a connu le même scénario. Pour prendre un autre exemple, on a même observé un regain des glaciers dans les monts du Karakoram central, où entre 1990 et 2000 ils ont avancé de 2,5 km.

Les mesures de la température moyenne actuelle du pergélisol relevées pendant une longue période près du col de Zhusalysyken (à 3 400 m) dans la chaîne de montagnes de l'Alatau de Zailyskiy (Tianshan Nord) montrent une augmentation constante de la température entre 1974 et 1995 avant qu'elle ne se stabilise autour de $-0,2^{\circ}\text{C}$ pendant plus d'une décennie.

Qui plus est, selon notre analyse, qui prend en compte la tendance mondiale au réchauffement, l'aire des glaciers du bassin du lac Balkash pourrait perdre un tiers de son étendue, sans toutefois disparaître complètement.

Ces études de cas prouvent que les glaciers de l'Asie centrale pourraient ne pas disparaître aussi rapidement que prévu. Ceci dit, avant de nous lancer dans la moindre prévision, nous avons besoin de systèmes d'observation actualisés.

Les lacs de glaciers pourraient-ils devenir dangereux en débordant ou en fissurant leurs rivages ?

Oui, cela pourrait bien se produire. La fonte d'un glacier pourrait donner lieu à un nouveau lac dans les parages, ou gonfler le niveau du lac, ou même déstabiliser les sols meubles. Ces trois phénomènes accroîtraient considérablement la probabilité de coulées de boue.

La fonte des glaciers est-elle responsable de la pénurie d'eau des basses terres ?

La gestion des ressources en eau pose un problème aigu en Asie centrale, surtout dans le bassin de la mer d'Aral. L'eau de fonte des neiges éternelles et des glaciers alimente les deux grands fleuves de ce bassin, le Syrdarya et l'Amoudarya. Leur débit augmente surtout au printemps et pendant le dégel, en été.

Dès le début des années 1990, 150 % du débit naturel du Syrdarya et 110 % de celui de l'Amoudarya étaient épuisés. Vous vous demandez sans doute pourquoi le pourcentage dépasse les 100 % : ces chiffres tiennent compte des flux de retour en provenance des terres agricoles.

Il est intéressant de noter que le débit des principaux fleuves s'est maintenu pratiquement au même niveau ces quelque 70 à 80 années. En dépit du rétrécissement considérable de l'aire des glaciers, le ruissellement des eaux vers le système fluvial n'a pas changé.

En outre, le volume cumulé des précipitations et des réserves maximales de neige n'a quasiment pas varié, non plus, sur la même période. L'aggravation de la pénurie d'eau dans la région n'est donc pas due à une diminution du volume de l'eau à la source mais à la mauvaise gestion de cette eau en aval.

De quelle façon l'eau a-t-elle été mal gérée ?

La mauvaise gestion de l'eau dans la région remonte aux années 1960, où les autorités centrales soviétiques ont décidé de détourner de l'Amoudarya et du Syrdarya des quantités massives d'eau afin d'irriguer d'énormes plantations de coton. Cela provoqua dans le bassin du Syrdarya une pénurie d'eau qui s'aggrava rapidement entre 1960 et 1990, alors que les agriculteurs étaient incités à utiliser plus d'eau et des quantités dangereuses de pesticides et d'engrais.

Cependant, déjà pendant la décennie 1960, seuls 25 % du débit naturel du fleuve atteignaient la mer d'Aral. Ceci nous indique que l'impact de l'homme sur le bassin était manifeste bien avant la culture intensive du coton. L'agriculture irriguée est une pratique bien établie dans la région depuis les années 1930.

De 1970 à 1989, les pertes en eau dans le bassin ont augmentées de 13,8 à 14,2 km³ par an. Le climat n'était pas responsable de plus de 5 km³ de perte par an (environ 35 % du total), contre 8 à 9 km³ du fait des activités économiques. Cette perte était due à l'accroissement rapide des surfaces irriguées ainsi qu'à l'évaporation des nombreux réservoirs construits dans la région. En outre, le réservoir d'Arnasaïsk perdait, à lui tout seul, 6 km³ d'eau par an en évaporation. Il y a actuellement environ 100 réservoirs et 24 000 km de canaux d'irrigation dans le bassin de la mer d'Aral.

Dans la zone irriguée de Priaralje, au Kazakhstan, la perte est passée, pour la même période, de 2,5 km³ à 4,6 km³ par an. La mer d'Aral ne mesure aujourd'hui que 25 % de sa superficie d'il y a 50 ans.

Toutefois, comme je l'ai déjà dit, même si les glaciers ont reculé, le débit annuel en termes de volume et de répartition interannuelle est resté inchangé depuis plusieurs décennies. Cela donne à penser qu'il existe un mécanisme de compensation, hypothèse confirmée par des recherches récentes.

Quelle sorte de mécanisme de compensation ?

Dans le contexte du réchauffement planétaire, la hausse des températures a provoqué la fonte de la glace souterraine – celle des glaciers recouverts, des glaciers rocheux et de la glace accumulée dans la couche de pergélisol. Cela a contribué au mécanisme de compensation, si bien que le volume du ruissellement dans les bassins versants est resté constant.

Mais, une fois la glace permanente totalement fondue, le mécanisme de compensation ne jouera sans doute plus ?

Nous estimons que ce mécanisme agira pendant encore des décennies, voire un siècle, en dépit du recul des glaciers. Car les réserves de glaces souterraines contenues dans les hautes montagnes du Kazakhstan et du reste de l'Asie centrale sont équivalentes à celles des glaciers actuels. De plus, il y a dans les montagnes de Chine deux fois plus de glace souterraine que dans les glaciers de surface. Sans compter le fait que la glace souterraine fond bien plus lentement que celle des glaciers à ciel ouvert.

Nous pouvons, dès lors, prévoir que le recul actuel des glaciers ne fera pas diminuer dans la région le ruissellement, pas plus que l'approvisionnement en eau, d'ici plusieurs décennies. Cette vision optimiste demande cependant à être soigneusement vérifiée, tâche qui exigera une observation et des études scientifiques supplémentaires, coordonnées tant au niveau régional qu'international. Je suis convaincu que le centre régional envisagé de recherche sur les glaciers nous aidera à prévoir avec une plus grande précision l'impact du changement climatique sur les glaciers et les ressources en eau de la région.

Comment les gouvernements nationaux et locaux peuvent-ils se préparer à la future pénurie d'eau ?

Le problème mérite une sérieuse réflexion. De fait, ces questions politiques ont déjà fait l'objet d'un grand nombre de programmes et d'études, et même de projets à l'échelle mondiale. Ils recommandent, le plus souvent, d'améliorer le système de gestion des ressources régionales en eau. Il est conseillé, par exemple dans l'agriculture irriguée, de remplacer le coton et le riz par des cultures moins gourmandes en eau, comme le blé et d'autres céréales.

Malheureusement, malgré les efforts des gouvernements de la région et de la communauté internationale, la situation reste tendue et s'aggrave même, en ce qui concerne le partage des eaux de la région. On continue à construire des réservoirs, et les zones irriguées s'étendent de plus en plus dans le bassin. En parallèle, le taux de croissance de la population reste élevé.

La situation est aggravée par des problèmes internes. D'une part, les pays, pris individuellement, n'ont pas de stratégies nettement définies pour l'eau. D'autre part, il n'existe pas de bases juridiques sur lesquelles adosser une gestion transfrontalière des ressources en eaux partagées, ni de critères unanimement acceptés pour le partage des eaux transfrontalières.

Interview réalisée par Anil Mishra

Pour en savoir plus (à Almaty): a.mishra@unesco.org

Repenser l'avenir des terres arides

En 1956, *The Future of Arid Lands*⁵ prévoyait que les terres arides feraient l'objet d'un nouvel et vif intérêt dans les décennies à venir. Depuis, les terres arides ont, au contraire, souffert d'un « sous-investissement », alors même que la progression des déserts ne cesse d'absorber les terres arables à une vitesse inquiétante. Aujourd'hui, un tiers de la surface du globe est menacé de désertification et, selon les prévisions, la superficie des terres arables devrait se réduire des deux tiers en Afrique, d'un tiers en Asie et d'un cinquième en Amérique latine d'ici 2025 par rapport à 1990.



Une publication commandée par l'UNESCO pour marquer l'Année internationale des déserts et de la désertification, *The Future of Arid Lands – Revisited*, jette un regard critique sur les conséquences imprévues de notre ancienne conception des écosystèmes de terres arides et sur les aspects socio-économiques de leur mise en valeur. Quelles erreurs avons-nous commises et quelles leçons en tirer ? Prévu pour paraître en 2007, l'ouvrage milite en faveur d'une nouvelle impulsion à donner à la recherche sur les terres arides afin de combler les lacunes persistantes de nos connaissances.

Le paradoxe est que le climat des basses latitudes présente toutes les qualités de lieux où il fait bon vivre et cultiver la terre : ciel dégagé, chaleur et longueur de la saison productive. La clé pour faire s'épanouir le désert a toujours été la découverte de ressources en eau. Dans ces conditions, la recherche de nouvelles sources a été intense et constante.

Ensemencement des nuages et autres astuces

Dans les années 1950, tous les espoirs se sont tournés vers la technologie et ce qui en découlerait. Ce fut l'aube de la construction des grands barrages, alors que l'on se souciait peu de la principale ressource en eau que constituaient les eaux souterraines. Le mot d'ordre était d'exploiter les eaux de surface, de les augmenter en ensemençant les nuages (*voir photo*) et par d'autres moyens, ou bien de trouver des eaux « nouvelles » tirées de sources inexploitées, comme le dessalement des eaux saumâtres et de l'eau de mer.

Au fil des années, on a assisté à la réalisation de presque tout ce qui avait été prévu, mais inévitablement, beaucoup de choses inattendues se sont produites. Avec les années 1950 s'est ouverte une période – qui se poursuit toujours – où la consommation de l'eau est montée en flèche, notamment dans le secteur agricole. En conséquence, peut-être, de cette accélération de la consommation, il s'est produit un changement radical dans la façon de percevoir l'exploitation de l'eau. Si une analyse coût-bénéfice a été, et est toujours, menée pour la plupart des projets d'exploitation de l'eau, la variété des éléments pris en compte dans les coûts et les bénéfices s'est élargie de façon significative depuis lors : aux coûts strictement économiques se sont ajoutés les coûts environnementaux et sociaux.

Alors que les eaux souterraines avaient été ignorées en 1956 parmi les grandes options, l'exploitation des ressources souterraines s'est rapidement développée à partir des années 1950, mais surtout entre 1960 et 1980. L'exploitation ne visait que les retours immédiats sur investissements et non pas la durabilité.

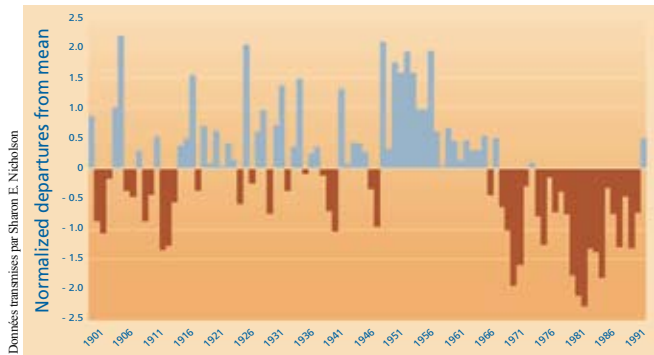
Avec la nouvelle prise de conscience de la valeur de l'eau, les marchés sont désormais promus au rang de mécanisme de correction des injustices commises dans la distribution de l'eau, soit par sa vente, soit par le commerce des denrées qui intègrent de l'eau – l'eau virtuelle.

Si l'on considère comme un ensemble la mise en valeur des ressources en eau et l'utilisation qui en est faite, la différence essentielle entre 1956 et aujourd'hui c'est que l'attention se porte désormais non plus sur l'exploitation de nouvelles réserves d'eau mais sur la nécessité de gérer la totalité des ressources en eau d'un point de vue incluant l'approvisionnement, la demande et la qualité de l'eau.



© NASA et l'US Geological Survey

Images satellites d'Almería, en Espagne du Sud, en janvier 1974 (à gauche) et avril 2000



Données transmises par Sharon E. Nicholson

Indice de pluviosité annuelle montrant les écarts à la moyenne, relevés entre 1901 et 1994 dans les stations météorologiques sahéliennes d'Afrique de l'Ouest

Modifier les conditions climatiques

Dans les régions arides, où la pluviosité est souvent faible mais toujours variable, beaucoup d'études ont cherché à comprendre, à prévoir cette variabilité et à trouver des moyens de faire pleuvoir lorsque la pluviosité est insuffisante. A l'époque où était publié *The Future of Arid Lands*, les techniques de modification des conditions atmosphériques étaient balbutiantes. Ce n'est pas par hasard si leur conception coïncidait avec les débuts de la modélisation numérique de la météorologie par ordinateur. Elles apparaissaient comme un moyen prometteur et valable de servir les progrès de la société et même certains objectifs militaires. La preuve fut faite que l'on pouvait faire pleuvoir dans des situations très particulières, sur de très petites zones, mais cette technique était d'un intérêt si limité et parfois imprévisible qu'elle fut mise en sommeil. Elle se poursuit toutefois, dans certaines régions, avec l'espoir que l'on puisse accroître un tant soit peu les ressources en eau, comme dans le bassin du fleuve Colorado, aux États-Unis.

Cinquante ans plus tard, l'optimisme qui accompagnait autrefois notre nouvelle possibilité d'influencer le climat et de créer des conditions plus favorables pour les terres arides, a largement cédé le pas aux inquiétudes sur l'impact indésirable de l'action de l'homme sur le climat mondial, comme le réchauffement planétaire. Le discours scientifique et politique portant autrefois sur une modification volontaire des conditions climatiques a fait place au débat sur les stratégies visant à atténuer l'impact de la modification involontaire du climat et à s'y adapter.

Avec la prise de conscience de plus en plus nette de l'interconnexion entre les systèmes atmosphériques, océaniques et terrestres à grande échelle, la cible des chercheurs n'est plus celle des impacts locaux et régionaux mais celle des changements à l'échelle planétaire. L'élévation des températures menace de plusieurs manières les modestes ressources en eau des terres arides. Il est évident que l'augmentation du taux d'évaporation des plantes en fonction de l'élévation de la température menace non seulement les réserves stockées dans les réservoirs et les sols, mais accroît aussi les besoins en eau des végétaux. Il existe encore une autre menace, peut-être plus alarmante pour de nombreuses régions : à mesure que s'élèvent les températures minimales diminuera la quantité d'eau contenue dans la couverture neigeuse des montagnes qui entourent bon nombre de terres arides dans le monde.

La nature en équilibre ou en mouvement ?

Plus que toute autre discipline peut-être, l'écologie illustre la manière dont se développent les paradigmes. Ce n'est pas nécessairement une question de chronologie, où un nouveau paradigme succéderait à un autre. Mais plutôt le fait que les écoles de pensée, ou paradigmes, trouvent ou perdent la faveur des communautés qui les pratiquent. En écologie, les deux plus importants paradigmes prennent pour modèles de comportement de l'environnement soit son équilibre, soit son non équilibre (flux).

Dans *The Future of Arid Lands*, la réflexion écologique était dominée par le paradigme de l'équilibre, modèle de dynamique écologique fondé sur des hypothèses conçues dans le cadre des zones tempérées de l'hémisphère nord et datant du début du siècle précédent. Sa validité en tant que cadre de réflexion sur les milieux arides a été contestée presque dès le départ, et pourtant elle en est venue à dominer la pensée politique pendant presque tout le 20^{ème} siècle. Aujourd'hui cependant, les écosystèmes de terres arides sont mieux interprétés par les modèles de non équilibre, qui reconnaissent comme moteurs la perturbation, la variabilité et l'imprévision. Or, le modèle d'équilibre se perpétue dans les institutions, et dans de nombreuses régions arides les gestionnaires adoptent le point de vue de l'équilibre.

Chemin faisant, l'écologie des terres arides a aussi bénéficié de l'émergence et des progrès de la science des systèmes complexes. L'intérêt se concentre maintenant non plus sur l'étude des éléments distincts de ces écosystèmes, comme le sol, l'eau, la végétation et les herbivores, mais sur les rapports et les interactions qui les lient.

Alternatives végétales et animales

The Future of Arid Lands s'intéressait avant tout à la production végétale et animale. Seules une poignée de stratégies étaient envisagées pour améliorer l'agriculture des terres arides : exploiter les ressources existantes au plan végétal et animal, en introduire d'autres empruntées à des régions similaires ayant

Ensemencement de nuages au Nouveau Mexique (É.-U.) dans le cadre du projet Cirrus (1947-1952). Cette technique vise à provoquer des précipitations (pluie ou neige) en dispersant dans l'air de minuscules particules d'iode d'argent par exemple, ou de CO₂ congelé (neige carbonique) faisant fonction de noyaux de condensation. Cela induit la formation de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace dans le nuage. Alors que l'ensemencement par la neige carbonique se faisait nécessairement à partir d'un aéronef, l'iode d'argent pouvait être vaporisé depuis le sol, d'où il s'élevait avec les courants ascendants (photo : pulvérisateur d'iode d'argent monté sur une vieille Oldsmobile). L'ensemencement des nuages réduit effectivement la couverture nuageuse, mais sa capacité à accroître les précipitations est controversée. Comment savoir, par exemple, quelle hauteur de précipitation un nuage aurait donnée s'il n'avait pas été traité ?



Images satellitaires montrant le recul des glaciers sur le mont Kilimandjaro, en République unie de Tanzanie, en 1993 (à g.) et 2000. En juillet dernier, le Comité du patrimoine mondial de l'UNESCO a adopté une stratégie pour prévoir et gérer les effets du changement planétaire sur les sites naturels (dont le Kilimandjaro) aussi bien que sur les sites culturels



© NASA and Goddard Space Flight Center

des chances de mieux réussir, créer de « meilleures » cultures ou de meilleurs élevages par le croisement ou par des manipulations génétiques plus élaborées.

Pour certains, les animaux de grande taille étaient par nature plus productifs que les espèces plus petites ; ils voyaient dans le chameau l'animal idéal, mais ils n'ont pas pensé à la difficulté d'étendre au-delà de son aire traditionnelle la vente des produits des camélidés. De l'avis général, l'élément clé de la production animale était la production d'un fourrage plus abondant et de meilleure qualité. La culture des végétaux devenait donc la principale préoccupation pour les pâturages et l'agriculture.

Les plantes exotiques semblaient détenir un grand potentiel. Un siècle de transplantations involontaires de végétaux avait prouvé que beaucoup d'espèces réussissaient bien mieux en dehors de leur domaine naturel, notamment dans des climats analogues. Dès 1956, des programmes visaient à réensemencer avec des graminées exotiques des pâturages brûlés ou dégradés.

Depuis, on a beaucoup critiqué l'usage d'espèces exotiques. En de nombreux endroits, comme dans le désert de Sonora, dans le nord du Mexique, de grands espaces de végétation naturelle

ont été défrichés etensemencés avec des graminées exotiques (voir photos). Souvent, les éleveurs apprécient leurs capacités à coloniser des zones perturbées, à concurrencer les espèces natives et à survivre à la sécheresse ; ils ont l'impression que leurs terres peuvent désormais nourrir plus de bétail. Or, ces mêmes caractéristiques rendent les espèces exotiques indésirables dans d'autres endroits de la région, où on les considère comme un danger nouveau, car elles remplacent les espèces natives et amènent les incendies là où il n'y en avait jamais eu.

Baucoup de cultures conventionnelles sont prodigieusement gourmandes en eau. Les recherches n'ont pas manqué sur de « nouvelles » cultures mieux adaptées à l'aridité. En 1956, concernant cette quête, deux approches différentes s'affrontaient. L'une préconisait d'exploiter les plantes natives des terres arides présentant des propriétés particulières, comme le jojoba qui donne une cire d'excellente qualité. L'autre recommandait de sélectionner les semences ou de traiter les cultures conventionnelles de façon à en optimiser telle ou telle caractéristique, comme le rendement, la tolérance à la sécheresse ou la résistance aux maladies. Dès 1956, les travaux

L'élevage de chameelles

Le nombre de chameaux paissant en plein désert est souvent excessif, ce qui constitue une lourde charge pour la végétation. L'élevage de chameelles pourrait résoudre le problème. Si l'on cultivait les mêmes plantes qui poussent naturellement dans le désert, pour les faire manger aux chameelles, leur élevage permettrait aux écosystèmes de pâturage de se reconstituer.

L'élevage des chameelles en étables permettrait également de réduire la quantité d'eau douce nécessaire pour produire du lait et d'économiser de l'électricité. Le lait de chameelle n'a pas besoin d'être produit dans des étables climatisées et une chameelle produit quatre fois plus de lait par jour (8 litres) qu'une vache en plein désert (une vache peut produire 25 litres de lait par jour, mais seulement en étable climatisée). Cultiver comme fourrage les plantes et les halophytes (tolérant le sel) présents dans le désert consommerait par ailleurs moins d'eau que l'Alfa ou les herbes de Rhodes que les chameaux mangent habituellement.

Il existe déjà une ferme d'élevage de chameelles à Dubaï, aux Emirats arabes unis. Le bureau de l'UNESCO à Doha prépare un projet de recherche sur les avantages et les inconvénients d'en créer d'autres. Les scientifiques qui travaillent sur le projet chercheront à savoir quels sont les (dés)avantages du lait de chameelle au plan

nutritionnel et médical par rapport au lait de vache ou de chèvre, et la quantité d'eau impliquée dans la production d'un litre de lait de chameelle, comparée à celle de la chèvre ou de la vache. Le projet étudiera également l'attitude du public à l'égard du lait de chameelle.

En cultivant à la ferme toute la gamme des plantes qui poussent dans le désert (*Cenchrus*, *Pennisetum*, *Panicum*, *Rhanterium* etc.), les scientifiques chercheront à savoir si ce fourrage pourrait réduire la production d'herbe de Rhodes et d'Alfa, consommateurs d'eau. Ces plantes à cultiver seront, elles aussi, étudiées afin de déterminer comment chacune donne son goût au lait. Ils examineront aussi la variété génétique des chameaux des diverses régions arides afin de vérifier si les bêtes (et lesquelles) peuvent être nourries avec des plantes locales ou halophytes, tout en produisant un lait abondant et de bonne qualité.

L'exploitation du pétrole et la disponibilité de l'eau ont changé le mode de vie du bédouin, en bien et en mal. L'élevage de chameelles pourrait contribuer non seulement à réhabiliter le désert, qui est leur lieu de vie, mais aussi à les sortir de la pauvreté.



Chameaux en plein désert au Qatar

© Hemming Schwabe/World Habitat Society

Pour en savoir plus: b.boer@unesco.org

La Révolution verte

C'est au Mexique qu'ont débuté dans les années 1940 une multitude d'expériences qui ont permis de mettre au point des variétés de cultures améliorées car plus abondantes, d'une qualité constante et plus résistantes aux parasites. Cela a abouti à la Révolution verte des années 1960, qui a sauvé de la famine certaines parties du monde en développement, comme l'Inde par exemple. Elle n'a cependant pas profité de manière égale à toutes les populations ni à toutes les régions. Elle a même été critiquée pour s'être focalisée sur les variétés hydrides et génétiquement modifiées et avoir ainsi accentué la perte de biodiversité, sans parler des risques sanitaires qui accompagnent l'usage des pesticides chimiques.

Parmi les terres arides, les premières vagues de la Révolution verte n'ont touché que les zones qui pouvaient être irriguées. La plus grande partie de l'Afrique subsaharienne n'en a donc pas bénéficié. Ceci a été partiellement imputé au manque de fiabilité du climat et à l'absence d'irrigation, mais aussi à l'incapacité des agriculteurs pauvres à investir dans des entrants tels que les engrais exigés par les variétés modernes. On a aussi suggéré que, si la Révolution verte avait tardé à pénétrer dans de nombreuses terres arides, c'est parce que les ressources végétales locales n'avaient pas été inventoriées et que des programmes de sélection génétique convenant à des milieux de zones arides de faible rendement n'avaient pas été préparés.

Des centres récents, tels que le Centre international de recherche agronomique sur les régions arides (ICARDA) et l'Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides (ICRISAT) se sont confrontés à ces problèmes spécifiques. En Afrique subsaharienne, les tentatives pour améliorer des cultures comme le mil, le sorgho et le manioc ont commencé à donner des résultats dans les années 1990. Cependant, les modestes avantages enregistrés dans de nombreuses zones arides ont été contrebalancés par une chute généralisée du prix des principales céréales, ce qui a été très préjudiciable à ces agriculteurs. Il semblerait que seule la poursuite des recherches par la communauté internationale permettrait aux agriculteurs de se tirer d'affaire.

Cultivateur de sorgho au Burkina Faso



du Centre international pour l'amélioration du maïs et du blé (CIMMYT) avaient assuré au Mexique l'autosuffisance en blé ; ce succès avait relancé l'intérêt pour l'approche génétique de l'augmentation des rendements (*voir encadré*).

Mais ces approches ont leurs limites. Dans la photosynthèse, les végétaux empruntent du CO₂ à l'atmosphère et lui rendent de l'eau. Cela implique deux contraintes. En premier lieu, si les plantes peuvent être rendues plus économes en eau, il y a des limites fondamentales à cette manipulation. En second lieu, les adaptations que beaucoup de plantes développent pour réduire les pertes en eau diminuent par ailleurs leur capacité à absorber du CO₂ : beaucoup de plantes du désert ne sont pas particulièrement économes en eau. Qui plus est, certaines d'entre elles, comme le jojoba, ne produisent pas de fruits en cas de sécheresse ; si les agriculteurs désirent une récolte chaque année – et c'est bien le cas – les parcelles ont besoin d'être fréquemment irriguées, ce qui annule l'avantage présumé de leur adaptation à la sécheresse.

Une troisième approche de l'exploitation des végétaux des terres arides, qui a été débattue en 1956, a attendu les quelques dernières décennies pour retenir l'attention. Les plantes du désert produisent des composés spécifiques pour résister à la concurrence, à la chaleur, au stress de la sécheresse et à la prédation. Certains programmes de recherche s'attachent maintenant à découvrir et analyser les composés produits par ces plantes et par les microbes qui leur sont associés, afin de décider s'ils ont des vertus pour traiter des maladies comme le cancer et le VIH/Sida.

En 1956, les débats cherchaient à identifier une culture, ou tout au plus un petit nombre de cultures susceptibles de transformer l'agriculture des terres arides. Depuis, la recherche et le développement s'intéressent non plus seulement à l'amélioration génétique de la plante et de son environnement par l'irrigation, les fertilisants et la lutte contre les parasites, mais aussi à l'amélioration des modes de vie ruraux et du bien-être physique, social et économique des familles et des communautés.

Faire verdir le désert

En 1956 dominait la stratégie de « faire verdir le désert » en exploitant essentiellement les ressources en eaux de surface et en étendant les installations d'irrigation à toutes les terres qui pouvaient le supporter au plan économique. Sans beaucoup se soucier de savoir comment une exploitation plus ou moins efficace de l'eau allait affecter l'environnement et la société. Agrandir autant que possible la zone de production agricole dépendant des pluies passait aussi pour une priorité. On comprenait toutefois qu'en raison de la variabilité du climat, il était risqué d'étendre les cultures hors irrigation à des terres qui avaient d'abord été consacrées au pâturage.

L'inquiétude était grande en 1956 quant à l'éventualité d'effets indésirables des systèmes traditionnels d'exploitation foncière dans les zones arides, notamment dans les pays en développement. La production animale, surtout par le pastoralisme, apparaissait nettement moins souhaitable que la culture, et son rendement devait être amélioré par les techniques modernes



Prolifération du mesquite dans l'élevage expérimental de Santa Rita, désert de Sonora au Mexique, entre 1902 (à g.) et 2003



Les scientifiques choisissent les priorités contre la désertification

Chaque année 2,4 milliards de dollars sont dépensés pour combattre la dégradation des terres arides du monde entier, problème dont les experts prévoient qu'il ira en s'aggravant.

Le 21 juin, 400 scientifiques, experts et décideurs venus de toutes les régions arides du monde ont établi, avec la *Déclaration de Tunis*, une liste des priorités de la recherche sur le sujet. La *Déclaration* a été adoptée à l'issue d'une conférence de trois jours co-organisée par l'UNESCO sur l'Avenir des terres arides, événement marquant de l'Année internationale des déserts et de la désertification.

Parmi les domaines de recherche sélectionnés dans la *Déclaration* figurent l'interdépendance et la protection des diversités culturelle et biologique, la gestion intégrée des ressources en eau, la quête de moyens d'existence durables pour les habitants des terres arides, les énergies renouvelables permettant de mettre en valeur les terres arides, et enfin les manières de faire face aux catastrophes, naturelles et provoquées par l'homme, ainsi que le coût réel de la passivité dans la lutte contre la dégradation des terres.

Lire la Déclaration de Tunis : www.unesco.org/mab/ecosyst/futureDrylands.shtml



Courtesy of Chris Reij

Logement pour touristes dans la Réserve de biosphère de Dana (Jordanie) au crépuscule. L'écotourisme est l'une des activités rémunératrices que soutient le projet de Gestion durable des terres arides marginales (SUMAMAD), dirigé par le MAB de l'UNESCO et l'UNU. Parallèlement, le projet améliore la gestion de l'irrigation dans la Réserve, produit du savon à base d'huile d'olives et emploie des femmes uniquement pour la création de bijoux

de gestion des élevages. Cela pouvait cependant nécessiter un « aménagement » par la suppression de la végétation indésirable par des moyens mécaniques ou chimiques, et/ou par une réduction de la taille des troupeaux afin de laisser la végétation se rétablir. Les deux termes de l'alternative étaient, et sont toujours, coûteux et probablement peu adaptés aux pays en développement.

Depuis, la rigidité des distinctions entre différents modes d'exploitation des terres s'est estompée. L'agronomie et ses applications considèrent désormais ces modes d'exploitation comme des éléments d'un système plus vaste, ce qui permet de valoriser leurs synergies, comme c'est le cas de l'agro-sylvi-pastoralisme. Le prix des terres a fini, lui aussi, par être fixé selon d'autres critères, tels que les valeurs environnementales, historiques, sociales, culturelles et spirituelles.

L'attention a également été attirée sur les conséquences négatives de certaines méthodes modernes mises en place il y a des décennies. Le risque d'accumulation du sel dans le sol était déjà reconnu dans les années 1950, ainsi que les concepts de base de la gestion de la salinité, mais les solutions comme les systèmes de drainage, étaient coûteuses. On savait aussi que le processus s'inversait facilement. Gérer les problèmes de salinité reste le principal défi de l'agriculture irriguée.



Collecte des eaux de pluie au Burkina Faso, grâce à des structures peu coûteuses, fabriquées à la main

©Chris Reij

De plus, comme l'inquiétude pour la dégradation des sols et la désertification ne fait que croître, les grands projets d'irrigation sont souvent considérés d'un œil sceptique car ils coûtent très cher, aux plans financier, social et environnemental, et des dommages qu'ils pourraient infliger à d'autres secteurs comme celui de la pêche, notamment dans les pays en développement.

Des progrès considérables ont été réalisés pour rendre l'utilisation de l'eau plus efficace. L'irrigation par pivot central s'est rapidement répandue à partir des années 1960. Avec ce dispositif, des combinés d'arrosage installés sur des tuyaux tournent autour de points fixes (les pivots) pour irriguer des champs circulaires. Cette technologie permettait une irrigation relativement peu coûteuse presque partout où on disposait d'eau. Elle permettait aussi d'irriguer toutes sortes de terrains. L'irrigation conventionnelle aussi a connu des progrès. Sur les grandes propriétés, le nivellement des sols a bien amélioré le rendement de l'eau. Sur les petites, l'installation de petites pompes portables a permis à de nombreux agriculteurs d'assurer leur production pendant les périodes de sécheresse, et d'accroître le nombre de récoltes annuelles. L'invention du goutte à goutte a également accru le rendement de l'eau utilisée, notamment dans les pays développés.

Depuis peu, des techniques de micro-irrigation impliquant le goutte-à-goutte au moyen de seaux et de tubes peu coûteux a démontré ses multiples avantages potentiels pour les petits agriculteurs des pays en développement, avec l'amélioration des rendements tout en économisant l'eau, les fertilisants et la main d'œuvre.

Dans les pays en développement, la collecte des eaux de pluie au moyen de structures à bas prix et faites à la main pour guider la pluie (voir photo) fait aussi l'objet d'un intérêt accru



Cette plante en fleur du Qatar est une *Limonium axillare*, parfois appelée *lavande de plage*. Elle tolère une forte salinité et se classe donc parmi les halophytes. Les scientifiques étudient les possibilités de sélectionner les halophytes et d'en cultiver certaines. Le bureau de l'UNESCO à Doha a aidé la publication, cette année, de *Biosaline Agriculture and Salinity Tolerance in Plants*

©UNESCO

comme moyen de faciliter l'autosuffisance, réduire la pauvreté et accroître la sécurité alimentaire là où il est impossible d'irriguer. Ce genre de solutions apparaît comme potentiellement plus viable, car il repose sur des technologies et des matériaux locaux qui en général n'exigent pas de grosses mises de fonds.

Au fur et à mesure que nous prévoyons le temps à plus longue échéance, il nous faudra probablement assouplir nos politiques de gestion. Si, par exemple, nous pouvons prévoir six mois à l'avance une bonne ou une mauvaise saison de récolte, il faudra avoir mis en place des mécanismes pour en aviser les cultivateurs et les éleveurs, et leur permettre de régler en conséquence leurs stratégies de culture et d'élevage.

Le principal objectif, en 1956, était de faire « mieux ». Cela impliquait une plus grande dépense en eau et une plus forte production agricole. Beaucoup de filières adoptées après cette date en vue du développement étaient manifestement non viables, comme l'exploitation des eaux souterraines fossiles en Amérique du Nord, en Afrique du Nord et dans la péninsule arabique. L'amélioration de la performance du système, enregistrée depuis 50 ans, est peut-être due en grande partie à la technique, comme l'amélioration des variétés agricoles, mais elle est également due, dans une grande mesure, à l'action politique par le biais des subsides et des tarifs douaniers.

Pourquoi investir dans la recherche sur les terres arides ?

En premier lieu, le problème énoncé par Malthus⁶ il y a 200 ans n'a pas disparu. Dans les 40 années à venir, la population mondiale va augmenter de 50 % et atteindre les 9 milliards. Les terres arides, qui représentent environ 41 % de la surface de la terre, seront appelées, à long terme, à jouer un plus grand rôle pour satisfaire une demande croissante.

La croissance démographique aura lieu, majoritairement dans les pays en développement, et surtout dans leurs zones arides, et massivement dans les zones urbaines. Le problème se posera de fournir aux agglomérations un approvisionnement régulier d'eau de qualité sans pénaliser indûment le secteur agricole – ce qui encouragerait d'autant la migration vers les villes – ou porter atteinte à la capacité de l'environnement à fournir des biens et des services aux générations futures. L'une des solutions réside dans l'assainissement et la réutilisation des flux d'eaux usées des villes. La politique doit considérer les eaux usées et les eaux des fortes pluies comme des ressources dont l'importance ira croissant.

En second lieu, d'un point de vue plus immédiat pour l'environnement, il est possible de soutenir qu'une bonne partie

Jardins botaniques coraniques pour la péninsule arabique

La péninsule arabique manque de jardins botaniques, en dépit de leur évidente valeur en tant que conservatoires des espèces végétales *ex situ* et du savoir traditionnel séculaire de l'Islam en matière de botanique.

En s'appuyant sur une équipe d'architectes, de botanistes, d'ingénieurs, de phytochimistes et d'érudits du monde musulman, le bureau de l'UNESCO à Doha a conçu le projet de créer un réseau de jardins botaniques à la gloire des antiques traditions et cultures de la région. Ces jardins présenteront des spécimens vivants des plantes citées dans le Coran, comme le palmier-dattier, la grenade, la figue et le raisin. Ils donneront également à voir des végétaux qui ont leur importance pour l'Islam, comme les plantes médicinales utilisées par le prophète Mohamed et mentionnées dans ses Dits.

Les jardins enseigneront au public la nécessité de préserver la diversité biologique. Victime de pertes d'habitats, de déversements de pétrole et de pratiques d'élevage inappropriées, la flore de la péninsule arabique soumise à un développement accéléré a bien besoin d'être mieux protégée de l'influence de l'homme.

Le plan des jardins botaniques respectera les deux grands concepts paysagers de l'horticulture islamique. Le premier ressortit aux environnements typiquement désertiques, ceux des *wadi*, *baadiya* et *raudhas* – espaces sablonneux et oasis. Le second renvoie aux jardins

planifiés selon les notions persanes de plates-bandes encaissées, *gulistan* (jardins fleuris), *bustan* (vergers) ou *chahar bagh* (jardins à quatre quartiers, voir la photo).

Le principe de ces jardins est de présenter un assemblage de végétaux disposés en quatre quartiers séparés par des canaux et reliés à une fontaine ou un bassin central. Ce schéma général s'enrichit de plates-bandes encaissées, ingénieux système traditionnel permettant de limiter les besoins d'irrigation en réduisant l'évaporation au sol et la transpiration des végétaux.

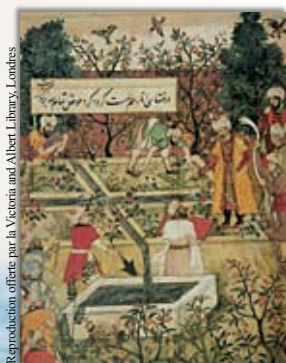
Autour de ce concept, chacun des jardins servira de conservatoire d'espèces venues des différents écosystèmes de la région : y seront cultivées des plantes originaires de la côte, des montagnes, des régions sablonneuses, des déserts de graviers, des *wadis*, des oasis et des habitats aquatiques, ainsi que des plantes agricoles et halophytes (qui tolèrent l'eau salée).

Le projet sera mis en œuvre au cours de l'année prochaine. Pour chacun des jardins, des accords de fonds-en-dépôt et des plans de travail sont en voie de négociation avec des donateurs potentiels.

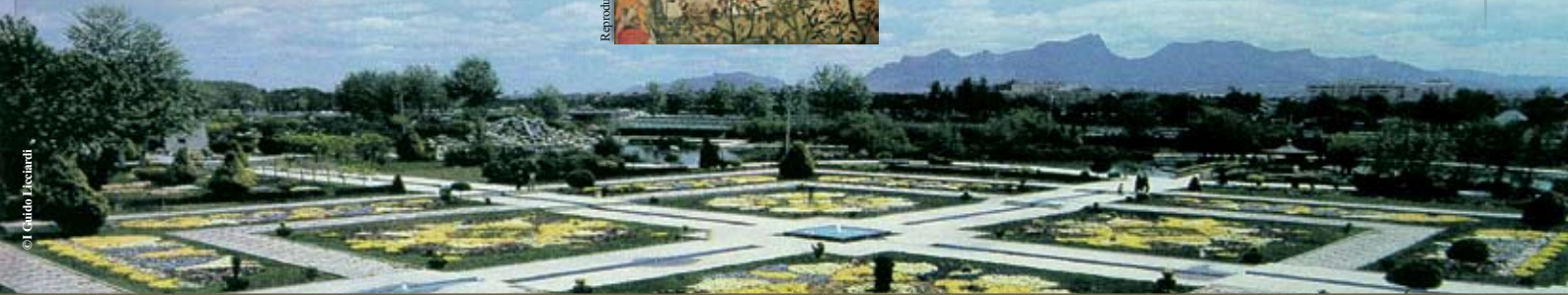
Pour en savoir plus (à Doha) : h.al-hammami@unesco.org

(à gauche) L'empereur Bâbur surveille la construction d'un jardin. Enluminure du manuscrit Baburname

(ci-dessous) Un jardin moderne d'Ispahan (Iran) sur le modèle traditionnel à quatre quartiers



Reproduction offerte par la Victoria and Albert Library, Londres



Combattre la désertification avec l'énergie solaire



Une fillette vend du charbon de bois au marché de Ouagadougou (Burkina Faso) en 2005

Le bois à brûler reste la principale source d'énergie (à 80%) en Afrique subsaharienne, où il sert essentiellement à cuisiner, éclairer et chauffer de l'eau. Autrefois, la population ramassait du bois mort mais avec la diminution des surfaces boisées, elle ne peut maintenant que s'approvisionner sur les arbres vivants. Dans le contexte de la pression démographique, de la culture sur brûlis et des sécheresses à répétition, cette pratique est en train de décimer les forêts africaines, dont on estime que 10 % auront disparu dans les 20 ans à venir.

En zone sahélienne, il est facile aujourd'hui pour le vent d'éroder le sol, car il y a bien peu de végétation pour le retenir. La Fondation Eden, une ONG suédoise implantée au Niger, a même observé des dunes à 200 km au sud du Sahara, non que le vent les y ait poussées ; elles se sont formées là, à partir de sols érodés lorsque les arbres ont été abattus pour faire place à des cultures annuelles comme le mil. Le directeur du département de l'environnement du Niger a confié en 1992 à la Fondation Eden que « 250 000 ha sont perdus chaque année au Niger à cause de la désertification » (soit la superficie du Luxembourg). Il ajoutait que « le bois de chauffage destiné à la ville de Zinder est ramassé dans un rayon de 200 km. »

Des projets pilotes ont été mis en œuvre depuis des dizaines d'années pour sensibiliser les populations afin qu'elles remplacent le bois par des formes durables d'énergie domestique. En Afrique, le programme des énergies renouvelables de l'UNESCO soutient des projets pilotes de création de « villages solaires ». L'an dernier, le programme a aidé les gouvernements du Burkina Faso et du Mali à installer l'électricité solaire dans des services publics comme les dispensaires et maternités de villages isolés. Les maternités avaient surtout besoin de pouvoir chauffer de l'eau afin d'améliorer l'hygiène et de protéger la mère et le nouveau-né d'infections potentiellement mortelles.

Pour en savoir plus : o.benchikh@unesco.org



En Mauritanie, des femmes utilisent un cuisoleil en plein air pour faire cuire des aliments. Ces cuisoleils permettent d'épargner les faibles ressources en bois. Ils sauvent aussi des vies : chaque année, des milliers de femmes dans le monde sont victimes d'émanations de monoxyde de carbone dans des habitations mal ventilées

des terres arides du monde est à l'origine de certains problèmes mondiaux qui pourraient être graves. La poussière de la région sahélienne et du Sahara en Afrique et les terres arides d'Asie centrale se déplace sur des continents entiers et suscite des inquiétudes non seulement en Chine et au Japon, mais aussi en Amérique du Nord. La poussière de l'Afrique est peut-être l'une des causes de la dégradation des récifs coralliens des Caraïbes. Les chercheurs s'inquiètent des effets possibles de la poussière des terres arides sur le climat planétaire par réflexion, dispersion et absorption du rayonnement solaire, ainsi que par la formation de nuages et les précipitations.

En troisième lieu, du point de vue de l'économie globale, les zones arides ont été très marginalisées. C'est dû en partie à leur isolement physique, mais c'est aussi une conséquence de leur manque d'influence économique, politique et sociale dans leurs propres pays. Ce n'est pas le cas pour certains de ces territoires lorsqu'ils possèdent des ressources minérales ou énergétiques indispensables à l'industrie mondiale. A l'avenir, grâce aux avantages que présentent leur situation géographique, leur climat, l'absence de concurrence dans l'utilisation de l'espace et le faible prix du foncier qui en découle, il se peut que les terres arides jouent également un rôle central sur la scène des énergies renouvelables, avec l'amélioration prévisible de la technologie solaire et la baisse de son coût de revient. Il est concevable que les zones arides profitent aussi d'autres avantages, de plus en plus compétitifs en tant que productrices de cultures rares et comme destinations du tourisme. Et, ce qui est peut-être le plus important, il est désormais démontré que les retours potentiels sur investissements sont plus élevés dans ces zones que dans les régions plus humides.

En dernier lieu, la mondialisation dépasse le seul domaine économique. Des questions d'équité sont en jeu. A l'heure actuelle, 20 % de la population mondiale consomme 85 % des ressources de la planète. Bon nombre des problèmes évoqués ici ont, au moins en partie, la pauvreté pour origine. Entre 1997 et 2020, on estime que la pauvreté, conjuguée à la détérioration de l'environnement, va pousser 60 millions de personnes à quitter les zones désertiques de l'Afrique subsaharienne pour aller en Afrique du Nord et en Europe. La viabilité de l'environnement tout autant que la suppression de l'extrême pauvreté et de la faim font partie des Objectifs du millénaire pour le développement.

Charles F. Hutchinson et Stefanie M. Hermann⁷

5. En 1956, l'American Association for the Advancement of Science (AAAS) publiait *The Future of Arid Lands*. Edité par Gilbert White, l'ouvrage reprenait des articles présentés à des réunions internationales d'experts tenues en 1955 au Nouveau Mexique (É.-U.), afin d'établir un calendrier des recherches sur les terres arides. Les réunions étaient organisées par l'AAAS et parrainées par l'UNESCO, avec le soutien de la Fondation Rockefeller
6. Thomas Robert Malthus. *Démographe et économiste politique anglais, il est surtout connu pour son Essai sur le principe de population (1798)* ; il prévoyait que la population dépasserait la production alimentaire selon le principe que, si elle n'est pas régulée, la population croît en progression géométrique (2, 4, 8, 16, 32...) alors que la production alimentaire croît en progression arithmétique (1, 2, 3, 4...)
7. Les deux auteurs de *The Future of Arid Lands – Revisited* sont membres de l'Office of Arid Land Studies de l'Université d'Arizona (É.-U.)

S'assumer avec le solaire

Alassane Agalassou est l'un des 26 techniciens, ingénieurs ou personnels impliqués dans la réalisation de projets qui ont été désignés par leur gouvernement ou institution pour prendre part cette année à l'Ecole d'été organisée chaque année en juillet au Siège de l'UNESCO à Paris. Le thème de cette année était « l'électricité solaire pour les zones rurales et isolées ». Parallèlement à une série d'ateliers de formation régionaux, ces « écoles » annuelles de trois semaines sur l'électricité solaire contribuent à former un personnel qualifié, à renforcer la sensibilisation du grand public et à promouvoir des politiques énergétiques appropriées.

Lors des quinze dernières années, plus de 500 stagiaires ont été formés à l'Ecole d'été. Ils sont actuellement formateurs dans plus de 50 pays situés principalement en Afrique mais aussi en Allemagne, en Bolivie, au Brésil, au Canada, en Colombie, au Guatemala, au Liban, en Turquie et au Vietnam, etc...

Alassane Agalassou est employé par l'Agence pour le développement de l'électrification rurale et de l'énergie domestique (Amader) à Bamako, au Mali, où il est chargé de l'amélioration de l'accès des populations rurales et péri-urbaines aux services modernes d'électricité, tels que l'éclairage des maisons, la réfrigération, la télévision et la radio. « Amader est confrontée à l'important défi d'apporter la modernité et l'espoir à la majorité des maliens à travers son programme d'électrification décentralisé », explique M. Agalassou. « Vous devez comprendre que dans mon pays, 10% seulement des onze millions d'habitants vivent dans des communautés qui bénéficient de l'électricité ».

M. Agalassou a l'intention d'utiliser les notions qu'il vient d'acquérir sur les aspects technologiques et économiques de la conversion photovoltaïque pour mieux définir et mettre en œuvre des projets destinés à améliorer les conditions de vie et les conditions sanitaires, afin que la production et la conservation des aliments soient plus efficaces et hygiéniques dans un pays où les températures peuvent dépasser les 40°C.



Participants s'exerçant à l'utilisation d'un logiciel de dimensionnement pour définir le besoin exact en énergie d'un projet donné lors d'une journée de travaux pratiques pendant l'école d'été de cette année



Au cours d'ateliers de formation sur le terrain organisés par l'UNESCO en 2003 à Bamako au Mali, câblage électrique de panneaux solaires et installation de systèmes photovoltaïques par les participants durant les travaux pratiques

L'Ecole d'été s'adresse à des femmes et des hommes ayant une formation universitaire ou technique liée directement ou indirectement à l'électrification décentralisée par l'énergie solaire. La formation est assurée par un groupe d'experts sur les divers aspects théoriques et appliqués de la conversion de l'énergie solaire, ainsi que par des représentants du secteur industriel et des institutions spécialisées.

Initialement, l'Ecole d'été incluait des visites de centres de recherches, d'industries et d'installations uniquement en France. Depuis 1992, grâce au soutien à la fois humain et financier de partenaires extérieurs, les visites techniques ont été élargies à la Belgique, l'Allemagne, l'Espagne, l'Italie et le Maroc. Ces visites durent une semaine en moyenne, les deux semaines de formation restantes ayant lieu au Siège de l'UNESCO.



Formation pratique organisée au CDER, au Maroc, lors de l'école d'été en 2001. Les participants sont en train de faire une évaluation de l'ensoleillement et de simuler une installation solaire

Qu'est-ce que l'énergie solaire ?

L'électricité solaire est le résultat de l'effet photo-électrique (ou photovoltaïque) découvert en 1839 par le scientifique français Edmond Becquerel. Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse du soleil en électricité. La plupart des cellules solaires utilisées actuellement sont en silicium.

Les cellules photovoltaïques produisent une tension de circa 0,6 volts (V) qui ne dépend pas de la surface de la cellule, contrairement à l'intensité du courant produit. Pour obtenir une tension supérieure, les cellules sont alors connectées en série pour constituer un module dont le voltage est la somme des tensions aux bornes de chacune des cellules. Les modules produisent un courant continu, la tension étant de 12 V pour les modules standard commercialisés. Suivant les besoins de l'installation, les modules peuvent être connectés en série pour obtenir une tension plus élevée. Les tensions les plus fréquemment utilisées pour les installations photo-voltaïques sont de 12, 24 et 48 V. En général, les modules sont caractérisés par la puissance qu'ils produisent exprimée en Watts (W), qui est pour ceux commercialisés de 10 W, 50 W, 75 W ou 120 W.

Au début des années 60, la conversion solaire a connu un développement important dû aux applications spatiales. L'utilisation de l'énergie solaire aujourd'hui a été largement étendue à diverses applications telles que : l'électrification rurale et décentralisée, le pompage de l'eau, la santé, les télécommunications... partout où le réseau électrique n'est pas présent.

Dans les sites isolés, le coût moyen d'une installation solaire complète (système complet incluant les batteries pour le stockage) varie de 15 euros hors taxe (HT) par Watt (pour une puissance de 1,5 à 2 kW) à 40 euros HT par Watt (pour une puissance de 200 à 400 W).



© Osmani Benhailah/UNESCO

Réfrigérateur solaire utilisé pour la conservation des médicaments dans les centres de santé des zones rurales et isolées. Cette technologie était l'un des thèmes de l'école solaire de cette année

Modules à la carte

Le fait que la formation soit structurée en modules permet aux spécialistes de domaines différents de choisir à la carte les cours qui les intéressent. Les décideurs, responsables du secteur énergétique et autres peuvent ainsi participer à tel ou tel aspect spécifique des travaux pratiques ou à une visite technique ou encore à des tables rondes sur un sujet donné.

Mahamat Oumara, du Tchad, est reconnaissant d'avoir pu mettre à jour ses connaissances sur les technologies photovoltaïques. Mais pour lui, les contacts établis au cours de l'Ecole d'été s'avèrent tout aussi précieux. Son seul regret étant, « si nous avions un meilleur équipement dans nos propres laboratoires pour tester le matériel de base, nous pourrions faire un travail plus efficace en matière de diffusion de la technologie ».

« Un des plus grands obstacles au développement des énergies renouvelables dans nos pays », ajoute M. Oumara, « est le manque d'informations appropriées à tous les niveaux, que ce soit pour les décideurs et utilisateurs ou pour les ingénieurs et techniciens n'ayant pas les compétences nécessaires. Les populations rurales tireraient bénéfice de l'apport de responsables de projets bien formés » note-t-il. « Une bonne gestion de projet conduit à des économies et permet également de prolonger la durée de vie des systèmes sans oublier bien entendu une meilleure exploitation et maintenance des systèmes installés. De la même façon, un bon ingénieur concevra un meilleur projet et, ainsi, élargira les opportunités de financement. Il ou elle dimensionnera également le système de manière plus adéquate en fonction des besoins de l'utilisateur final, ce qui se traduira par des économies de coût pour les populations rurales. »

Démystifier l'énergie solaire

En compagnie de trois autres industriels français, René Desserrières, de chez Photowatt, un des fabricants français du solaire, a enseigné à l'Ecole d'été lors des trois dernières sessions. « Nous connaissons toujours environ 20 % des participants », dit-il, « ce qui donne lieu à des discussions animées et d'un grand intérêt entre fabricants et utilisateurs à propos des installations existantes et de leurs composants ».

M. Desserrières explique que la formation de l'UNESCO est un excellent complément à d'autres activités de formation davantage liées à des projets spécifiques. « La formation de l'UNESCO est faite dans un autre esprit », dit-il. « Son objectif est que les ingénieurs et les techniciens acquièrent un niveau supérieur. Désignés par leurs pays ou par une institution locale ou régionale, ces jeunes gens joueront au final un rôle important dans l'élaboration et la mise en oeuvre de politiques énergétiques rationnelles, en évitant, nous l'espérons, les erreurs passées dans la planification et la gestion de projets. Cette formation offre une approche plus réaliste qui remet en cause les mythes en démystifiant l'énergie solaire. Les deux parties doivent faire l'effort de se considérer comme partenaires. Certains experts dans les pays en développement nous voient comme de simples fournisseurs d'une technologie dont ils voudraient un transfert immédiat ».



Utilisation d'une plate-forme de simulation d'un système solaire, utilisée lors d'une séance de formation pratique organisée en 2002 au cours de l'école d'été. Cette plate-forme pédagogique a été développée par l'UNESCO en collaboration avec l'ADEME

© Osman Benchikh/UNESCO

Pour M. Desserrières, la fabrication de cellules photo-voltaïques est encore trop complexe et coûteuse à transférer. « Néanmoins, » relativise-t-il, « les pays en développement peuvent produire d'autres composants et, en développant l'électricité solaire, récolter 80% des bénéfices, créer des emplois et améliorer la qualité de vie de leurs communautés rurales ».

De nombreuses institutions régionales, comme le Centre de développement des énergies renouvelables (CDER) à Alger (Algérie) et le Centre national pour la recherche scientifique et technique (CNRST) à Rabat (Maroc), ont envoyé des ingénieurs et des techniciens à l'École d'été de l'UNESCO. « Pour notre personnel de haut niveau », dit M. Bennouna, Chef du laboratoire d'énergie renouvelable au CNRST, « cette formation est excellente à plusieurs points de vue – pour suivre ce qui se fait actuellement dans ce domaine, rencontrer les acteurs-clé, nouer des contacts avec les membres de facultés de haut niveau, et enfin, non moins important, rencontrer des spécialistes d'autres régions ».

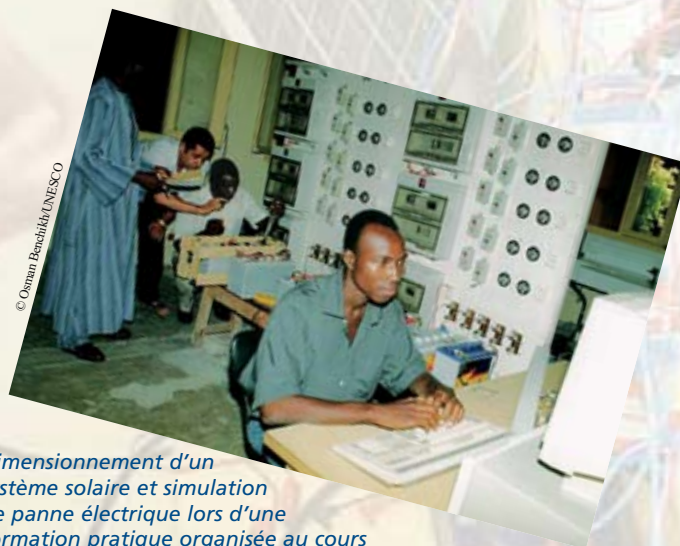
Acheter son « kit solaire » au marché

Près de deux milliards d'individus dans les zones rurales en Afrique et ailleurs n'ont toujours pas accès aux services électriques de base. « Il est très triste de voir qu'à l'aube de ce nouveau millénaire, la majorité de la population rurale du monde en développement utilise encore les bougies et la lampe à pétrole », soupire M. Bennouna, en regrettant le manque d'autonomie technologique dans les pays qui sont ceux concernés par une massive application et utilisation des énergies renouvelables. Pour M. Bennouna, « la production et la fabrication de cellules solaires, ainsi que la production de silicium, ne sont malheureusement pas à l'ordre du jour. Le processus industriel pour la production de cellules solaires



© Osman Benchikh/UNESCO

Participants visitant une petite station électrique solaire lors des visites techniques organisées en Espagne à l'occasion de l'école d'été en 2001 sur le même thème de « l'électricité solaire pour les zones rurales et isolées »



© Osman Benchikh/UNESCO

Dimensionnement d'un système solaire et simulation de panne électrique lors d'une formation pratique organisée au cours de l'école d'été en 2001

requiert un savoir faire technologique élevé et une technologie pointue qui nécessitent un marché très important afin d'être profitable et économiquement viable ».

« Cependant », ajoute t-il, « des progrès énormes ont été faits et aujourd'hui des composants de systèmes solaires sont fabriqués et commercialisés localement dans plusieurs de nos pays et parfois même exportés. Au Maroc, par exemple, les systèmes solaires sont vendus au marché par des commerçants locaux au même titre que les fruits, les épices ou autres marchandises. Les mentalités ont également changé et les gens achètent désormais leur énergie en acquérant leurs propres 'kits solaires' comme ils feraient pour avoir une télévision ou un réfrigérateur. C'est une des diverses manières par laquelle la technologie solaire parvient jusqu'à l'utilisateur final et devient populaire ».

Osman Benchikh

Pour en savoir plus :
o.benchikh@unesco.org; www.unesco.org/science/bes

Osman Benchikh

« L'ère des énergies renouvelables a commencé »

Avec une consommation globale de pétrole qui devrait augmenter cette année de 2,5 millions de barils par jour, en raison notamment d'une demande croissante de la Chine, et alors que la production de pétrole plafonne, la Conférence de Bonn sur les énergies renouvelables en juin dernier est venue à point nommé. Le ministre allemand de l'environnement, Jürgen Trittin a déclaré, dans ses propos liminaires, que « l'ère des énergies renouvelables a commencé ». L'Allemagne est le leader mondial incontesté de l'énergie éolienne depuis le début des années 1990, l'énergie solaire étant dominée par le Japon. L'Allemagne a réaffirmé à Bonn sa volonté d'aider les pays du Sud à se doter d'énergies propres, en s'engageant à ajouter un prêt bonifié de 500 millions \$ É-U chaque année pendant cinq ans en plus du milliard déjà annoncé lors du Sommet mondial sur le développement durable en 2002 – soit presque autant que la Banque mondiale. Cette initiative spectaculaire est l'un des nombreux engagements en faveur des énergies renouvelables pris individuellement à Bonn par certains pays, y compris la Chine et les Philippines, évoqués ci-après. Mais doit-on se réjouir d'une *Déclaration* adoptée par 154 gouvernements qui ne fixe pas d'objectifs chiffrés mais se contente de prendre note des objectifs que certains pays se sont donnés ? Responsable des énergies renouvelables à l'UNESCO, Osman Benchikh a son propre point de vue sur le sujet.

En dépit de la hausse du prix du baril de pétrole⁸, et malgré les problèmes liés à l'importance géostratégique de ce même pétrole, il ne semble pas que ces facteurs aient provoqué un « électrochoc » au sein de la communauté internationale à Bonn. Est-ce que cela ne fait de la Conférence qu'une demie réussite ?

La Conférence de Bonn pourrait s'avérer être une étape majeure dans l'histoire des énergies renouvelables. Des représentants de 154 pays, parmi lesquels 120 ministres et un certain nombre de Chefs d'Etats, se sont réunis à Bonn pour discuter de questions relatives aux énergies renouvelables. En ce sens, la conférence a réellement atteint ses objectifs en réussissant à attirer l'attention du grand public sur ce sujet. Bonn a démontré que la communauté internationale considère désormais sérieusement les énergies renouvelables comme une alternative rationnelle et crédible. L'accroissement de cette prise de conscience a conduit la communauté internationale, et notamment les pays développés, à s'engager fermement, ces dernières années, en faveur de ces énergies. En Europe, la puissance produite par l'énergie éolienne a progressé de plus de 35% annuellement entre 1996 et 2003 ; l'année dernière, le secteur photovoltaïque a augmenté de 33%. A ce jour, l'industrie des énergies renouvelables en Europe représente un chiffre d'affaires de 10 milliards d'euros et emploie 200 000 personnes.

Il est vrai que l'issue finale de la Conférence de Bonn – la déclaration politique – est faible. Des engagements concrets manquent toujours et aucun objectif n'a été fixé. Ceci dit, je pense que

l'histoire de l'humanité est un processus de longue haleine et qu'aujourd'hui, certains pays ne sont tout simplement pas prêts à prendre des engagements plus ambitieux.

Revenons deux ans plus tôt au Sommet mondial sur le développement durable. Pour fixer des objectifs, le Sommet a identifié cinq grands axes qui peuvent contribuer au développement durable : l'eau, l'énergie, la santé, l'agriculture et la biodiversité. Deux ans après, que dit-on, que l'énergie est une des composantes principales du développement et que, si l'on veut penser le développement durable, que ce soit des pays développés ou en développement, il faut considérer les énergies renouvelables comme élément majeur. Le simple fait d'avoir organisé cette conférence, avec une participation massive de représentants gouvernementaux, représente pour moi une réussite.

Se pourrait-il que certains pays hésitent à s'engager parce qu'ils songent au nucléaire comme une alternative au pétrole ?

Non je ne le pense pas du tout. De toutes façons, environ 56% du pétrole sont absorbés par le secteur du transport et on ne peut pas propulser un avion à l'énergie nucléaire – du moins jusqu'à présent. Même si des bus et des voitures électriques existent déjà, leur usage reste marginal car ils ne peuvent être utilisés que sur de courtes distances.

N'oublions pas que la technologie et l'utilisation de l'énergie nucléaire nécessitent un savoir-faire et des capitaux qui restent accessibles à un nombre limité de pays industrialisés.

Diriez-vous que ce sont surtout les pays en développement qui ont montré l'exemple à Bonn ? Je pense notamment à la Chine, qui s'y est engagée à utiliser les énergies renouvelables pour couvrir



Osman Benchikh

8. Le prix du baril avait déjà grimpé à plus de 40 \$ É-U au moment où se tenait la Conférence de Bonn. Le 20 août, il a frôlé la barre des 50 \$ É-U, soit une augmentation de 50% depuis le début de l'année

10 % de ses besoins d'ici à 2010. Rappelons au passage que la Chine a ratifié le Protocole de Kyoto.

Avec une économie galopante, la Chine aura besoin de consommer beaucoup d'énergie. Que la Chine s'engage de manière sérieuse à faire appel à 10% d'énergies renouvelables, c'est très important. Après tout, les Chinois ne représentent pas moins d'un cinquième de la population mondiale.

A mon avis, il ne faut pas toujours lier le développement des énergies renouvelables au Protocole de Kyoto, même s'il reste vrai que la maîtrise de l'énergie est un premier pas pour la protection de l'environnement. Si aujourd'hui, pour les pays développés, les énergies renouvelables représentent une option du futur qui permettra de diversifier les sources d'énergies, protéger l'environnement et, peut-être, éviter des conflits et des tensions liées à cette quête d'énergie, cela reste seulement une option parmi d'autres. En même temps, pour les pays en développement, c'est l'unique option qui existe, c'est là une grande différence. C'est la seule option leur permettant de nos jours d'avoir accès à un minimum de confort et de modernité. Il y a donc là, un antagonisme convergent avec des intérêts complémentaires entre les pays du Nord et les pays du Sud. Pour les pays du Sud, la problématique environnementale est importante mais il faut souligner qu'il existe dans ces pays d'autres priorités aussi, sinon plus, pressantes. L'urgence aujourd'hui, c'est de donner un minimum d'énergie à ceux qui n'en ont pas et qui représentent malheureusement plus d'un tiers de la population mondiale.

Si les énergies renouvelables sont si importantes pour les pays du Sud, pourquoi la Banque mondiale finance-t-elle vingt fois moins les énergies renouvelables que le gaz, le pétrole ou le charbon ?

La Banque mondiale reste avant tout une banque et une banque agit en fonction de ses intérêts. Quand elle fait un investissement, elle essaie de s'assurer de sa rentabilité. Je ne pense pas que nous devrions être guidés par une approche qui soit purement économique. Sinon, on oublie toute forme de solidarité. Je suis heureux de constater que la Banque européenne d'investissement a décidé que, désormais, les sources renouvelables d'énergie recevront la moitié des subsides, à l'horizon 2010. Je tiens par ailleurs à souligner que la Banque mondiale est de plus en plus impliquée dans le financement des projets d'énergies renouvelables, ce qui démontre encore une fois, s'il le fallait, la viabilité économique de ces énergies.

Pour vous, quel est le seuil « idéal » d'utilisation d'énergies renouvelables que les pays devraient cibler, qu'ils soient riches ou pauvres ?

Je ne pense pas qu'il puisse y avoir un seuil identique pour tous les pays. Même si l'on ne prend comme exemple que les pays en développement, nous devons distinguer ceux qui bénéficient d'un taux d'électrification important de ceux pour lesquels il l'est moins. Pour les pays ayant une forte population non raccordée au réseau, les énergies renouvelables représentent l'option la plus sérieuse aujourd'hui. C'est le cas des pays d'Afrique, où 72% de la population *grosso modo* n'a pas accès à l'électricité avec un taux qui ne fera qu'augmenter, compte tenu d'une croissance

démographique plus importante que celle du réseau. Comme je le disais précédemment, pour les pays ayant une forte population non raccordée au réseau, une électrification utilisant les énergies renouvelables assez importante, de l'ordre même de 40%, serait, à mon avis, un seuil qui peut être considéré sérieusement. A ce propos, j'aimerais prendre l'exemple du gouvernement des Philippines, qui a annoncé à Bonn, pour 2013, une augmentation de 100% de la part des énergies renouvelables dans sa production nationale d'énergie, soit 4700 MW représentant à peu près 40% de sa consommation d'énergie. Quant à l'Europe, l'objectif fixé en 2002 de doubler la part des énergies renouvelables dans le secteur énergétique de l'Union européenne, pour atteindre 12% d'ici à 2010, me paraît être réaliste. Je pense que, vers 2050, les énergies renouvelables devraient représenter environ 40% du secteur de l'énergie dans les pays industrialisés.

Il serait peut être utile que des scénarios viables à moyen et long terme sur une utilisation optimale des énergies renouvelables soient établis et qu'une réflexion indépendante soit menée pour définir et proposer le meilleur avenir énergétique pour nos enfants et leurs enfants.

Suggérez-vous de créer une sorte de conseil sur les énergies, à l'instar du PNUD et de l'OMM qui ont initié en 1988 le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat ?

L'UNESCO a justement présenté une proposition en ce sens à Bonn. L'Organisation s'est associée au ministre allemand de l'éducation et de la recherche pour l'organisation d'un « science panel » qui a consisté en une journée dédiée à la science, à la recherche, au développement ainsi qu'aux ressources humaines. Parmi les conclusions de cette journée figure la proposition de créer un conseil d'experts pour conseiller et orienter les Etats sur les énergies. Par ailleurs, ce même ministre s'est engagé à financer une autre proposition de l'UNESCO, celle de mettre en place une « université ouverte » sur les énergies renouvelables. Cette université virtuelle fonctionnerait via des centres existant dans le Nord et dans le Sud. En tant que chef de file, l'UNESCO compte réaliser cette initiative novatrice avec d'autres partenaires l'année prochaine.

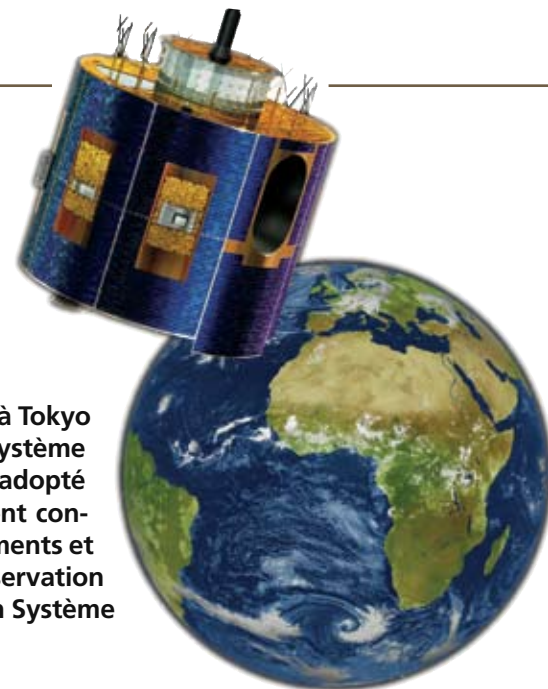
Je reste convaincu que ces deux initiatives recueilleront le soutien nécessaire à leur lancement. Lors de la récente vague de consultations des Commissions nationales pour l'UNESCO conduite par le Directeur général, les différentes régions consultées jusqu'ici, à savoir : l'Afrique, l'Amérique latine et les Caraïbes ainsi que l'Asie et le Pacifique, ont toutes proposé que les énergies renouvelables soient l'une des priorités du prochain Programme et Budget de l'Organisation pour 2006-2007.

Cet engouement pour les énergies renouvelables est loin d'être nouveau. En effet, depuis sa création, L'UNESCO a été un pionnier pour la promotion et le développement des énergies renouvelables. Au début des années 1950, l'UNESCO préconisait déjà le développement des zones arides à travers un programme du même nom, en utilisant les énergies renouvelables et plus particulièrement les énergies solaire et éolienne.

Propos recueillis par Susan Schneegans

Informations sur la Conférence de Bonn : www.renewables2004.de

Un système pour gérer la planète, d'ici à 2015



Le 25 avril 2004, le deuxième Sommet sur l'observation de la Terre, réuni à Tokyo (au Japon), a franchi une nouvelle étape vers l'établissement d'un système mondial d'information pour «gérer la planète», lorsque les ministres ont adopté le Cadre de mise en œuvre d'un plan de dix ans. Sans être juridiquement contraignant, le Cadre concrétise la ferme volonté politique de 47 gouvernements et de la Commission européenne pour mettre en place, d'ici à 2015, une observation de la Terre qui sera exhaustive, coordonnée et soutenue, encadrée par un Système mondial des systèmes d'observation de la Terre (GEOSS).

À première vue, il n'y a rien là de nouveau, car de nombreuses organisations et programmes s'efforcent déjà de soutenir et d'améliorer la coordination des systèmes d'observation de la Terre, dans le cadre, par exemple, du partenariat pour une Stratégie d'observation mondiale intégrée. Cependant, leurs efforts ont été jusqu'ici freinés par l'attitude ambivalente des gouvernements. Même dans les pays les plus riches, les infrastructures techniques s'érodent par manque de constance dans la volonté d'observer la Terre et par manque de fonds dans les agences spatiales.

Mais les temps changent. Les gouvernements commencent à mieux appréhender l'enjeu de l'observation de la Terre pour planifier un développement durable. Cela s'est manifesté en 2002 pendant le Sommet mondial pour le développement durable, à Johannesburg (Afrique du Sud). La réunion du G8 de juin 2003 en France a ensuite désigné l'observation de la Terre comme la priorité scientifique absolue pour les années à venir. Ce qui a enfin ouvert la voie, le mois suivant, au premier Sommet sur l'observation de la Terre, à Washington (É.-U.), pendant lequel 33 pays et la Commission européenne se sont engagés à préparer un plan décennal de mise en œuvre.

Un Groupe technique pour les observations de la Terre (GEO) a été établi. Coprésidé par les États-Unis, la Commission européenne, le Japon et l'Afrique du Sud, et réunissant plus de 21 organisations internationales – dont l'UNESCO et sa Commission océanographique intergouvernementale (COI) – le GEO va élaborer ce plan de mise en œuvre. Dès lors que le *Cadre* a été approuvé, il appartiendra au GEO de le présenter sous la forme d'un plan détaillé au troisième Sommet sur l'observation de la Terre, en février 2005.

Le GEOSS s'appuiera sur les systèmes existants, y compris ceux des diverses nations, sur la Surveillance mondiale pour l'environnement et la sécurité, commune à l'Union européenne et à l'Agence spatiale européenne, et sur des initiatives relevant du système des Nations Unies.

Environ la moitié des 47 gouvernements du Sommet d'avril dernier représentait des pays en développement. C'est logique, car des pays aux ressources très diverses ont investi dans les satellites d'observation de la Terre, depuis les États-Unis, le Japon et la France jusqu'à l'Inde, la Chine, le Vietnam, l'Argentine, le Brésil, l'Algérie, l'Afrique du Sud et, tout récemment, le Nigeria. Depuis qu'il a lancé, en octobre de l'an dernier, le microsatellite

de télédétection en orbite basse de la Terre

«Nigeria Sat-1» pour surveiller l'environnement et fournir des informations utiles à la mise en place de certaines infrastructures, le Nigeria a été accueilli au sein du Réseau de surveillance des catastrophes, qui regroupe l'Algérie, la Chine, le Royaume-Uni et le Vietnam. Comme les catastrophes naturelles sont des phénomènes imprévisibles, l'adhésion d'un pays au Réseau multiplie ses chances d'être survolé par l'un des cinq satellites au «bon» moment, ce qui nous aide à minimiser le temps de réaction. Il est logique, également, que des pays ne possédant pas de satellites fassent partie du GEOSS. Car ils font régulièrement l'objet de survol et de télédétection par des satellites sans avoir facilement accès aux données recueillies, situation peu satisfaisante pour eux mais aussi pour les pays développés, qui ont, eux-mêmes, intérêt à ouvrir à un plus grand nombre de partenaires l'observation de la Terre. Si nous devons élucider les processus naturels impliqués dans des phénomènes à long terme tels que la variabilité du climat, la désertification ou les catastrophes naturelles, et améliorer leur prévision, cela exigera une observation exhaustive, soutenue et mondiale par satellite et *in situ* (sur terre et sur mer). Les données des instruments de mesure archivées depuis 1861 nous indiquent, par exemple, que l'élévation des températures de surface dans l'hémisphère Nord a dépassé, au 20^{ème} siècle, celle de tout autre siècle depuis au moins 1 000 ans. Mais il nous est impossible d'obtenir une évaluation mondiale, du fait de l'insuffisance des archives pour l'hémisphère Sud.

« Pour que le GEOSS atteigne ses objectifs » a déclaré au Sommet l'Ambassadeur d'Afrique du Sud Ben Ngubane, « il est indispensable qu'un plus grand nombre de pays en développement rejoignent le Réseau [...] Associer des initiatives régionales telles que le NEPAD à l'élaboration du GEOSS sera décisif à cet égard. Il est absolument nécessaire que le GEO étudie et résolve les problèmes de mise à disposition des données d'observation de la Terre dans les pays en développement, à des coûts réduits et abordables ».

Un système de gestion de l'information pour notre planète

Ben Ngubane exposait les attentes de l'Afrique du Sud à l'égard du GEOSS, au nom de son ministre des arts, de la culture, de la science et de la technologie, Phumzile Mlambo-Ngcuka.

«Ces 20 dernières années» a-t-il noté, «nous avons fait de grands progrès dans la création de structures politiques crédibles, afin de nous aligner sur les critères mondiaux d'un développement durable fondé sur la science. Ceci [...] est bien illustré par le phénomène du «trou d'ozone», pour lequel il n'a fallu que dix années entre sa détection, la compréhension de sa causalité et la mise en place de remèdes efficaces ordonnés par des structures politiques internationales⁹. Alors, que manque-t-il ? Pour éviter que nos succès ne se limitent à une série de résultats ponctuels, comme à propos du trou d'ozone, il faut ce que les milieux d'affaires appellent un système de gestion de l'information, [...] fondé sur les grands principes généraux du profit et supervisé par des indicateurs internationalement reconnus, susceptibles d'être mesurés de façon fiable, scientifique et à un coût abordable. Notre souhait est que le GEOSS soit un système de gestion de l'information pour notre planète».

Poursuivre la mise en œuvre des traités

L'ambition déclarée du GEO est non seulement de faire progresser la connaissance des processus dynamiques de la Terre, mais aussi de donner une impulsion à la mise en œuvre des

obligations fixées par les traités sur l'environnement. Des exemples nous sont donnés, ces dernières années, tels que la Convention sur la diversité biologique, adoptée au Sommet Terre de Rio en 1992, la Convention sur la lutte contre la désertification de 1994 ou encore le Protocole de Kyoto (*voir encadré*).

Comme l'explique Eric Vindimian, du ministère français de l'écologie et du développement durable, «le fait de participer au GEO n'implique pas le souhait de ratifier des traités. Il reste que l'ambition du GEOSS est de construire des outils qui permettent d'observer la planète et que ces outils sont conçus pour être orientés vers les besoins des utilisateurs majeurs, autrement dit, les gouvernements, qui sont ceux qui ont le plus besoin de connaître l'état de la planète pour signer et mettre en œuvre les traités internationaux. Même les gouvernements qui n'ont pas ratifié certains traités n'ont pas manifesté d'opposition à ce que les observations du GEOSS servent à la mise en œuvre des traités internationaux. Les pressions sur l'environnement sont, bien entendu, parmi les paramètres à observer, tout autant que l'état de l'environnement en réponse à ces pressions».

La Stratégie d'observation mondiale intégrée

Depuis la fin de la Guerre froide, les agences spatiales se sont largement recentrées sur les questions de sécurité environnementale et participent à l'expansion d'un réseau de satellites équipés de capteurs optiques, infrarouges et radars destinés à la surveillance de la planète. Ces satellites constituent souvent le seul moyen pour recueillir les données indispensables à la compréhension et à la prévision des modifications – d'origine humaine ou naturelle – qui affectent l'atmosphère, les terres et les océans.

Cependant, les satellites sont des entreprises coûteuses, et l'observation planétaire *in situ* ne l'est guère moins. En 2002, Tellman Mohr, du Comité sur les satellites d'observation de la Terre (CEOS), signalait qu'«il existe plusieurs initiatives mondiales concernant l'étude du climat ou des océans par exemple, mais aucune agence, aucun organisme n'est en mesure de mettre en œuvre l'un de ces systèmes en dehors d'une coopération».

Le désir de partager les dépenses a joué son rôle dans la décision, prise il y a six ans, de lancer la Stratégie d'observation mondiale intégrée (IGOS). De même, il apparaissait de plus en plus clairement que la Terre, l'atmosphère et les océans, loin d'être des systèmes indépendants, faisaient partie intégrante d'un unique système planétaire, et que les programmes de recherche n'atteindraient leur pleine efficacité que si des passerelles étaient jetées entre les différentes initiatives mondiales.

IGOS se compose de 14 partenaires, parmi lesquels on compte le CEOS, qui représente 23 agences spatiales, l'UNESCO, la FAO, le PNUE, l'OMM, les Systèmes mondiaux d'observation de la Terre (GTOS), de l'océan (GOOS) et du climat (GCOS), ICSU, le Programme mondial de recherche sur le climat et le Programme international géosphère-biosphère.

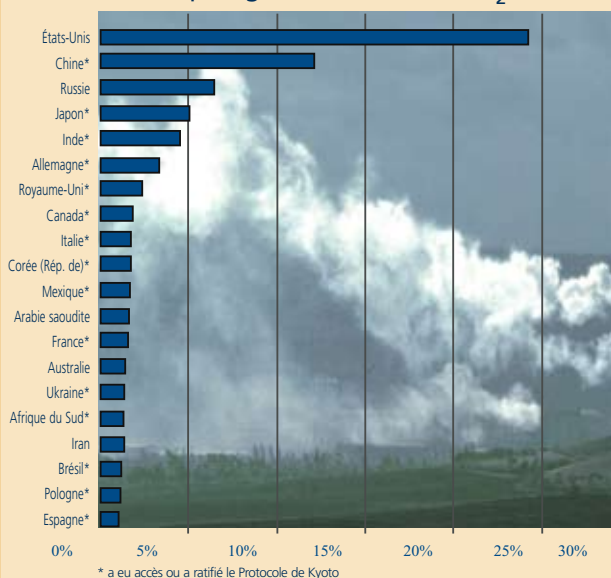
9. Environ 90% de l'ozone se trouve dans la stratosphère (à une altitude de 11 à 30 km). L'ozone agit comme un bouclier protecteur contre les rayons UV. Le Protocole de Montréal a, dans un premier temps, réduit (en 1987) puis interdit (en 1992) les chlorofluorocarbones dans les pays développés. Le processus naturel de production de l'ozone devrait restaurer l'intégrité de la couche d'ozone d'ici à 2050, si des changements climatiques ne viennent pas fausser les prévisions

Etat actuel du Protocole de Kyoto

Conclu par plus de 100 pays après plus de dix ans de négociations, le Protocole de Kyoto de 1997 demande aux 38 nations les plus industrialisées de réduire de 5,2%, d'ici à 2012, leurs émissions de gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990. En avril 2004, 122 pays responsables de 44,2% des émissions mondiales de CO₂ avaient ratifié le Protocole de Kyoto, les derniers en date étant Israël (mars 2004) et l'Ukraine (avril 2004). Étant donné que le Protocole doit être ratifié par les pays responsables de 55% des émissions mondiales de CO₂ pour pouvoir entrer en vigueur, sa mise en œuvre ne pourra être efficace que lorsqu'il aura été ratifié par l'un au moins des autres pays Parties à la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

Pour en savoir plus : <http://unfccc.int>

Les 20 plus grands émetteurs CO₂ (2000)



Source: http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/graphics/top20_2000.gif

Le *Cadre* du plan de mise en œuvre du GEOSS reconnaît qu'IGOS fait partie des groupes qui ont effectué «des travaux importants et proposé des orientations pour l'action à entreprendre en matière de coopération pour l'observation de la terre, de l'eau, du climat, de la glace et de l'océan».

Parmi les avantages attendus, au plan socio-économique, le *Cadre* cite: réduire les pertes en vies humaines et en biens par suite de catastrophes naturelles, connaître les facteurs environnementaux qui affectent la santé et la vie humaines, mieux gérer les ressources énergétiques, comprendre, prévoir et réduire la variabilité du climat et ses modifications et s'y adapter, améliorer la gestion des ressources hydriques et la protection des écosystèmes terrestres, côtiers et marins, ainsi que de la biodiversité. Tels sont précisément les objectifs d'IGOS.

Les équipes thématiques d'IGOS

Ces quatre dernières années, IGOS a répertorié plusieurs questions cruciales, en particulier les courants océaniques et le

changement climatique, l'état des ressources mondiales en eau, le cycle planétaire du carbone, la chimie atmosphérique et les risques géophysiques tels que les éruptions volcaniques et les glissements de terrain. Les scientifiques spécialisés dans ces domaines se sont constitués en comités pour mettre au point des stratégies sous forme de rapports identifiant d'abord quel type de données les satellites pourraient leur fournir et sur quelle durée, afin de combler les lacunes des connaissances actuelles.

À ce jour, les partenaires d'IGOS ont approuvé les stratégies de cinq des équipes thématiques. Elles visent le cycle du carbone, l'eau, les océans, les risques géophysiques, et le sous-thème des récifs coralliens. Les stratégies concernant la chimie atmosphérique et l'observation des côtes sont encore à l'étude.

Deux autres thèmes ont été proposés: l'occupation des sols et la cryosphère. Tirant son nom du terme grec *kruos*, qui signifie gelée ou froid glacial, la cryosphère est la partie de la surface de la Terre où l'eau se présente sous sa forme solide: glace de mer, glace d'eau douce, glaciers et terres gelées (le pergélisol). Quant au thème de l'occupation des sols, il sera centré sur l'utilisation durable des terres, les écosystèmes naturels, la biodiversité et la surveillance des modifications de l'occupation des sols.

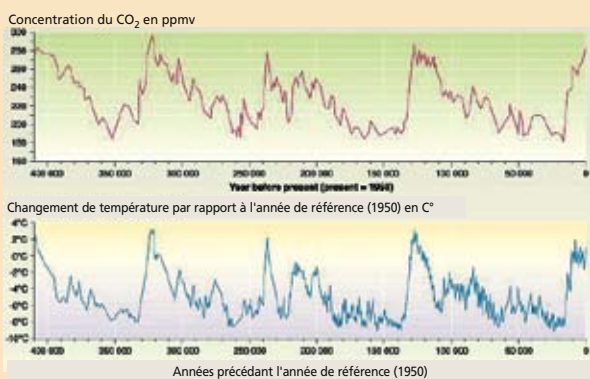
Vivre à l'intérieur de la serre

Si beaucoup de capitales disposent déjà d'une mesure, assez régulière et précise de la pollution de l'air, ce n'est toujours pas le cas dans la plupart des villes du monde, en dépit de la croissance exponentielle de l'usage de la voiture, même dans les pays les plus pauvres. La pollution de l'air posant un problème à la fois pour la santé et pour l'environnement, elle nous oblige à mieux comprendre la façon dont les différents produits chimiques affectent l'atmosphère. Grâce aux satellites, on peut envisager un système mondial de surveillance de ces phénomènes.

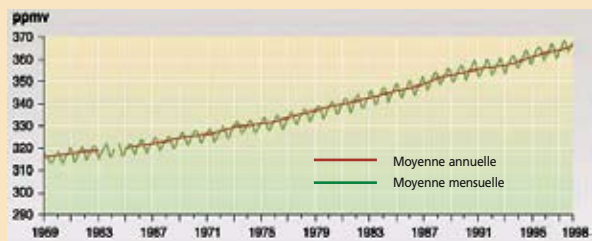
À la différence de l'ozone de la stratosphère, qui est bien-faisant, l'ozone de la troposphère (jusqu'à 11 km d'altitude) est la principale composante du smog urbain. L'ozone naît de l'action de la lumière solaire sur les oxydes d'azote et les composés organiques volatils émis par les moteurs automobiles et certaines sources fixes. Ces émissions, capables de parcourir des centaines de kilomètres, peuvent donner lieu à de fortes concentrations d'ozone sur de grands espaces. Selon le résumé du rapport *Airtrends* de l'Agence des États-Unis pour la protection de l'environnement, datant de 1995, il est scientifiquement prouvé qu'«une exposition à l'ozone de six à sept heures, même à de faibles concentrations, réduit sensiblement les fonctions pulmonaires et induit une inflammation respiratoire chez des sujets en bonne santé, se livrant à une activité modérée. Certains symptômes tels que douleur de poitrine, toux, nausée et congestion pulmonaire peuvent apparaître». Le rapport estimait que «l'ozone fait perdre à l'agriculture des États-Unis environ 1 à 2 milliards de dollars par an [et] endommage les écosystèmes forestiers de Californie et de l'est des États-Unis».

Deux rapports publiés tout récemment, en mai 2004, signalent une augmentation des problèmes de santé dus à la pollution atmosphérique. L'un d'eux, publié par l'Agence française de sécurité sanitaire environnementale, estime que la pollution atmosphérique est responsable de la mort de 6 500 à 9 500 personnes par an (sur une population française de

Concentration du CO₂ dans l'atmosphère



D'après la carotte de glace de Vostok. Remarquer la corrélation entre le changement de température (en bas) et le changement de concentration du CO₂ (en haut) au cours des 400 000 dernières années. Chaque creux de la courbe des températures correspond à une glaciation. La concentration actuelle du CO₂ (368 parts par million en volume ppmv, en l'an 2000) n'avait jamais été atteinte depuis 420 000 ans, et probablement pas depuis 20 millions d'années. Le rythme actuel d'augmentation n'a pas eu de précédent depuis au moins 20 000 ans. La concentration du CO₂ prévue pour l'an 2100 se situerait entre 540 et 950 ppmv. Cet écart d'évaluation est dû aux incertitudes sur la persistance des mécanismes actuels d'élimination (les puits de carbone) et à l'ampleur de la rétroaction du climat sur la biosphère terrestre.



Courbe Moana Loa. Avant l'époque industrielle (autour de 1750), la concentration du CO₂ atmosphérique s'élevait à environ 280 ±10 ppmv pendant plusieurs milliers d'années. Elle a constamment augmenté depuis.



© UNESCO

« L'exposition à l'ozone pendant 6 à 7 heures réduit sensiblement les fonctions pulmonaires et induit une inflammation respiratoire chez des sujets en bonne santé, se livrant à une activité modérée »

60 millions), soit 3 à 5% de la mortalité des personnes de plus de 30 ans. Publié par l'École de médecine de Harvard (É.-U.) et cité par la revue *The Lancet*, l'autre rapport, intitulé *À l'intérieur de la serre: incidences du CO₂ et de l'évolution du climat sur la santé publique dans les centres-villes*, attribue une partie de la responsabilité de la progression de l'asthme chez les enfants à l'usage des combustibles fossiles. Les enfants des centres-villes seraient plus exposés à l'asthme du fait que les particules de diesel sont d'excellents vecteurs pour le dépôt de pollen dans les cellules saines des poumons, d'autant plus qu'un taux élevé de CO₂ stimule une production plus abondante et plus précoce de pollen. Aux États-Unis, le taux d'incidence de l'asthme chez l'enfant a augmenté de 160% entre 1980 et 1994; quant à l'Europe, on pense qu'un enfant sur sept en est affecté aujourd'hui.

Dix ans de données, une goutte d'eau dans un seau

Le rapport approuvé du thème sur l'océan a été publié en janvier 2001. L'adoption de son programme a abouti à un accord entre deux agences de recherche spatiale, la NASA (É.-U.) et le CNES (France) et deux agences opérationnelles de l'espace, NESOLS (É.-U.) et Eumetsat (Europe) pour le lancement, en collaboration, de Jason-2, en 2005. Ce satellite poursuivra la mission de Jason-1 et de Topex/Poseidon, les satellites franco-américains qui ont révolutionné nos connaissances océanographiques.

Faisant le tour de la Terre en 112 minutes, Topex/Poseidon (lancé en 1992) a été le premier satellite capable de mesurer la hauteur de la surface de l'océan avec une précision de quelques cm, ce qui a permis aux scientifiques d'en déduire la dynamique de l'ensemble de l'océan sous la surface. C'est ce type de données qui les met en mesure d'observer les grands courants océaniques qui régulent le climat en assurant la circulation de la chaleur autour de la planète. Pour la première fois, les scientifiques ont été en mesure d'observer le déroulement d'événements capitaux, tels qu'El Niño, un phénomène engendré par un régime de vents inhabituel qui draine les eaux chaudes vers la zone équatoriale du Pacifique et perturbe les conditions météorologiques habituelles dans le monde. Topex/Poseidon a également fourni une méthode efficace pour mesurer la variation du niveau moyen de l'océan à l'échelle mondiale en corrélation avec le changement climatique planétaire.

Les succès inestimables de Topex/Poseidon ont décidé les États-Unis et la France à lancer Jason-1 en 2001, afin de

poursuivre la mission. Les mesures de la surface des mers que le satellite envoie ont une résolution de 1 cm, une précision jamais obtenue auparavant. Jason-1 devrait fonctionner pendant une dizaine d'années.

Même ainsi, du point de vue des scientifiques, une décennie de données représente tout juste une goutte d'eau dans un seau. « Nous savons aujourd'hui qu'El Niño ou l'oscillation de l'Atlantique Nord [une «balançoire» atmosphérique qui oriente les tempêtes hivernales d'ouest en est à travers l'océan] ne sont pas de simples phénomènes annuels; ils obéissent à des cycles décennaux, explique Colin Summerhayes, de la COI de l'UNESCO. « Grâce à des données à plus long terme, la prévision météorologique pourrait fournir des informations utiles aux activités agricoles, en particulier dans les régions arides. »

Elucider certains mystères du cycle de l'eau

IGOS a mis en chantier un rapport thématique similaire concernant l'état des ressources en eau dans le monde. Rien ne nous paraît plus banal aujourd'hui que les images satellites retransmises par la télévision lors des informations sur la météo. Depuis la première mission américaine en 1960, une série ininterrompue de satellites météorologiques a été lancée. Il reste toutefois des lacunes à combler dans la compréhension scientifique du cycle élémentaire de l'eau. Les précipitations, en particulier, restent très difficiles à évaluer : on estime ainsi que l'ensemble des zones arrosées simultanément ne représente pas plus de 1 à 4% du globe. Et l'intensité de ces précipitations peut varier radicalement en quelques minutes, voire quelques secondes. Dans ce domaine, une nouvelle génération de Satellites, dénommés Terra et Agua (É.-U.) et Envisat (Europe), fournira bientôt un ensemble de données sans précédent, en quantité aussi bien qu'en qualité.

IGOS s'efforce de mettre sur pied un réseau international pour collecter, comparer et synthétiser les données provenant des différents satellites et celles recueillies au sol. L'objectif est d'être à pied d'œuvre lors d'un grand rendez-vous technologique: en 2007, les États-Unis et le Japon lanceront une constellation de neuf satellites de mesure mondiale des précipitations équipés pour mesurer toutes les trois heures les précipitations sur toute la planète.



© D.Regier/UNESCO

Rizières en Indonésie. Une meilleure connaissance du cycle de l'eau nous aidera à accroître la productivité agricole pour nourrir une population mondiale en expansion

L'éruption du siècle



Image offerte par le US Geological Survey

Le mont Pinatubo se réveille après 400 ans

Après quatre siècles de sommeil, le mont Pinatubo, aux Philippines, a connu en juin 1991 une éruption si violente qu'elle a projeté à une hauteur de 40 km des colonnes de plus de 10 km³ de matière pyroclastique et de cendres et lancé dans la stratosphère un gigantesque voile nuageux chargé de 17 mégatonnes de dioxyde de soufre. Des cendres volcaniques sont restées pendant des mois en suspension, et certaines ont été portées par les vents jusqu'en Russie et en Amérique du Nord. L'éruption a provoqué une chute de la température de l'hémisphère Nord, allant jusqu'à 0,6°C. Elle a enseveli plus de 400 km² du paysage sous des coulées de cendres chaudes et recouvert de cendres 7 500 km² de l'île de Luzon. Plus d'un million de personnes ont dû être déplacées et près de 900 en sont mortes. Les dommages aux biens et à l'infrastructure se sont comptés en centaines de millions de dollars.



Image offerte par le US Geological Survey

A gauche, L'éruption a recouvert de cendres l'île philippine de Luzon – A droite, des enfants sur le toit de leur école à Bamban en octobre 1991

L'activité volcanique fait l'objet, partout dans le monde, de mesures régulières. L'acquisition et le traitement de données informatisées ont fait de grands progrès, mais pas encore suffisamment pour remplacer le cylindre enregistreur que vous pouvez encore voir imprimer des signaux sur les sismographes placés aux points stratégiques autour des volcans potentiellement actifs.

Les satellites ne sauraient apporter toutes les réponses

À eux seuls, cependant, les satellites ne peuvent apporter de réponse à la plupart des questions primordiales auxquelles sont confrontés les scientifiques. Ainsi, la mesure des niveaux de CO₂ absorbés par la forêt ou le rythme de l'érosion côtière leur échappent. En conséquence, IGOS développe des stratégies destinées à associer les données d'origine spatiale et celles recueillies à la surface du globe. Les images satellites de l'érosion du littoral sont susceptibles de modifier en profondeur les travaux d'un biologiste marin. Réciproquement, les agences spatiales ont besoin d'informations venues du sol pour interpréter les signaux envoyés par les satellites.

Comprendre le cycle du carbone pour prévoir l'évolution du climat

Au début de l'an 2004, IGOS a approuvé la stratégie pour un système d'observation mondiale permettant d'étudier les effets

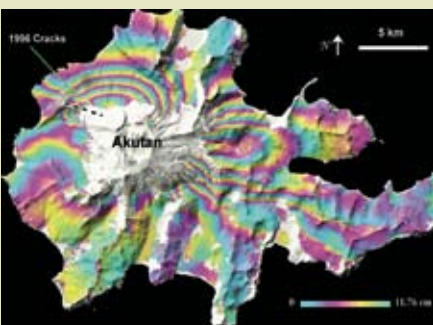
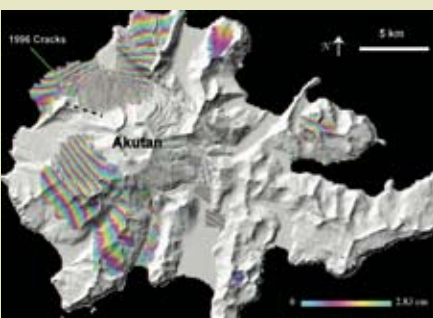
de l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Plus que l'ensemble des autres gaz à effet de serre, comme le méthane, les oxydes nitreux et les halocarbones, le CO₂ est responsable du réchauffement planétaire. Cela est partiellement dû au fait que la teneur de l'atmosphère en CO₂ persiste durant des siècles, même après que le niveau des émissions se soit stabilisé. Au contraire, le méthane, un gaz essentiellement produit par l'agriculture, le traitement des déchets, l'exploitation du charbon et du gaz naturel, se dispersera quelques décennies à peine après l'arrêt des émissions.

Les prévisions concernant les variations de niveau du CO₂ dans l'air et l'évolution du climat exigent une meilleure compréhension du cycle planétaire du carbone, c'est-à-dire de sa circulation entre les terres, les océans et l'atmosphère. Dans ce cycle, les océans finiront par absorber quelque 90% du CO₂ anthropique émis dans l'atmosphère. Cependant le taux d'absorption par les eaux océaniques de surface et son transport dans les profondeurs de l'océan, où il ne sera pas libéré dans l'atmosphère avant des millénaires est bien plus lent que le taux d'émission du CO₂ dans l'atmosphère, ce qui se traduit par une accumulation de CO₂ dans l'atmosphère. Les océans absorbent actuellement environ 30% du CO₂ émis par les combustibles fossiles, mais on ne sait pas encore comment fonctionne ce processus et comment il pourrait fonctionner à l'avenir, dans un environnement différent. L'océan débarrasse l'atmosphère de son CO₂ grâce à deux processus. Des végétaux microscopiques, ou phytoplancton, convertissent le CO₂ en matière organique par photosynthèse; lorsque ces plantes meurent et sombrent elles entraînent ce carbone au fond de l'océan. C'est ce que l'on appelle «la pompe biologique». L'autre mécanisme, «la pompe de solubilité» tient au fait que le CO₂ de l'atmosphère est soluble dans l'eau de mer. Lorsque les eaux superficielles de la mer se refroidissent dans les hautes latitudes, elles se densifient et s'enfoncent dans l'océan en entraînant le CO₂ dissous. Il semble que l'absorption nette du CO₂ anthropique soit régi selon des cycles longs, par la physique de l'océan, et plus précisément par le transport des eaux superficielles saturées en CO₂ vers les profondeurs. Cependant, dans de nombreuses régions et sur des cycles plus courts, il peut arriver que la pompe biologique prenne le contrôle de la répartition du CO₂ dans les océans.

C'est en mesurant la teneur en carbone des eaux de surface et des eaux profondes et en étudiant la circulation physique de l'océan que les scientifiques commencent à comprendre comment et à quel rythme l'océan débarrasse l'atmosphère de son CO₂. Pour obtenir ces mesures, il faut prélever des échantillons sur des navires de recherche ou des navires de commerce spécialement équipés, et utiliser également des bouées scientifiques. En étudiant la coloration de l'océan, telle qu'elle apparaît sur les images satellites, les scientifiques ont la possibilité d'évaluer la densité du phytoplancton à l'échelle planétaire et d'entrevoir les processus qui déterminent la variabilité spatiale et géographique de son mode de croissance. Il est indispensable de recouper ces observations afin de construire des modèles montrant comment le carbone absorbé et libéré par l'océan interagit avec l'atmosphère et les terres.

«Nous disposons aujourd'hui de plusieurs modèles, mais les résultats qu'ils fournissent varient jusqu'à 50%», explique le Français Philippe Ciais, du Commissariat à l'énergie atomique

Une étude satellite



Ces deux interféogrammes montrent le volcan Akutan, sur une île lointaine des Aléoutiennes, en Alaska (É.-U.). En 1996, une salve d'éruptions volcaniques violentes a ébranlé cette île faiblement peuplée. Craignant de voir se réveiller le volcan endormi (ce qui n'arriva pas), les scientifiques ont utilisé deux paires d'images satellites, produites par des radars de longueurs d'ondes différentes, pour mesurer les modifications de la topographie du volcan.

L'interféogramme de la bande C (image du haut), de longueur d'ondes inférieure, a été construit à partir d'images prises par une sonde embarquée sur le satellite ERS de l'Agence spatiale européenne; l'interféogramme de la bande L (image du bas) provient du satellite japonais J-ERS. Pour établir un interféogramme, il faut au moins deux images de la même cible prises à des moments différents. Les satellites actuels mesurent la même cible environ une fois par mois. On superpose les deux images pour montrer où les modifications se sont produites. Les paires d'images ayant servi à produire les interféogrammes présentés ci-contre révèlent une déformation de la surface du volcan due à une intrusion de magma, qui s'est déplacé du sommet vers l'est. Cette déformation a pu être «saisie» parce qu'une image a été prise avant l'intrusion et l'autre après (les bandes de couleur indiquent les modifications).

La bande C peut être plus sensible à de petites déformations que la bande L, mais elle ne convient pas pour mesurer des déformations qui déplacent la cible de plus de quelques centimètres entre deux observations. La présence de végétation et le mouvement des nuages dévient le trajet des rayons. Du fait que les surfaces naturelles ne sont généralement pas composées de roche compacte mais comprennent aussi des sols, des débris etc. (comme dans le cas de cette île), le radar de la bande L, plus longue, semblerait bien plus utile que celui de la bande C pour mesurer les géorisques, même en l'absence de végétation.

Aucune mission de survol n'est en cours dans la bande L, si bien que des observations telles que celle de l'image du bas ne sont plus possibles. L'Agence spatiale japonaise se prépare cependant à mettre en orbite le satellite ALOS (bande L). Plusieurs autres satellites sont en service avec des équipements d'interférométrie de la bande C: le RadarSat canadien, l'ERS-2 et Envisat européens.

(CEA), qui conduit la stratégie d'IGOS sur le cycle du carbone. «On peut probablement améliorer ces modèles. Mais, à défaut d'une plus grande précision dans nos observations, il nous manque un point de référence pour mesurer l'amplitude du changement dans le cycle du carbone entre aujourd'hui et la prochaine décennie».

Prendre la mesure des géorisques

La stratégie des risques géologiques (« géorisques ») a été publiée en avril 2004 par les chefs de file de l'équipe thématique, le British Geological Survey, l'Agence spatiale européenne et l'UNESCO. Le rapport dresse l'état des besoins des divers groupes d'utilisateurs en matière d'atténuation des risques et formule des recommandations pour améliorer l'observation et la surveillance des risques, *in situ* aussi bien que depuis l'espace.

Chaque année, des éruptions volcaniques, des tremblements de terre et des glissements de terrain provoquent la mort de milliers de personnes, en blessent un nombre encore supérieur, dévastent leurs habitations et détruisent leurs moyens d'existence. Les dommages subis par l'infrastructure se comptent en milliards, et même davantage si l'on inclut les primes d'assurance. Les géorisques frappent les riches comme les pauvres mais ont une incidence hors de proportion dans les pays en développement. Parallèlement à l'accroissement de la population humaine s'accroît le nombre de personnes vivant dans des zones à risque, de sorte que les effets des géorisques augmentent à un rythme insoutenable. Pour atténuer l'impact de ces phénomènes, il faudra faire d'importants progrès dans la connaissance des risques et dans la mise au point des moyens pour y faire face. En cas de danger, les citoyens doivent être informés du lieu, de l'heure, de la gravité du risque, de son évolution probable et de risques et du manque de continuité de l'interférométrie des radars dans la bande C – et surtout la bande L (voir les images satellite). Dans les 10 ans à venir, il s'agira de combler ces lacunes

en harmonisant les diverses recherches sur les géorisques pour les intégrer dans des systèmes opérationnels à l'échelle mondiale. La communauté des spécialistes pourra dès lors améliorer la cartographie, la surveillance, la prévision, l'atténuation des incidences et les dispositifs de secours, ce qui fournira de précieuses informations aux agences chargées de gérer les catastrophes. La Stratégie comblera les lacunes des observations à long terme et des questions non couvertes par le système de réaction aux catastrophes établi sous l'égide de la Charte internationale de l'espace et des grandes catastrophes, ou de l'Équipe opérationnelle des Nations Unies pour la gestion des catastrophes.

Entrée sur la scène politique

Dans les dix ans à venir, le partenariat d'IGOS va nous permettre de mieux comprendre comment fonctionnent les systèmes qui entretiennent la vie sur la planète et comment ils agissent les uns sur les autres. Au fur et à mesure de cette compréhension, IGOS façonnera les outils dont les décideurs ont besoin pour planifier un développement durable. Le Sommet de l'observation décennale de la Terre fait entrer les travaux d'IGOS sur la scène politique. Ces opérations menées en parallèle contiennent la promesse d'une puissante alliance de rigueur scientifique et de volonté politique. Le sommet de février devrait apporter un surcroît de confiance dans l'élaboration d'un système d'observation de la Terre qui va révolutionner notre façon de gérer la planète.

S. Schneegans, A. Otchet, R. Missotten¹⁰ et M. Hood¹¹

Les rapports thématiques sont sur: www.igospartners.org

10. Spécialiste du programme des sciences de la terre à l'UNESCO

11. Spécialiste du programme des sciences de la mer à l'UNESCO

Scruter l'océan pour comprendre le changement climatique



© Jerzy Smykła

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.

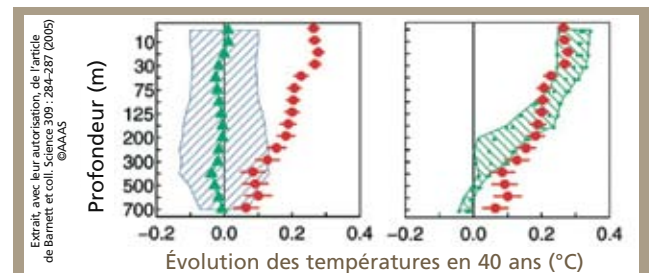
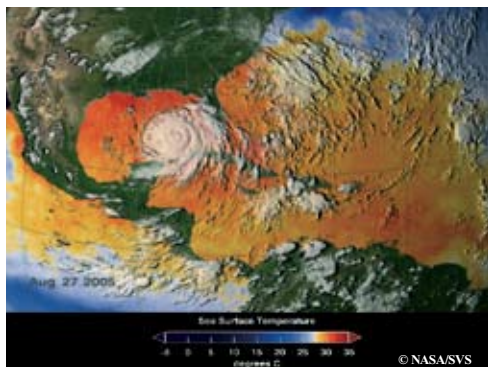
Il est scientifiquement impossible de lier l'un ou l'autre des événements extrêmes à l'évolution du climat mondial, mais la tendance actuelle confirme le fait qu'un changement planétaire est à l'œuvre. Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec), chargé d'évaluer les recherches 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



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 concordaient 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'oeil de l'ouragan Katrina (le mur de l'oeil) 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'oeil 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. Niemius XCoast Guard 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 Folha

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

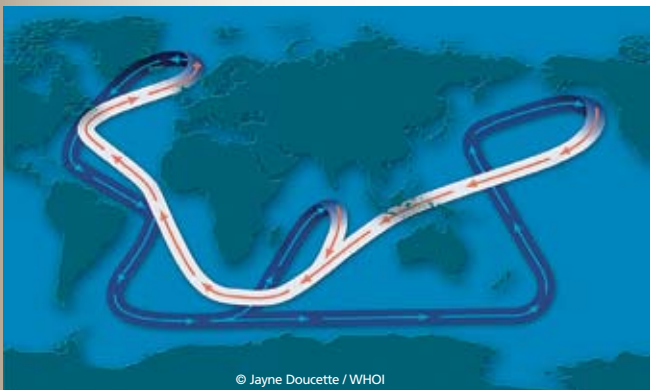
La température moyenne entre l'équateur et les pôles diffère en raison de l'inclinaison relative de la surface de la Terre par rapport au soleil. Cependant, cette différence est bien plus faible que ce à quoi on s'attendrait. C'est parce que les océans et l'atmosphère transportent de la chaleur vers 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.

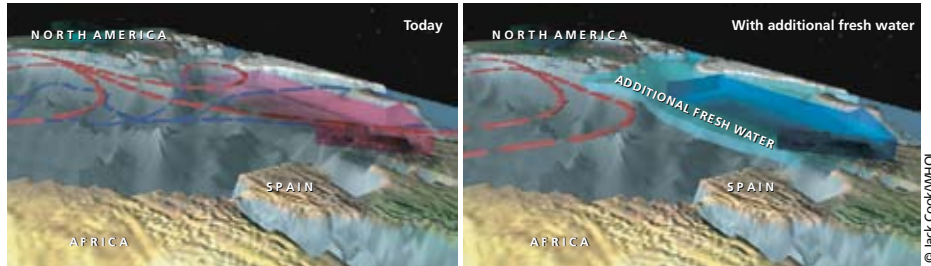
L'évaporation dans l'atmosphère laisse derrière elle une eau plus salée et plus fraîche (donc plus dense). Les eaux circulant sous la couche supérieure partout dans le monde sont les plus denses, les plus froides et les plus salées des eaux qui se forment, surtout dans l'Atlantique Nord polaire, par 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.



Le cheminement du tapis roulant océanique



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

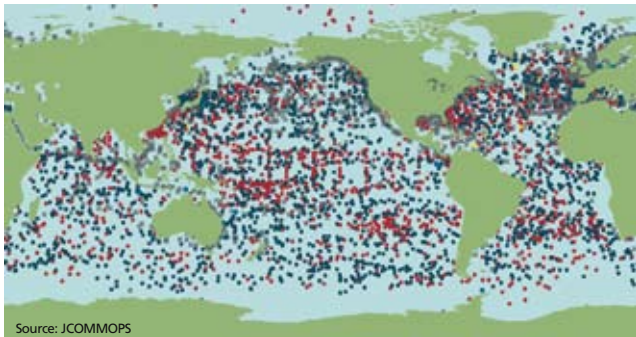
Les océans jouent certes un rôle central dans l'élévation du niveau de la mer, qui provient aussi bien de l'expansion des eaux océaniques chaudes que de la fusion des glaciers (voir encadré, p.10). et des calottes glaciaires. Le niveau moyen mondial de la mer est monté d'environ 2 mm par an, d'après 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.



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.

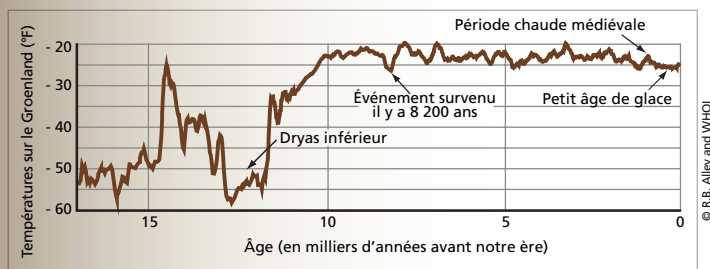


Le climat pourrait-il changer brusquement ?

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

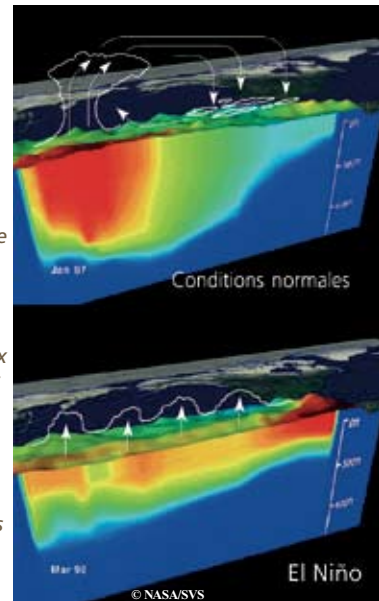
Les satellites assurent une couverture mondiale des océans et constituent un élément clé du GOOS. Voici une vision d'artiste du satellite européen SMOS qui va mesurer la salinité de surface à partir de 2007

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 plates-formes 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 subsuperficiel 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

© UNESCO/IOC

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> ; a.fischer@unesco.org

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

Un puits de carbone qui sature ?

Les océans nous rendent un service inestimable en absorbant la moitié du dioxyde de carbone (CO₂) libéré par la combustion des matières fossiles, ce qui atténue l'impact de ce gaz à effet de serre sur le climat. Un colloque réuni en mai¹⁶, à l'UNESCO, a toutefois conclu que nous pourrions bientôt payer cher la facture de ce service.

Lorsqu'en mai dernier, plus de 100 éminents spécialistes mondiaux du carbone océanique, appartenant aux divers domaines de la biologie et de la chimie marines, ont additionné les connaissances scientifiques les plus sérieuses dont ils disposent, les résultats se sont avérés alarmants. Ces travaux de recherche suggèrent que l'élévation du taux d'acidité de l'océan pourrait être très nocive pour les coraux et autres organismes fixant le calcium comme les crustacés et certaines espèces de phytoplancton. Cela perturberait les chaînes trophiques marines, au point peut-être d'entraîner l'effondrement des industries de la pêche et du tourisme dans de nombreuses régions du monde. Cela pourrait également modifier la capacité de l'océan à absorber le CO₂ des combustibles fossiles selon des modalités que l'on ne peut pas encore prévoir exactement.

Les participants ont donc décidé de fixer un ordre de priorité pour les recherches visant à élucider les conséquences éventuelles sur les écosystèmes marins d'une acidification de l'océan et à savoir si l'on pouvait sans danger envisager des stratégies de géo-ingénierie destinées à réduire l'impact du CO₂ sur le climat, en stockant son excédent dans les profondeurs de l'océan.

Comment fut établi le lien entre carbone et climat

Au milieu du 19^{ème} siècle, les cercles scientifiques se passionnèrent pour l'hypothèse nouvelle des ères glaciaires, selon laquelle, il y a des dizaines de milliers d'années, la majeure partie des continents de l'hémisphère nord avait été recouverte d'épaisses couches de glace. En cherchant à savoir comment le climat de la planète avait pu changer si radicalement, les scientifiques ont découvert que certains gaz de l'atmosphère terrestre piègent la chaleur du soleil. On a calculé que l'on pourrait reproduire les conditions qui prévalaient pendant les périodes glaciaires si l'on divisait par deux la teneur de l'atmosphère en CO₂. Mais quels processus naturels avaient bien pu provoquer des changements aussi

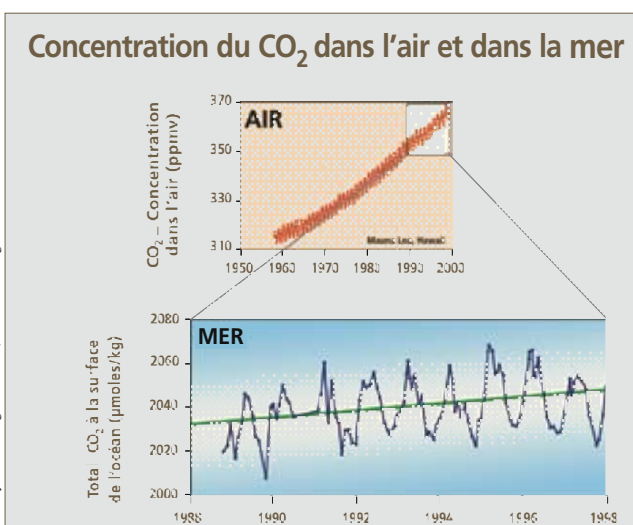
spectaculaires dans la teneur en CO₂ ? Cette question devait donner le coup d'envoi à des recherches parmi les plus stimulantes – et durables – en sciences de la terre, portant sur le cycle global du carbone.

Au début de la révolution industrielle, au milieu du 18^{ème} siècle, les activités humaines comme la combustion de matières fossiles ont commencé à ajouter du CO₂ dans l'atmosphère mais dans une faible mesure, eu égard à la grande quantité de CO₂ normalement présente dans l'atmosphère. On n'a donc pas pris au sérieux les premières inquiétudes sur cette accumulation à long terme car, en ce temps-là, la plupart des scientifiques croyaient que l'océan absorberait normalement 90% du CO₂ d'origine industrielle émis dans l'atmosphère.

Vers la fin des années 1950, les géochimistes Roger Revelle (fondateur de la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO, la COI) et Hans Suess ont tiré le signal d'alarme. D'après leurs calculs, l'absorption du CO₂ par l'océan était bien plus lente qu'on ne l'avait cru, les océans ne pouvant absorber que 50 % du CO₂ émis chaque année par la combustion des matières fossiles. Le reste, avertissaient-ils, allait s'accumuler dans l'atmosphère et accroître la capacité de celle-ci à piéger la chaleur, ce qui produirait un « effet de serre ». En 1958, Charles David Keeling commença à effectuer les premières mesures de grande précision du CO₂ atmosphérique à l'observatoire de Mauna Loa, à Hawaï (É.-U) ; il devait bientôt livrer au monde la preuve de l'augmentation régulière de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Vingt-cinq ans plus tard, commençaient à leur tour les mesures du CO₂ océanique à la Station de séries chronologiques de l'Atlantique, aux Bermudes, qui corroboraient la pénétration lente du CO₂ excédentaire sous la surface des océans.

L'énigme du puits de carbone manquant

Du CO₂ émis mondialement à partir des combustibles fossiles, seule une moitié s'est accumulée dans l'atmosphère. Les recherches sur ce qui est advenu de l'autre moitié ont inspiré



Augmentation de la concentration du CO₂ dans l'air et dans la mer. Pour ce qui est de la mer, chaque creux de la courbe s'explique par la variation saisonnière

16. L'océan dans un monde à forte concentration en CO₂. Colloque scientifique international co-parrainé par le Comité scientifique de la recherche océanique (SCOR) et la COI de l'UNESCO

des travaux échelonnés sur plusieurs dizaines d'années, quant à ce « puits de carbone manquant ». Les deux possibilités en étaient la biosphère terrestre (par le biais de la photosynthèse) et l'océan. L'océan, la plus grande réserve naturelle de carbone, entretient avec l'atmosphère une interaction dynamique sur plus de 70 % de la surface de la planète. Pour calculer la quantité de CO₂ absorbée par l'océan, il n'existe qu'une méthode : la mesurer directement à l'échelle mondiale. De 1990 à 1998, un programme plurinational intitulé Expérience sur la circulation océanique mondiale/Étude conjointe des flux océaniques mondiaux a capitalisé les données de près de 10 000 stations provenant de 95 expéditions distinctes menées dans tous les océans, et a dressé un premier relevé mondial de la répartition du carbone dans l'océan.

Les résultats de ce relevé viennent d'aider à percer le mystère du puits de carbone manquant : les données montrent

que les océans ont absorbé environ 118 milliards de tonnes du CO₂ émis depuis 1800, soit environ 48 % de la totalité ; actuellement 20 à 25 millions de tonnes de CO₂ s'introduisent tous les jours dans les océans, d'après l'étude publiée dans le numéro de juillet de *Science*¹⁷. N'était le puits océanique, le CO₂ atmosphérique serait bien plus abondant et ses effets sur le climat bien plus marqués¹⁸. Mais les scientifiques sont dès lors confrontés à une nouvelle question : les océans vont-ils continuer

à absorber près de la moitié du CO₂ émis dans l'atmosphère – même dans le cas d'un réchauffement du climat, qui modifierait les schémas de mélange des eaux océaniques ? Une deuxième étude mondiale et plusieurs programmes internationaux de recherche ont donc été lancés en 2003 pour tenter de répondre à ces questions.

Un océan acide ?

Une autre question, peut-être plus pressante, se pose : comment ces teneurs plus élevées de CO₂ océanique vont-elles affecter les écosystèmes marins ? On s'inquiète beaucoup, de nos jours, du coût écologique que pourrait comporter ce service fourni par les océans, à savoir, leur acidification.

En se dissolvant dans l'eau, le CO₂ réduit le pH de l'eau et la rend plus acide. Depuis le début de la révolution industrielle, le pH a baissé, au plan mondial, de 0,12 unités¹⁹ de pH.



Photo offerte par le Prof. Ulf Reichert, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften, IFM-GEOMAR

Dans ce fjord de Norvège, les expériences effectuées dans un enclos flottant (en mésocosme) montrent le comportement des écosystèmes marins dans un environnement devenu plus acide

Si ce taux n'est pas vraiment alarmant, la rapidité de son changement et sa tendance continue à la baisse sont inquiétants.

À notre connaissance, les océans n'ont jamais subi une acidification aussi rapide. D'ici à la fin du siècle, si la concentration du CO₂ atmosphérique continue à croître de façon exponentielle, nous devons nous attendre à constater une multiplication par trois du pH et par 100 de sa vitesse d'augmentation par rapport aux périodes de transition entre les ères glaciaires et interglaciaires. Il est probable que la planète n'a pas connu de si grandes modifications du pH océanique depuis 21 millions d'années.

D'ici à la fin du siècle, nous pourrions constater une multiplication par trois du pH et par 100 de sa vitesse d'augmentation par rapport aux périodes de transition entre les ères glaciaires et interglaciaires

Menace sur les écosystèmes marins

Les coraux, le plancton calcifié, les moules, escargots, oursins et autres organismes marins utilisent le carbonate de calcium (CaCO₃) de l'eau de mer pour construire leurs coquilles ou leurs squelettes. Lorsque le pH diminue, par exemple quand l'eau est plus acide, les organismes ont plus de difficulté à sécréter du CaCO₃ pour élaborer la substance de leur squelette. C'est ce qui inquiète les océanographes : du fait que les océans n'ont jamais connu une acidification aussi rapide, on ne sait pas comment la chimie de l'océan va se comporter ou comment les écosystèmes vont s'adapter.

La pénétration du CO₂ dans l'océan s'effectue très lentement mais, en laboratoire ou dans les expériences de terrain, les scientifiques peuvent accélérer le processus afin d'étudier les effets que l'augmentation du CO₂ pourrait avoir sur les écosystèmes marins dans les décennies à venir. Ils peuvent, par exemple, installer des enclos flottants (mésocosmes) dans l'océan qui baignent des populations naturelles de phytoplancton, et faire varier la concentration du CO₂ dans l'air qui surplombe l'enclos, pour étudier les effets des divers taux de CO₂ sur l'écosystème. La durée de vie du phytoplancton étant de l'ordre d'une semaine, les scientifiques peuvent en peu de temps observer ces effets sur plusieurs générations.

Les expériences menées jusqu'ici en laboratoire et sur le mésocosme ont montré que presque tous les organismes qui fixent le calcium ont manifesté une baisse de la calcification dans des milieux acidifiés. Cela se vérifie aussi bien chez les minuscules organismes unicellulaires que chez les coraux constructeurs de récifs. Dans ces conditions, le phytoplancton calcifié, qui fait partie des premiers maillons de la chaîne alimentaire marine, édifiera des squelettes plus minces, ce qui

17. Sabine et Coll. (2004) *The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂*, *Science*, **305**, 367–371

18. On dépense actuellement 40 à 60 \$ E.U. pour éviter l'émission de chaque tonne de CO₂ (Programme de recherche et de développement sur les gaz à effet de serre de l'Agence internationale de l'énergie atomique). En absorbant 118 milliards de tonnes de combustibles fossiles depuis le début de l'ère industrielle, l'océan a rendu à l'écosystème naturel un service de l'ordre de 6 milliards de \$ E.U.

19. Plus le pH est bas, plus la solution est acide. L'eau de mer naturelle varie entre 7,7 et 8,2 unités de pH

mettra en péril leur croissance et leur reproduction, pourrait avoir de profondes incidences sur la chaîne alimentaire marine et enfin provoquer de brusques changements de l'importance numérique des populations ou de leur localisation géographique.

Les récifs coralliens sont doublement exposés aux dangers de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère. En premier lieu, celle-ci peut être due à un réchauffement de la planète, qui entraînera un réchauffement de l'eau. Les coraux sont très sensibles aux changements de température. Une élévation de 1 à 2°C de la température locale au-delà de leur maximum estival normal peut provoquer un phénomène dit de décoloration, car les coraux expulsent alors leurs algues symbiotiques (algues qui vivent en symbiose avec le corail et lui sont indispensables), en laissant translucides les tissus coralliens. En 1998, un seul épisode de décoloration a causé la perte de près de 20 % du corail vivant du monde. Le corail peut se rétablir après de tels épisodes, mais, lorsqu'ils se répètent, l'écosystème a tendance à s'affaiblir, à devenir plus sujet à la maladie, ce qui porte atteinte à la biodiversité. Le second danger qui guette les coraux, c'est l'augmentation de l'acidité de l'eau due à l'élévation de la concentration du CO₂. Le ralentissement de la calcification affecte la capacité du récif à développer son squelette carbonaté, ce qui ralentit la croissance du récif, fragilise son support structurel et l'expose davantage à l'érosion. On estime que vers le milieu de ce siècle le ralentissement de la calcification pourrait aboutir à nous faire perdre par érosion une superficie de récifs plus grande que celle qui pourra être reconstruite par la nouvelle calcification.

Parmi les espèces supérieures de la vie marine, certaines, comme les invertébrés et même certains poissons, peuvent être affectées par une baisse du pH dans leur environnement qui provoque une acidose (accroissement de l'acide carbonique dans

les fluides corporels) entraînant une perte de résistance, une chute du métabolisme, une dépression du comportement affectant l'activité physique et la reproduction et enfin l'asphyxie.

Si ces projections sur l'avenir de nos océans paraissent apocalyptiques, nous n'assisterons cependant pas à des changements aussi spectaculaires et rapides, mais plutôt à des modifications lentes et progressives des conditions d'équilibre dans la vie des écosystèmes marins, échelonnées sur plusieurs dizaines d'années. Les scientifiques ont fixé une série de priorités pour des recherches de caractère urgent. Ils vérifieront également si les changements prévisibles des écosystèmes se produisent effectivement.

Les invertébrés et même certains poissons peuvent être affectés par une baisse du pH dans leur environnement, ce qui provoque une perte de résistance, une chute du métabolisme, une dépression du comportement affectant l'activité physique et la reproduction, et enfin l'asphyxie.

Esquiver l'impact

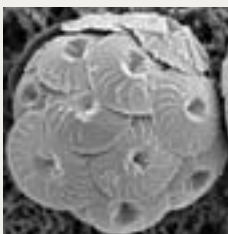
De nombreux scientifiques estiment qu'en stabilisant la concentration atmosphérique aux alentours de 550 parties par million (ppm), on pourrait éviter ses effets les plus nuisibles sur le climat. Actuellement, sa concentration se situe à ~ 380 ppm, et, si aucun dispositif de prévention n'est adopté, elle devrait atteindre les 550 ppm vers le milieu du siècle. Stabiliser la concentration à 550 ppm constituera un défi mondial d'une dimension sans aucun équivalent. À en croire le

Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), qui fait autorité en matière d'évaluation scientifique, ce résultat ne pourrait sans doute pas être atteint par une simple réduction des émissions, mais plutôt par une savante combinaison de dispositions, au nombre desquelles figureraient des investissements dans la mise au point de sources d'énergie bon marché, peu ou pas du tout gourmandes en carbone, une meilleure exploitation de l'énergie et des possibilités nouvelles de gestion du carbone. Ces dernières comprennent le stockage du carbone dans la biosphère terrestre (plantation d'arbres, réduction du déboisement, par exemple), ou la captation du CO₂ émis par les installations industrielles pour le stocker dans des couches géologiques ou dans les profondeurs de l'océan. Le Giec s'efforce actuellement d'évaluer la faisabilité de ces options, leur efficacité et leur sécurité. Il invite à entreprendre de nouvelles recherches sur tous les points où les informations disponibles ne permettent pas encore de prendre des décisions politiques éclairées.

Les scientifiques participant au colloque de l'UNESCO étaient invités à se demander, au cas où on utiliserait l'océan pour y stocker volontairement du CO₂ atmosphérique, quelle serait l'efficacité de l'opération et quelles en seraient les incidences écologiques. Ces dix dernières années, beaucoup d'études ont été menées sur le sujet mais elles n'ont pas discuté ou évalué l'efficacité potentielle et les risques de la séquestration du carbone dans l'océan. Qui plus est, la science s'est trouvée elle-même prise au piège d'une lutte acharnée

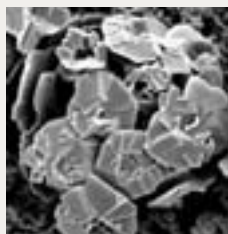
Comment le phytoplancton réagit-il à des niveaux élevés de CO₂ ?

Le monde d'aujourd'hui (pCO₂: 280-380 ppm)



Photos au microscope électronique à balayage de deux espèces de phyto-plancton calcifié dans les conditions actuelles de pCO₂ (pCO₂ entre 280 et 380 ppm) et dans les conditions de pCO₂ élevé prévues pour la fin du siècle. Les résultats expérimentaux indiquent que l'augmentation du CO₂ provoque des malformations aux coquilles de carbonate de calcium.

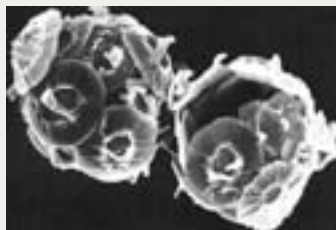
Le monde avec CO₂ élevé (pCO₂: 580-720 ppm)



Calcidiscus leptoporus



Gephyrocapsa oceanica



Photos offertes par le Professeur Ulf Riebesell, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften, IFM-GEOMAR. Adaptée et réimprimée avec la permission de Nature (www.nature.com): Riebesell et al. (2000) Reduced calcification of marine phytoplankton in response to increased atmospheric CO₂ Nature 407, 364-367.



Photos courtesy of Dr. Ove Hoegh-Guldberg, Centre for Marine Studies, University of Queensland, Australia

L'augmentation du CO₂ et l'élévation de la température peuvent faire rapidement passer les récifs coralliens de l'état d'écosystèmes sains à celui de quasi-cimetières de corail décoloré et pourrissant

entre des associations d'écologistes et des entrepreneurs désireux d'obtenir des indemnités financières pour la séquestration de carbone dans l'océan. Les scientifiques exaspérés ont demandé à la COI de fournir un abri sécurisé qui permette de soustraire les discussions scientifiques à l'influence des intérêts extérieurs.

Stratégies de stockage et recherches à effectuer

Le débat porte sur deux méthodes d'utilisation de l'océan pour y stocker l'excédent de CO₂. L'une des stratégies consiste à organiser et à intensifier la croissance, à la surface de la mer, de plantes qui fixent le carbone. Lorsque ces organismes meurent, ils sombrent dans les profondeurs en entraînant le carbone avec eux. Dans de nombreuses régions de l'océan, ce qui limite la croissance du phytoplancton, c'est le manque d'un oligo-élément essentiel, le fer. Ces dix dernières années, huit expériences effectuées à petite échelle ont prouvé que l'introduction de fer dans des régions qui en manquent peut stimuler un développement du phytoplancton dépassant de 20 à 30 fois le rythme naturel.

Les participants au colloque estiment que les expériences d'enrichissement en fer ont été et continueront à être utiles pour l'étude des rapports existant entre les écosystèmes marins et le cycle global du carbone. Cependant, toutes les recherches effectuées concluent que l'enrichissement en fer serait une méthode très inefficace pour séquestrer le CO₂ atmosphérique, en raison, à la fois, de la faible quantité du carbone qui pourrait être piégé par cette méthode, et du fait que, à supposer que la carence en fer soit éliminée, il est probable que la carence en d'autres nutriments ou bien des facteurs environnementaux viendraient freiner la croissance.

L'autre méthode pour séquestrer le CO₂ produit par les installations industrielles consiste à le liquéfier par compression et à le stocker dans des cavités naturelles isolées de l'atmosphère, telles que des couches géologiques profondes ou le fond de l'océan. De nombreuses questions restent posées quant à l'efficacité et les conséquences de l'injection de CO₂ liquéfié dans les profondeurs océaniques, car les données expérimentales sont extrêmement réduites. L'efficacité de la méthode dépendrait de la localisation et de la profondeur de l'injection, puisque l'on veut maintenir aussi longtemps que possible le CO₂ injecté hors de contact avec l'atmosphère, tout en limitant, dans la mesure du possible, les dégâts éventuels pour l'environnement autour du point d'injection. Reproduire en laboratoire la température,

la pression et les communautés biologiques des profondeurs océaniques est extrêmement difficile. Y effectuer des expériences à petite échelle *in situ* n'est pas simple non plus, car cela exige des véhicules sous-marins téléguidés ou des instruments spéciaux qui doivent être descendus à de grandes profondeurs à partir de navires de recherche.

Il faut signaler que plusieurs tentatives d'expériences *in situ* ont été contrecarrées par des associations d'écologistes craignant qu'elles n'ouvrent la voie à des décharges de dimensions industrielles. La question a suscité de vives discussions à l'intérieur même de la communauté scientifique, dont une bonne partie s'oppose fermement à la séquestration du carbone dans l'océan et va jusqu'à suggérer que la communauté abandonne les recherches sur le sujet.

Malheureusement, l'immense capacité naturelle de l'océan à stocker le CO₂ continuera à intéresser les milieux d'affaires, et certaines entreprises seraient tentées de promouvoir cette technique sans se soucier des incidences possibles sur l'environnement. Les participants au colloque estiment qu'en dépit de la vive opposition d'inspiration éthique, les recherches sur la faisabilité technique et économique de la mise en œuvre de cette stratégie palliative ne sont pas prêts de s'arrêter. La communauté scientifique internationale doit se tenir prête à répondre avec précision et sans *a priori* aux questions portant sur les incidences éventuelles pour l'environnement et sur l'efficacité à long terme ou les avantages de cette technique, compte tenu des autres solutions et de la nécessité vitale de stabiliser le CO₂ atmosphérique à un niveau de concentration mettant la vie humaine et son bien-être à l'abri des plus importants de ses effets nocifs.

Rester vigilant

La Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques a pour objectif ultime « de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». Si l'on a abondamment discuté des termes « perturbation anthropique dangereuse du climat », on ne l'a pas fait pour les taux acceptables de CO₂ océanique, si bien qu'il n'existe pas de normes pour juger quels taux de CO₂ devraient être considérés comme tolérables pour la vie marine ou encore comment les stratégies proposées pour la gestion du carbone pourraient, soit réduire, soit exacerber les effets nocifs sur la chimie et la biologie océaniques.

La COI continuera à tenir à jour son Dossier de surveillance sur la science de la séquestration du carbone océanique et à réunir la communauté scientifique intergouvernementale afin qu'elle élabore une base d'information scientifique objective orientée vers la prise de positions politiques à l'intention des scientifiques, des décideurs et du grand public.

Maria Hood²⁰

Rapport du symposium et Dossier de surveillance de la COI à lire sur <http://ioc.unesco.org/iocweb/co2panel/>

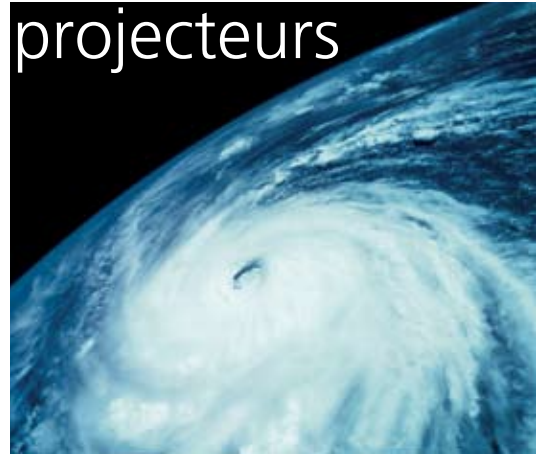
20. Spécialiste du Programme des Sciences de la mer à l'UNESCO

Les petites îles sous les projecteurs

S'il nous fallait une occasion d'attirer l'attention du monde sur les besoins spécifiques des petites îles, le cyclone Héta nous l'a offerte. Ce cyclone, qui a balayé le Pacifique comme un bulldozer dans les premiers jours de 2004, n'a épargné que Tokelau et Wallis & Futuna, qui ont eu la chance de se trouver au point de formation du cyclone. Cinq autres îles n'ont pas eu cette chance. Héta a provoqué de graves dégâts en Samoa américaine, aux îles Cook, à Niue, en Samoa occidentale et à Tonga, ravageant particulièrement Niue.

État composé d'une seule île de 250 km² avec une population de 2 100 résidents, Niue a assisté, impuissante, au passage du cyclone qui a réduit à néant les efforts qu'elle avait récemment déployés pour se développer. À 300 km à l'heure, vitesse jamais encore observée à Niue, les vents de Héta ont démantelé toutes les installations de communication par satellite de l'île ; des volontaires parmi les habitants ont toutefois réussi à remettre en service l'Internet en 10 jours à peine.

Alors que la réflexion se poursuit sur l'avenir de Niue et de ses habitants, surtout chez les non Niueens, les résidents se sont mis tranquillement à reconstruire leur île, signe de la force d'âme et de la résilience des insulaires du monde entier.



© UNESCO/Stockbyte

Territoires à risques

Parmi les 25 pays les plus exposés aux cataclysmes, plus de la moitié sont des petits États insulaires en développement (SIDS), sujets aux éruptions volcaniques, tremblements de terre, tsunamis, glissements de terrain, inondations, ouragans et cyclones. Voilà 40 ans que l'UNESCO s'emploie à identifier les zones exposées aux catastrophes naturelles, à améliorer les méthodes d'évaluation des risques et encourager la prise de mesures d'intervention appropriées. Dans le Pacifique, ses travaux l'ont amenée à soutenir les efforts entrepris par les communautés pour atténuer les effets des catastrophes naturelles à Tonga, Vanuatu et ailleurs, en collaboration avec l'Université Massey de Nouvelle-Zélande et d'autres partenaires. La Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO apporte son assistance, depuis de nombreuses années, au Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique, qui agit en diffusant dans toute la région des observations, des avis d'alerte et des bulletins de conseils sur les tsunamis.

Dans les Caraïbes, voilà une quinzaine d'années qu'au titre du projet Stabilité des côtes et des plages dans les petites Antilles, des aménageurs du littoral, des gouvernements et des ONG effectuent des mesures permanentes des plages et des lignes de côte afin de dégager des pratiques éclairées pour leur mise en valeur. Aux Caraïbes encore, plusieurs opérations sont

entreprises sur les volets pédagogique et de communication en vue d'atténuer les dégâts imputables aux cataclysmes, telles que la rédaction d'un manuel sur les mesures d'intervention à l'usage des écoles des Caraïbes, en collaboration avec l'Agence caribéenne de réaction d'urgence aux catastrophes.

Exploiter les forces de la nature

Mettre au point des systèmes d'énergie alternative est une nécessité vitale pour beaucoup de petites îles. Les travaux entrepris de longue date par l'UNESCO sur l'exploitation des sources d'énergie propre ont reçu un coup d'accélérateur, dans les années 1990, après le Sommet solaire mondial (1993–1995), puis grâce à la contribution de l'Organisation au Programme solaire mondial des Nations Unies (1996–2005). Parmi les activités de renforcement des capacités se trouvent le Programme mondial d'éducation et de formation en matière d'énergies renouvelables (voir p.23), ainsi qu'une collection de matériels d'étude sur les énergies nouvelles et renouvelables. Des livres didactiques viennent d'être publiés portant, par exemple, sur les systèmes photovoltaïques solaires et l'énergie géothermique, accompagnées d'un ensemble de matériel vidéo (voir *Lueur d'espoir*, p.46) retraçant l'historique et les perspectives des énergies renouvelables dans le Pacifique.



© UNESCO/Cambars



Pinney's Beach, à Nevis, dans la mer des Antilles, avant le passage de l'ouragan Luis, en août 1995 et deux mois après le passage de l'ouragan

Menée par l'UNESCO et le PNUD, une initiative en cours apporte son soutien à toute une gamme de projets régionaux et nationaux sur les énergies renouvelables dans le Pacifique, comme une politique énergétique nationale et un plan d'action stratégique pour Tokelau, des options pour une production ininterrompue d'énergie pour l'île d'Apolima (aux Samoa), un renforcement de l'usage des énergies renouvelables aux îles Cook et la formation aux systèmes photovoltaïques domestiques.

La montée des mers

Depuis la Conférence de la Barbade de 1994 (voir p.49), le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat a affiné ses projections concernant l'impact du changement climatique sur les SIDS. Cela a incité des nations insulaires à évaluer leurs besoins en matière de ressources, de formation et de soutien financier. Devant la probabilité d'une élévation du niveau de la mer pouvant atteindre 1 m d'ici la fin du siècle, plusieurs de ces pays ont dressé des plans pour protéger leurs lignes de côtes par la construction de digues, par exemple. Les Maldives, très peuplées, construisent même actuellement une île artificielle pour une partie de leurs citoyens, alors que, dans le Pacifique, Tuvalu et Kiribati préparent des projets de transfert de la totalité de leurs populations vers l'Australie, la Nouvelle-Zélande et d'autres lieux dans les 50 années à venir.

L'une des grandes contributions de l'UNESCO à la solution des problèmes posés par l'élévation du niveau de la mer, c'est le Système mondial d'observation de l'océan (GOOS), entreprise internationale de coopération dirigée par la COI (voir p.34). Le GOOS est un réseau mondial de navires, de bouées (fixes et dérivantes), de flotteurs immergés, de marégraphes et de satellites qui recueillent des données en temps réel sur l'état physique et le profil biogéochimique des océans mondiaux. Il comprend des sous-systèmes qui gèrent les données et l'information pour diverses applications comme les mesures et les prévisions de changement du niveau de la mer, la position et



©Gloria McConaghy

Les panneaux solaires sont constitués de nombreuses cellules autonomes installées en batterie. Ce grand panneau, composé de 34 cellules, est affecté aux systèmes de 12 V. Plus le panneau est grand, plus il produit d'énergie électrique. Le rendement est optimum lorsque aucune ombre ne se projette sur le panneau entre 9 h et 15 h. Si une seule cellule est à l'ombre, le résultat peut se trouver réduit de moitié, ou davantage. Extrait du Solar Photovoltaic Systems Technical Training Manual (2003). Le Manuel de formation technique de l'UNESCO aux systèmes photovoltaïques solaires est le fruit des recherches effectuées dans le Pacifique, où des communautés insulaires éparpillées ont fait œuvre de pionniers en testant, dans les conditions réelles, le photovoltaïsme solaire et l'électrification des zones rurales

Lueur d'espoir

La vidéo « Rays of Hope » et son fascicule mettent en lumière l'importance des énergies renouvelables pour les îles du Pacifique, leurs inquiétudes pour l'environnement, leur dépendance à l'égard de l'énergie, et les différents types d'énergie renouvelable. Elle présente des interviews et des impressions concernant le projet, recueillies dans plusieurs pays :

Kiribati : des panneaux solaires alimentent en électricité des centres médicaux ruraux et des sites excentrés de radio-téléphones

Fidji : une coopérative villageoise gère un petit projet hydroélectrique qui fournit de l'électricité à plus de 200 foyers d'un hameau situé bien à l'intérieur de l'île principale

Samoa : un projet hydroélectrique de taille moyenne implanté à Afalilo a réussi à inverser les parts respectives de l'énergie hydraulique et du diesel qui alimentent une centrale : 80 % de l'énergie provient actuellement de l'énergie hydraulique et 20 % seulement du diesel

Vanuatu : l'huile de noix de coco fournit leur combustible aux autobus, aux taxis et autres véhicules ; elle est également utilisée dans les générateurs d'un projet d'hydroponique (culture hors sol).

Lueur d'espoir est une initiative du Programme d'ingénierie de l'UNESCO: t.marjoram@unesco.org ; pour en commander un exemplaire : www.unesco.org/publishing.

la force des courants, la mesure de la glace de mer et son étendue, les cartes et les prévisions d'efflorescences d'algues nuisibles et l'estimation de la vulnérabilité des stocks de poissons et des fermes aquacoles.

Où il est question d'eau douce

Vu leur exiguïté et leurs particularités géographiques, topographiques et climatiques, beaucoup de SIDS se heurtent au casse-tête de se procurer et de gérer des ressources hydriques suffisantes et de qualité. L'UNESCO participe à la gestion durable de l'eau par son Programme hydrologique international (PHI) et par le Programme mondial des Nations Unies pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP), ainsi que par son programme l'Homme et la biosphère (MAB). Sous l'égide du Groupe de travail du PHI pour le Pacifique, les études achevées et en cours sont essentiellement axées sur les bassins versants et les communautés (voir *Le théâtre des rivières*, p.48), la recharge des nappes souterraines des atolls et la pollution des nappes phréatiques, entre autres.

Le régulateur de l'évolution

Les petites îles jouent depuis longtemps un rôle particulier dans les études scientifiques sur la diversité génétique et l'évolution du vivant. Comme l'écrit David Quammen dans *The Song of the Dodo*²¹, «l'isolement géographique est le régulateur de l'évolution». Les observations qu'il fit aux Galapagos il y a un siècle et demi ont été déterminantes pour Darwin lorsqu'il conçut son œuvre révolutionnaire la *Théorie de l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle*. Vers la même époque, les îles de l'archipel malais se sont révélées indispensables pour permettre à Alfred Wallace d'affiner sa réflexion sur les lois de la nature.

21. Quammen, D. *The Song of the Dodo. Island Biogeography in an Age of Extinction*. Simon & Shuster, New York, 1997, p. 128

Or, la diversité biologique est de plus en plus menacée, dans de nombreuses petites îles, en raison de l'introduction d'espèces allogènes, de l'implantation d'infrastructures touristiques, de l'insuffisance des dispositifs d'évacuation des déchets et de la surexploitation de certains groupes biotiques tels que les coraux, par exemple.

La préoccupation de l'UNESCO quant à la diversité biologique est ancrée dans deux initiatives complémentaires. La première est la Convention pour la protection du patrimoine naturel et culturel mondial, instrument juridique contraignant, qui couvre les sites remarquables, d'intérêt extraordinaire et universel. La Liste du patrimoine inclut : l'atoll Aldabra (Seychelles), East Rennell (îles Salomon), le Parc national des mornes Trois Pitons (Dominique), les îles Cocos (Costa Rica) ; deux sites de Cuba et

le Parc national et la Réserve marine des Galapagos (Équateur). La seconde initiative est le Réseau mondial des réserves de biosphère, élément du programme MAB ; ces sites constituent des cas exemplaires pour qui veut étudier les procédures de développement durable appliquées en concertation avec les populations locales. La liste compte aujourd'hui 440 sites dans 97 pays et territoires, parmi lesquels Cuba, la Dominique, Maurice et les îles Vierges des États-Unis.

Le creuset culturel

Voir les petites communautés insulaires comme historiquement éloignées et isolées est une erreur. En fait, l'histoire des îles atteste les grandes interactions et les mélanges culturels

Les petits états insulaires dans le monde

		Population 2003	Topographie	Longueur du trait de côte (km)	Eau renouvelable habitants/an (m ³)	Prévalence du VIH/sida chez les adultes ^a 2001 ^b
Océan Atlantique	Cap Vert	412 137	Accidenté, rocaillieux, volcanique	965	703	0,04
	Sao Tomé & Príncipe	175 883	volcaniques, montagneux	209	15 797	—
Océan Indien	Comores	632 948	îles volcaniques	340	1 700	0,1
	Maldives	329 684	plates	644	103	0,1
	Maurice	1 210 447	petite plaine côtière, plateau central	177	1 904	0,1
	Seychelles	80 469	étroite bande côtière, coraux, plates	491	—	—
Golfe	Bahraïn ^c	667,238	plaine basse désertique, faible escarpement central	665	181	0,3
Océan Pacifique	Îles Cook	21 008	atolls coralliens sans élévation, volcaniques, collines	120	—	—
	Fidji	868 531	montagnes d'origine volcanique, atolls coralliens	1 129	35 074	0,1
	Kiribati	98 549	atolls coralliens sans élévation	1 143	—	—
	Îles Marshall	56 429	îles basses, de grès et sables coralliens	370	—	—
	Micronésie	108 143	atolls coralliens sans élévation, montagnes volcaniques	6 112	—	—
	Nauru	12 570	plage de sable, récifs coralliens, plateau riche en phosphates	30	—	—
	Niue	2 145	falaises de grès, plateau central	64	—	—
	Palau	19 717	îles coralliennes basses, île principale montagneuse	1 519	—	—
	Papouasie-Nouvelle Guinée	5 295 816	littoral bas, montagnes	5 152	166 563	0,7
	Samoa	178 173	plaines côtières étroites, intérieur montagneux	403	—	—
	Îles Salomon	509 190	atolls coralliens plats, montagnes déchiquetées	5 313	100 000	—
	Tokelau ^{ab}	1 418	atolls	—	—	—
	Tonga	108 141	Formations coralliennes et volcaniques	419	—	—
Tuvalu	11 305	atolls coralliens bas et étroits	24	—	—	
Vanuatu	199 414	plaines côtières étroites, montagnes d'origine volcanique	2 528	—	—	
Méditerranée	Chypre	771 657	plaines, montagnes	648	995	0,3
	Malte	400 420	basse, pénéplaines falaises côtières	140	129	0,1
Mer des Antilles	Antigua & Barbuda	67 897	îles basses, de grès et de sables coralliens	153	800	—
	Aruba ^h	70 844	plate avec quelques collines, maigre végétation	—	—	—
	Bahamas	297 477	formations coralliennes longues et plates	3 542	66	3,5
	Barbade	277 264	plate, avec plateau central	97	307	1,2
	Cuba	11 263 429	plaines étagées, petites collines, montagnes	5 746	3 404	< 0,1
	Dominique	69 655	montagnes déchiquetées d'origine volcanique	148	—	—
	République dominicaine	8 715 602	hautes terres, montagnes déchiquetées	—	2 507	2,5
	Grenade	89 258	origine volcanique, montagnes au centre	121	—	—
	Haïti ⁱ	7 527 817	accidentée, montagneuse	—	1 723	6,1
	Jamaïque	2 695 867	étroites plaines côtières, montagnes	1 022	3 651	1,2
	Antilles néerlandaises ^{ab}	216 226	collines, intérieur volcanique	364	—	—
	St Kitts & Nevis	38 763	Volcanique, intérieur montagneux	135	621	—
	St Lucie	162 157	volcanique, montagneuse, avec de larges vallées	158	—	—
St Vincent & Grenadines	116 812	volcaniques, montagneuses	84	—	—	
Trinité & Tobago	1 104 209	plates, avec collines et montagnes	—	2 968	2,5	
Îles Vierges américaines ^{ab}	124 778	collines, terrains accidentés, montagnes	188	—	—	
Mer Chine du Sud	Singapour	4 608 595	terrain plat, plateau central ondulé	193	149	0,2

^a N'adhère pas à l'Alliance des petits États insulaires (Les Antilles néerlandaises et les Îles Vierges américaines y ont toutefois le statut d'observateurs) ; ^b Non indépendant ; ^c Les estimations de population pour Haïti prennent en compte les effets de l'excédent de mortalité dû au sida ; ^d Estimation pour 2001

Sources : www.un.org/esa/sustdev/sids/sidslist.htm ; données de population : CIA Factbook : www.cia.gov/cia/publications/factbook ; données sur les ressources en eau : Nations Unies (2003) Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau. L'eau pour les hommes, l'eau pour la vie (Tableau 4. 2). Editions UNESCO, Paris

Le théâtre des rivières

La communauté Epulé de Vanuatu n'a plus, depuis trois ans, le droit de pêcher dans la rivière locale et les récifs qui la bordent. La population a voulu résister, bien qu'elle soupçonnât depuis longtemps que la rivière fût polluée par l'exploitation du bois, l'agriculture et l'accroissement du nombre des villageois. Son chef espère qu'ils finiront par accepter l'interdiction.

Inspirés par le désir de faire comprendre à la population locale ni-Vanuatu que c'était à elle-même qu'il incombait de gérer ses ressources en eau, le PHI vient de s'engager aux côtés des troupes locales de théâtre Haulua et Won Smol Bag (« un seul petit sac » en bislama). Ces troupes montent des pièces devant les communautés locales, mettant en scène les types de comportement qui nuisent à la rivière et qui contreviennent aux lois et codes de conduite de Vanuatu, comme l'abattage des arbres à moins de 50 m. d'une rivière.

Le texte de la Pièce sur la rivière a été élaboré en étroite collaboration avec le Département de géologie, des mines et des ressources hydriques. Les représentations ont été bien accueillies par les spectateurs de plusieurs villages de la région. Le plus intéressant, c'est que pendant les débats qui suivaient immédiatement chacune des représentations, plusieurs villageois se sont proposés pour participer aux travaux de prévention et de restauration, comme la plantation d'arbres le long des ruisseaux et des rivières, ou la surveillance continue des bassins versants.

Pour en savoir plus sur le projet du PHI concernant les bassins versants et les communautés : www.unesco.org/water

qu'elles ont offerts à l'humanité. Il serait bien plus exact de les considérer comme des carrefours culturels.

À la différence des autres théories, qui imaginaient des populations se laissant dériver sur de grands radeaux au gré des courants océaniques, nous savons pertinemment aujourd'hui que les premiers habitants se déplaçaient délibérément et en toute connaissance de cause dans le vaste espace marin du Pacifique. Ces morceaux de terre dans la mer, les îles, étaient leurs points de rencontre, leurs « carrefours ». C'est dans cet esprit que l'UNESCO a lancé « Vaka Moana : les routes océaniques », sous l'égide de la Décennie mondiale du développement culturel, afin de renforcer les liens entre les peuples du Pacifique, grâce à une meilleure connaissance de leur histoire et de leur commune dépendance par rapport à l'océan, et de promouvoir toutes les formes d'art qui ont en partage le thème de l'océan.

Promouvoir le patrimoine culturel

S'il s'agit de préserver le patrimoine culturel, le plus important au regard de beaucoup de SIDS, ce ne sont peut-être pas tant les biens et les sites matériels, que ce que l'on appelle « le patrimoine culturel immatériel ». Il couvre toutes les formes de culture traditionnelle populaire nées dans une communauté donnée, et transmises oralement ou par la gestuelle, comme les coutumes, les langues, la musique, la danse, les rites, les fêtes, la médecine et la pharmacopée traditionnelles.

De nombreuses actions relevant des thèmes transversaux de l'UNESCO sont en cours dans des contextes insulaires : elles ont pour objet de tirer parti du capital culturel pour améliorer le niveau de vie tout en préservant le patrimoine culturel. Citons par exemple la promotion, dans la région du Pacifique, de l'artisanat traditionnel en tant que possibilité d'emploi pour les jeunes les plus pauvres. Aux Caraïbes, l'initiative Sentier des jeunes (YouthPATH) cherche à attirer les jeunes vers un tourisme lié au patrimoine naturel et culturel et vers d'autres

activités rémunératrices comme la visite d'un lieu de nidification des tortues, un ancien village d'esclaves, un hameau de pêcheurs-chasseurs de baleines. Le projet régional repose entièrement sur l'idée que la mer des Antilles est un dénominateur commun qui rapproche les cultures de ses îles, au sens temporel comme au sens spatial.

Transmission du savoir traditionnel

Le savoir local et autochtone constitue un autre volet de la diversité culturelle, qui prend un sens particulier dans le cas des petites îles. La gestion traditionnelle des ressources marines dans la zone Pacifique fait l'objet, depuis les années 1980, de plusieurs actions de la part de l'UNESCO. Ces dernières années, ses travaux ont nettement progressé sous l'impulsion du débat sur « La science et les autres systèmes de connaissances » qui s'est tenu en marge de la Conférence mondiale UNESCO-CIUS sur la Science en 1999.

L'une des conséquences en est le lancement du projet sur les Systèmes locaux et autochtones de connaissance dans une société planétaire (LINKS). Au milieu de l'année 2004, LINKS diffusera un CD-ROM sur la navigation traditionnelle dans le Pacifique destiné à servir essentiellement d'outil pédagogique dans les écoles, en montrant aux élèves d'intérêt des systèmes de bâtonnets noués pour enseigner les schémas de la houle et les cercles de cailloux pour orienter la navigation d'après la course des étoiles, et d'autres pratiques du savoir autochtone. LINKS travaille également sur un projet à Vanuatu visant à encourager les écoliers et les lycéens à intégrer dans leurs communautés et leurs écoles le savoir autochtone.



La navigation traditionnelle dans le Pacifique ; le feuillage accroché au gréement est un moyen simple de suivre les moindres modifications de la direction et de la force du vent

La lutte contre le VIH/sida

Le fait d'être une sorte de carrefour dynamique peut également produire des effets négatifs sur les aspirations d'un pays. À cet égard, le VIH/sida est très préoccupant. Des études menées notamment dans les Caraïbes ont souligné la dimension culturelle de la prévention du VIH/sida et des soins apportés à ses victimes, ainsi que le rôle critique de l'éducation pour limiter la propagation et l'impact de l'épidémie. Pour prévenir le sida il est indispensable d'avoir recours à une coopération multidisciplinaire et à de larges partenariats, et d'utiliser les instruments novateurs des médias et de la communication permettant d'élaborer des campagnes

De la « ligne de front » à Maurice

« Les petits États insulaires en développement sont, partout dans le monde, des zones de ligne de front où se manifestent bon nombre des grands problèmes de l'environnement et du développement »

Secrétaire général des Nations Unies, M. Kofi Annan,
New York, septembre 1999

Rio, juin 1992. Réunie pour le Sommet Terre, la communauté internationale a reconnu que les petites îles constituent un « cas spécial en matière d'environnement et de développement ». Cette reconnaissance a suscité le rapprochement des petits États insulaires en développement, qui se sont constitués en groupe afin de débattre de leurs préoccupations spécifiques.

La Barbade, avril-mai 1994, « Petites îles, grands problèmes », Conférence mondiale sur le développement durable des petits États insulaires en développement. L'Action 21 adoptée à Rio a inspiré le Programme d'action de la Barbade des Nations Unies (BpoA). Le BpoA énumère 15 domaines prioritaires nécessitant des actions précises parmi lesquels le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer, les catastrophes naturelles et environnementales, la gestion des déchets, les ressources côtières et marines et le tourisme.

Johannesburg, septembre 2002. Le Sommet mondial sur le développement durable a réaffirmé que les SIDS étaient un cas à part, aussi bien du point de vue de l'environnement que du développement. Parmi les actions de suivi recommandées, le Sommet de Johannesburg a lancé un appel en faveur d'un bilan complet des résultats du BpoA.

Maurice, 30 août – 3 septembre 2004, « Petites îles, grands enjeux ». Conformément à la décision de l'Assemblée générale des Nations Unies, un examen complet des dix années de mise en œuvre du BpoA sera entrepris. Les questions non résolues seront identifiées pour faire l'objet d'un suivi.

Pour en savoir plus sur la contribution de l'UNESCO au BpoA :
www.portal.unesco.org/islandsBplus10 ; sur le réseau SIDS et l'Alliance des
petits États insulaires : www.sidsnet.org/aosis

ciblées de sensibilisation du public et de provoquer un changement des comportements, notamment chez les jeunes.

Aux Caraïbes, l'UNESCO s'associe à toute une gamme de partenaires pour promouvoir des politiques et des pratiques efficaces de prévention et d'atténuation des effets du sida par l'éducation formelle aussi bien que non formelle. Un projet pilote mené en Jamaïque par l'UNESCO, le ministère de l'éducation et d'autres organismes d'enseignement illustre ce type d'actions²².

Le développement durable ne se fera pas sans la jeunesse

Juste avant et pendant la réunion internationale de mise à jour du BpoA, qui aura lieu à Maurice en janvier 2005, des jeunes insulaires de tous les SIDS se rencontreront pour exposer leurs préoccupations concernant la vie sur les petites îles, comparer leur expérience, promouvoir la compréhension culturelle, participer à des débats et à des manifestations et soumettre à la réunion principale leurs conclusions. Intitulée « Vision des jeunes pour la vie dans les îles » cette initiative, qui sera proposée par le ministère de l'éducation et de la recherche scientifique de Maurice, est inspirée par l'UNESCO, à travers sa Plate-forme des régions côtières et des petites îles, et sa Section de la jeunesse, avec le soutien d'organisations et de donateurs nationaux, régionaux et interrégionaux.

Visiter le site : www.unesco.org/csi/smisis/siv/vision-action.htm

Relier les îles à la communauté mondiale

Étant donné le peu d'établissements d'enseignement supérieur dans les îles – ce qui accentue la fuite des cerveaux – on espère voir proliférer les modules et les programmes de télé-enseignement reposant sur l'application des TIC. Dans le même ordre d'idée, les Centres communautaires multi-médias (CCM) encouragent les communautés à s'autonomiser et comblent le fossé numérique en combinant la station de radio villageoise avec l'Internet et les technologies apparentées. L'objectif recherché est de convertir les stations de radio communautaires en CCM équipés d'ordinateur, de télécopie, de téléphone et de services de messagerie et d'Internet. Des stations de radio de la Barbade, de Cuba, de Jamaïque et de Trinidad & Tobago ont été les premières à participer au projet.

La Voix des petites îles (SIV²³), une initiative interrégionale couvrant la mer des Antilles, l'océan Indien et le Pacifique, s'appuie sur les TIC et les stations de radio existantes pour susciter dans le grand public le débat et la participation aux activités de développement au niveau local. Les jeunes insulaires disposent, eux aussi d'un « espace de parole » sur le Forum Internet SIV de la jeunesse²⁴ qui a donné lieu à des débats sur des sujets tels que la pêche à la baleine, le recyclage, l'amiante dans les écoles et la montée de la violence chez les délinquants.



Lycéens du Bequia Community High School de Saint Vincent et Grenadines, émettant en ligne sur le Forum Internet des Jeunes de la Voix des petites îles

© UNESCO/Herman Behar

La mise en œuvre du BpoA a donné des résultats mitigés. Parmi les habitants des petites îles, nombreux sont ceux qui n'ont aucune idée du BpoA et des relations qu'il peut avoir avec leur vie quotidienne. Cependant, ces derniers temps, diverses initiatives commencent à introduire des améliorations progressives dans le mode de vie des SIDS. Citons par exemple l'Alliance des petits États insulaires et le réseau d'information SIDSNET pilotée par les Nations Unies. Avec les agences sœurs, l'UNESCO apporte une contribution importante à l'objectif général de mise en valeur durable des îles, en vertu de l'idée que ces États insulaires ne sont pas des « îles d'une mer lointaine » mais une mer d'îles. »²⁵

Claire Green²⁶ and Malcom Hadley²⁷

22. Institut intl. de planification de l'éducation (IPE) de l'UNESCO et University of the West Indies, 2003 ; et Stratégie régionale sur l'éducation et le VIH/sida pour les Caraïbes, UNESCO Kingston et IPE

23. www.smallislandsvoice.org

24. www.sivyoung.org – nom d'utilisateur : view, mot de passe : only

25. Hau'ofa, E. (1993) Our Sea of islands. Dans : A New Oceania. Rediscovering Our Sea of Islands. Université du Pacifique Sud, Fidji, et Beake House, p.7

26. Plate-forme des régions côtières et des petites îles : www.unesco.org/csi

27. Ancien Rédacteur de Nature et Ressources (trimestriel de l'UNESCO)

Des satellites à la rescousse des tombes gelées de Sibérie

Les montagnes situées à cheval sur la Russie, le Kazakhstan, la Mongolie et la Chine sont parsemées de centaines de tombes prises dans les glaces. Découverts dans les années 1920, ces vestiges archéologiques d'un grand intérêt appartiennent à la culture disparue des Scythes, qui a connu son apogée il y a 2 500 ans. Dans les tombes, certains corps sont si bien conservés dans le sol gelé que même les tatouages sont restés intacts sur la peau.

Pilleurs de tombes et chercheurs de trésors sont les ennemis traditionnels de ces vestiges mais une nouvelle menace pèse aujourd'hui sur eux. Avec le changement climatique, le pergélisol se met à fondre dans cette partie de la Sibérie. Dans une course contre la montre, l'UNESCO et l'Université de Gand, en Belgique, aident des équipes de spécialistes de Russie et du Kazakhstan à localiser depuis l'espace les tombes restantes, afin de permettre aux conservateurs locaux de les protéger.

Pendant des milliers d'années, les monts Altaï ont constitué un passage très fréquenté entre les steppes de Mongolie et du Kazakhstan. Ils ont fourni d'abondantes informations archéologiques sur les voies commerciales et autres modes d'échanges entre populations. La Route de la soie en est toute proche, et on peut trouver dans les tombes des Scythes des vases chinois, des tapis persans, des soieries indiennes...

Le mot « scythe » est un terme générique qui recouvre les diverses populations qui ont habité la steppe eurasienne au

cours de l'âge du Fer, sans désigner une civilisation particulière. L'économie scythe était de type semi-nomade. Les populations se déplaçaient selon les saisons avec leurs chevaux, leurs yaks, moutons et chèvres pour revenir chaque été au point de départ. Ce mode de vie est encore en partie pratiqué aujourd'hui. C'est ainsi qu'aucun grand village, aucune grande ville n'a jamais été construite et qu'il est très rare d'y trouver des vestiges d'anciens établissements humains. Ce sont donc les tumulus ou *kourganes* qui deviennent la principale source d'information archéologique sur les Scythes.

Enterrés avec or et chevaux

Les Scythes étaient d'audacieux guerriers à cheval. Maîtres dans l'art d'élever les chevaux, ils pratiquaient aussi le négoce tout en effectuant dans les territoires avoisinants des razzias qui pouvaient les mener jusqu'à Babylone ou en Europe orientale.

Les chevaux suivaient les Scythes dans la tombe. Des corps de chevaux sacrifiés ont été découverts dans des tombes, parmi des artefacts et des ustensiles de bois, de cuir, de tissu, de soie, de métal et d'or. Les ornements étaient finement ouvragés et, dans certains cas, ils se sont exceptionnellement bien conservés.

Bon nombre de ces tombes sont prises dans le pergélisol, où la température se maintient entre 0°C et -20°C. Comme les populations scythes occupaient la totalité de la steppe eurasienne qui s'étend de la mer Noire à la Mongolie, les tombes conservées dans la glace sont une source exceptionnelle d'information sur l'une des cultures les plus fascinantes de l'époque.



Superbe représentation d'un félin, en bois à la feuille d'or, telle qu'elle a été trouvée dans un tombeau de Berel. On distingue en arrière-plan un sabot de cheval parfaitement conservé, complet avec peau et pelage. Les corps des chevaux n'étant pas embaumés, leurs organes internes sont restés en place. Le contenu de l'estomac d'un cheval révèle de nombreuses informations sur la végétation, le climat, etc.



© Institut d'ethnographie et d'archéologie de Novosibirsk

Cercueil et sarcophage de Berel, partie orientale du Kazakhstan, en 2000, avant l'extraction de la tombe par l'équipe de Zeinolla Samachev, de l'Institut Kazakh d'archéologie, et Henri-Paul Francfort du Centre national de recherche scientifique (CNRS) de France. Sitôt extrait de son emplacement original, le cercueil de bois a subi un traitement chimique afin d'empêcher sa désintégration sous l'effet de l'air et de la sécheresse. Des échantillons du bois ont aussi été prélevés aux fins de datation. On observe, pour cela, les anneaux de croissance sur le bois



L'Open Initiative

L'Open Initiative a été lancée en 2001 par l'UNESCO et l'Agence spatiale européenne afin de soutenir la Convention du patrimoine mondial et le Réseau mondial des réserves de biosphère. Sa principale mission est de développer la coopération entre agences spatiales, instituts de recherche, académies des sciences et universités, ONG et secteur privé, afin de protéger les sites naturels et culturels de pays en développement.

Ces sites sont en effet exposés à une foule de menaces, potentielles et très réelles, comme l'expansion incontrôlée de l'agriculture, l'urbanisation envahissante, les conflits armés, le braconnage, les catastrophes naturelles, le changement climatique et le tourisme non respectueux de l'environnement. Les pays en développement ne disposent souvent pas de cartes détaillées pour gérer et protéger ces sites de façon efficace. L'imagerie satellitaire offre le moyen de combler cette lacune.

A titre de contribution à l'Open Initiative, l'UNESCO a mis en place un Programme de télédétection, dirigé par Mario Hernandez. En étroite liaison avec le pays responsable d'un site donné, le programme définit l'ensemble des besoins, fait entrer en scène les partenaires spécialisés, qui exécuteront le projet, et s'assure du financement nécessaire. Le programme coordonne également la formation du personnel local qui devra traiter toute l'information tirée des images satellite, à la fin du projet.

Le projet Altaï inclut la Réserve de biosphère Katunsky en Russie, également classée Patrimoine mondial de l'UNESCO. En dehors de ce projet, l'Open Initiative est en train d'observer les chutes de l'Iguazu en Argentine, le site antique du Machu Pichu au Pérou et les vestiges de la civilisation Maya au Guatemala. Elle fait également appel à la télédétection pour observer et sauvegarder le site archéologique d'Uruk-Warka, dans le sud de l'Irak. Un sixième projet s'est achevé en 2003. Il s'agissait de fournir à la République démocratique du Congo, au Rwanda et à l'Ouganda leurs premières cartes exactes du territoire inaccessible du gorille de montagne, à titre de contribution aux efforts de sauvegarde des 650 derniers gorilles de montagne.

L'Open Initiative a maintenant attiré de très nombreuses agences spatiales.

Pour en savoir plus :
www.unesco.org/science/remotesensing



Cette « Démouille des glaces » a été découverte sur le plateau Ukok des monts Altaï, situé à environ 2 500 m d'altitude. Vivant à l'époque de la culture Pazyryk (scythe) de la fin du 5ème siècle avant Jésus Christ, elle avait environ 25 ans à sa mort. On l'appelle aussi « la Princesse Ukok » en raison du raffinement des objets trouvés dans sa tombe, et du fait qu'elle en était la seule occupante – la femme partage habituellement la tombe d'un homme. Sa momie aussi était tatouée et des armes étaient placées à ses côtés, ce qui a donné lieu à l'hypothèse d'une princesse guerrière, ou même d'une Amazone. En analysant des échantillons de cheveux et de peau, les généticiens glanent des informations sur l'origine ethnique de la population Pazyryk. L'analyse chimique et physique des os et des tissus mous fournissent des indications sur la nutrition, la santé et le mode de vie. Montait-elle à cheval, par exemple ? De quelles maladies souffrait-elle ? La Démouille des glaces a été exhumée par l'archéologue Natalia Polosmak, du département Sibérie de l'Académie russe des sciences.

A droite, segment du bras droit d'un Scythe enterré dans les monts Altaï à la même époque que la Démouille des glaces. Le site a été fouillé pour la première fois en 1929 par l'archéologue russe Mikhaïl Gryaznov. Le dessin de droite indique l'emplacement de tous les tatouages du corps de cet homme. Les tatouages représentent des animaux et des créatures mythiques



Aucune carte détaillée de l'Altaï

L'Université de Gand et celle de l'Etat de Gorno-Altai mènent conjointement depuis 1995 des recherches dans les monts Altaï. Ils se livrent en même temps à l'excavation des tumulus et à l'exploration des autres formes de patrimoine archéologique. En 2003 et 2004, l'équipe de chercheurs a étudié la localisation des sites rituels et funéraires dans le paysage de l'Altaï à travers les époques (étude diachronique).

En l'absence de cartes détaillées de ces montagnes, des images obtenues par satellite ont permis de dresser des cartes

topographiques sur lesquelles les chercheurs reportent les informations archéologiques.

Un nouveau départ

Voilà des dizaines d'années qu'une foule d'équipes de recherche, nationales et internationales, se bousculent sur les monts Altaï. Elles ont fouillé des douzaines de *kourganes* en Chine, au Kazakhstan, en Mongolie et en Russie. Malheureusement, elles se sont parfois contentées de fouiller un tumulus bien particulier, prometteur de découvertes, sans se soucier de situer les monuments dans leur contexte culturel ou avoir réfléchi à la position qu'ils occupaient dans l'ensemble du paysage.

En outre, si on a tenté, par le passé, de dresser des plans de sauvegarde ou de préservation des *kourganes*, ils n'ont jamais dépassé le stade de l'ébauche.

Le projet élaboré par l'Université de Gand avec le soutien de l'UNESCO et d'une généreuse dotation de 330 000 € de la part de la communauté flamande de Belgique vient aujourd'hui combler cette lacune. Il vise à inventorier toutes les tombes gelées des monts Altaï en même temps que les autres éléments du patrimoine archéologique, sur une période de deux ans à partir de 2005. L'Université de Gand dresse à cette fin des cartes à partir d'une imagerie satellitaire montrant la topographie de la région et le lieu de chaque *kourgane*. L'équipe étudie en même temps le changement climatique dans l'Altaï et analyse les menaces que ce changement fait peser sur les tombes gelées.

Voleurs et grands chemins

Pour de nombreuses tombes, l'aide arrivera hélas trop tard. Elles ont été détruites par les pilliers de tombes et les chercheurs de trésors, il y a plusieurs siècles pour certaines, ou bien tout récemment pour d'autres. En guise de dissuasion, le gouvernement russe exige désormais un permis de recherche avant toute excavation d'un *kourgane*.

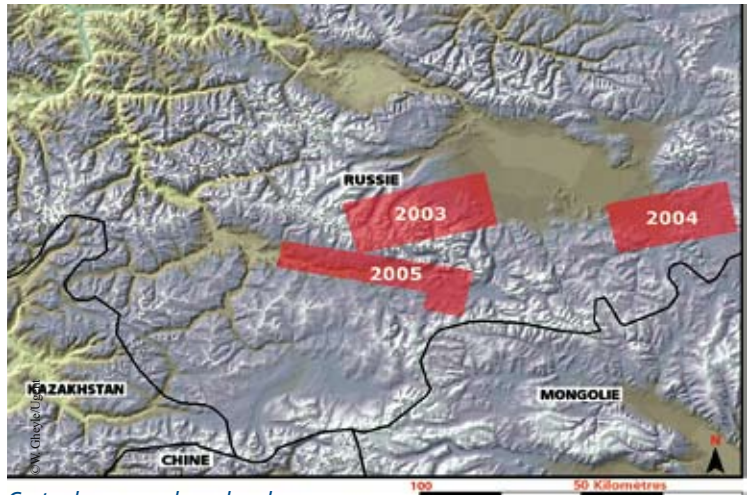
D'autres tombes, échappant aux mains des voleurs, ont vu leur long sommeil troublé par la construction de routes, qui ouvrent progressivement ce territoire naguère inaccessible. Durant son séjour de 2005 à Dzhazatar par exemple, l'équipe de Gand a remarqué que plusieurs sites avaient été dérangés par ce type de travaux.

Dans des cas de ce genre, il reste cependant possible de faire quelque chose. Si on leur fournit un inventaire précis de la localisation des monuments archéologiques dans la zone, les autorités locales pourront mieux planifier l'implantation des infrastructures, comme celle du tracé que l'on fixera pour un pipeline. L'inventaire sera également un atout entre les mains des autorités pour réglementer la mise en place d'activités touristiques nouvelles, comme le rafting, l'alpinisme ou le camping, et pour sensibiliser les personnes à la nécessité de préserver les *kourganes*.



©H.-P. Fransfort/CNRS

Cet ornement en forme de renne a été découvert sur un harnais de cheval à Berel. Tous les ornements préservés pendant des siècles dans le pergélisol doivent subir un traitement chimique dès leur découverte, sans quoi l'exposition à l'air les fait s'effriter. Il serait donc vain pour des pilliers de tombes modernes de voler des artefacts car ils s'enfuiraient les mains vides



Carte des zones de recherche couvertes en 2003, 2004 et 2005. Cette carte a été établie d'après les images RADAR réalisées par la Mission topographique de la navette Radar (SRTM)

Le glacier Tuyuksu dans le nord du Tien Shan en juillet 1997. Il avait reculé de 362 m par rapport à 1955. Il n'existe pas de cartographie complète du retrait du pergélisol dans le massif de l'Altaï au fil du temps, bien que l'Association internationale du pergélisol soit à la recherche de financements pour surveiller et cartographier le pergélisol dans sa totalité

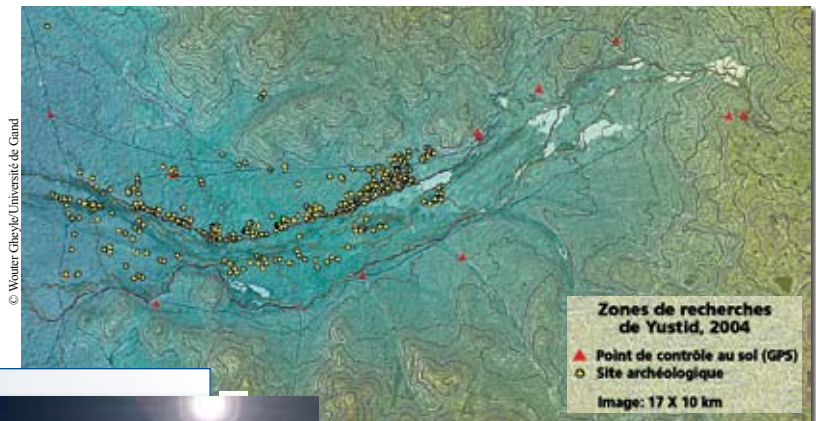


Une menace plus insidieuse

L'autre menace qui pèse sur les tombes glacées se rapporte au climat. Comme les monts Altaï se situent à la limite de la vaste zone de pergélisol qui couvre une bonne partie de la Sibérie, ce pergélisol est très sensible aux changements climatiques. Avec la fonte progressive du pergélisol qui préserve les *kourganes* de l'Altaï, les tombes gelées et leur précieux contenu ne seront bientôt plus prises dans la glace qui les a si longtemps préservées. Les mesures effectuées dans diverses stations météo, l'examen des carottes de glace et la recherche sur les glaciers, tout indique que le climat de l'Altaï est en train de changer radicalement. Le pergélisol disparaîtra dans une très large mesure de la région vers le milieu du siècle actuel. Après 2 500 ans de parfaite conservation, les *kourganes* restants et les révélations qu'ils fournissent sur la culture des anciens Scythes nomades pourraient être perdus à jamais.

Les satellites à la rescousse

Dans le cadre de son « *Open Initiative* », l'UNESCO a complété les capacités de l'Université de Gand en matière de télédétection par l'introduction d'expertise supplémentaire (voir encadré p. 51). C'est par exemple l'UNESCO qui a fait appel au Laboratoire de propulsion par réaction, l'un des Centres de recherches de l'Agence nationale des États-Unis pour l'aéronautique et l'espace (NASA), en lui demandant de fournir à l'Université de



Guide de télédétection pour débutants

La télédétection est la science qui permet de déduire des informations sur la Terre à partir d'images prises à distance. Ses formes les plus courantes sont la photo aérienne et l'imagerie satellitaire.

La télédétection fait un tel usage de la photogrammétrie que les deux termes en viennent à se confondre. Les photogrammes peuvent se présenter sous forme de photos ou d'imagerie stockée, sous forme numérique, sur bande ou sur disque. Ce peut être des images vidéo ou des images prises par des caméras CCD ou par d'autres capteurs de rayonnement, comme les scanners.

La télédétection par satellite sert en général à observer la surface de la Terre, les modifications de son aspect, les océans, la neige et la glace, mais elle est également tournée vers d'autres horizons, comme celui de l'atmosphère, du climat et, dernièrement même de Mars et de l'espace.

Les satellites peuvent être dirigés vers un point fixe de la Terre, ils sont alors en orbite géostationnaire, comme les satellites météorologiques, ou bien ils peuvent viser presque toute la planète, quand ils suivent une orbite quasiment polaire, par exemple. Chaque satellite « scanne » la Terre et saisit l'information sous forme numérique pour la transmettre à des stations au sol.

Voici les engins de télédétection qui sont cités dans l'article :

ASTER, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, est un instrument d'imagerie lancé par la plate-forme Terra. ASTER sert actuellement à fournir des cartes de température de surface, de réflectance et d'altitude des terres émergées. Les bandes thermiques des capteurs numériques d'ASTER sont réglées de façon à donner une vue de toute la gamme des températures au sol sur une grande échelle.

CORONA est un satellite des années 1960 qui n'est plus en service. C'était un « espion » militaire américain. Conformément à la politique des États-Unis qui permet de verser certaines informations militaires dans le domaine public, après un certain délai, des images enregistrées par CONONA ont été diffusées en 1996 et 2002. CORONA était placé en orbite terrestre à une altitude variant entre 160 km et 200 km, selon les missions.

Landsat passe au dessus de l'équateur du nord au sud à une altitude de 705 km. Il suit un cycle constant de 16 jours et effectue un peu plus de 14 passages par jour autour de la Terre, à la vitesse de 7,5 km par seconde. Landsat 7 a été lancé en même temps que Terra, 27 ans après le lancement par la NASA du premier vaisseau spatial Landsat dans le cadre de son Système d'observation de la Terre. Il a pour mission de fournir une observation ininterrompue de la surface terrestre à l'intention des scientifiques et des ingénieurs travaillant pour des autorités nationales ou locales, pour l'agriculture, l'armée, le commerce, l'université ou encore la recherche sur le changement planétaire etc.



Vue de la plate-forme Terra, satellite lancé en 1999 dans le cadre du Système d'observation de la Terre de la NASA

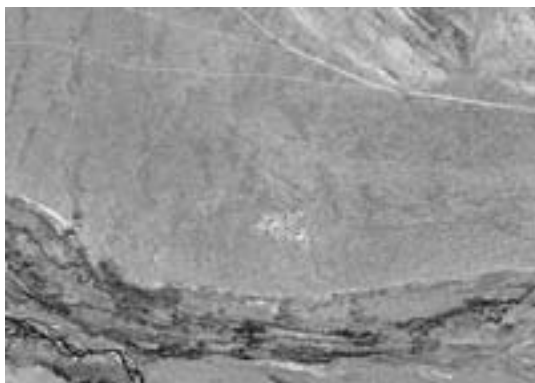
Gand des images satellite d'ASTER qui permettront de suivre l'état des glaciers dans les monts Altaï (voir *Guide de télédétection pour débutants*). Il faudra mesurer en continu les glaciers sur plusieurs décennies afin de savoir lesquels avancent ou reculent, indication certaine du changement climatique. Cela pourrait indirectement laisser prévoir à quelle vitesse le pergélisol est en train de fondre. Forts de cette information, les responsables de la protection des tombes pourront déterminer, par exemple, lesquelles se situent dans les zones les plus exposées.

Les *kourganes* sont littéralement pris dans la glace. Après l'enterrement, la tombe était recouverte de pierres formant un tumulus perméable. La pluie a pu s'infiltrer dans la tombe et y geler. Avec le temps, il s'est formé un bloc de glace qui a préservé la tombe avec tout son contenu. Comme l'archéologie répugne désormais à procéder à l'excavation des tombes, les scientifiques étudient les moyens de les préserver sur place, en créant une sorte de système de climatisation pour les maintenir glacées.

Grâce aux données livrées par le satellite de reconnaissance CORONA et aux mesures précises fournies par le Système mondial de positionnement (GPS), l'absence de cartes a été surmontée. Le satellite CORONA atteint une résolution au sol de 1,8 m, ce qui suffit aux besoins de la cartographie topographique. Cela suffit aussi pour détecter la plupart des structures archéologiques ayant plus de 2 à 3 m de diamètre, comme les *kourganes* et autres monuments funéraires ou rituels (Voir *Guide de télédétection pour débutants*).

Au cours des campagnes exploratoires de 2003 et 2004, l'Université de Gand a pu produire des cartes topographiques détaillées et des modèles de hauteur (3D) d'après l'imagerie satellitaire de

CORONA, représentant une surface totale de 600 km². On crée un modèle de ce type en combinant deux images de la même zone grâce à un logiciel photogrammétrique d'ordinateur (voir *Guide de télédétection pour débutants*). L'équipe de Gand a ainsi pu représenter en détail plus de 3 000 monuments archéologiques. Elle a entré toutes les données dans une base de données reliée à un GPS. Il s'agit d'une application informatique qui emmagasine, visionne et analyse des cartes et autres informations géographiques. Bien que la base de données et le GPS aient une finalité de recherche, la base de données sera également offerte aux conservateurs russes afin qu'ils puissent gérer la mise en valeur de la région, et surtout protéger son patrimoine archéologique.



A gauche : Image satellite prise en 1969, à une altitude de plus de 150 km, montrant quatre sites funéraires scythes. On remarquera l'alignement parallèle des pointillés partant du bord de la rivière qui signalent les tumulus de la dépression de Yustid. Ces sites, fouillés dans les années 1980 par V.D. Kubarev, ont été étudiés en détail en 2004 par l'équipe de Gand.
A droite : Photo de tumulus scythes alignés, prise d'une colline

Depuis 2005, l'Université de Gand effectue un inventaire du patrimoine archéologique d'une partie des montagnes russes et kazakhes à l'aide de l'imagerie satellitaire, en partenariat avec l'Université de l'État de Gorno-Altai et de l'Institut Margulan d'archéologie d'Almaty. Grâce à ce procédé, on peut faire un inventaire cartographique de l'archéologie en conjuguant le travail habituel de terrain, l'interprétation des images satellite et le GPS.

La vallée du Dhazator, située dans le sud de la République de l'Altaï de la Fédération de Russie, a été choisie pour la première campagne de cartographie, du 8 juillet au 18 août de l'an dernier. Sur une période de six semaines, 1687 structures archéologiques différentes ont été localisées et décrites. Elles couvraient 192 sites sur une superficie de 284 km². Toute la vallée du Dhazator a été cartographiée de manière détaillée à l'aide de l'imagerie du satellite CORONA. Une partie de l'expédition s'était consacrée à sélectionner les meilleurs points de contrôle au sol pour les images satellite et à produire des modèles de



L'archéologue Kaatje De Langhe et le géographe Matthijs Vanommeslaeghe sur un tumulus bien préservé, typique d'un kourgane qui n'a pas été dérangé. Ils sont en train d'en mesurer la localisation, pendant la campagne de 2005, grâce à un récepteur GPS très perfectionné

hauteur et des orthophotographies. Ces dernières sont des photos aériennes qui éliminent la distorsion des points de contrôle au sol due au relief, à l'inclinaison et à la perspective.

Ce n'est qu'un début

Le projet devra déborder la frontière russe et pénétrer dans les pays voisins, Kazakhstan, Chine et Mongolie, pour cartographier le patrimoine archéologique et mesurer les changements climatiques à travers l'ensemble du massif de l'Altaï. Cette année, l'Université de Gand inventorie la vallée de Kara-Kaba dans la partie orientale du Kazakhstan et étudie les effets du changement climatique sur les glaciers, avec l'Institut Margulan et le géocryologue Sergei Marchenko, de l'Association internationale du pergélisol. Pour cet élément du projet, l'UNESCO engagera la participation d'un autre partenaire de l'*Open Initiative*, l'Académie chinoise des sciences. Comme le changement climatique exige une observation ininterrompue pendant de longues périodes, ce n'est qu'un début.

Wouter Gheyle avec la collaboration de Jean Bourgeois, Jessica Bunning et Mario Hernandez²⁸

Pour en savoir plus: AltaiMountains@Ugent.be; www.archaeology.ugent.be/altai/; www.altai-republic.ru/; Ma.Hernandez@unesco.org; http://whc.unesco.org/; http://www.unesco.org/science/remotesensing

²⁸ Jean Bourgeois est professeur en titre et Wouter Gheyle chercheur scientifique au département d'archéologie et d'histoire ancienne de l'Europe, à l'Université de Gand, en Belgique. Mario Hernandez est chef du Programme de télédétection de l'UNESCO et Jessica Bunning est assistante de programme à l'UNESCO

Coup de chaleur sur les forêts australiennes

L'Australie est en proie à la plus sévère sécheresse connue de mémoire d'homme ; seul l'extrême nord-ouest y échappe. Entre 1910 et 1999, la moyenne des températures a connu une hausse de 0,7 ° C, essentiellement depuis 1950. Les projections effectuées par l'Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation sur des modèles du climat indiquent que la hausse des températures annuelles moyennes atteindra 0,4 à 2° C d'ici 2030 et 1 à 6° C d'ici 2070. Les tendances de la pluviosité restent plus difficiles à évaluer. Ce changement de régime climatique est surtout inquiétant pour les forêts, car l'impact du réchauffement pourrait aggraver le risque de multiplication des incendies incontrôlables, intenses et destructeurs, qui déciment la biodiversité.

Les Greater Blue Mountains et les Tropiques humides du Queensland sont deux des sites illustrant les *Case Studies on Climate Change* and World Heritage publiées en avril dernier par le Centre du patrimoine mondial de l'UNESCO. Séparés par plus de 2 700 km, ces sites sont, à plusieurs titres, aux antipodes l'un de l'autre : le premier a un écosystème de forêt d'eucalyptus tempérée, le second de forêt pluviale tropicale et de mangroves. Ils n'en seront pas moins vulnérables tous les deux au climat plus chaud et sec du 21^{ème} siècle en Australie.

Lesley Hugues, de l'Université de Macquarie de Sydney, soutenait en 2003 qu'il était difficile de prévoir exactement l'impact du changement climatique en Australie sur la large gamme des espèces, par manque de données de référence. Depuis cependant, des études menées sur des écosystèmes alpins et forestiers vulnérables laissent entrevoir un déclin significatif d'un grand nombre d'espèces et même l'extinction de certaines d'entre elles.

L'espèce de vertébrés peut-être la plus vulnérable est le possum nain des montagnes (*Burramys parvus*), dont le cycle vital exige une longue période de couverture neigeuse à l'étage

alpin. On estime qu'une hausse de 1° C de la température éliminerait son bioclimat et qu'une hausse de 2° C éliminerait celui de cinq autres espèces alpines. En l'absence de toute possibilité de migration vers un milieu plus enneigé, il est probable que ces espèces seront amenées à disparaître.

Dans les écosystèmes boisés plus secs de l'Australie occidentale, une hausse de 0,5° C de la température réduirait de 28 % l'habitat de l'ensemble des grenouilles et des mammifères, et une hausse de 1° C verrait la disparition ou la réduction à de petites enclaves, de l'espèce *Dryandra*. En ce cas aussi, pour 1° C de plus, Hilbert et coll.²⁹ estiment que la forêt pluviale d'altitude perdra environ 50 % de son domaine. Cela est dramatique, vu l'importance de ces écosystèmes pour de nombreux vertébrés endémiques.

En outre, la fragmentation de l'habitat, qui caractérise les petites zones protégées que sont souvent les sites du Patrimoine mondial, limite les possibilités de migration vers des milieux plus favorables.



La région des Greater Blue Mountains doit sa brume bleutée à l'essence d'eucalyptus, très inflammable, libérée dans l'atmosphère en réaction à la chaleur. Plus de 100 taxons d'eucalyptus y ont été dénombrés

© Jim Throssel/UCN Photo Library



© Mel Williams



© Sean McLean

La zone du Patrimoine mondial des Greater Blue Mountains abrite le Pétrogale à queue touffue, en brosse (à gauche) et le dasyure tigre, deux espèces endémiques. Leurs habitats et leurs systèmes de survie pourraient être profondément affectés par le changement du climat, de la fréquence et de l'intensité des incendies de forêt

L'une des forêts les plus dépendantes du feu

Les forêts d'eucalyptus d'Australie, comme celles des Greater Blue Mountains de l'Etat de Nouvelle Galles du Sud, au sud-est du pays (voir *carte p. 58*), sont l'un des écosystèmes forestiers les plus dépendants du monde à l'égard du feu.

Dans ces montagnes, le domaine du Patrimoine mondial comprend plus d'un million d'ha de plateaux, d'escarpements et de gorges de grès, essentiellement recouverts de forêts tempérées d'eucalyptus. Avec ses huit zones protégées, le site a été inscrit en 2000 sur la Liste du patrimoine mondial parce qu'il représente l'adaptation et la diversification des eucalyptus tout au long de l'évolution du continent depuis sa séparation du Gondwana (voir également l'encadré p. 58).

Son inscription sur la Liste du patrimoine mondial se justifie en outre par le fait que le site abrite 120 espèces rares ou en voie d'extinction, dont 114 taxons endémiques, ainsi que des espèces reliques de l'évolution, comme le pin de Wollemi, qui se sont perpétuées dans des microsites très délimités.

Les projections montrent une perte de biodiversité pour 2020 dans certains sites écologiquement riches, comprenant la Grande barrière de corail et les Tropiques humides du Queensland. D'autres sites subissant un risque incluent les zones humides des îles Kakadu, le sud-ouest de l'Australie, les îles sub-antarctiques et les zones alpines

Giec (2007)³⁰

L'essence très inflammable de l'eucalyptus

Le brouillard bleu qui a donné leur nom aux Greater Blue Mountains, est dû à l'essence très inflammable de l'eucalyptus libérée dans l'atmosphère en réaction à la chaleur. De nombreuses espèces d'eucalyptus, de pins gris et autres végétaux locaux se sont si bien adaptés au feu qu'ils ne libèrent leurs graines qu'après un incendie, la cendre compensant alors la pauvreté du sol en nutriments.

La repousse des eucalyptus et des pins gris est en général très vigoureuse dans les trois années qui suivent un grand incendie. Mais si un second incendie se produit pendant le processus de régénération, il peut provoquer une perte de diversité des espèces en tuant les plantes avant qu'elles n'aient pu produire des graines.

De sorte que si l'intervalle entre deux grands feux de brousse passe d'un cycle de 10–20 ans à moins de six ans, il se produira une perte significative dans la diversité des principales espèces d'eucalyptus et autres végétaux de la région, modification qui entraînerait de graves conséquences pour l'intégrité des écosystèmes de la région.

Etudier le comportement du feu

Plusieurs stratégies sont en préparation pour protéger les Greater Blue Mountains de l'effet destructeur des incendies incontrôlés, dans le contexte d'un changement climatique. La première appliquera des politiques mieux documentées, grâce aux recherches sur la propagation des incendies et leur impact écologique, notamment à la lumière des incendies terriblement destructeurs de 2002, qui ont donné lieu, en décembre 2003 à l'établissement du Centre de recherches en coopération sur les feux de brousse.

La seconde stratégie s'intéresse à l'utilisation contrôlée, ou en mosaïque, des brûlis ciblant certains écosystèmes, de manière spécifique, afin de réduire les risques d'incendies intenses et très destructeurs. Comme les Greater Blue Mountains bordent les faubourgs en développement rapide de Sydney, la plus grande ville d'Australie, peuplée de 4,3 millions d'habitants, il pourrait bien se produire un conflit d'intérêts entre la protection de la propriété urbaine et celle de la biodiversité.

L'émergence d'espèces adaptées au feu

Dans les écosystèmes australiens, comme dans tous ceux qui se sont développés dans des conditions climatiques de type méditerranéen, le feu est devenu depuis longtemps l'agent de sélection. Mais en Australie, ce facteur a pris une plus grande importance il y a environ 100 000 ans, lorsque la sécheresse s'est installée après une longue période glaciaire.

Cela a entraîné la disparition de la mégafaune du pays (les espèces de grands animaux) et l'apparition d'espèces mieux adaptées aux incendies. Le feu allait marquer encore bien plus profondément le paysage dès l'arrivée des premiers Aborigènes, il y a environ 60 000 ans, qui se servirent du feu pour gérer l'environnement.

Ces deux facteurs expliquent pourquoi les espèces sensibles au feu comme les bouleaux, les pins, fougères arborescentes et « sheoaks », ainsi que les espèces de la forêt ombrophile, ont cédé la place aux eucalyptus et aux pins gris dépendants du feu. À cela se sont ajoutées l'apparition de forêts sclérophylles³¹ et l'aggravation de l'érosion du sol provoquant l'envasement des zones côtières et la formation de mangroves. Pour la population aborigène, l'usage de l'« agriculture du bâton enflammé » comme moyen d'aménager et de débroussailler le paysage permettait à la fois de prévenir des incendies plus destructeurs et de surveiller les déplacements du gibier. Des pratiques culturelles telles que les brûlis en mosaïque appliquées pendant des millénaires devaient marquer profondément le paysage australien.

Par suite de la réduction des précipitations et de l'accroissement de l'évaporation, les projections montrent que les problèmes de sécurité d'approvisionnement en eau s'aggraveront d'ici 2030 dans le sud et l'est de l'Australie.

Giec (2007)

Vers une migration des espèces en hauteur

La hausse des températures pourrait menacer la flore et la faune des rares espaces plus humides et plus élevés des Greater Blue Mountains, en forçant les espèces à escalader les montagnes et



Deux snow gums à écorce rouge (Eucalyptus pauciflora). Exclusivement présents dans les régions alpines du sud-est de l'Australie, les snow gums sont particulièrement menacés par le changement climatique

© David Pinn

Les Tropiques humides : un point chaud de la biodiversité

Une autre étude de cas en Australie concerne la zone du patrimoine mondial des Tropiques humides du Queensland, qui couvre 450 km sur la côte nord-est de l'Australie (voir carte). Elle comprend des basses terres tropicales et des hautes terres couvertes de forêts ombrophiles et de fourrés, de végétation composite, de mangroves et de forêts et bois sclérophylles. Ces écosystèmes abritent une très riche variété d'espèces végétales et animales, dont une grande partie est considérée comme endémiques, rares ou en voie d'extinction et comme des témoins de l'évolution (voir encadré). C'est ce qui a justifié le classement du site en 1988 au patrimoine mondial.

Ce remarquable écosystème est menacé par la rapidité des changements de température et de pluviosité, auxquels beaucoup d'espèces de cette région sont incapables de s'adapter.

Pour la moitié environ des espèces modélisées, un réchauffement de 3,5° C, correspondant au scénario moyen des projections, pourrait aboutir à la disparition totale des conditions de leur environnement ; quant aux espèces restantes, leur variété pourrait tomber à 11% de leur niveau actuel. Même une hausse de 1° C de la température moyenne entraînera une réduction significative de la variété des espèces pour presque tous les vertébrés endémiques des Tropiques humides du Queensland.

Espèce relique du Gondwana, le casoar à casque (*Casuarius casuarius johnsonii*) ne se trouve qu'en Australie et en Papouasie-Nouvelle-Guinée. Mis en péril par la réduction de son habitat, il se classe au 3ème rang des oiseaux du monde par sa taille, après l'autruche et l'éméu. Les adultes peuvent mesurer jusqu'à 1,8 m et peser environ 60 kg. En consommant les fruits de plus de 150 espèces d'arbres de la forêt ombrophile dans les Tropiques humides, les casoars à casque passent dans leurs selles denses et abondantes des graines en état de germer. Ils contribuent ainsi puissamment à la biodiversité de la forêt ombrophile en dispersant ces graines sur plus d'un km à la ronde



© Paul J. Henderson

Les vertébrés de ces forêts ombrophiles tropicales isolées pourraient se trouver piégés, sans refuge possible, si se produisaient effectivement les modifications climatiques prévues. Beaucoup d'espèces pourraient disparaître dans les 50 à 100 ans, dont des grenouilles, mammifères, oiseaux et scincidés. Quelle sera l'étendue de la perte de biodiversité, cela dépendra de la rapidité et de la chronologie du changement climatique.

Le Service australien de recherches scientifiques marines et tropicales se propose de définir des initiatives réalistes et proactives, à l'échelle de la région, pour faire face au changement climatique envisagé. Son programme de recherches, largement doté par le gouvernement australien, affinera les modèles et les scénarios existants afin de désigner les espèces et les communautés écologiques les plus menacées, les effets à long terme des menaces et leur distribution géographique, la façon dont le changement climatique pourrait entrer en interaction avec d'autres facteurs comme le déboisement, la fragmentation, l'incendie, les mauvaises herbes et les bêtes sauvages, et enfin savoir si certaines régions, et lesquelles, pourraient à l'avenir perpétuer les habitats anciens, ou en constituer de nouveaux.

Pour la zone des Tropiques humides du patrimoine mondial, l'Université James Cook de Townsville, au Queensland, a créé un Centre de recherches sur la biodiversité tropicale et le changement climatique, uniquement consacré à l'impact du changement climatique sur les biotes du site.

à réduire ainsi les ressources disponibles en eau. Or, l'un des critères environnementaux qui ont fait inscrire le site sur la Liste, c'est justement l'étagement de la végétation en fonction de la diminution des températures sur des altitudes de 100 à 1400 m.

Les marais d'altitude des Greater Blue Mountains abritent, par exemple, certaines espèces singulières adaptées à des sols périodiquement détrempés. Ces espèces risquent d'être délogées par d'autres qui tolèrent des sols plus secs. Les marais d'altitude sont aussi l'habitat du scincidé en danger d'extinction (*Elamprus leuraensis*) et de la libellule géante. Leur capacité à stocker l'eau et à la libérer lentement contribue également à la survie des plantes menacées, comme le *Microstrobos fitzgeraldii* et l'*Epacris hamiltonii*, qui se sont adaptés à des habitats constamment humides. La superficie des marais se trouvant à la limite inférieure d'une pluviosité acceptable serait très menacée de réduction par un changement de pluviosité et/ou une évaporation accrue dans un climat plus chaud.

Les preuves du changement climatique restent fragmentaires

Les preuves de l'impact du changement climatique sur les écosystèmes des Greater Blue Mountains sont encore incomplètes et auraient besoin d'être étayées par des recherches plus approfondies et systématiques. On sait, par exemple, qu'au moins une espèce d'eucalyptus, apparentée aux Snow Gums des régions alpines, ne pousse plus dans la région des Blue Mountains. Certains horticulteurs et botanistes attribuent cela au changement climatique.

Selon les projections pour 2030, la production agricole et forestière va décroître sur une grande partie du sud et de l'est de l'Australie ... à cause de l'augmentation des sécheresses et des feux.

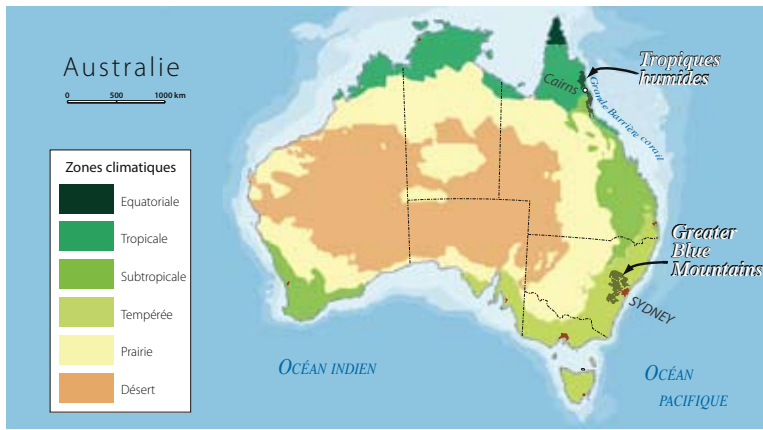
Giec (2007)

Il existe également des preuves d'un impact durable après les grands feux de brousse de 2002–2003, où la repousse normale des eucalyptus ne s'est pas produite dans la partie haute des Greater Blue Mountains.

La propagation de l'agent pathogène du sol *Phytophthora* affecte sérieusement à l'heure actuelle plusieurs espèces végétales de montagne. Le stress des végétaux dû à la sécheresse, à l'érosion et aux mouvements du sol dans ces conditions extrêmes est peut-être à l'origine de sa propagation et de son impact sur de nombreuses communautés végétales sensibles. On a constaté un plus grand stress, de longue durée, sur les marécages d'altitude saturés³² et sur les invertébrés qui en dépendent, dans une atmosphère devenue plus chaude et plus sèche. Il est toutefois difficile, en l'absence de recherches ciblées, de fournir des preuves que le changement climatique en est la cause.

Mieux connaître pour mieux protéger

Plusieurs projets de recherche concernant l'impact du changement climatique sur les Greater Blue Mountains sont en cours sous l'égide de trois agences : le Bureau australien de l'effet de serre, le Département de l'environnement et du patrimoine de la Nouvelle-Galles du Sud et l'Institut du patrimoine mondial des Greater Blue Mountains. Sont étudiés en particulier l'impact du changement climatique sur la biodiversité et sur les fonctions des écosystèmes (terrestres et aquatiques), les effets de synergie sur les autres menaces



Ce figuier étrangleur (*Ficus virens*) est l'un des plus grands arbres du nord tropical du Queensland. Il germe au sommet d'un autre arbre, et ce sont souvent les oiseaux qui en dispersent les graines. En poussant, il fait descendre ses racines jusqu'à étrangler son hôte. Cette adaptation donne au figuier étrangleur un avantage certain par sa hauteur dans la compétition pour le soleil, qui ne brille qu'au-dessus d'une canopée très dense

comme celles des espèces invasives et les risques de feux de brousse pour les personnes et les biens.

*Les Tropiques humides abritent le Dendrolagus de Lumholtz (*Dendrolagus lumholtzi*), qui mesure à peine 60 cm. Animal nocturne et solitaire, il passe la majeure partie du temps dans la canopée, à manger des feuilles et des fruits*



L'Institut du patrimoine mondial des Blue Mountains travaille avec d'autres partenaires sur un projet de recherche (2007–2010) pour évaluer les menaces de toutes sortes pesant sur les écosystèmes de la région, parmi lesquelles le changement climatique. L'Institut travaille aussi à des programmes de recherche en collaboration avec des instituts en France et aux États-Unis mettant en commun les efforts et les techniques de recherche sur les conditions climatiques extrêmes, sur la multiplication des périodes de sécheresse, des risques d'incendie et autres effets du changement climatique.

Si la chronologie du changement climatique fondée sur les modèles actuels s'avère correcte, il nous reste très peu de temps pour concevoir et tester des stratégies d'atténuation de ces effets sur la protection des sites, naturels et culturels, du patrimoine mondial. Il est impératif que les agences internationales encouragent les pays développés, disposant de moyens appropriés, à s'engager dans des recherches internationales pour soutenir sans délai les stratégies d'atténuation des risques. La fenêtre d'opportunité pourrait bien être plus étroite que nous ne le croyons.

Rien ne peut remplacer la lutte contre les émissions de CO₂

S'il existe dorénavant des méthodes plus efficaces pour lutter contre les feux de brousse et circonvenir partiellement leurs effets, cela laisse intacte l'absolue nécessité de traiter le problème fondamental des émissions de CO₂. Il s'agit de sensibiliser davantage le public quant au prix que les générations actuelles et futures devront payer pour la perte de biodiversité et de services rendus par les écosystèmes, que l'on a tendance aujourd'hui à considérer comme des biens allant de soi.

John Merson³³

A lire : Case Studies on Climate Change and World Heritage: <http://whc.unesco.org/en/othermaterials/>

Une longue évolution en isolement

La région des Tropiques humides abrite environ le tiers de 315 espèces de mammifères de l'Australie, parmi lesquelles des possums verts spécifiques, les chats marsupiaux, les kangourous escaladeurs d'arbres et des espèces rares de chauves-souris. Outre les mammifères relativement communs, comme l'ornithorynque et le wallaby, les Tropiques humides abritent 13 espèces de mammifères uniques au monde. Toutes sauf 2, le bettong du nord (*Bettongia tropica*) menacé d'extinction et le mahogany glider (*Petaurus gracilis*), habitent les forêts. On y compte 2 espèces de dendrolagues (voir photo), 1 de kangourou-rat, 4 de possums et 1 de mélomys.

Certaines espèces de la forêt ombrophile des Tropiques humides ont de proches parents en Nouvelle Guinée et en Asie du Sud-Est. Lorsque l'Australie s'est trouvée isolée après l'éclatement du supercontinent du Gondwana [Ndlr : L'Australie s'est séparée de l'Antarctique il y a environ 55 millions d'années], elle a dérivé vers le nord. Il y a environ 15 millions d'années, elle a buté sur la plaque continentale asiatique. La collision a ouvert la voie à des échanges entre deux ensembles d'animaux et de végétaux qui avaient évolué isolément. Certaines espèces de la flore et de la faune asiatiques ont migré vers l'Australie, alors que des espèces australiennes se déplaçaient vers le nord. Bon nombre d'entre elles ont colonisé la Nouvelle-Guinée, masse terrestre de forte altitude créée au-devant de l'Australie par sa dérive vers le nord. Si bien que certains mammifères singuliers originaires des Tropiques humides cohabitent avec les voisins nordiques de l'Australie, comme le possum pygmée à longue queue en Papouasie-Nouvelle-Guinée et la minuscule chauve-souris insectivore au nez en forme de tube (pesant à peine 8 g) en Asie du Sud-Est.

Source: Wet Tropics Management Authority: www.wetropics.gov.au/pa/pa_mam_info.html

29. Hilbert, D. et coll. (2001) Sensitivity of tropical forests to climatic change in the humid tropics of north Queensland. *Australian Ecology* 26:590–603
30. Giec (2007) Impacts, adaptation et vulnérabilité. Résumé à l'intention des décideurs. 4e rapport d'évaluation du Groupe de travail II (avril). Lesley Hughes, citée en début d'article, fut l'auteure principale du chapitre sur l'Australie et la Nouvelle Zélande et l'un des auteurs du chapitre sur les écosystèmes : www.ipcc.org.
31. La feuille des forêts sclérophylles contient beaucoup de tissu fibreux, ce qui rend très lente la formation d'humus
32. Marais de faible profondeur colonisés par une végétation dense. La saturation permanente du sol y maintient des conditions anaérobiques (privées d'oxygène) qui empêchent la décomposition de la masse végétale. La matière organique accumulée forme de la tourbe, qui se comporte comme une éponge et retient l'eau de pluie pour la libérer ensuite lentement
33. Auteur d'une étude de cas sur le site du patrimoine mondial des Greater Blue Mountains, dont une version abrégée a paru dans *Case Studies on Climate Change and World Heritage*. *Blue Mountains World Heritage Institute* : j.merson@bmwhi.org.au

ENCYCLOPÉDIE

**Encyclopedia of Life Support Systems**

Encyclopédie en ligne lancée par l'UNESCO en 2002 avec les éditions EOLSS du Royaume-Uni. Représentant l'équivalent de 200 volumes imprimés, elle est rédigée par des milliers d'experts de plus de 100 pays. Constamment mise à jour, elle offre aux universités des pays les moins avancés des abonnements gratuits. En anglais. Plus de 2 300 de ses articles traitent de questions relatives au changement climatique, telles que l'économie du changement climatique potentiel, le coût des stratégies de réaction, l'effet du réchauffement planétaire sur les forêts, la biodiversité, l'agriculture, la gestion de l'eau, l'élévation du niveau de la mer, ainsi que de l'impact sur les pêcheries, de la fonte des calottes glaciaires etc. Pour s'inscrire : www.eolss.net/eolss_subuldc.aspx; pour en savoir plus: unesco-eolss@unesco.org

LIVRES

**Case studies on Climate Change and World Heritage**

Produit par le Centre du patrimoine mondial de l'UNESCO (2007). En anglais, 80 p. Présente les études de cas de 26 sites naturels et culturels menacés en raison du changement climatique, illustrant les dangers auxquels font face les 830 sites de la Liste du patrimoine mondial. Pour le télécharger : <http://whc.unesco.org/autres/materiaux/fr/>; voir aussi : <http://whc.unesco.org/en/climatechange>

**Water: a Shared Responsibility**

2ème Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau. Éditions UNESCO et Berghahn Books. Publié dans le cadre du Programme mondial d'évaluation des ressources en eau, hébergé par l'UNESCO et impliquant 24 agences des Nations unies (2006). ISBN: 92-3-104006-5, 56,00 € (sous forme de CD-ROM : 36,00 €). Existe en anglais et en espagnol.

Pour télécharger le rapport : www.unesco.org/water/wwap.

Sont présentés, entre autres, les effets du changement climatique sur les ressources en eau et la production alimentaire, le changement climatique et la pollution atmosphérique. Le rapport prône l'intégration de l'énergie hydraulique et des autres formes d'énergie durable afin de réduire la dépendance à l'égard des stations de conversion des combustibles fossiles, dont les émissions aggravent les problèmes de variabilité et de changement climatiques. Pour télécharger le rapport : www.unesco.org/water/wwap

**The Gulf Stream**

Par Bruno Voituriez. Collection Forum Océans de la COI de l'UNESCO. Éditions UNESCO (2006) ISBN: 92-3-203995-8, 18,00 €. Existe en français, anglais et espagnol, 210 p. Qu'est-ce que le Gulf Stream ? Voilà la question à laquelle répond ce livre, qui retrace la découverte scientifique du Gulf Stream, les phénomènes qui en sont la cause, son rôle dans la dynamique du climat et son impact sur les écosystèmes marins de l'Atlantique Nord.

À paraître

The Future of Arid Lands – Revisited

Ouvrage commandé par le MAB de l'UNESCO. Charles F. Hutchinson et Stéphanie M. Herrmann de l'Université de l'Arizona (É.-U.) présentent l'état des connaissances scientifiques sur les écosystèmes des terres arides 50 ans après The Future of Arid Lands, édité par Gilbert F. White. Parution prévue en novembre 2007. En anglais. Pour en savoir plus, voir p. 16 ou www.unesco.org/mab/ecosyst/drylands/Pub.shtml; ou encore écrire à: t.schaaf@unesco.org

À paraître

Groundwater and Climate Change

Collection d'études de cas du monde entier. Sortie prévue au début de 2008, avant une conférence sur Les eaux souterraines et le climat en Afrique, co-organisée par le PHI de l'UNESCO, l'AISH et l'IAH à Kampala (Ouganda) du 25 au 28 juin 2008. En anglais. Pour en savoir plus : a.aureli@unesco.org

BROCHURES

**Policy Briefs**

Collection de brochures de 6 pages, lancée en 2006 par le MAB de l'UNESCO et le Comité scientifique du CIUS sur les problèmes de l'environnement (SCOPE). En anglais. Plusieurs brochures de cette nouvelle collection traitent de sujets relatifs au changement climatique, notamment The Carbone Cycle et, plus récemment, Human Alteration of the Nitrogen Cycle – Threats, Benefits and Opportunities. Publiée en mai 2007, cette dernière explique que, sur une période de 100 ans, le N₂O possède un potentiel de réchauffement de la planète 296 fois plus élevé que celui d'une masse égale de CO₂; ce composé contribue par ailleurs à l'épuisement de l'ozone de l'atmosphère. Pour le télécharger : www.unesco.org/mab/biodiv/biodivSC.shtml#assessments

**GRAPHIC**

Brochure de présentation du projet du PHI de l'UNESCO (2006). En anglais, 20 p. Cette brochure présente l'Évaluation des ressources en eaux souterraines, compte tenu de la pression humaine et des changements climatiques (GRAPHIC), projet lancé en 2004 par le PHI de l'UNESCO et qui doit se

poursuivre au moins jusqu'en 2013. Elle étudie l'impact des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines dans le monde et les questions qu'ils soulèvent au plan de la politique et de la gestion. Elle décrit les méthodes d'évaluation de l'impact en fonction du temps. Pour la télécharger : <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001507/150730E.pdf>

La science en Afrique**Contribution de l'UNESCO au plan de l'Afrique pour la science et la technologie d'ici 2010**

Division de la politique scientifique et du développement durable (2007). Disponible en français et en anglais, 32 p. En traitant de problèmes tels que la perte de biodiversité, les difficultés d'accès à l'énergie, la désertification et l'insécurité alimentaire et hydrique, l'Afrique a conscience du fait que le succès de beaucoup de ses programmes dépendront de sa capacité à s'adapter aux changements climatiques et à la variabilité du climat. Brochure remise par l'UNESCO aux chefs d'États et de gouvernements lors du Sommet de l'Union africaine, en janvier 2007. Pour le télécharger : www.unesco.org/science/science_africa_fr.shtml ou bien en demandant un exemplaire à: s.schneegans@unesco.org; a.candau@unesco.org

**Agenda pour les îles 2004 et après****Réagir au changement et entretenir la diversité dans les petites îles**

Brochure produite par le Plate-forme des régions côtières et des petites îles de l'UNESCO (2004). Disponible en français et en anglais, 48 p. En 1989, l'Alliance des petits États insulaires adoptait la Déclaration de Malé proclamant que l'élévation du niveau de la mer menaçait la survie même de certains petits États insulaires et priant instamment la communauté internationale de prendre des mesures efficaces afin de réduire l'effet de serre. Cette brochure décrit les activités actuelles de l'UNESCO pour accompagner les petites îles vers le développement durable et les aider à s'adapter au changement climatique. Diffusé lors de la Conférence organisée par les Nations unies à Maurice en janvier 2005 pour faire le bilan décennal du Programme d'action de la Barbade pour les petites îles (voir p.45). Pour le télécharger : www.unesco.org/csi/B10/mim.htm



POUR LES ÉCOLES

Explique-moi le climat

Par Guy Jacques. Éditions UNESCO/Éditions Nouvelle Arche de Noé (2005). ISBN: 92-3-203990-7, 6,00 €. Existe en français, anglais et espagnol, 48 p. Met à la portée des jeunes lecteurs les connaissances scientifiques nécessaires pour comprendre le climat, ses mécanismes, ses manifestations. Des effets de la latitude à ceux de la continentalité ou de l'altitude, des outils du météorologue au Protocole de Kyoto, de l'histoire des climats à la géographie des grands domaines climatiques.

**Explique-moi la Terre**

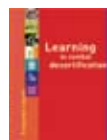
Par Philippe Bouysson. Produit par le PICG de l'UNESCO. Collection À la Découverte du monde. Éditions UNESCO/Éditions Nouvelle arche de Noé (2006). ISBN: 978-92-3-204015-2. Existe en anglais et français, 8,00 €, 48 p. Pour les 11-16 ans. La place de notre planète dans l'univers et le système solaire, sa structure, la tectonique des plaques, le rôle de l'atmosphère et de l'hydrosphère, la formation des reliefs, les glaciations, les risques naturels sont autant de thèmes abordés dans un souci constant de mise en relation avec la vie des hommes.

**Les humeurs de l'océan**

De Patricia Chairpoulos. Collection À la découverte du monde. Éditions de l'UNESCO (2003). ISBN: 978-92-3-103872-3. Disponible en anglais, arabe, espagnol et français 4,60 €, 48 p. Cet ouvrage décrit les débuts des océans mondiaux, leur rôle dans la dynamique du climat mondial et la richesse des ressources qu'ils contiennent.

**Kit pédagogique sur la désertification**

Produite par le MAB de l'UNESCO, en collaboration avec la Convention des Nations unies pour combattre la désertification. Distribuée aux écoles dans les pays les moins avancés depuis 2003, en vente depuis 2004. Éditions UNESCO. 30 €. ISBN: 92-3-103892-3. Disponible en allemand, anglais, arabe, espagnol, français, hindi, mongol et russe. S'adresse aux instituteurs du primaire et aux enfants de 10 à 12 ans des pays sujets à la désertification. Chaque kit comprend un guide du maître, des études de cas, trois exemplaires d'un livre illustré, L'École où pousse l'arbre magique, et une affiche. Pour en savoir plus: www.unesco.org/mab/ecosyst/drylands.shtml

**Kit pédagogique pour les pays situés en zones arides**

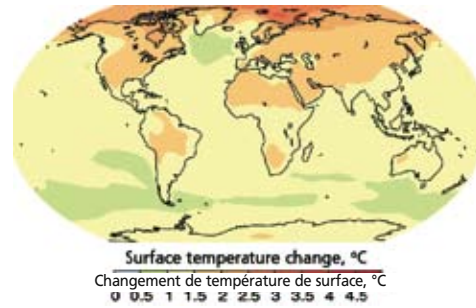
Produite par le MAB de l'UNESCO (2007). S'adresse aux enseignants du primaire et du secondaire du monde entier. Démarche innovante faisant appel à la créativité et au sens artistique des élèves d'environ 6 à 15 ans. Un aperçu du kit est disponible en français et en anglais : www.unesco.org/mab/ecosyst/drylands/docs/kitArt_F.pdf



Aperçu de **notre monde futur**

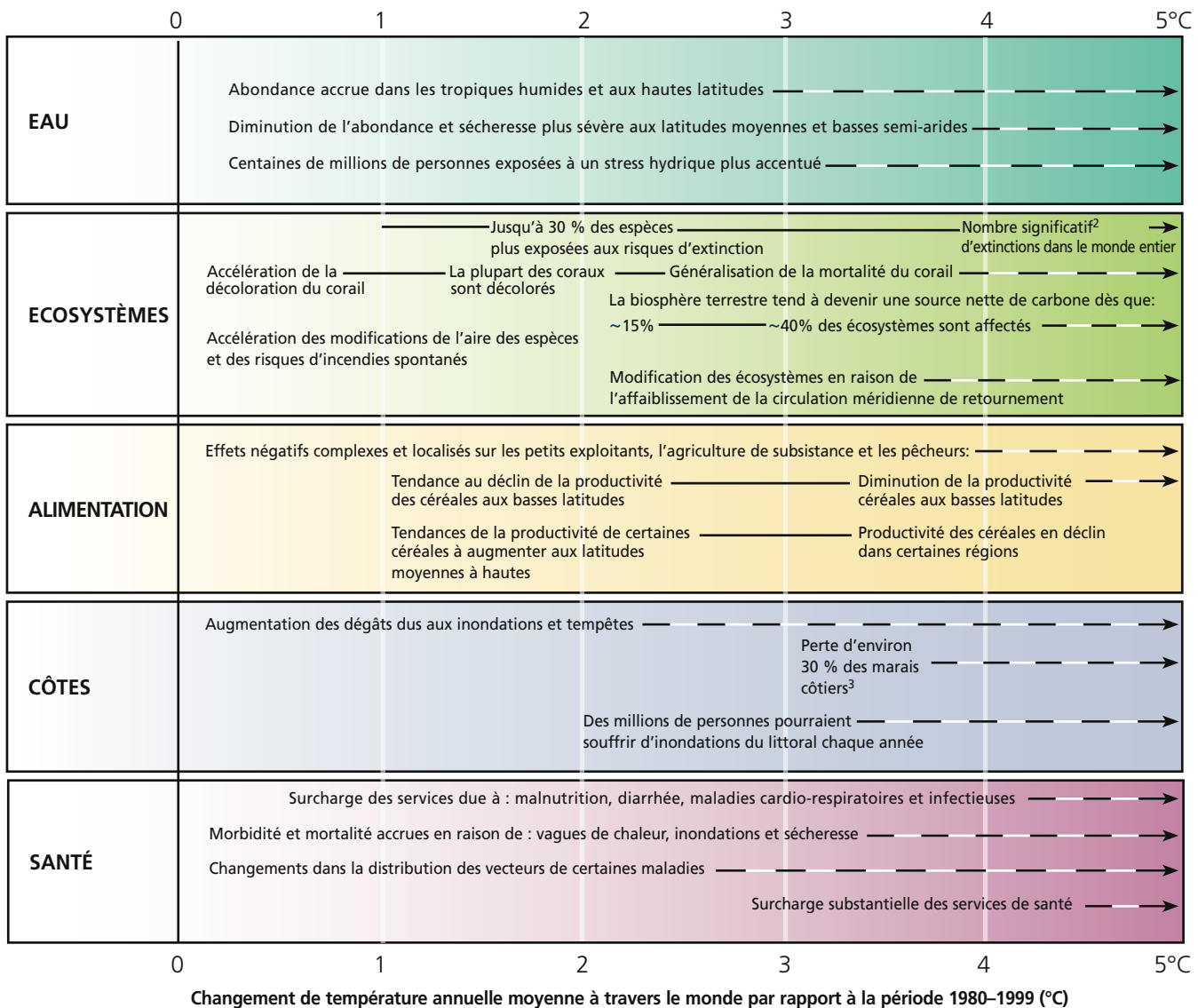
Prévisions du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (2007)

A droite: Les prévisions de l'élévation des températures mondiales jusqu'en 2020-2029 selon le scénario AIB (modéré) du Giec (augmentation de 2,8°C, concentration du CO₂ à 850 ppm). Selon ce scénario, le monde connaît une rapide croissance économique, la population mondiale culmine au milieu du siècle avant de décliner, des technologies nouvelles et plus efficaces sont rapidement adoptées et l'équilibre s'établit entre toutes les sources d'énergie (fossiles et renouvelables). Le scénario d'augmentation extrême (élévation de la température de 4°C, CO₂ à 1550 ppm) est identique à l'AIB, à l'exception notable qu'il intègre une utilisation intensive des combustibles fossiles. Si la concentration du CO₂ pouvait être maintenue constante au niveau de l'an 2000, le réchauffement planétaire en 2100 ne dépasserait pas les 0,6°C.



Source: IPCC (2007) *Climate Change 2007 – the Physical Science Basis*.
 4^{ème} Rapport d'évaluation à l'intention des décideurs. Groupe de travail I. Février

Principaux effets jusqu'en 2100 de la hausse prévue de la température moyenne mondiale¹



¹ Les effets varieraient en fonction des efforts d'adaptation, du rythme de la hausse des températures et du mode de vie socio-économique retenu.

² Significatif se définit ici comme plus de 40 %.

³ Sur la base d'une vitesse d'élévation du niveau de la mer de 4,2 mm/an entre 2000 et 2080.

NOTE: Les indications sont placées de telle sorte que la partie gauche du texte marque le début approximatif d'un effet donné. Le niveau de fiabilité est élevé pour toutes les déclarations.

Source: IPCC (2007) *Impacts, Adaptation and Vulnerability*. 4^{ème} Rapport d'évaluation à l'intention des décideurs. Groupe de travail II. Avril.