



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

Au chevet du fleuve « mère de la Chine », p. 16

Planète

SCIENCE

Bulletin trimestriel
d'information sur les
sciences exactes et naturelles

Vol. 7, No. 2
Avril-juin 2009

SOMMAIRE

PLEINS FEUX SUR ...

- 2 Le frisson du forage

ACTUALITÉS

- 10 Les pôles se réchauffent plus vite que prévu
- 10 Le Danemark appuie l'éducation au changement climatique
- 11 Dix années pour sauver les récifs coralliens
- 12 Prix scientifiques pour femmes d'exception
- 12 2011 sera l'Année de la chimie
- 13 Inauguration de l'observatoire Pierre-Auger
- 13 Un Iranien remporte un prix d'optique

INTERVIEW

- 14 Jacques Weber explique pourquoi la crise financière peut être une opportunité

HORIZONS

- 16 Au chevet du fleuve « mère de la Chine »
- 19 Épaves, mondes engloutis et pilliers de tombes

EN BREF

- 24 Agenda
- 24 Vient de paraître

ÉDITORIAL

L'autre **crise**

L'eau est trop importante pour être abandonnée à ses seuls gestionnaires. Tel est le message de *L'eau dans un monde qui change*, troisième édition du Rapport mondial sur l'évaluation des ressources en eau, présenté par l'UNESCO le 16 mars au Forum mondial de l'eau, à Istanbul (Turquie), au nom de 26 organismes des Nations unies.

Le rapport espère convaincre les gouvernements de s'intéresser davantage à leur « or bleu ». Les investissements actuels dans l'eau sont minimes, comparés aux sommes consacrées à la crise financière et à la réduction des émissions de carbone – alors que les ressources en eau vont être victimes du changement climatique. « L'eau doit être placée au cœur des politiques agricoles, énergétiques, sanitaires, éducatives et d'infrastructures » souligne le coordonnateur du rapport, Olcay Unver de l'UNESCO.

Les auteurs expliquent que la crise de l'eau s'aggravera dans les prochaines décennies si les problèmes prévisibles ne sont pas traités à temps. Déjà situés à un niveau inégalé, les besoins en eau s'accroîtront encore lorsque la population mondiale aura atteint les 9 milliards en 2050, avec des urbains plus nombreux que les ruraux, une production énergétique accrue, l'élévation du niveau de vie et l'évolution des modes alimentaires. En 2030, près de la moitié de l'humanité (47%) vivra dans des zones soumises à un important stress hydrique.

Les pays riches consomment beaucoup de viande, donc beaucoup d'eau, car notre consommation doit se mesurer à l'eau que nous mangeons et non à celle que nous buvons. La production d'1 kg de blé nécessite de 800 à 4 000 litres d'eau, celle d'un kg de bœuf entre 2 000 et 16 000. En 2002, un Suédois consommait 76 kg de bœuf par an et un Américain 125 kg. Les pays émergents, eux aussi, développent leur goût pour la viande et les produits laitiers. On estime que le Chinois qui mangeait 20 kg de viande en 1985 en consommera 50 kg en 2009, ce qui nécessitera 390 km³ d'eau en plus. Or, nous le verrons dans une étude de cas tirée du rapport, gérer la pénurie d'eau est devenu la priorité pour le fleuve Jaune, deuxième fleuve de Chine par sa longueur.

Puis, il y a l'énergie que nous « cultivons ». Il faut entre 1 000 et 4 000 litres d'eau pour produire un seul litre de biocarburant. Cette production reste faible – la part de l'éthanol utilisée par les transports était estimée en 2008 à 4,5 % aux États-Unis, 40 % au Brésil et 2,2 % dans l'Union européenne – mais elle augmente constamment. Après avoir triplé entre 2000 et 2008, elle devrait passer de 77 à 127 milliards de litres en 2017.

Les besoins énergétiques pourraient augmenter de 55 % d'ici 2030, provenant, à elles seules, pour près de la moitié, de la Chine et de l'Inde. En dépit de leur forte empreinte écologique et de leur impact social, les barrages ont donc de l'avenir : la production hydroélectrique devrait progresser de 1,7 % par an entre 2004 et 2030, soit une augmentation cumulée de 60 %. Le rapport estime qu'en Afrique, où les retenues d'eau n'atteignent que 4 % du potentiel – contre 70 % dans la plupart des pays industrialisés – elles devraient absolument être développées pour répondre à la production d'énergie ainsi qu'à tous les autres besoins en eau du continent.

Comment convaincre les gouvernements d'agir ? Pour l'économiste Jacques Weber : par l'argument économique. Dans ce numéro, il explique pourquoi la crise financière actuelle découle de la pénurie croissante des ressources naturelles, et pourquoi cela en fait une occasion en or de « verdier » l'économie mondiale.

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

Le frisson du forage

Force est de reconnaître qu'après plus de 250 ans de recherches géoscientifiques, la *terra incognita* (l'inconnu) commence toujours à quelques dizaines de mètres à peine sous nos pieds. Le désir d'explorer cet obscur monde souterrain ne se limite pas à l'intérêt intellectuel de comprendre les éléments constitutifs et la structure de la planète dont nous habitons la surface. Les roches sous nos pieds sont la source des dangers cachés, tapis dans les tremblements de terre et les éruptions volcaniques. Les couches profondes recèlent des informations sur la physionomie de la Terre il y a des millions d'années, les climats et la répartition géographique des océans et des continents d'autrefois. Elles détiennent le secret de la naissance des roches, de l'enrichissement de certains minéraux et de l'épuisement de certains autres, toutes connaissances qui nous aident à exploiter les ressources de notre planète de façon plus élaborée et plus durable.

« Comme j'aimerais pouvoir descendre vérifier par moi-même ». Cette frustration, tous les géoscientifiques du monde l'ont exprimée. Forer est peut-être la seule façon de confronter les modèles avec la réalité, mais c'est une entreprise coûteuse. Les compagnies gazières et pétrolières estiment que le forage d'un puits standard de 3 km de profondeur leur coûte environ cinq millions de dollars. Comment, se demandent souvent les chercheurs, justifier de telles dépenses auprès d'une agence de financement si les résultats d'un forage d'intérêt purement scientifique sont encore plus aléatoires que ceux – fort incertains – d'une entreprise de forage pétrolier.

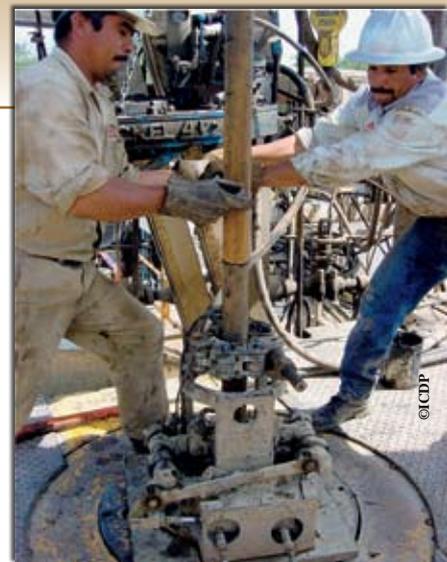
C'est ici qu'intervient le Programme international de forages continentaux scientifiques (ICDP). Depuis ses débuts, en 1996, il a financé 25 projets soumis par des scientifiques du monde entier. L'UNESCO est membre du Conseil consultatif scientifique qui les a approuvés. Dans les pages suivantes, nous décrivons certains de ces projets fascinants, marquant ainsi la fin de l'Année internationale de la planète Terre par un voyage dans ses profondeurs.

Aujourd'hui, le plus profond des puits forés atteint 12 262 m. Soit environ le tiers de la distance jusqu'à la base de la croûte terrestre (35 km), le 500^{ème} de la distance au centre de la Terre (6 374 km) et le 1 000^{ème} du diamètre de la Terre (12 748 km). Ainsi la technologie actuelle du forage ne fait-elle qu'égratigner la surface. Cependant, en descendant vers les entrailles de la Terre, on pénètre déjà dans un monde véritablement différent. À moins de 4 km de profondeur, la température de la roche atteint les 100°C, point d'ébullition de l'eau à la surface. À moins de 1 % de distance du centre de la Terre, la pression lithosphérique – le poids

de la roche au-dessus de nous – est déjà devenue suffisante pour écraser l'acier le plus résistant. Accéder à des profondeurs même modestes est donc un singulier et difficile exploit technique.

L'astéroïde imprime sa marque

Les structures d'impact sont l'un des huit thèmes de l'ICDP. Les astéroïdes traversent l'espace à la vitesse de plusieurs milliers de km/h. Si la probabilité d'en voir un entrer en collision avec la Terre au cours d'une vie humaine est extrêmement rare,



Des ouvriers sondeurs posent un manchon sur la tige de forage durant le projet du cratère de Chicxulub, dans la péninsule mexicaine du Yucatan



Un astéroïde tueur livre ses secrets

Il y a 25 ans, Antonio Camargo, géologue pétrolier, menait une étude en mer au large de la côte nord du Yucatan, au Mexique. Les données qu'il recueillit révélaient des anomalies gravitationnelles sous forme de cercles gigantesques ayant près de 100 km de rayon, à proximité du village côtier de Chicxulub. Les formations rocheuses ne pouvaient avoir une origine volcanique mais pouvaient-elles être les vestiges d'un cratère d'impact ? C'était bien le cas. Camargo était tombé par hasard sur un cratère d'impact qui, progressivement enterré sous l'érosion pendant 65 millions d'années, avait échappé à l'attention des géologues de terrain. Depuis cette découverte se sont multipliées les données scientifiques prouvant que le cratère aurait été provoqué par un astéroïde tueur concomitant avec la fin des dinosaures.

Dans le cratère, les débris produits par la chaleur et la pression extrêmes de l'impact présentent un intérêt considérable pour les scientifiques. Ce ne sont pas uniquement des roches terrestres datant d'avant l'impact, remaniées et fondues ensemble par la chaleur et l'onde de choc de l'impact. Elles contiennent aussi des fragments du corps même qui a provoqué l'impact.

Les éléments particulièrement intéressants sont les isotopes rares, qui étaient abondants lors de la formation du système solaire mais ont peu à peu disparu des roches terrestres au cours des temps géologiques.

Pendant l'hiver 2001-2002, l'ICDP a entériné une proposition de forage dans le bord du cratère d'impact, à environ 62 km du centre. Le puits Yaxcopoil-1 a été foré à quelque 40 km au sud-ouest de Mérida, capitale du Yucatan, sur 1 510 m de profondeur. Les 795 premiers mètres consistaient en roches carbonatées tertiaires, datant d'après l'impact, et dans les 615 m suivants, le trépan traversa des roches crétacées d'avant l'impact. Prise en sandwich entre elles, se trouvait une couche d'impactites de 100 m d'épaisseur, composée de brèches d'impact fondues et de suévite. Elles étaient loin d'être fraîches car elles avaient subi d'importantes altérations chimiques durant 65 millions d'années.

Plus de 900 m de carottes ont été prélevées, et l'ensemble du puits a été équipé d'instruments géophysiques de diagraphie afin d'obtenir une série continue de données pétrophysiques *in situ* de la paroi du puits. Les roches recueillies et les données de géophysique sont devenues des trésors pour les géologues.

elle n'est cependant pas nulle. Pendant les 4,5 milliards d'années de l'histoire de la Terre, beaucoup de collisions célestes ont eu lieu. Le fait, par exemple, que l'axe de rotation de la Terre soit incliné par rapport au plan de l'écliptique trouverait une explication très élégante dans un impact subi par notre planète en sa prime jeunesse. La lune, quant à elle, serait née d'un éclat de la très jeune Terre après une semblable collision.

Des astéroïdes et des météorites ont heurté la surface de la Terre même récemment et laissé des empreintes indubitables. Jusqu'ici les scientifiques en ont dénombré 174, non seulement sur les continents mais aussi au fond des mers (voir *Un astéroïde tueur livre ses secrets* et *Lire dans un lac les archives du climat*).

Selon la dimension de l'objet céleste, les effets d'une collision avec la Terre peuvent être véritablement destructeurs. Au moment de l'impact, presque toute l'énergie cinétique de l'astéroïde se convertit en onde de choc, accompagnée d'une énorme production de chaleur.

Le brasier peut être assez puissant pour vaporiser en quelques minutes le manteau de la Terre, couche après couche. Les conséquences en sont terribles. La fusion des roches ne laisse pas seulement une profonde cicatrice à la surface de notre planète. Des milliards de tonnes de poussière et de cendres sont également propulsées jusque dans les couches les plus élevées de l'atmosphère, où elles atténuent ou bloquent complètement la lumière du soleil pendant des décennies.



©Christian Koebert

Cette photo aérienne du lac Bosumtwi, au Ghana, montre la structure circulaire et fermée de son bassin, né de l'impact d'une météorite, il y a environ 1 million d'années

Faites connaissance avec les extrémophiles

Le record d'altitude atteint par les oiseaux de proie lorsqu'ils s'élèvent sans peine dans les courants thermiques ascendants est généralement considéré comme la limite supérieure de la biosphère. Sa limite inférieure se situe là où le sol riche en humus rencontre le substrat rocheux – le plus souvent à quelques mètres à peine sous la surface. Mais ces définitions sont-elles correctes ? De nombreux indices donnent à penser que la biosphère se prolonge bien plus profondément à l'intérieur de la Terre qu'on ne le croit généralement.

Les extrémophiles ont été découverts dans les années 1970. Ces microorganismes vivent dans des conditions que l'on imagine stériles ou du moins très hostiles à la vie. Les thermophiles des sources chaudes du parc national de Yellowstone, aux États-Unis, ont été parmi les premiers à être reconnus comme tels. Ces bactéries et archées peuvent survivre à des températures de 50°C ou plus.

Une autre sorte de thermophiles, les archées chemosynthétiques, a été découverte autour des événements hydrothermaux sous-



Lire dans un lac les archives du climat

Les meilleures archives du climat se trouvent parfois dans les sédiments des lacs d'eau douce. Ils contiennent un mélange de pollen, de débris végétaux et minéraux qui permettent aux paléontologues de reconstituer les conditions climatiques d'un lointain passé.

L'un des meilleurs exemples en est le lac Bosumtwi du Ghana. Ce lac, d'une circularité presque parfaite, a un diamètre de 8 km. Sa profondeur maximale est d'environ 80 m, mais ses sédiments s'accumulent sur plus de 300 m en dessous du fond actuel du lac. Ce lac est né il y a un peu plus d'un million d'années, de l'impact d'une grosse météorite. Deux facteurs ont préservé ses sédiments en l'état : la relative élévation du bord de son cratère et le fait qu'il n'est parcouru par aucune rivière. Il se prête donc de manière idéale aux études climatiques. Comme il se situe dans la zone des moussons de l'Afrique de l'Ouest, ses sédiments devraient nous éclairer sur l'évolution du climat dans cette partie du monde au cours du dernier million d'années.

Entre juillet et octobre 2004, une plate-forme de forage flottante a été amenée au Ghana, et plus de 24 puits ont été forés dans le lac. Plus de 1 800 m

de carottes ont été recueillies pour l'étude du climat. La plus longue carotte d'un seul tenant consistait en 294 m de boues laminées. Le pollen, les débris et les minéraux de chaque couche annuelle – une varve – fournissent des informations sur le temps qu'il a fait et l'état de l'environnement pendant une année. Pour les scientifiques, ces varves se lisent comme un livre, chaque page livrant les secrets du climat passé.

Comme le lac Bosumtwi est en réalité une nappe d'eau qui occupe un cratère d'impact, plusieurs puits ont été forés à travers les sédiments

jusqu'aux roches sous-jacentes du craton de l'Afrique de l'Ouest, âgé de 2,2 milliards d'années. Comme dans le cas du Chicxulub (voir *Un astéroïde tueur livre ses secrets*), les couches comprises entre le sédiment et le sous-bassement ont révélé des informations sur l'impact lui-même.

À près de 10 000 km à l'ouest du lac Bosumtwi, de l'autre côté de l'Atlantique, se trouve une autre petite nappe d'eau. Elle détient la clé de l'histoire du climat de l'Amérique centrale tropicale. Caché dans la jungle des basses terres du nord du Guatemala, le lac Peten Itza fait le pendant du lac Bosumtwi, à un hémisphère de distance. Les deux lacs se situent dans la zone de convergence intertropicale, au climat humide, qui se déplace au cours de l'année. Il s'ensuit un régime de pluie nettement saisonnier dans ces deux localités. Les chercheurs espèrent, en comparant les varves du lac Peten Itza et celles du lac Bosumtwi, déterminer les similitudes et les différences entre les régimes climatiques de l'Afrique tropicale et de son pendant en Amérique centrale.

Avec la plate-forme de forage, neuf puits ont été forés au début de 2006 dans les sédiments du lac Peten Itza. Ils ont révélé qu'au cours des 20 000 à 30 000 dernières années, le climat des basses terres du Guatemala était passé plusieurs fois, et rapidement, d'une phase sèche à une phase très humide et vice-versa. Le plus radical de ces changements a eu lieu à la fin de la dernière glaciation, quand des glaciers situés à des milliers de kilomètres plus au nord ont fondu. Et même les débuts de l'agriculture et le déclin des cultures Maya, sous l'effet de la sécheresse, sont archivés dans les couches de sédiments du lac.

marins du rift des Galapagos, éperon de la dorsale du Pacifique-Est. L'énergie du métabolisme de ces microbes provient, non pas de la photosynthèse, mais de l'oxydation du méthane ou de molécules inorganiques, comme le sulfure d'hydrogène. On a jusqu'ici étudié au moins une douzaine de classes d'extrémophiles, depuis les acidophiles jusqu'aux xérophiles. Les premiers recherchent les liquides extrêmement acides, dont le Ph ne dépasse pas 3, alors que les xérophiles peuvent se développer dans des conditions totalement sèches et desséchantes, comme dans le désert de l'Atacama, entre les Andes et le Pacifique, en Amérique du Sud.

La limite supérieure connue à l'heure actuelle pour la température supportée par le vivant dans l'ensemble de la biosphère terrestre est de 121°C. Cette température a progressivement augmenté année après année, à mesure que l'on cultivait de nouveaux thermophiles provenant de milieux toujours plus chauds. En prenant cette température comme base de calcul, on peut estimer les limites des conditions de vie des thermophiles au sein de la Terre. Toute personne qui est descendue

dans une mine profonde sait qu'il fait d'autant plus chaud que l'on descend plus bas. Les gradients géothermiques, unités de mesure de cette élévation de la température, sont de l'ordre de 10 à 60°C par km. Si nous mettons en équation la limite supérieure de température supportable pour le vivant, les gradients géothermiques ainsi que les températures moyennes à la surface de la Terre – entre 0 et 25°C –, nous trouvons que des thermophiles pourraient bien exister jusqu'à 12 km sous la surface. Le méthane est, très probablement, « l'aliment » de ces bactéries (voir *Microbes friands de méthane*).

Jouer avec le feu

L'un des objectifs de la volcanologie est de réduire les risques que constituent les quelque 600 « montagnes de feu » actives de par le monde. Les chercheurs ont mis au point des moyens de surveiller d'assez près les volcans pour déceler des signes d'éruption imminente. Depuis une dizaine d'années, de nombreuses vies humaines ont été épargnées parce que les scientifiques avaient su prévoir l'activité de volcans dangereux. Il arrive néanmoins que les scientifiques les plus aguerris aient perdu la vie dans la violence d'une éruption.

Rares sont les volcanologues dont les travaux exigent qu'ils soient à proximité immédiate d'une montagne en éruption. La plupart de nos connaissances sur le fonctionnement interne des volcans a été déduite de l'examen des roches et des dépôts éjectés par d'anciennes éruptions. En étudiant la minéralogie et la pétrologie des roches volcaniques et ignées, les chercheurs obtiennent des informations sur la température et la composition chimique du mélange en fusion dans l'ancienne chambre magmatique. L'étude géologique du voisinage immédiat d'un volcan permet de déterminer sa portée maximale. Savoir jusqu'où les flux de lave et les coulées pyroclastiques se sont autrefois frayé un chemin sur le flanc du volcan, aide à prévoir l'étendue des zones de danger potentiel pour de futures éruptions.

Les régions volcaniques sont des trous de serrure donnant sur le feu infernal qui brûle dans les entrailles de la terre. Forer n'est déjà pas facile, mais forcer les volcans à divulguer leurs secrets en pénétrant à l'intérieur constitue un singulier défi technique. Comment forer dans une roche qui était encore en fusion il y a à peine quelques semaines ou quelques mois ? Comment empêcher le turbulent magma des profondeurs de découvrir votre trou et d'en profiter comme d'un conduit pour une nouvelle éruption ?

Les scientifiques et les entrepreneurs de forages ont joué littéralement avec le feu en creusant plusieurs puits dans le volcan Kilauea de Hawaï. En 1959, il était entré en éruption avec de spectaculaires fontaines de lave, en abandonnant un lac de lave en fusion. En quelques semaines, le lac s'était couvert d'une fine



Microbes friands de méthane

Le méthane est un hydrocarbure simple, abondant dans les régions de pergélisol de l'Arctique, non pas sous forme gazeuse mais, lorsqu'il est mélangé à de l'eau, sous la forme solide d'un hydrate gazeux. Pour certains, ces hydrates gazeux constituent une importante source d'énergie du futur. D'autres les voient comme une menace pour le climat actuel car, s'ils se dissolvent, une énorme masse de méthane, gaz à effet de serre, envahira l'atmosphère. On a également envisagé la probabilité que des microbes extrémophiles vivent dans ces hydrates.

C'est pour étudier ces questions, entre autres, que les géoscientifiques ont foré, en décembre 2001, trois puits parallèles dans le champ d'hydrates de gaz de Mallik, du delta du Mackenzie, dans l'Arctique du nord-ouest canadien, avec l'aide de l'ICDP. Une couche de plus de 200 m contenant ces gaz est prisonnière du pergélisol à 900 m de profondeur. Des microbes friands de méthane ont été trouvés en 2002 dans plusieurs carottes remontées pendant la campagne de forage. Comme leur concentration était nettement inférieure à ce que l'on attendait, les résultats ont encore épaissi le mystère des extrémophiles dans les profondeurs de la biosphère.

Encore plus étrange que les microbes vivant dans les hydrates de gaz est l'hypothèse concernant le graben de l'Eger, structure de rift située entre l'Allemagne et la République tchèque. Des chercheurs y ont constaté une forte corrélation entre l'intensité d'un essaim de séismes et la teneur en méthane des eaux de source : plus les petits séismes étaient fréquents, plus la teneur en méthane augmentait. Le lien entre ces deux faits apparemment étrangers est probablement les bactéries qui vivent dans les grandes profondeurs. À chaque petit séisme, de légères fissures se forment dans le granit sous-jacent de la région de l'Eger. L'hydrogène, qui se forme lorsque la radioactivité naturelle de la roche décompose l'eau en ses deux éléments, peut alors s'échapper. Les bactéries du fond l'engloutissent, ce qui donne du méthane comme sous-produit de leur métabolisme. Plus il y a de séismes, selon cette théorie, plus il se libère d'hydrogène, plus les bactéries ont de « nourriture » et produisent du méthane. Trouver ces bactéries et étudier leur métabolisme, tel est l'un des objectifs d'un projet de forage envisagé pour le graben de l'Eger.

Récupérer les éléments microbiologiques dans les carottes de forage exige une manipulation stérile et l'extraction des fluides. D'autres précautions sont indispensables au cours du forage pour éviter que les microbes de la surface ne contaminent le puits

4

Planète **SCIENCE**, Vol. 7, No. 2, Avril-juin 2009

D'où vient Hawaï ?



En 1999, une plate-forme fut installée sur la Grande île pour tenter de résoudre le mystère des origines d'Hawaï. Les laves de Mauna Kea, refroidies de longue date, furent forées en plusieurs temps. Fin 2004, le puits avait atteint la cote de 3 340 m. Du fait que les foreurs avaient remonté une carotte presque complète, les échantillons de roches récupérés fournissent le plus long des enregistrements stratigraphiques ininterrompus que nous ayons jamais obtenus d'un volcan insulaire, et qui remonte à 600 000 ans au moins. Cette carotte représente non seulement la structure du volcan lui-même, mais aussi un échantillon précis du panache. Au fur et à mesure du lent déplacement de Mauna Kea au-dessus du panache, des montées de magma d'âges différents et venues de diverses profondeurs atteignaient l'édifice et s'empilaient sur les précédentes, comme des crêpes sur une assiette. Chaque couche a ses caractéristiques qui, considérées dans leur ensemble, fournissent une image précise de l'évolution du Point chaud.

On estime que ces Points chauds sont à l'origine non seulement des chapelets d'îles et de monts sous-marins, mais également des épisodes de volcanisme massif qui ont inondé plusieurs vastes zones de continents. Les traps du Deccan, par exemple, couvrent une grande région de l'Inde centrale, tandis que des basaltes d'inondation constituent le sous-bassement rocheux de la majeure partie de la Sibérie au nord du 60^{ème} parallèle. Il est possible que des panaches du manteau y aient percé des trous en brûlant l'épaisse croûte continentale avant d'inonder de lave mafique la surface, donnant lieu à ce que l'on nomme « Les grandes provinces ignées ». Une autre zone de ce type couvre une partie des États d'Idaho, Washington et Oregon, dans le nord-ouest des Etats-Unis. Là, selon l'hypothèse du panache, les basaltes des fleuves Columbia et Snake ont un rapport avec le Point chaud qui alimente encore les volcans et les geysers du Parc national de Yellowstone.

Coulée de lave de Mauna Kea. Si l'on compte la distance depuis le fond du Pacifique, ce volcan mesure 11 km de haut !



©Ph. Bouysson (2007) *Explique-moi la Terre - Editions UNESCO/NANE*

croûte de roche solidifiée. À peine un an après la fin de l'éruption, une plate-forme de forage était placée sur cette couche de roche dangereusement fine. Les chercheurs voulaient savoir si, en dessous, la lave était encore liquide. Après les sept premiers mètres, l'outil rencontra de la lave en fusion à une température de 1100°C, record qui, en 40 ans, n'a toujours pas été battu.

Les forages dans une zone volcanique active (un Point chaud) nous aident non seulement à comprendre les modes de fonctionnement de ces montagnes de feu mais aussi à réduire les effets des éruptions. Ils nous permettent également d'exploiter les vastes réservoirs de géothermie et nous font comprendre comment se forment les minéraux sous l'effet du feu qui brûle à l'intérieur de la Terre (voir *Comment le charbon devient diamant*).

Comment le volcanisme peut-il se manifester loin des zones volcaniques ?

La majorité des quelque 600 volcans actifs du monde se situent sur les marges des immenses plaques de lithosphère qui constituent la croûte terrestre. Prenez, par exemple, les volcans italiens comme le dangereux Vésuve, près de Naples. Ils se situent à la frontière des plaques africaine et européenne. Le mont Unzen du Japon, dont le conduit a été foré en 2004 par un projet de l'ICDP, se trouve sur la ligne de rencontre entre les plaques du Pacifique et de l'Eurasie. Les volcans des Andes, comme le gigantesque Cotopaxi de l'Équateur et le Villarica du Chili méridional, indiquent en pointillés la ligne de démarcation entre les plaques du Pacifique et de l'Amérique du Sud.

Sur ces marges convergentes, le volcanisme est dû, selon la théorie de la tectonique des plaques, au fait que la croûte de l'une s'enfonce sous le manteau de l'autre, par subduction. Elle commence alors à fondre, et les roches en fusion, brûlantes, se mettent à flotter pour revenir à la surface, où leur éruption érige des volcans.

Même l'Islande, île au milieu de l'océan comme Hawaï – se situe sur une limite de plaques chevauchant la marge entre l'Europe et l'Amérique du Nord. Mais c'est une marge divergente, où les deux plaques s'éloignent l'une de l'autre, en laissant derrière elles une zone de croûte très fine. Les roches en fusion du manteau peuvent facilement perforer cette zone de faiblesse et donner naissance à des îles comme l'Islande, ou les Açores, également dans l'Atlantique. Qu'ils soient convergents ou divergents, les bords de ces

plaques sont comme des coutures à claire voie de la croûte terrestre qui laissent le magma monter jusqu'à la surface.

Pourtant, Hawaï se situe loin de toutes ces coutures. Entre le chapelet d'îles et la frontière de plaque la plus proche, en Californie, il n'y a rien d'autre que les quelque 3 000 km de la plaque ininterrompue du Pacifique. Comment diable, se demandent beaucoup de scientifiques, le volcanisme peut-il se manifester aussi loin de toute zone volcanique connue ?

Une réponse partielle à cette question se trouve à l'ouest et au nord de la Grande île d'Hawaï. En considérant l'âge de ses sœurs du nord-ouest, les chercheurs ont constaté que les îles deviennent plus vieilles en proportion de leur éloignement des volcans actuellement en activité. Les roches de Maui, voisine immédiate de la Grande île, ont environ 1 million d'années, celles de Honolulu, sur Oahu, environ 3,5 millions d'années. Cette corrélation entre âge et distance se poursuit tout au long du chapelet d'écueils, de récifs et de monts sous-marins du nord-ouest de Hawaï, jusqu'à atteindre les 81 millions d'années à l'extrémité des monts sous-marins de l'Emperor, près de la fosse des Aléoutiennes.

Un chalumeau magmatique

Il y a environ 35 ans, une hypothèse a été avancée pour expliquer cette corrélation. Un étroit panache de magma très chaud, en fusion, s'élèverait des profondeurs du manteau. Agissant comme un chalumeau, sa chaleur transpercerait la croûte océanique sus-jacente. Bien que la plaque se déplace au-dessus de



Des géoscientifiques font un pari

**FAILLES
ACTIVES
ET MÉCANISME
DES SÉISMES**

En 1985, Bill Bakun et Allan Lindh, chercheurs en tremblements de terre, de l'United States Geological Survey (USGS) firent un pari. Ils eurent l'audace de prédire qu'avant huit ans un tremblement de terre de magnitude 6 frapperait le long de la faille de San Andreas, sous la petite ville californienne de Parkville, à mi-chemin entre San Francisco et Los Angeles. Plus de 11 ans après l'expiration de ce délai, la ville fut finalement ébranlée par un événement de ce type. Un mardi matin de fin septembre 2004, un tremblement de terre, de la magnitude 6 prévue frappa, heureusement sans provoquer de dommages.

Du fait que le séisme se soit produit si longtemps après la date prévue, on pourrait dire que la prévision avait totalement échoué. Mais avec le recul, ce fut peut-être là le début de l'une des tentatives les plus intéressantes des sciences modernes de la Terre. En 1985, cette annonce avait fait sensation. Elles découvraient sans arrêt des signes ou de nouveaux paramètres qui pouvaient passer pour des indices de la survenue de tremblements de terre. Ce pouvait être la conduite étrange du bétail ou des animaux de compagnie aussi bien que le changement de concentration des gaz dissous dans les eaux souterraines.

Parkfield semblait l'endroit idéal pour une vérification scientifique de ces hypothèses. En quelques années, la ville fut truffée de centaines d'instruments installés par les scientifiques des universités, des établissements de recherche et des services gouvernementaux. Depuis le niveau de l'eau des puits jusqu'aux tensions de la croûte terrestre, les instruments mesuraient tous les paramètres géophysiques imaginables, dont certains ne semblaient avoir aucun rapport avec les tremblements de terre.

La faille de San Andreas passe pour être l'une des zones sismiques les plus dangereuses du monde. Elle a plusieurs fois provoqué de grands tremblements de terre destructeurs dans la zone de San Francisco et de Los Angeles avec ses faubourgs. Sur presque toute la longueur de cette faille de 1 200 km, il ne s'est dégagé aucun schéma régulier dans la date d'apparition des événements. Parkfield fait exception à cette observation avec le rythme apparemment régulier de ses séismes. En dépit des études

effectuées depuis plus d'un siècle sur la faille de San Andreas et plusieurs autres failles sismiques, les chercheurs n'ont pas bien élucidé les processus physiques qui se produisent dans la zone précise de la rupture sismique. Alors que les techniques modernes de mesure et de modélisation permettent aux sismologues de recréer la complexité de la rupture ayant provoqué un séisme après son apparition, ils n'ont pas d'instruments qui prévoient quand, où et comment la prochaine secousse aura lieu. Insuffisantes sont les connaissances sur les conditions physiques et chimiques à l'intérieur d'une zone sismogénique de faille pour que l'on puisse prévoir ce qu'il adviendra.

Au cours des années où la croûte terrestre sous Parkfield ne connut pas de forte secousse, une équipe de scientifiques de Stanford University et de l'USGS – restreinte mais décidée – élaborait de nouveaux projets : ils allaient forer profondément dans la faille la plus célèbre du monde. Et comme aucune autre section de la faille n'avait été aussi bien étudiée que la zone de Parkfield, l'équipe la proposa comme l'endroit idéal.

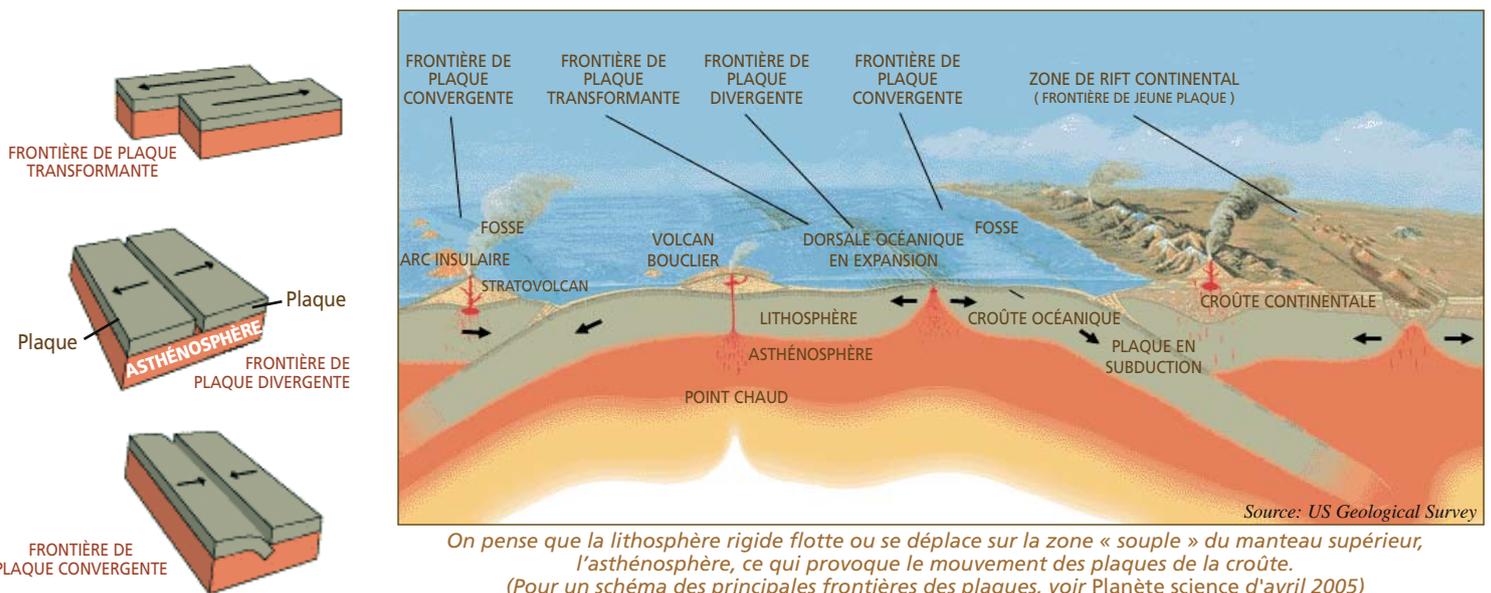


Une scientifique inspecte les carottes prélevées dans la faille de San Andreas, en Californie (États-Unis)

Le forage proprement dit commença en 2002 par un puits pilote. Situé à 2 km de la faille, il atteignit la profondeur de 2 200 m. En juin 2004, le forage du puits principal débuta à quelques mètres seulement du puits pilote. Lorsque l'outil arriva à presque 2 km de profondeur, les responsables le dévièrent de la verticale pour l'orienter vers la faille. En août 2005, à plus de 3 km de profondeur, il pénétra dans la faille. On fut surpris de découvrir qu'il n'y avait pas une simple interface relativement étroite où les blocs voisins – les plaques nord-américaine et Pacifique – coulissent l'une par rapport à l'autre. Les déplacements opérés pendant des millions d'années avaient produit une épaisse zone de roches fragmentées et de croûte ameublie.

En 2007, trois forages furent effectués à différentes profondeurs dans la zone de failles des séismes. Certains atteignirent une poche où de petits tremblements de terre se produisent à intervalles réguliers.

Le dernier d'entre eux sera rempli d'instruments qui vont enregistrer, à la source, la naissance des séismes. Cet observatoire en profondeur au sein d'une zone sismogénique constituera une première pour les géosciences.



On pense que la lithosphère rigide flotte ou se déplace sur la zone « souple » du manteau supérieur, l'asthénosphère, ce qui provoque le mouvement des plaques de la croûte. (Pour un schéma des principales frontières des plaques, voir Planète science d'avril 2005)

ce Point chaud, le panache, quant à lui, est extrêmement régulier et immobile. Il en résulte un alignement des trous opérés par le chalumeau, un chapelet d'îles qui enfiler des volcans comme un rang de perles. Cela paraît logique, mais ce n'est qu'une hypothèse non encore prouvée.

Collisions souterraines

La tectonique des plaques n'est connue que depuis un demi-siècle. Les formidables forces internes qui construisent et détruisent des montagnes ont joué un grand rôle dans la conception de cette théorie. Le moteur de ces forces se trouve dans les puissants

courants de convection qui – comme l'eau qui bout dans une casserole – circulent dans tout le manteau de la Terre. La croûte – placage ultrafin à la surface externe de ce maelstrom de température et de pression élevées – est écartelée par ces courants et morcelée en une douzaine de plaques grandes comme des continents.

Compte tenu de la chaleur considérable stockée à l'intérieur de la Terre, le manteau est souvent décrit comme « un profond océan de magma de roches en fusion ». Or, si on a prouvé l'existence d'une fusion localisée, ce n'est absolument pas l'ensemble du manteau qui est en fusion. Ses roches ont, en fait, la viscosité du verre, substance pensée généralement comme rigide et fragile. Mais le verre coule effectivement, si l'on sait attendre : après 100 ans ou plus, une vitre deviendra plus fine en haut qu'en bas, de façon non pas visible mais mesurable. À l'échelle géologique, cette vitesse extrêmement lente finit par donner lieu aux courants de convection du manteau. Les plaques de la surface de la Terre, bien plus froides et moins denses, flottent sur ces courants de roche chaude et visqueuse.

Les géoscientifiques ne comprennent toujours pas parfaitement la nature des forces qui animent le mouvement des plaques. Quoiqu'il en soit, les plaques se percutent ou déplacent leurs voisines pour avancer, dans les zones de collision ou – en termes techniques – les marges convergentes. Il arrive qu'une plaque soit coincée sous une autre, c'est le processus de subduction. La plaque descendante peut être suivie jusqu'à 700 km sous la surface, si l'on étudie l'apparition des tremblements de terre.

Dans ces zones de subduction, plus les roches de la croûte sont enterrées profondément, plus elles s'échauffent et sont comprimées par la pression de la roche sus-jacente et la vitesse acquise dans la collision. Le plus souvent, la pression monte tellement que les roches de la croûte changent de nature. Sous l'effet de la pression et de la chaleur, qui transforment les minéraux, leur structure cristalline est remaniée ou leur composition chimique partiellement altérée. C'est le phénomène du métamorphisme. Comme il y a partout des roches métamorphosées, nous savons que le phénomène a dû se produire tout au long de l'histoire de la Terre. Chaque morceau de marbre, de quartzite et tous les gneiss sont le résultat de ces transformations.

Grâce à la tectonique des plaques, les chercheurs expliquent assez facilement la façon dont des morceaux de la croûte s'enfoncent à des profondeurs où la pression et la température sont si élevées que le métamorphisme intervient. Mais l'une des pièces du puzzle

Comment le charbon devient diamant

Les roches qui ont subi un métamorphisme d'ultra haute pression (UHP) ont connu des conditions si rudes – plus de 20 000 fois la pression normale de l'air au niveau de la mer, et des températures supérieures à 500 °C – que le charbon ordinaire se change en diamant et le quartz commun en coésite. Alors que le métamorphisme normal, à basse pression, se produit partout, ce processus UHP semble relativement rare.

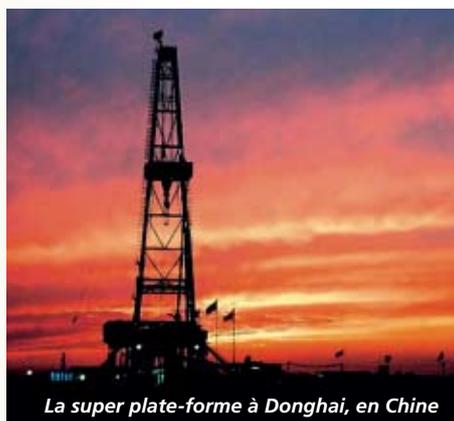


À l'heure actuelle, on ne connaît dans le monde que 20 régions (ou terranes) contenant des roches qui, à un moment de leur vie, ont subi cette espèce d'hypermétamorphisme. Ces « terranes » UHP se signalent par la présence d'éclogites provenant du métamorphisme de haute énergie de roches ignées mafiques (basalte ou gabbro le plus souvent) entraînées sous le manteau dans une zone de subduction. Les éclogites contiennent des cristaux de grenat, rouge foncé, et un minéral très résistant, le zircon. Comme ces cristaux contiennent eux-mêmes des micro-diamants et de la coésite à l'état d'impuretés, les scientifiques sont certains qu'ils ont subi une mutation UHP.

Parmi les 20 régions contenant des éclogites UHP, celle de la Chine est de loin la plus grande. La ceinture montagneuse Sulu-Dabie-Altun commence au nord de Nanjing, sur le littoral de la mer Jaune. Elle s'oriente d'abord vers le sud avant de tourner à l'ouest, et s'étire jusqu'aux montagnes de l'Altun, en Chine occidentale. Sa longueur totale dépasse les 4 000 km.

En 2001, le Programme chinois de forages scientifiques continentaux commença à creuser dans cette ceinture afin d'étudier la complexité du métamorphisme UHP et de résoudre la question de savoir comment ces roches plongent et remontent à travers la croûte. Un site a été choisi dans le canton de Donghai, province de Jiangsu, près de l'extrémité orientale de cette gigantesque ceinture. Lorsque le projet a pris fin, près de quatre ans plus tard, un puits avait été creusé en son cœur jusqu'à 5,1 km de profondeur. Dans de nombreuses carottes ramenées à la surface les chercheurs ont trouvé des zircons et des coésites, produits du métamorphisme UHP, datant d'environ 230 millions d'années. Cela avait dû se produire lorsque deux blocs de la croûte et du manteau supérieur, comme des plaques – les blocs de la Chine du Nord et du Yangtsé – sont entrés en collision, à l'ère mésozoïque. Ces métamorphites UHP étaient ensuite remontées des profondeurs, à peine 20 millions d'années après leur formation. Dans les échantillons tirés du puits, les scientifiques ont trouvé plus de 50 sortes de minéraux, parmi lesquels du fer, du nickel et du chrome natifs.

Si la ceinture des UHP de Chine est un vestige du mésozoïque, beaucoup d'autres régions du monde connaissent de nos jours ce phénomène. Quelque part, dans des zones de collision active, comme les zones de subduction du Japon et des Andes, les roches comprimées jusqu'à leurs limites passent d'un état à un autre. L'un des objectifs déclarés de l'ICDP pour ces régions est non seulement de remonter des minéraux rares d'UHP mais aussi d'observer les processus à l'œuvre dans l'érection des montagnes sur les zones de collision qui façonnent la Terre.



©Luigi Burlini



Eau supercritique et vapeur gratuites

L'Islande, où les volcans avoisinent les glaciers, se situe à cheval sur la dorsale médio-atlantique, qui marque par ailleurs la frontière tectonique entre l'Amérique du Nord et l'Europe. Les Islandais utilisent depuis des siècles la chaleur de la Terre, grâce aux nombreuses sources parfaitement gratuites.

Mais une chose est de se baigner dans une source chaude minérale, par une journée froide, juste au sud du cercle arctique, une autre est d'utiliser l'énergie géothermique à l'échelle industrielle. En Islande, de nombreux puits ont été creusés pour recueillir la chaleur de la Terre qui, sur cette île se manifeste sous la forme d'eau chaude ou de vapeur. Plus de 80 % des maisons individuelles, des immeubles d'habitation et de bureaux y sont chauffés par la géothermie. Près de 20 % de l'électricité produite en Islande est d'origine géothermique. Le reste provient de l'énergie hydraulique, et seulement 0,1 % de la combustion de minéraux fossiles.

Mais même dans un pays comme l'Islande, où les ressources en énergies renouvelables sont prédominantes, il est encore possible de faire mieux. Il reste en effet à étudier des questions fondamentales du point de vue scientifique concernant la condition et le mouvement des fluides de la croûte terrestre. C'est pourquoi l'ICDP collabore au Projet islandais de forages profonds sur la péninsule de Reykjanes au sud-ouest, et dans le domaine volcanique de Krafla, au nord-est. Ce projet a été lancé de concert par le gouvernement et l'industrie islandaise de l'énergie. Il a pour objectif de rentabiliser l'exploitation des ressources géothermiques en augmentant le rendement des puits par rapport au coût du forage.

À l'heure actuelle, les puits de géothermie à haute température produisent, en général, un mélange en deux temps d'eau et de vapeur à des températures allant de 200 à 320°C. En Islande, creuser un puits de 2,5 km de profondeur, produisant par exemple de la vapeur sèche à quelque 235°C et pouvant fournir à peu près 5 MW d'électricité, coûte environ 4 millions de dollars. Si l'on pouvait exploiter un réservoir ayant une température et une pression bien supérieures, la production d'énergie électrique en serait considérablement améliorée.

L'une des sources de cette énergie « non conventionnelle » est l'eau supercritique. Elle apparaît lorsque l'eau est chauffée à plus de 375°C tout en étant pressurisée à 22 mégapascals, soit environ 220 fois la pression normale de l'air à la surface de la Terre. C'est le point où disparaît la distinction entre liquide et vapeur, car l'eau y atteint un état totalement nouveau : elle devient supercritique. Un puits creusé dans un tel réservoir pourrait produire jusqu'à dix fois plus d'électricité qu'un puits conventionnel ayant le même débit. Ce gain amortirait très vite le surcoût du forage qui, en Islande, est estimé à 9 millions de dollars.

Les géologues pensent que l'eau supercritique joue un rôle très important, et pas seulement dans la circulation des minéraux au sein de la croûte terrestre. Elle intervient peut-être dans la formation même des dépôts de minerais. Ses propriétés physiques et chimiques sont tellement différentes de celles de l'eau chaude qu'elle filtre les éléments minéraux de la roche bien plus rapidement et selon des modalités tout à fait différentes. C'est seulement par des forages dans les réservoirs d'eau supercritique que peuvent être étudiés ces phénomènes. Le projet de forage d'Islande est un laboratoire naturel à cet égard, car il vise à forer, dans les deux ans à venir, plusieurs puits de 4 et 5 km de profondeur en régime supercritique. Un puits test de 3,1 km a été achevé en 2005. L'eau du fond n'avait pas encore exactement atteint l'état supercritique, mais elle était au moins à 300°C.



Des geysers comme celui-ci, en Islande, témoignent de l'énorme énergie thermique stockée dans la Terre

reste sans réponse : comment les métamorphites, produits de ce changement, finissent-elles par revenir à la surface de la Terre ? Quelle force est capable de les ramener d'une profondeur de 50 km ou davantage ?

Un couple pas si étrange

Pour tout le monde, l'idée de forage évoque les puits de pétrole et de gaz naturel. Évidemment, depuis que le premier boom pétrolier a ébranlé le monde en 1859 dans l'État américain de Pennsylvanie, la majorité des puits a, bien sûr, été forée soit pour chercher des hydrocarbures soit pour les extraire et les envoyer vers les raffineries.

Lorsque l'on totalise le grand nombre de puits creusés à la recherche de minerais comme le charbon et autres gisements, il est à peu près certain que 99 % des puits profonds ont été forés non pour la recherche scientifique mais à des fins économiques. Ceci dit, et en comparant les vastes investissements des industries pétrolières et minières aux maigres financements des sciences de la terre, on est tenté de demander pourquoi une organisation dédiée au progrès de la science et à la connaissance de la Terre comme l'ICDP s'avise de forer en quête de ressources naturelles.

« Nous n'allons pas rivaliser avec l'industrie en creusant des puits à finalité purement économique », déclare Rolf Emmermann, président du comité exécutif de l'ICDP. Mais il souligne les synergies inhérentes à la collaboration de la science avec l'industrie. Les compagnies et leurs services techniques de terrain possèdent une expérience inégalée dans le forage et la diagraphie des puits ainsi que dans l'interprétation des résultats. En même temps, les géoscientifiques ont un appétit quasi insatiable pour l'exploration de l'inconnu. Notamment quand il s'agit de creuser profond dans des milieux difficiles, par une température élevée, dans des roches abrasives ou des fluides corrosifs, ces deux communautés ont sans aucun doute beaucoup à apprendre l'une de l'autre.

Serions-nous assis sur la solution à nos problèmes énergétiques ?

Nous savons tous désormais que pomper indéfiniment du pétrole brut dans les réservoirs souterrains n'apportera pas la réponse à nos besoins énergétiques futurs. Il faut que des sources renouvelables remplacent, partout où c'est possible, les combustibles fossiles. De même que pour le charbon, le pétrole et le gaz, les plus vastes réservoirs d'énergie renouvelables, et de loin, se trouvent au sein de la Terre. Selon les estimations faites en 2004 par l'Agence internationale de l'énergie, les quantités d'énergie géothermique exploitables par les technologies actuelles seraient deux fois plus élevées que celles de l'ensemble des autres sources renouvelables – vent, soleil, biomasse et hydraulique. Les scientifiques de cette agence ont par ailleurs calculé la quantité de chaleur stockée dans les 3 km supérieurs des continents : 12×10^{12} gigawatts/heure.



Projets de forage scientifique ICDP

La date d'achèvement des projets est donnée entre parenthèses

Si cette « chaleur continentale » pouvait être récupérée en totalité, elle pourrait satisfaire les besoins énergétiques de l'humanité pour 100 000 ans au rythme actuel de la consommation, même compte tenu du fait que les continents couvrent seulement environ le quart de la surface de la Terre. Il est évident que cette chaleur ne peut être tout entière exploitée, mais tout propriétaire de sa maison en Europe centrale qui utilise une pompe à chaleur le sait : il est assez facile d'utiliser au moins une partie de la chaleur qui se trouve sous nos pieds. À l'heure actuelle, 24 pays utilisent l'énergie géothermique.

Le plus grand consommateur du monde, les États-Unis, en produit au moins le tiers du total (voir également *Eau supercritique et vapeur gratuites*).

Retour vers le futur

Même si des centaines de puits étaient creusés à des fins scientifiques, chacun d'entre eux ne serait qu'une piqûre d'épingle dans la croûte terrestre. Il faut donc que chaque projet financé par l'ICDP représente une « localité typique » ayant une portée mondiale en matière de géosciences.

Toute une série de questions urgentes et fondamentales sur le passé de la Terre et les processus internes de notre planète peuvent trouver une réponse dans des puits moins profonds. De même, les sédiments peuvent divulguer leurs secrets, tels que les archives du climat, dès les premières centaines de mètres sous le sol. Dans certains cas, les zones où naissent les séismes peuvent être atteintes à 3 ou 4 km sous la surface. C'est parfois la Terre elle-même qui déplace des roches depuis les profondeurs de la lithosphère et les rapproche de la surface, par un processus encore mal élucidé.

Mais il existe une autre limitation, fondamentale, aux forages, même les plus profonds : souvenez-vous que la Terre a un diamètre de 12 748 km, alors que le puits le plus profond n'atteint, jusqu'ici, que 12 262 m, soit le millième de son diamètre. Pour plus spectaculaire que soit l'évolution future de la technologie du forage, atteindre les 15 à 20 km semble irréalisable aux observateurs les plus optimistes.

En dépit de toutes les difficultés, forer dans la croûte de notre planète constitue l'une des frontières les plus passionnantes de la science actuelle. Cette aventure peut nous permettre d'élucider quelques-uns des nombreux mystères enfouis sous nos pieds depuis des millions d'années dans l'obscur *terra incognita*.

Horst Rademacher¹

Cet article a été adapté de la brochure de l'ICDP publiée en 2007 et intitulée *The Thrill to Drill*.

1. Sismologue et journaliste scientifique freelance

Comment participer

Depuis plus de dix ans, le Programme international de forages continentaux scientifiques met en commun les ressources de l'Afrique du Sud, de l'Allemagne, de l'Autriche, du Canada, des États-Unis, de la Finlande, de l'Islande, du Japon, du Mexique, de la Norvège, de la Pologne, et de la République tchèque. L'UNESCO est membre de l'Équipe scientifique consultative, qui approuve les propositions de projets à financer et à soutenir. La société Schlumberger en est membre corporatif. Quatre autres pays négocient actuellement leur adhésion.

Pour être éligible, un projet de forage scientifique doit proposer des recherches sur l'un ou plusieurs des huit thèmes illustrés sur le diagramme ci-dessous. Les questions à traiter dans les demandes d'aide à l'ICDP doivent être très substantielles. En outre, la localité proposée doit représenter de manière exemplaire d'autres structures similaires de la Terre, qui n'ont pas encore été suffisamment étudiées. Enfin, toute proposition doit être élaborée par plusieurs chercheurs spécialisés dans différents domaines des sciences de la terre qui coopèreraient de façon à tirer le meilleur parti d'un même forage.



Pour en savoir plus : www.icdp-online.org; icdp@gfz-potsdam.de; ou contacter Ulrich Harms: ulrich@gfz-potsdam.de ou r.missotten@unesco.org

Les pôles se réchauffent plus vite que prévu

L'Année polaire internationale (API) a pris fin le 31 mars, après deux années de recherches intenses, qui ont révélé que les pôles se réchauffaient plus vite que prévu. Les résultats des travaux ont été présentés dans une déclaration du 25 février par les deux parrains de l'Année, l'OMM et le Conseil international pour la science. La Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO en est l'un des nombreux partenaires.

Parmi les connaissances acquises pendant l'API, il se confirme que les calottes glaciaires du Groenland aussi bien que de l'Antarctique perdent de leur masse, ce qui fait monter le niveau de la mer, et que le rythme des pertes s'accélère au Groenland.

Lorsque les données recueillies par les bouées profilantes robotisées – déployées dans le cadre du Système mondial d'observation de l'océan, coordonné par la COI de l'UNESCO – sont croisées avec celles fournies par les mammifères marins équipés d'instruments, et par les navires de recherche de l'API, il se confirme que l'océan Austral s'est réchauffé plus rapidement que l'ensemble de l'océan mondial. En outre, les eaux profondes et denses qui se forment à proximité de l'Antarctique se sont rafraîchies par endroits, en raison de la fonte accélérée des calottes glaciaires et des barrières de glace de l'Antarctique, et se sont réchauffées en d'autres endroits.

En 2007 et 2008, la superficie des glaces pérennes du minimum estival de l'Arctique a diminué d'environ 1 million de km² pour tomber à sa valeur actuelle, la plus basse depuis le début des enregistrements par satellites. Par ailleurs, pour la première fois depuis le début des observations, la région du pôle Nord n'était recouverte, au milieu de l'hiver, que d'une couche relativement fine de glace de première année. Les expéditions de l'API ont enregistré une dérive sans précédent de la glace à travers le bassin de l'Arctique.

Dans l'Atlantique Nord, de subtils changements dans l'état de l'océan et les flux thermiques et dynamiques entre l'atmosphère et l'océan ont montré leur rôle décisif dans la force et la trajectoire des grandes tempêtes. Celles-ci constituent le principal apport de chaleur et d'humidité de l'atmosphère vers l'Arctique. Ces connaissances permettront d'améliorer la prévision des trajectoires et de l'intensité des tempêtes.

La modification du calendrier, de la nature et de la hauteur des précipitations hivernales due au réchauffement de l'Arctique, oblige les éleveurs de rennes du nord-ouest de l'Europe à s'adapter. Plus à l'est, les rennes sont stressés par la réduction des pâturages et le blocage des voies de migration dus au changement d'utilisation des sols et à la construction d'infrastructures. Les insectes et les champignons deviennent envahissants. Plusieurs communautés locales ont aidé les réseaux de l'API à recueillir, échanger et vérifier les observations sur la glace de mer, le biote, la météorologie et le climat de l'Arctique.

Les poches de carbone prises dans le pergélisol sont plus grandes qu'on ne l'avait cru. En outre, il se dégrade bien plus vite que prévu, en libérant dans l'atmosphère un autre gaz à effet de serre : du méthane. Les chercheurs ont découvert que les hydrates gazeux de méthane enfouis dans le plancher océanique remontent dans l'atmosphère d'autant plus facilement que la couverture de glace recule. Sur les côtes sibériennes ils ont relevé une activité importante de dégazage de méthane venant des sédiments marins.

Les biologistes ont répertorié 7 500 espèces animales dans l'Antarctique et 5 500 dans l'Arctique, dont plusieurs centaines seraient inconnues. Les nouveaux venus sont essentiellement des invertébrés. L'une des plus grandes surprises a été de découvrir que certaines espèces microbiennes présentent des formes à peu près identiques dans les écosystèmes de l'Arctique et de l'Antarctique, distantes de 11 000 km ! D'autres espèces ont évolué de façons fort différentes, et certaines se sont développées et répandues à des latitudes plus basses. Il est désormais prouvé, par exemple, que de nombreuses pieuvres vivent dans les grands fonds à des latitudes moins élevées proviennent d'ancêtres communs vivant toujours dans l'océan Austral. L'étude des écosystèmes actuels a également confirmé la migration récente vers les pôles d'espèces terrestres et marines, en réaction au réchauffement climatique. Deux zones d'environ 400 km² chacune ont été déclarées Ecosystèmes marins vulnérables au titre de la Convention sur la conservation de la flore et de la faune marines de l'Antarctique, et inscrites sur un registre international de protection.

Pour en savoir plus : k.alverson@unesco.org; www.ipy.org

Le Danemark appuie l'éducation au changement climatique

Le 14 janvier, le Danemark a engagé 1,2 million de dollars dans trois initiatives de l'UNESCO sur l'éducation au changement climatique. L'Organisation pourra ainsi développer son forum virtuel mondial *On the Frontlines of Climate Change* et le programme Sandwatch d'éducation à la surveillance des littoraux. Cela financera en outre un séminaire international sur l'enseignement du changement climatique, du 27 au 29 juillet.

L'allocation du Danemark traduit l'inquiétude générale devant la rapidité et la gravité du changement climatique. Elle intervient au cours d'une année qui décidera si le monde est prêt ou non à s'engager sérieusement dans ce combat : les États parties à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques se réuniront du 9 au 17 décembre dans la capitale du Danemark, afin de rédiger le projet de texte qui fera suite au protocole de Kyoto.

À l'occasion du séminaire international sur l'éducation au changement climatique de juillet, les experts du monde entier se retrouveront au siège de l'UNESCO, à Paris, afin de préparer des directives pour l'introduction du changement climatique dans les programmes scolaires. Celles-ci pourraient ensuite faire l'objet d'un débat subsidiaire pendant la réunion de Copenhague.

Lancé en juin dernier, le forum en ligne de l'UNESCO donne la parole aux habitants des petits États insulaires en développement et aux communautés autochtones qui se trouvent en première ligne du changement climatique. Le soutien financier du Danemark permettra au forum de se développer en créant une base de données mondiales d'observations concernant l'impact du changement climatique et les stratégies locales d'adaptation. Des recherches de terrain recueilleront des informations complètes sur les cas particulièrement intéressants.

Quant à Sandwatch, lancé en 2001 par l'UNESCO, c'est un programme éducatif qui enseigne aux élèves, encadrés par leurs maîtres, à surveiller l'état de leurs plages en appliquant des méthodes scientifiques : observer et mesurer. Au fil des ans, Sandwatch

a accumulé des données et des informations précieuses sur la santé du milieu côtier. Avec les fonds danois, l'UNESCO établira une base de données en ligne standardisée, à compléter et à analyser par les participants, qui permettra d'évaluer l'impact du changement climatique et autres phénomènes littoraux, et d'élaborer de meilleures politiques de gestion. De son côté, l'UNESCO travaillera avec les ministères de l'éducation afin d'étendre encore le réseau des écoles participant à Sandwatch – présent aujourd'hui dans 55 pays – et d'engager les gouvernements à intégrer ce programme dans leurs cursus scolaires.

Le Danemark contribue pour environ 3,7 millions de dollars par an aux programmes d'éducation et de communication de l'UNESCO, mais c'est la première fois que ce pays vise spécifiquement l'éducation au changement climatique.

Pour en savoir plus : d.nakashima@unesco.org ; www.climatefrontlines.org ; allez sur : www.sandwatch.org ou voir Planète Science de janvier 2007.



Dans ce champ des Andes péruviennes, à 3 800 m d'altitude, Julia fait cuire des papas, (pommes de terre). Les glaciers des Andes reculent et le régime des pluies perd de sa régularité. Depuis les années 1980, les agronomes ont mis au point quelques variétés hybrides de papas plus grosses et dont la culture est plus exigeante en eau. Censées être plus appréciées sur les marchés des villes, ces hybrides remplacent progressivement les variétés locales. Or, toute érosion de la biodiversité rend les agriculteurs moins résilients devant le change-

ment climatique, car il leur sera plus difficile d'adapter leurs cultures aux nouvelles conditions climatiques. L'éducation au changement climatique permet de valoriser le potentiel des méthodes locales pour y faire face, et de tempérer les pressions exercées sur les communautés locales par des forces extérieures afin de les détourner de pratiques traditionnelles efficaces

Dix années pour sauver des récifs coralliens

Depuis 1950, le monde a perdu 19 % de ses récifs coralliens. Quelque 15 % des récifs restants sont dans un état critique et risquent de disparaître dans les 10 à 20 ans prochains, et 20 % de plus dans les 20 à 40 ans. Ces prévisions émanent de 372 scientifiques et gestionnaires de récifs coralliens de 96 nationalités. Elles sont résumées dans le rapport périodique 2008 du *Status of Coral Reefs of the World*, rédigé par le Réseau de surveillance de la grande Barrière de corail, auquel participent l'UNESCO, la NOAA, Reef Check et ReefBase, entre autres organismes.

Seuls 46 % des récifs coralliens du monde sont considérés comme étant en bon état et hors de péril immédiat. Par ailleurs, les catégories « sérieusement menacés », « critique » et « en bonne santé »

ne prennent pas en compte les menaces liées au réchauffement climatique mondial, prévu comme inéluctable mais sans précision de date.

Ce sont le réchauffement de l'océan et son acidification croissante ainsi que l'intensification des tempêtes tropicales qui, selon les grands scientifiques et gestionnaires du monde, représentent aujourd'hui les plus graves menaces pour tous les récifs coralliens. Les satellites de la NOAA révèlent que les océans tropicaux se sont réchauffés à un rythme de plus en plus rapide ces dix dernières années, ce qui donne à penser qu'il ne reste que 8 à 10 années pour redresser la situation, dans la mesure où une concentration de CO₂ dans l'eau de mer supérieure à 450 ppm met en péril la survie des récifs coralliens tels que nous les connaissons. Le tiers des espèces de corail du monde est déjà menacé d'extinction.

Dans les pays adhérant à l'Initiative du Triangle du corail, les récifs de l'Indonésie, des Philippines, de la Malaisie et de Timor-Leste continuent à dépérir en raison de la surpêche, de la sédimentation croissante et de la pollution urbaine et industrielle. En Asie du Nord-est, les récifs dépérissent pour les mêmes raisons, auxquelles s'ajoute le problème du blanchissement. Là au moins, se développe une sensibilisation à la nature grâce aux progrès des économies nationales et de la coopération régionale.

Au Moyen-Orient, les récifs de la mer Rouge et du golfe d'Aden sont sains, mais ceux du golfe Persique, de la mer d'Arabie et du golfe d'Oman sont encore chancelants après le violent cyclone de l'été 2007. Les coraux qui longent la péninsule arabique ont également subi de grosses pertes en raison des grands travaux qui sont en cours.

Les plus vastes aires marines protégées (AMP) du monde viennent d'être établies dans le Pacifique. En 2006, les États-Unis ont révisé le classement du Monument national marin de Papahânaumokuâkea pour attribuer le statut de haute protection aux 356 892 km² de la réserve de l'écosystème de récifs coralliens des îles du nord-ouest d'Hawaï. Puis, en janvier 2009, le président américain a bravé les chefs d'entreprise pour créer une aire protégée dans trois régions du Pacifique couvrant environ les 320 000 km² d'un chapelet d'îles isolées et presque inhabitées. Elles comportent des récifs coralliens intacts, des espèces en voie de disparition et le gouffre le plus profond de la Terre, la fosse des Mariannes. Ces trois régions sont : les îles Mariannes dans le Pacifique Ouest, le Monument national des îles lointaines du Pacifique, et l'atoll Rose au large de la Samoa américaine. Les aires protégées s'étendront sur 80 km. La plus vaste AMP du monde est celle des îles Phoenix, couvrant 410 500 km², établie par le gouvernement de Kiribati. Elle éclipse celle du parc marin de la grande Barrière de corail, créée en 1975 et reclassée en 2004, qui a déclaré une zone de 115 395 km² d'interdiction absolue de tout prélèvement, sur un total de 344 400 km².

Deux régions se sont engagées à protéger 20 à 30 % de leurs habitats marins et côtiers d'ici 2020 : le « Challenge de Micronésie », lancé par Palau, les États fédérés de Micronésie, les îles Marshall, Guam et les îles Mariannes du Nord, et le « Challenge des Caraïbes », lancé en 2008 par les Bahamas, la République dominicaine, la Jamaïque, la Grenade, Saint Vincent et les Grenadines².

Près de 500 millions de personnes dépendent des ressources des récifs coralliens pour se nourrir et améliorer leurs revenus, dont 30 millions en sont totalement dépendants pour leur survie.

Pour en savoir plus, voir page 24 ; lire le rapport : www.gcrmn.org

2. Sur l'état des récifs coralliens des Caraïbes, voir Planète Science d'avril 2008

Boursières L'ORÉAL-UNESCO (par région)	Projet de recherches en sciences de la vie	Institution(s) d'accueil
Fina Kurreeman Ile Maurice	Étude des gènes spécifiquement associés à l'arthrite rhumatoïde	Harvard Medical School et Women's Hospital, Boston, États-Unis
Nonhlanhla Dlamini Afrique du Sud	Médecine traditionnelle africaine pour le traitement du sarcome de Kaposi, caractérisé par une croissance anormale des vaisseaux sanguins, suivie de lésions des muqueuses (tumeurs) ; ce cancer est commun chez les malades du sida	University of Florida, Gainesville, États-Unis
Joan Munissi Tanzanie	Substances antimicrobiennes isolées à partir de champignons marins de Tanzanie	Université de Göttingen, Allemagne
Marie Abboud Liban	Imagerie optique non-invasive des vaisseaux sanguins qui se forment pour irriguer une tumeur naissante, afin de localiser la tumeur et en améliorer le diagnostic	Université de Bretagne occidentale, Brest, France
Khadjetou Lekweiry Mauritanie	Étude de la transmission du paludisme dans la capitale, Nouakchott	Institut de recherche pour le développement, Dakar, Sénégal
Rima Al-Besharat Syrie	Isoler et identifier les souches locales de bactéries probiotiques pour les utiliser dans des produits alimentaires	Technische Universität München, Allemagne
Jingyi Shi Chine	Génétique de la leucémie myéloïde aiguë, cancer des globules blancs	Institute of Cancer Research, Sutton, Royaume-Uni
Yean Yean Chan Malaisie	Utilisation de biocapteurs électrochimiques de l'ADN pour détecter les maladies infectieuses dans un échantillon de liquide corporel. Ouverture vers un kit peu coûteux et portable de diagnostic des maladies infectieuses	University of New South Wales, Sydney, Australie
Ishrat Bano Pakistan	Conception de nanoparticules magnétiques pour l'administration de médicaments	University of Cambridge, Royaume-Uni
Ivana Pešić Serbie	Étude et identification des protéines urinaires, un outil pour diagnostiquer et prévenir les maladies rénales	Université de Georg-August, Göttingen, Allemagne
Mareike Posner Allemagne	Étude de la résistance des structures des enzymes pour les organismes qui se sont adaptés à des conditions extrêmes	Centre of Extremophile Research, University of Bath, Royaume-Uni
Lydia Lynch Irlande	Étude de l'omentum humain comme outil de diagnostic immunologique. L'omentum graisseux couvre les intestins	Harvard Medical School, Boston, États-Unis
Paula Villar Argentine	Conception d'un modèle informatique du cœur en 3D	Barcelona Supercomputing Centre, Espagne
Bertha Gonzales Frankenberger Mexique	Le développement du langage et de la voix chez les nouveau-nés et les prématurés	Ste-Justine University Medical Center, Montréal, Canada, et Centre hospitalier universitaire d'Amiens, France
Cecilia Gonzales Marin Pérou	Liens entre les infections buccales et les complications médicales chez les femmes enceintes	Queen Mary's School of Medicine and Dentistry, Londres, Royaume-Uni

Prix scientifiques pour femmes d'exception

Les cinq lauréates de l'année pour le prix L'ORÉAL-UNESCO Pour les Femmes et la Science ont reçu chacune 100 000 dollars, le 5 mars, lors d'une cérémonie organisée au siège de l'UNESCO, à Paris. Quinze jeunes chercheuses se sont également vu attribuer jusqu'à 40 000 dollars chacune pour la poursuite de leurs travaux en sciences de la vie, dans un laboratoire de renom à l'étranger de leur choix (voir tableau).

Les lauréates de cette année sont :

- **Afrique et États arabes** : **P^r Tebello Nyokong**, du Département de chimie de l'Université de Rhodes en Afrique du Sud, pour sa contribution à l'utilisation du potentiel des lumières dans le traitement du cancer et pour remédier aux nuisances causées à l'environnement.
- **Asie-Pacifique** : **P^r Akiko Kobayashi**, du Département chimie, de la Nihon University au Japon, pour sa contribution à la mise au point de conducteurs moléculaires et la conception et synthèse d'un métal moléculaire à un seul composant.
- **Amérique du Nord** : **P^r Eugenia Kumacheva**, du Département de chimie de l'Université de Toronto au Canada, pour la conception et le développement de nouveaux matériaux valorisables dans de nombreuses applications, parmi lesquelles l'administration ciblée de médicaments dans le traitement du cancer et de matériaux permettant une haute densité de stockage de données optiques.
- **Europe** : **P^r Athene M. Donald**, du département de physique de l'Université de Cambridge au Royaume-Uni, pour avoir élucidé les mystères de la physique de la matière désordonnée, depuis le ciment jusqu'à l'amidon.

- **Amérique Latine** : **P^r Beatriz Barbuy**, de l'Institut d'astronomie, de géophysique et de sciences atmosphériques à l'Université de São Paulo au Brésil, pour ses recherches sur la vie des étoiles, depuis la naissance de l'Univers jusqu'à l'époque actuelle.

Le jury était présidé, cette année, par l'Égyptien Ahmed Zewail, Prix Nobel de Chimie 1999.

Pour en savoir plus : r.clair@unesco.org; www.forwomeninscience.com

2011 sera l'Année de la chimie

L'ONU a déclaré 2011 Année internationale de la chimie, et placé l'UNESCO et l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) à la tête de cette opération, par une résolution de sa 63^{ème} Assemblée générale, tenue en décembre à New York.

La résolution avait été soumise à l'ONU par l'Éthiopie, après avoir été avalisée par le Conseil exécutif de l'UNESCO. L'Année célébrera les

réalisations de la chimie et ses contributions à la connaissance, à la protection de l'environnement et au développement économique.

« Nous espérons renforcer la sensibilisation et la compréhension de la chimie par le public » a déclaré le P^r Jung-Il Jin, président de l'UICPA. Éveiller le public à la chimie est de la plus grande importance » a ajouté Koïchiro Matsuura, Directeur général de l'UNESCO, « au vu des défis à relever pour un développement durable. La chimie va jouer un rôle majeur dans l'exploitation de sources énergétiques alternatives et l'alimentation d'une population mondiale en pleine croissance ». Les transformations moléculaires sont essentielles à la production des aliments, des médicaments, du carburant et d'un nombre infini de produits manufacturés et minéraux.

L'Année, qui marquera le centenaire de l'attribution, en 1911, du prix Nobel de chimie à Maria Sklodowska Curie, sera également une occasion de rendre hommage à la contribution des femmes à la science. C'est aussi en 1911 que l'Association internationale des sociétés de chimie (IACS) fut fondée afin de faciliter la communication et la coopération scientifiques internationales entre les chimistes en standardisant la nomenclature et la terminologie. En 1919, l'UICPA succéda à l'IACS.

secretariat@iupac.org; j.hasler@unesco.org; www.chemistry2011.org

Inauguration de l'observatoire Pierre-Auger

Le 14 novembre, a eu lieu l'inauguration de l'observatoire Pierre-Auger à Malargüe, en Argentine. Il explore les mystères des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie qui bombardent la Terre de particules chargées d'une énergie 10 millions de fois supérieure à celle de l'accélérateur de particules le plus puissant du monde. Lancé il y a plus de 10 ans sous les auspices de l'UNESCO, l'observatoire est un réseau de 1 600 sondes réparties en Argentine sur 3 000 km².

L'observatoire Pierre-Auger est un « détecteur hybride » qui fait appel à deux méthodes distinctes. L'une détecte les rayons cosmiques à haute énergie grâce à leur interaction avec de l'eau placée dans des cuves en surface. L'autre recherche la formation de gerbes atmosphériques en observant la lumière ultraviolette émise dans la haute atmosphère de la Terre.

C'est au siège de l'UNESCO, à Paris en 1995, que la collaboration internationale pour le projet devint une réalité lorsque toutes les parties acceptèrent l'offre faite par l'Argentine d'héberger l'observatoire austral. Le 13 octobre 1998, le comité financier du projet Pierre-Auger se réunit au siège de l'UNESCO afin de mettre au point un accord sur l'organisation, la gestion et le financement du projet. Carlos Menem, alors président de l'Argentine annonça à la réunion que la construction pourrait commencer dès le début de l'année suivante. L'accord fût signé en mars 1999, deux mois avant le début de la construction du détecteur en Argentine.

Le projet porte le nom de Pierre Auger, Directeur de la science à l'UNESCO de 1948 à 1958, qui mourut en 1993. Son meilleur titre de gloire est peut-être d'avoir orchestré le rôle de l'UNESCO dans la fondation, près de Genève, de l'Organisation européenne de la recherche nucléaire (CERN), qui vient de lancer, le 21 octobre dernier, le grand collisionneur d'Hadrons.



© Observatoire Pierre Auger

L'un des 1 600 détecteurs de surface, sur fond de cordillère des Andes. Chacun d'eux fonctionne de façon autonome avec simplement 20 watts d'énergie solaire. Les signaux du détecteur sont relayés automatiquement par radio à l'observatoire central

Pierre Auger était spécialisé en physique expérimentale dans le domaine atomique (effet photoélectrique), nucléaire (neutrons lents) et rayonnement cosmique (gerbes atmosphériques). Après ses années de service à l'UNESCO il fut Directeur du service de physique cosmique au Centre national de la recherche scientifique (1959–1962) en France et Directeur général du Conseil européen de recherches spatiales (1962–1967).

La Collaboration Pierre-Auger réunit quelque 350 scientifiques d'Allemagne, Argentine, Australie, Bolivie, Brésil, Espagne, États-Unis, France, Italie, Mexique, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Royaume-Uni, Slovaquie, République tchèque et Vietnam. James W. Cronin, de l'Université de Chicago (Etats-Unis), Prix Nobel de physique, a été le concepteur de l'observatoire, avec Alan Watson, de l'Université de Leeds (Royaume-Uni).

Le projet entre maintenant dans sa deuxième phase, où sont envisagés la création d'un site dans l'hémisphère nord, au Colorado (États-Unis), ainsi que des perfectionnements pour le site austral.

Pour en savoir plus www.auger.org; m.alarcon@unesco.org

Un Iranien remporte un prix d'optique

Le Dr Saifollah Rasouli, de l'Institut des hautes études en sciences fondamentales de Zanjan (Iran) est, cette année, le lauréat du prix Gallieno Denardo, parrainé conjointement par le Centre international de physique théorique (CIPT) de l'UNESCO et la Commission internationale d'optique (CIO).

Ce prix annuel est attribué à des chercheurs de moins de 40 ans, originaires de pays en développement. Il comprend une bourse de 1 000 dollars de la part de la CIO et une prise en charge complète, de la part du CIPT pour permettre au lauréat de participer à un stage à la CIO en y donnant en outre un séminaire sur ses travaux de recherche.

Le Dr Rasouli a reçu son prix au cours du Collège annuel d'hiver sur l'optique en science de l'environnement destiné aux scientifiques de pays en développement, organisé par le CIPT du 2 au 13 février de cette année. Ce prix récompense l'utilisation de l'interférométrie laser dans l'étude de la turbulence atmosphérique, qui offre une résolution plus fine que les autres méthodes. Les travaux du Dr Rasouli connaissent de nombreuses applications, dans l'observation météorologique, par exemple, aussi bien que dans l'amélioration du rendement des carburants d'avions et de voitures.

Pour en savoir plus : <http://prizes.ictp.it/ICO>; pressoffice@ictp.it



Jacques Weber

« La crise peut être l'occasion de refonder l'économie mondiale »

Face à la crise financière et économique qui ne cesse de s'étendre dans le monde, de nombreux chercheurs, organisations et institutions se mobilisent. On entend parler de Green Deal ou de Global New Green Deal, de fonder la taxation sur les services écosystémiques, alors que les ressources naturelles s'amenuisent. Ici, l'économiste et anthropologue Jacques Weber, directeur de recherche du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) en France, décortique le comment et le pourquoi d'une idée qui gagne du terrain : le basculement vers une économie mondiale verte pour repartir sur des bases plus saines.

Comment analysez-vous la crise actuelle ?

La présente crise me semble n'avoir pas d'équivalent passé : la référence à la crise de 1929 est erronée. Les effets de cette crise sur l'économie mondiale sont encore à venir et nul ne peut dire pour combien d'années celle-ci va « plonger ». Avec des conséquences encore et toujours plus graves pour les pays les plus pauvres.

Déjà, des pays de plus en plus nombreux sont en quasi cessation de paiement, au sein même du « monde riche », comme l'Islande ou même l'Irlande. Les quasi faillites de banques se multiplient, obligeant les Etats à nationaliser ; le chômage s'envole partout, la Chine ayant perdu plus de vingt millions d'emplois entre septembre 2008 et janvier 2009, soit presque la population active de la France en quelques mois. L'implosion des économies et les drames sociaux qu'elle entraîne fait craindre des explosions sociales.

La crise actuelle est indubitablement financière au départ et serait advenue tôt ou tard. Mais le fait qu'elle se déclenche à l'issue d'une hausse considérable des cours du pétrole, des minerais et des matières alimentaires incite à penser que nous sommes dans une crise de rareté objective des ressources naturelles, épuisables et renouvelables, dont l'expression est financière.

La crise peut-elle être salutaire pour le développement durable ?

Si la crise est bien issue de raretés naturelles croissantes, la fragilisation même de l'économie peut être une occasion d'affronter directement ces raretés de telle sorte que l'on n'en pâtisse pas dans l'avenir. Elle peut être l'occasion de refonder l'économie mondiale et les économies nationales, et de redéfinir les institutions internationales au service de cette refondation de l'économie.

Elle peut, enfin, être l'occasion de concevoir des mécanismes redistributifs à échelle mondiale au profit des pays les moins consommateurs: cela serait la fin d'une « aide » internationale au développement, fruit du bon vouloir, de la charité, bref, de l'arbitraire, et son remplacement par des mécanismes basés sur la seule rigueur, sur la seule justice.

Dans le système capitaliste tel que nous le vivons, la création de richesse se fait par la destruction de la nature (*capital naturel*). Si je détruis un site, je crée de la 'valeur ajoutée' et le PIB s'en trouve augmenté. Dans le système capitaliste « refondé », la destruction de la nature serait rendue très coûteuse; par contre, l'entretien ou l'accroissement du *potentiel naturel* rapporterait beaucoup.

Les entreprises sont-elles prêtes à accepter le principe du pollueur payeur ?

Le principe du 'pollueur payeur' n'est pas punitif. Il s'agit de faire payer celui qui continue à polluer pour financer ceux qui consentent des investissements destinés à réduire leur pollution. Il s'agit donc d'un principe incitatif et redistributif. Dans l'idéal, on placerait la taxe à un niveau suffisamment élevé pour rendre 'rentable' de consentir les investissements de réduction de la pollution.

Prenant conscience de leur dépendance à l'égard du monde vivant et de la rareté croissante des ressources naturelles qui génèrent leurs profits, les entreprises tentent déjà de minimiser l'impact de leurs activités et de concevoir une comptabilité spécifique de la biodiversité et des services écosystémiques dans leurs activités. Pour autant, si elles comprennent le bien-fondé d'une refondation de l'économie sur le potentiel naturel, il n'est pas évident qu'elles en mesurent toutes les implications potentielles sur leur mode d'organisation à tous niveaux, comme sur leurs marchés et la construction de leurs profits. Mais qui le pourrait, à ce stade ? Il y faut un effort important d'analyse collective.

Comment basculer vers une économie verte ?

L'abolition des taxes sur le travail et leur remplacement par des taxes de nature écologique en est une illustration. L'instauration d'une taxe sur l'énergie, depuis sa production jusqu'à la consommation finale, que l'on pourrait appeler « taxe sur l'énergie ajoutée », en est une autre. Ici, il s'agit de pénaliser la consommation d'énergie à chaque étape du processus, afin d'encourager des économies d'énergie et le développement d'énergies « propres »³. Il ne s'agit pas d'alourdir la fiscalité mais de substituer des taxes en faveur de la conservation du potentiel naturel à des taxes actuelles qui tendent à encourager la destruction de ce potentiel.

Qu'entendez-vous par « l'abolition des taxes sur le travail » ?

J'entends par là toutes les charges qui pèsent sur le travail. En France, ces charges représentent près de 50% du salaire brut. Ainsi, la « taxe professionnelle » payée par les entreprises alimente les finances des collectivités locales mais pèse sur les salaires. Lorsque le Président Sarkozy a annoncé sa suppression en février dernier et son remplacement par une taxe à caractère écologique, il s'agissait bien de la même logique que celle que je défends: on remplace un « coût du travail » par un « coût des consommations de nature » englobant la fertilité des sols, les pêcheries, les forêts, les espaces touristiques.

Que permettrait cette taxe écologique ?

La taxation directe ou indirecte (par des marchés de droits) des consommations de nature viendrait en partie compléter le dispositif de « basculement » des régulations au profit du maintien ou de l'élargissement du potentiel naturel

Aujourd'hui, le prix du poisson dans l'assiette est fixé par rapport au coût du travail pour l'amener jusque-là depuis la mer. Le poisson lui-même n'a pas de valeur propre. Un marché de droits donne indirectement une valeur au poisson. Pour les pêcheries, des « quotas individuels transférables » existent dans de nombreux pays. Ces droits transférables peuvent être relatifs à des quantités, à des zones, à des temps de pêche, entre autres. Pour les sols, la variation d'un indicateur de fertilité peut servir de base à la taxe; pour les forêts, la mise aux enchères de droits de coupe revendables avec perte de ces droits en cas de non respect du cahier des charges ; pour le tourisme en zone sensible, mise aux enchères entre opérateurs d'un droit de visite pour un nombre donné de touristes, avec perte du droit en cas de non respect du cahier des charges. Dans chaque cas, tout ou partie de la valeur des droits est utilisée pour permettre la reconversion de ceux qui sont « exclus ».

En Allemagne, l'essor de l'éolienne aurait un effet pervers sur les émissions de carbone des pays de l'Est, puisque les entreprises allemandes vendent leurs crédits aux industries polluantes en Pologne et ailleurs. Ce marché des droits, qui fait partie du Clean Development Mechanism (CDM) décidé dans le cadre du Protocole de Kyoto, est-il efficace ?

Vous illustrez là le fait bien connu qu'un marché sans règle, ce n'est pas la « loi du marché » mais la loi de la jungle ! Le CDM me semble échapper largement à tout contrôle. Il serait à évaluer. Pour corriger le tir, il conviendrait que le marché soit l'objet d'une régulation d'ensemble.

Le marché carbone est un outil intéressant. A condition que les émissions soient effectivement contrôlées et non laissées à la seule déclaration des acteurs. Dans mon esprit, il s'agit d'utiliser le marché comme outil, pas de devenir l'outil du marché. Enfin, aucun outil n'est parfait, ni ne se suffit à lui même. En fonction des objectifs, des acteurs et de la nature des questions, on emploiera une combinaison d'instruments.

Le Président Correa d'Equateur a proposé que l'OPEP impose une taxe sur le prix du pétrole qui serait reversée aux pays producteurs pour leur permettre de développer des énergies alternatives, une idée inspirée par l'économiste Herman Daly. Qu'en pensez-vous ?

Cela peut faire partie de la batterie d'outils. Mais il s'agit d'autre chose que ce que je propose: la taxation de l'énergie, de sa production à la consommation finale des produits. La mesure proposée par le président Correa ne porte que sur le prix du pétrole à la production... La mesure que je propose (je ne prétends pas en être le seul auteur !) reprend l'idée de M. Correa, mais en l'élargissant à l'ensemble de l'économie mondiale. Ce qui aurait pour résultat celui attendu par M. Correa, mais en plus une forte incitation à réduire la consommation d'énergie. Hélas, la quête d'énergies « propres » fait trop oublier l'exigence et l'urgence des économies d'énergie.

Une « taxe sur l'énergie ajoutée » suppose l'existence d'une institution internationale disposant du pouvoir de collecter et redistribuer cette taxe internationalement de façon inversement

proportionnelle à la consommation d'énergie. Il s'ensuivrait d'abord une incitation à économiser l'énergie, ainsi qu'une redistribution de la taxe au profit des pays les moins consommateurs d'énergie, donc les plus pauvres.

Les organisations internationales sont les lieux indispensables de discussion entre les nations. Elles ont permis des projets de grande ampleur, dont témoignent ceux conduits par l'UNESCO. Elles n'ont cependant aucun pouvoir de régulation, de mise en œuvre de règles décidées par les Etats, encore moins de pouvoir de contrôle ou de sanction sans lesquels il n'est pas de régulation. Souhaitons que la prochaine réunion du G20 à Londres, en avril prochain, prenne le sujet à bras le corps et refonde le système international, le rendant apte à gérer des instruments économiques, taxe sur l'énergie ajoutée et d'autres, à l'échelle mondiale. Sans cette profonde refonte, la refondation de l'économie n'aura pas lieu et le système actuel reproduira, en plus profonde, la présente crise.

Peut-être avons nous besoin d'une nouvelle institution résultant de la fusion de plusieurs existantes: UNEP, FAO, PNUD ... Mais surtout, investie d'un pouvoir effectif de mise en œuvre des décisions des Etats et de régulation planétaire. Ce seul fait en ferait quelque chose de radicalement nouveau dans l'économie mondialisée.

Comment voyez-vous le rôle de la recherche et celui de l'UNESCO, face à ces changements de paradigme ?

La recherche est au cœur de toutes ces réflexions sur la refondation de l'économie. Pour l'instant, cette réflexion internationale n'a pas reçu de cadre lui permettant d'être vraiment efficace et accumulative. Il est grand temps de constituer un groupe de travail international d'économistes reconnus pour leurs compétences en économie des ressources et de l'environnement à échelle locale et mondiale auquel seraient posées des questions : Quelle serait la faisabilité d'un basculement des régulations existantes vers une économie verte ? Quelles seraient les conséquences d'un tel basculement ? Comment penser des régulations mondiales et redistributives ?

Des pays ne sortiraient pas de la misère effroyable où ils se trouvent, tel Haïti parmi d'autres, sans reconstruction des bases écologiques indispensables à un développement durable: j'ai dit il y a déjà plusieurs années et maintiens aujourd'hui que là se trouvent les Abou Simbel⁴ du 21^{ème} siècle pour l'UNESCO. L'Organisation qui a inventé les réserves de biosphère comme projets de développement durable a l'opportunité de se saisir de cette question, d'offrir un cadre à la réflexion. Elle démontrerait une utilité singulière dans cette crise dont elle ressortirait auréolée.

Interview réalisée par Meriem Bouamrane

Lire aussi le rapport intérimaire préparé à la suite du G8 en juin 2007 : The Economics of Ecosystems and Biodiversity: <http://ec.europa.eu/environment/nature/biodiversity/economics/>

- 3. L'économie d'énergie à un endroit ne doit pas cacher la dépense énergétique totale. On lit souvent que la voiture électrique serait une voiture 'propre'. En fait, la seule chose certaine est qu'elle est propre là où elle est utilisée. Mais elle utilise une énergie tirée d'une autre énergie: les batteries doivent être chargées, soit à partir de centrales nucléaires, soit à partir de centrales thermiques. Entre l'énergie fossile à l'entrée d'une centrale thermique et l'utilisation de la voiture électrique, on a perdu 60% de l'énergie initiale !*
- 4. La sauvegarde de ce temple nubien dans les années 1960 fut un des plus grands succès de l'UNESCO du 20^{ème} siècle*

Au chevet du fleuve « mère de la Chine »

Le fleuve Jaune est, par sa longueur, le deuxième de Chine, après le Yangtsé, et le sixième du monde. Habitée par 110 millions de personnes en 2000, la région est le berceau des civilisations de la Chine du Nord et le cœur du développement politique et socioéconomique actuel : son bassin produit 6,8 % du PIB national.

Affectueusement surnommé « mère de la Chine », le fleuve Jaune est cependant affligé d'interminables sécheresses, d'inondations, de sédimentation et d'une grave pollution. La sécheresse de cette année menace d'être la pire depuis un demi-siècle. Quel effet le réchauffement climatique aura-t-il sur l'approvisionnement en eau, dans une région dont la population en pleine croissance pourrait atteindre les 121 millions d'ici 2010 ? Entretemps, la santé de ses écosystèmes se dégrade en raison de l'expansion des secteurs agricole, industriel et urbain, qui se disputent entre eux des ressources déjà proches de leurs limites.

L'étude de cas présentée ci-dessous a été effectuée par la Commission de protection du fleuve Jaune (CPFJ) pour *L'eau dans un monde qui change*, titre du troisième Rapport mondial sur l'évaluation des ressources en eau, rendu public le 16 mars. La CPFJ reconnaît qu'elle devra, en concertation avec les ministères concernés, trouver un équilibre entre les secteurs concurrents et prendre des mesures pour remédier à la situation si elle veut protéger la « mère de la Chine » et sauvegarder l'avenir de plus de 120 millions de Chinois.

Le fleuve Jaune prend sa source sur le plateau Qinghai-Tibet, dans l'ouest de la Chine. Il parcourt ensuite, sur 5 500 km, la vaste plaine de Chine du Nord et traverse neuf provinces avant de se jeter dans la mer de Bo Hai, à environ 250 km au sud de Beijing (voir carte).

Dans cette zone montagneuse, la température moyenne ne varie, au cours de l'année, que de 4 °C à 14°C. Plus de 60 % des précipitations ont lieu entre juin et septembre, pendant la saison de croissance des cultures. Dans les années 1990, la pluviosité est restée d'environ 7,5 % inférieure à la moyenne des décennies précédentes, en raison de la sécheresse (voir page suivante *La décennie de la sécheresse*).

Xu et ses collaborateurs⁵ prévoient que l'augmentation de la température annuelle du bassin versant pourrait atteindre 3,9°C d'ici 2080, et celle de la pluviosité 8,7 %, cependant que le débit du fleuve pourrait diminuer pendant la même période.



Lac de glacier, à la source du fleuve Jaune, sur le plateau Qinghai-Tibet



Prélèvement d'un échantillon d'eau dans le lac E-Ling, près de la source du fleuve Jaune

Le bassin pourrait connaître une grave pénurie d'eau au cours du siècle si l'eau n'est pas mieux utilisée, grâce à une meilleure gestion et une adaptation de la technologie. Voici quelques-unes des principales menaces.

Surexploitation des eaux souterraines

Les besoins en eau ont fait un bond entre 1949 et 2006, passant de 10 milliards de m³ à près de 38 milliards de m³. Depuis leur mise en service en 1950, il y a aujourd'hui 380 000 puits tubés. En 2000, 11 milliards de m³ d'eaux souterraines étaient pompées chaque année. Cette surexploitation, notamment dans les villes grandes et moyennes, pose un grave problème. Dénommée autrefois « la ville des sources », Jinan par exemple a vu ses sources s'assécher dans les années 1990. Dans l'ensemble, le niveau des eaux souterraines a nettement diminué dans 65 localités, en raison de pompages excessifs.

Le fleuve devient « imbuvable »

C'est la qualité de l'eau qui a payé le plus fort tribut à une économie florissante et à une industrialisation accélérée, associées à la croissance de la population. La quantité des eaux usées non traitées, rejetées dans le fleuve Jaune, a doublé depuis les années 1980, pour passer à 4,2 milliards de m³ par an. Dans le fleuve se déversent plus de 300 polluants, et seuls 60 % des eaux de son cours sont encore propres à la consommation.

Au titre de la loi de lutte contre la pollution, un cadre juridique était en préparation en 2009 afin de protéger les ressources en eau. Des règlements et des normes concernant également les effluents. Dans le même temps, la loi sur la protection des ressources en eau du fleuve Jaune est en cours de modification.



Le bassin versant du fleuve Jaune s'étend sur 795 000 km². En 2000, environ 26 % de sa superficie était urbanisée. Il participe de deux zones climatiques différentes : aride et semi-aride de mousson continentale au nord-ouest, et semi-humide au sud-est

Il serait cependant difficile de cultiver du riz dans le bassin sans irriguer. Avec l'irrigation, les principales cultures – blé, maïs et soja – voient leurs rendements augmenter de 50 % ou davantage. Ce sont ces gains de productivité qui ont motivé l'expansion de l'irrigation dans le bassin depuis les années 1950. Mais on estime en général que celle-ci a atteint ses limites et qu'il faudrait désormais encourager davantage la production pluviale (45 % des superficies) pendant la prochaine phase de mise en valeur du bassin, vu la raréfaction inéluctable de l'eau.

Usage excessif de l'eau pour l'irrigation

Entre 1951 et 1987, de nombreux ouvrages furent construits sur le fleuve pour limiter les inondations, produire de l'énergie hydroélectrique et irriguer. Dans les années 1970, sur le cours supérieur du fleuve de grands barrages furent édifiés ; autour du cours moyen du fleuve une campagne de protection des sols créa de nouvelles terres agricoles en terrasses sur le plateau de loess ; enfin, dans le cours inférieur les dérivations aux fins d'irrigation furent considérablement développées. En 2000, il y avait plus de 10 000 retenues opérationnelles, dont 23 derrière de puissants barrages, pour un volume total de 62 milliards de m³, dépassant le débit annuel du bassin. La production hydroélectrique du bassin s'élève actuellement à 40 TWh par an.

L'expansion de l'irrigation a été rapide : de 8 000 km² en 1950, à 75 000 en 2000. Bien que la demande se soit stabilisée dans les années 1980 et que l'usage de l'eau dans l'agriculture ait décliné depuis 2000, dans le *Plan de partage des eaux du fleuve Jaune*, l'agriculture reste en tête, avec 84 % de la consommation totale, suivie par l'industrie (9 %), les ménages (5 %) et l'environnement (2 %). Lorsque la consommation dépasse les disponibilités, le déficit est comblé par le recours aux eaux souterraines en dehors du bassin ou par le recyclage.

Face à l'augmentation des besoins de l'industrie et à la sensibilisation du public à l'environnement, alors même que les réserves atteignent leurs limites se manifeste la volonté d'améliorer le rendement de l'eau dans l'agriculture. La CPFJ a lancé un plan visant à réduire de 10 % la consommation de ce secteur d'ici 2010.



À mi-course du fleuve Jaune, dans le plateau de loess, sur ces pentes aménagées en terrasses, les alignements de plantes vertes retiennent le sol. Cette méthode locale traditionnelle prévient l'érosion du sol et conserve l'eau. Ces plantes assurent en outre aux villages des revenus complémentaires à l'agriculture

Gérer la sédimentation

Le fleuve Jaune doit son nom à la couleur des sédiments dont il se charge abondamment en traversant un plateau de loess de 640 000 km². D'énormes quantités de ce sol meuble, facilement érodé, sont charriées par le fleuve et ses affluents, notamment à l'occasion des pluies torrentielles de l'été.

La charge sédimentaire transportée par le fleuve est en moyenne de 1,6 milliard de tonnes par an. Un quart seulement aboutit à la mer, le reste se déposant dans le lit du fleuve. La sédimentation surélève le lit de 5 à 10 cm par an, et il a fallu périodiquement remonter les digues en conséquence. L'impact de la sédimentation sur la dynamique du chenal a compliqué l'aménagement du fleuve, notamment dans sa partie inférieure.

La CPFJ a considéré comme une priorité absolue pour l'environnement de refouler la lourde charge sédimentaire du fleuve ainsi que de protéger la biodiversité et sauvegarder les terres humides et les pêcheries de l'embouchure. Le débit minimum nécessaire pour assurer le refoulement des sédiments est estimé à 14 milliards de m³, auxquels s'ajoutent 5 milliards de m³ pour garantir les autres besoins environnementaux. Mais il est bien difficile d'assurer ce débit minimum pour l'environnement lorsque les eaux de surface sont déjà exploitées au maximum.

Faire face aux inondations et à la sécheresse

Au cours de la longue histoire du bassin du fleuve Jaune, les inondations et la sécheresse ont fait des millions de victimes. Entre 206 av. J.-C. et 1949 ap. J.-C., 1 092 grandes crues ont été répertoriées, ainsi que 1 500 ruptures de digues, 26 changements de chenal et 1 056 épisodes de sécheresse. La plaine de Chine du Nord, très plate, créée par les alluvions du fleuve Jaune, a toujours été sujette aux inondations.

Depuis l'avènement de la République populaire de Chine, en 1949, les grands plans de lutte contre les inondations ainsi que la construction de nombreux ouvrages hydrauliques ont fortement réduit les dangers et les pertes provoqués par les crues. L'aménagement des berges, les réservoirs et les retenues d'eau ont contribué à lutter efficacement contre les inondations et à minimiser les effets de la sécheresse. En Chine, le système de lutte contre les inondations par la construction de grands

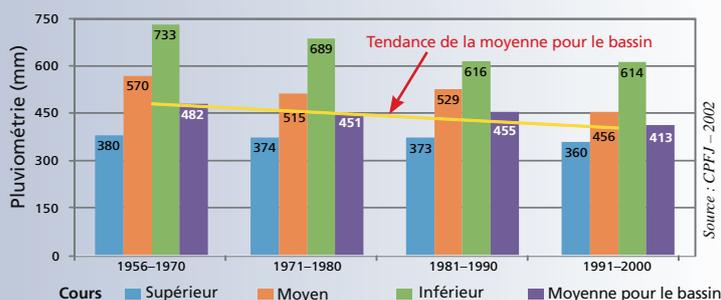
La décennie de la sécheresse

En 1987, le Conseil d'État de la Chine instaura un Plan de partage des eaux du fleuve Jaune afin de mieux répartir les ressources disponibles en fonction de la demande réelle, en fixant son plafond à 37 milliards de m³ par an, pour un débit moyen de 58 milliards de m³. Les provinces situées au milieu du bassin recevaient 22 % du débit disponible, le reste étant réparti à égalité entre les provinces de l'amont et de l'aval. Le partage est révisé tous les ans, compte tenu des variations saisonnières de l'eau disponible.

Dans les années 1990, ce plan fut cependant mis à rude épreuve : la sécheresse régna dans toute la plaine de Chine du Nord, y compris dans le bassin du fleuve Jaune. Deux de ses affluents, le Wei He et le Fen He, furent réduits à des filets d'eau. Le débit diminua de 24 %, et tomba, dans le cours inférieur, à 14 % de la moyenne annuelle à long terme. De 1995 à 1998, pendant 120 jours chaque année, l'écoulement fut totalement interrompu sur les 700 derniers kilomètres du fleuve. Les répercussions furent sévères : extrême pénurie d'eau dans les provinces du cours inférieur, impossibilité d'évacuer en mer les sédiments, et menaces pour la survie de l'écologie du delta et des pêcheries côtières.

Depuis 1999, le Plan a réussi à empêcher le lit du fleuve de s'assécher complètement, bien que le débit tombe parfois à un niveau purement symbolique.

Gérer la pénurie d'eau est devenu la principale priorité pour le bassin du fleuve Jaune. En l'état du déséquilibre croissant entre la disponibilité et la demande, il est difficile de répondre à la moindre nouvelle demande d'un secteur sans réduire la fourniture aux autres. De toute évidence, des choix délicats devront être faits pour répondre à ces besoins conflictuels. Dans la mesure où l'agriculture est la plus grosse consommatrice d'eau, la conclusion inéluctable est que l'on devra réduire sa part, et trouver de nouvelles pratiques agricoles pour utiliser l'eau plus efficacement.



Pluviométrie dans les différents segments du bassin du fleuve Jaune, 1956-2000

ouvrages a pris comme repères, pour les grands fleuves, le débit des plus fortes crues enregistrées depuis les années 1950 et, pour les petits, la fréquence des crues quinquennales à décennales.

En dehors des grands ouvrages, on a amélioré les autres dispositions, notamment en élaborant et en appliquant des programmes de prévision des crues et des systèmes d'alerte, et en mettant en vigueur des lois, des règlements, des politiques et les règles de l'économie. En aménageant, par exemple, les chenaux des fleuves et en réglementant toute installation en zones inondables. La CPFJ et les provinces du Shanxi, Shaanxi, Henan et Shandong se sont unies pour créer un centre de lutte contre les inondations du fleuve Jaune et de secours en cas de sécheresse.

Réglementer une soif dévorante

Dans les années 1990, le gouvernement central a adopté un train de lois visant à faire face, à l'échelle nationale, à la pénurie d'eau et à garantir la poursuite du miracle économique du pays, alors que le public prenait pleinement conscience de l'environnement. L'arsenal juridique comprend la loi sur l'eau, la loi sur la protection du sol et de l'eau, la loi de lutte contre les inondations, la loi de protection de l'environnement, la loi sur la pêche, la loi sur la forêt et la loi sur les ressources minérales. En 2002, une loi nouvelle mettant l'accent sur la gestion intégrée des ressources en eau a inauguré une transition entre une demande de développement reposant sur le tout ingénierie vers une stratégie soucieuse de la ressource et centrée sur la disponibilité de l'eau.

Créée en 1946, la CPFJ administre le bassin du fleuve Jaune sous l'égide du ministère des ressources en eau et du Conseil d'État. Elle prépare et met en œuvre le plan de mise en valeur de l'eau et du bassin du fleuve, décide de la répartition de ses ressources entre les provinces et se charge de construire et d'entretenir les ouvrages – à l'exception des grands barrages – pour tout ce qui touche à l'utilisation de l'eau et à la prévention des inondations.

Depuis 2000, la CPFJ a conçu un Plan d'utilisation de l'eau, fondé sur des scénarios d'approvisionnement et de demande à moyen et à long terme, afin de répartir au mieux les ressources entre les différents secteurs. Des plans annuels d'utilisation de l'eau sont transmis aux utilisateurs, qui doivent veiller à maintenir des volumes suffisants pour les zones prioritaires, notamment en cas de sécheresse. La CPFJ a également élaboré des règles encourageant les ménages à installer des appareils économiseurs d'eau, les agriculteurs à adopter les pratiques les plus efficaces de l'eau, et les industriels à recourir à des techniques réduisant l'utilisation de l'eau et les rejets. Elle a en outre mis en place un système de fixation des prix de l'eau.

Un arsenal de lois est aujourd'hui en place afin de freiner la pollution et l'utilisation abusive de l'eau, par une approche holistique, qui prend en compte les besoins de tous les usagers. En même temps, tous les efforts sont faits pour trouver un équilibre entre les besoins en eau des différents secteurs. Cela suffira-t-il à restaurer l'ancienne gloire de la « mère de la Chine » ? Seul le temps le dira.

La rédaction de cette étude de cas a été facilitée par le bureau de l'UNESCO à Beijing au titre du projet espagnol de l'Objectif du millénaire pour le développement visant à établir un cadre de partenariat avec la Chine pour le changement climatique.

5. Xu, Z. X.; Zhao, F. F.; Li, J. Y. (2006 or 2007) Impact of climate change on stream flow in the Yellow River Basin: www.ifwj2.org/addons/download_presentation.php?fid=1077

Épaves, mondes engloutis et pilleurs de tombes

Au cours des siècles, des villes entières ont été submergées par les flots, et d'innombrables navires ont péri en mer. Leurs vestiges constituent un patrimoine archéologique précieux, de la plus grande importance culturelle. Nombreux sont les sites submergés qui restent inviolés depuis des siècles, voire des millénaires. Or, en l'absence d'oxygène, la matière organique, comme le bois, se conserve bien mieux sous l'eau que sur la terre ferme. Cela confère une valeur unique à ces sites.

Le 2 janvier, la Convention de l'UNESCO sur la protection du patrimoine culturel subaquatique est entrée en vigueur, trois mois jour pour jour après sa ratification par un 20^{ème} État⁶. « Il sera désormais possible de protéger légalement la mémoire historique contenue dans le patrimoine culturel subaquatique, et de mettre un frein au trafic florissant des pilleurs de trésors » a déclaré avec satisfaction Koïchiro Matsuura, Directeur général de l'UNESCO.

Alors qu'au siècle dernier, une myriade de sites archéologiques étaient découverts sur la terre ferme, au contraire les mers, les fleuves et les lacs du monde gardaient jalousement leurs secrets. La mise au point d'une technologie avancée – qui comprend des engins submersibles, des costumes de plongée et le sonar – rend plus facile leur accès, même par grands fonds.

La fièvre de l'or

Les découvertes archéologiques de ces dernières décennies ont enflammé l'imagination du public et galvanisé la communauté scientifique, mais aussi ravivé l'appât du gain et une fièvre insensée de l'or chez les chasseurs de trésors.

En 1995, par exemple, les vestiges d'un navire du 16^{ème} siècle ont été repérés par un plongeur au large de la côte de Playa Damas, au large de l'actuel Panama. On pense que ce pourrait être le *Vizcaina*, l'un des deux navires perdus dans ces eaux en 1503 par l'explorateur italien Christophe Colomb. Le navire a malheureusement été laissé à la merci d'une société de chasseurs de trésors (voir 22 sur la carte, page suivante).

En 2007, une société américaine de ce type s'est emparée subrepticement des 17 tonnes de monnaies d'argent et d'or de l'épave espagnole du *Nuestra Señora de las Mercedes*, avant de faire transiter par avion le butin via Gibraltar. L'Espagne s'efforce aujourd'hui de récupérer son patrimoine devant la justice (voir 28 sur la carte).

Comblent les lacunes des livres d'histoire

Une grande partie des traces de l'existence humaine sont souvent bien mieux protégées sous l'eau que sur la terre ferme. Cela tient à l'absence d'oxygène et de lumière, ainsi qu'à leur relative difficulté d'accès – du moins jusqu'à ces derniers temps. Ces sites peuvent nous éclairer sur l'évolution des civilisations et parfois même pallier l'absence de traces écrites. Quel genre d'arcs les archers du héros

Photo: Wikipedia Commons



Épave du vapeur italien *Tèti*, au large de l'île de Vis, en Croatie

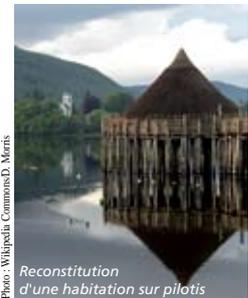
© D. Pfla/UNESCO

populaire Robin des Bois (*photo*) utilisaient-ils, par exemple, pour voler les riches au profit des pauvres, dans l'Angleterre médiévale ? Les arcs découverts dans le navire de guerre *Mary Rose* du roi Henri VIII, coulé en 1545 lors d'un affrontement avec la marine française, ont permis de répondre à la question (voir 2 sur la carte). Dans le même ordre d'idées, les fouilles des épaves chinoises ayant sombré au 15^{ème} siècle au large du Kenya ont prouvé l'existence d'un commerce très ancien entre la Chine et l'Afrique.

D'autres mystères restent entiers. Il y a 700 ans, Kubla Khan, chef des tribus mongoles qui dominaient la majeure partie de l'Asie, décida de conquérir le Japon. Les Mongols n'ayant pas l'expérience du combat naval, Kubla Khan força des milliers de Chinois à lui construire une flotte. En 1281, 4 400 navires transportant plus de 70 000 hommes firent voile vers le Japon – pour disparaître sans laisser de traces (voir 14 sur la carte). La légende, toujours vivace au Japon, d'un vent divin, donne à penser que la flotte a pu être détruite par une tempête ou un tsunami. Les archéologues sont à la recherche de ses vestiges.

Des traces de l'évolution des techniques de navigation et de la connaissance de l'univers ont été découvertes au fond de l'océan. Parmi ces objets rares, il y a plusieurs astrolabes trouvés dans les épaves. L'astrolabe servait à localiser et prévoir la position du soleil, de la lune et des étoiles, ainsi qu'à déterminer l'heure d'après la latitude. Le premier ordinateur analogique connu a été trouvé en 1900 dans un navire grec échoué aux alentours de 100 av. J.-C. Le mystérieux mécanisme de l'anticythère aurait servi à calculer les positions astronomiques et les éclipses du Soleil et de la Lune (voir 7 sur la carte).

Plusieurs sites sont un témoignage muet des batailles navales historiques, comme celle de Salamine entre la Perse et les villes-États grecques en 480 av. J.-C. ou celle de Lépante, en 1571, opposant la flotte ottomane à la coalition des républiques de Venise, de Gènes, la papauté et l'Espagne.



2) Mary Rose (description p. 19)
Les arcs en bois trouvés sur le navire de guerre anglais Mary Rose étaient en excellent état après quatre siècles passés au fond de la mer.

1) Habitacions sur pilotis sur le Loch Tay

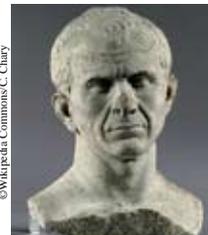
Les maisons sur pilotis sur des lacs, en Irlande et en Écosse étaient construites sur de petites îles naturelles ou artificielles, dans des lacs, des rivières ou des marécages. L'humidité du milieu favorise la conservation de la matière organique, comme le beurre vieux de 2 500 ans, découvert dans les vestiges d'une maison sur pilotis sur le lac Loch Tay ! (reconstituée ici)



3) Barrière de navires vikings
Roskilde, ancienne capitale viking du Danemark, se situait dans le fjord du même nom, à l'ouest de Copenhague. Pour protéger des attaques maritimes ce grand centre commercial, les Vikings coulèrent délibérément cinq navires dans le fjord, près de Skuldelev, afin d'en bloquer le chenal d'accès.



4) Rheingold : le « trésor des Barbares »
Il y a plus de 1 700 ans, le « trésor des Barbares » a sombré dans le Rhin. Composé de plus de 1 000 objets d'argent, de bronze, de cuivre et de fer pesant plus de 700 kg, il représente la plus grande découverte faite en Europe de métaux de l'époque romaine. La photo montre de la vaisselle. Il semble que des pilliers Allamans, surpris par une patrouille romaine aient jeté par-dessus bord une partie de leur butin.



5) Le buste de César
En 2008, un buste en marbre représentant l'Empereur romain Jules César fut découvert dans le Rhône, à Arles (France). Ce buste grandeur nature est daté, approximativement, de l'époque où César fondait Arles, en 46 av. J.-C.



28) Épave de Nuestra Señora de las Mercedes (description p.19)
Le torpillage du Nuestra Señora de las Mercedes en 1804 en Méditerranée décida l'Espagne à s'allier à la France contre l'Angleterre.



27) « Seahenge »
Les lieux sacrés Holmes I et II ont été surnommés « Seahenge » (par analogie avec Stonehenge). Situé dans des marécages de la côte anglaise, « Seahenge » est constitué de cercles de poteaux périodiquement submergés, avec de petits troncs éclatés de chêne formant un enclos circulaire.



26) Épave du Titanic
Le luxueux paquebot sombra le 14 avril 1912 pendant sa première traversée de Southampton (Royaume-Uni) à New York (États-Unis) après avoir heurté un iceberg dans l'Atlantique Nord, en causant la mort de 1517 passagers en raison du nombre insuffisant de canots de sauvetage. L'épave a été redécouverte en 1985.



25) Épave du USS Monitor
Le navire des Etats-Unis Monitor figurant sur cette gravure fut le premier navire de guerre blindé. La faible hauteur de son franc-bord et le poids de sa tourelle le rendaient peu adapté à la navigation : il sombra dans l'Atlantique pendant une tempête, en 1862, près de la Caroline du Nord, aux Etats-Unis, avec 16 hommes d'équipage.



24) Port Royal en Jamaïque
Fondée sitôt après que les Anglais eurent arraché la Jamaïque aux Espagnols en 1655, Port Royal avait été un havre pour les riches marchands, les pirates notoires et les planteurs enrichis, lorsqu'elle fut détruite par un tremblement de terre, en 1692.

23) Aktunkaab, la grotte des mains
« La grotte des mains », Aktunkaab en langue maya, est une grotte sèche dans l'État du Yucatan, au Mexique. Elle présente plus de 300 empreintes de mains, en positif et en négatif, datant d'environ 15 000 ans.



22) Épave du navire Vizcaina
(Description p.19) L'explorateur italien Christophe Colomb perdit neuf navires dans l'Atlantique au cours de diverses expéditions, dont le Gallega et le Vizcaina en 1503, près de l'actuel Panama. En 1995 un plongeur découvrit ce qui pourrait être le Vizcaina, chargé de canons, d'ancres et de céramiques datant des 14^{ème} et 15^{ème} siècles.

Cette épave, la plus ancienne qui ait été découverte au large de l'Amérique, fut cependant abandonnée à la merci d'une société de chasseurs de trésors.



21) Épave d'Oranjemund
Une épave portugaise du 16^{ème} siècle contenant plus de 2 300 pièces de monnaie et de nombreux objets fut découverte en 2008 par des mineurs de diamants. Épave la mieux préservée de cette période en dehors du Portugal, elle a été dégagée par les archéologues sous la surveillance du gouvernement namibien pour être un jour exposée dans un musée. Elle a été trouvée près d'Oranjemund sur la Côte des squelettes, ainsi dénommée en raison des dangers que présentait le désert du Namib pour les marins perdus.



20) Dwarka
Dwarka est l'un des lieux de pèlerinage les plus anciens et les plus vénérés de l'Inde. Selon la légende, cette ville sainte fut entièrement balayée, il y a longtemps, par une énorme vague. Les fouilles commencèrent au début des années 1980, lorsque des archéologues de la mer découvrirent des murs de pierre et six niveaux de ruines.



Exemples à travers du patrimoine

Photo: Wikipedia Commons/D. Morris
© UNESCO/Koschik
© Karasch, Roskilde Viking Museum
Historical Museum of the Palatinate, Speyer, Germany, P. Hang-Kirchner
© Wikipedia Commons/C. Chury
© E. Sorozon/National Maritime Museum, U.K.
© UNESCO/Nautical Archaeology Society
© NOAA
Photo: Wikipedia Commons
Photo: Wikipedia Commons
© AFP/Google.com
© J. Avilés/NAH/SAS
© Wikipedia Commons/US Library of Congress
© Wikipedia Commons/Bajhan



6) La grotte Cosquer
L'accès de la grotte Cosquer, près de Marseille se trouve immergé par 37 m. Ses parois sont couvertes de peintures effectuées par des humains il y a 27 000 à 19 000 ans. Elles représentent des animaux, des mains et une gravure exceptionnelle d'un « homme blessé ». Les peintures attestent peut-être certaines mutilations, rituels sacrificiels ou maladies.

7) Épave contenant l'Anticythère
Une épave contenant des fragments de sculptures et d'autres objets fut découverte en 1900 par des cueilleurs d'éponges près de l'île grecque d'Anticythère. La trouvaille la plus célèbre, (photo) datant d'environ 100 ans av. J.-C. est un mécanisme considéré aujourd'hui comme le plus ancien ordinateur analogique. Utilisé pour calculer la position astronomique, le mécanisme s'inspirait peut-être des travaux d'Archimède.

8) L'histoire de l'Arche de Noé
(voir description p. 22)
Il y a environ 7500 ans, à la fin de l'ère glaciaire, la fonte des glaciers fit monter le niveau de la Méditerranée et inonda la mer Noire, qui n'était alors qu'un lac. Cet événement serait à l'origine de l'histoire du déluge décrit dans la Bible. Un village mésolithique englouti, découvert près de Sozopol, témoigne de cette tragédie.

9) Épave d'Uluburun
À la fin de l'Âge de bronze (vers le 14^{ème} siècle av. J.-C.), un navire marchand sombra en Méditerranée au large d'Uluburun, sur la côte sud de la Turquie. Les fouilles scientifiques de l'épave, l'une des plus anciennes qui aient été découvertes, ont remonté 20 tonnes de poteries, de bijoux d'or et d'argent, d'outils et d'armes de bronze ainsi que des traces de fruits frais et secs. Les vestiges du navire, qui était peut-être chypriote, se trouvent actuellement au Musée Bodrum d'archéologie sous-aquatique.

10) L'ancienne Carthage
Carthage fut fondée au 9^{ème} siècle av. J.-C. par les Phéniciens dans le golfe de Tunis, détruite ensuite par les Romains en 146 av. J.-C., puis de nouveau pendant la conquête musulmane en 698 ap. J.-C. Des parties du port et de la ville ont été trouvées au large de la côte. Ce site du Patrimoine mondial comportait des maisons de six étages.



11) Apollonia
Apollonia de Libye fut fondée par les Grecs au 7^{ème} siècle av. J.-C. pour servir de port à la ville de Cyrène toute proche, aujourd'hui un site du Patrimoine mondial. Romanisée par la suite, Cyrène resta une grande capitale du monde hellénique jusqu'à ce qu'en 365 ap. J.-C. un tremblement de terre submergea certains quartiers ainsi que le port d'Apollonia.



12) Les ruines de la baie d'Alexandrie
Au temps des Ptolémée, Alexandrie était le plus grand port et le centre culturel de l'Égypte. L'ancien phare de Pharos (illustration) et d'autres vestiges engloutis ont été découverts dans le port oriental. La construction d'un musée sous-marin est prévue.



13) Le port de Césarée
Le port de Césarée fut construit sur la côte méditerranéenne d'Israël vers l'an 10 av. J.-C., par le roi Hérode en l'honneur de son protecteur romain, César Auguste. Ce fut le premier grand ouvrage à utiliser le béton qui durcit sous l'eau. C'est aujourd'hui un musée sous-aquatique : munis d'une carte étanche, les plongeurs peuvent admirer 36 sites des ruines du phare, des ancres, des piédestaux et même une épave romaine.



14) La flotte de Kubla Khan
(description page 19)
Pourquoi sa flotte de 4 400 navires disparut-elle sans laisser de traces, alors qu'elle était en route pour envahir le Japon, il y a sept siècles ? Les archéologues espèrent élucider ce mystère.



15) Épave du Tek Sing
Lorsque sombra le Tek Sing, l'une des dernières jonques chinoises, au large de l'Indonésie, en 1822, il entraîna dans la mort 1 500 personnes. En 1999, plus de 300 000 articles de porcelaines furent pillés par des chasseurs de trésors. L'épave fut détruite. (Photo d'un modèle réduit)



le monde de biens culturels submergés

Planète **SCIENCE**, Vol. 7, No. 2, avril-juin 2009

19) Mahabalipuram
Un groupe de sanctuaires fondés par les rois Pallava fut sculpté dans la roche, aux 7^{ème} et 8^{ème} siècles, au long de la côte de Coromandel, en Inde. Il est célèbre pour ses rathas (temples en forme de chariots), ses mandapas (sanctuaires dans des grottes) et ses sept pagodes, dont six semblent avoir été submergées par la mer. Au cours du tsunami de 2005, leurs vestiges et un ancien port furent découverts sur ce site du Patrimoine mondial.



18) Nanhai No.1
Nanhai No.1 est un vaisseau vieux de 1 000 ans, qui fut coulé pendant la dynastie des Song (960-1279 ap. J.-C.) au large de la côte sud de la Chine, sur la Route marine de la soie qui reliait la Chine au Moyen Orient et à l'Europe. Remontée en 2007, l'épave et les 60 000 à 80 000 objets de sa précieuse charge seront exposés dans un aquarium contenant une eau de même qualité, température et conditions que celle de son ancien lieu de repos.



17) Les hydroglyphes de Baiheliang
Le Baiheliang (Crête de la grue blanche) est une arête de montagne récemment submergée par le nouveau barrage des Trois Gorges sur le fleuve Yangtsé. Elle présente certaines des plus anciennes inscriptions hydrologiques du monde, témoignant de 1 200 ans de variations du niveau du fleuve. Un musée sous-aquatique est en construction.



16) Pièges à poissons aborigènes
(description p. 23)
Les antiques pièges à poissons de Brewarrina, dans le fleuve Darling, éveillent de vifs échos spirituels et symboliques chez les Aborigènes.



La perte du bateau amiral *l'Orient* de Napoléon Bonaparte fut l'un des facteurs de la défaite de la France contre les Anglais devant la rade d'Aboukir, en Égypte en 1798 (voir photo). L'épave a ensuite été redécouverte gisant par le fond.

Des millions de concentrés du temps

Plus de trois millions d'épaves seraient éparpillées au fond des océans de la planète, dont certaines vieilles de milliers d'années. Une épave fonctionne comme un concentré de temps, qui fournit un parfait instantané de la vie à bord au moment du naufrage.

Mais toute épave ne raconte pas nécessairement une tragédie. Les épaves constituent parfois des barrières (navires-obstacles) coulées délibérément afin d'interdire le passage d'un fleuve, d'une anse ou d'un canal. Certains navires ont été coulés par des défenseurs afin d'entraver l'arrivée d'une flotte ennemie (voir 3 sur la carte) ou bien par des attaquants pour barrer la retraite de la flotte des défenseurs. D'autres épaves n'ont jamais été conçues pour naviguer mais pour survoler ou traverser un territoire. Des avions, des épaves de trains ou de voitures ont été découverts au fond de mers ou de lacs.

Villes englouties

Les vestiges d'innombrables édifices ou lieux d'habitation sont aujourd'hui submergés. Leur sort a été scellé par la subsidence, les séismes, les inondations, les glissements de terrain ou par l'érosion. Certains ont été délibérément construits sur l'eau, comme les *kampongs*, villages sur pilotis de la Malaisie actuelle.

La légende de la ville engloutie d'Atlantis remonte aux textes écrits autour de 400 av. J.-C. par le philosophe grec Platon. Si l'on n'a jamais pu situer Atlantis de façon convaincante, d'autres villes englouties ont été mises au jour. Les vestiges de l'antique Héraklion témoignent de la montée des eaux qui l'ont submergée. C'était le plus important des ports égyptiens de commerce avec la Grèce avant la fondation d'Alexandrie, en 332 av. J.-C. par Alexandre le Grand. Située à environ 25 km à l'est de l'actuelle Alexandrie, Héraklion fut submergée il y a 1 200 ans par des séismes qui provoquèrent une inondation massive du Nil. Il y a 2 000 ans, Alexandrie comptait un demi-million d'habitants. Les célèbres fouilles de la baie ont mis au jour, par exemple, les vestiges du phare de Pharos



Touché par les canons britanniques, l'Orient explose pendant la bataille de la rade d'Aboukir en août 1798, d'après le tableau d'Arnald George. La perte d'une bonne partie de la flotte française laissait, de fait, l'armée française immobilisée en Égypte

(voir 12 sur la carte), construit au 3^{ème} siècle av. J.-C., et le palais de la reine Cléopâtre VII (69–30 av. J.-C.). Les vestiges de Port-Royal, en Jamaïque, ont, eux aussi, été redécouverts par des archéologues en plongée (voir 24 sur la carte).

Scènes de vie à l'ère glaciaire

Des sites préhistoriques parmi les mieux préservés du monde se trouvent au fond de la mer du Nord. Datant d'environ 50 000 à 60 000 ans, ils portent les traces d'animaux tués par des chasseurs et de leurs campements préhistoriques, ainsi que les restes de milliers de mammouths, de rhinocéros laineux et autres mammifères de l'ère glaciaire. Dans le sud de la mer du Nord, 200 artefacts en os, bois de cervidés et silex de l'ère de la pierre⁷ ont été découverts, faits par des humains déjà dotés d'une anatomie moderne.

La Baltique abrite quelque 20 000 sites de l'ère de la pierre. Il y a environ 9 000 ans, le Danemark, la Suède et le Royaume-Uni ne formaient qu'un continent, alors que la Baltique et la mer Noire n'étaient que des lacs. Lorsque le réchauffement fit fondre les calottes glaciaires à la fin de l'ère glaciaire, l'élévation du niveau de la mer submergea de nombreux lieux d'habitation, des forêts et des rivages. Parmi les artefacts, on a trouvé de la poterie, des canots, des morceaux de bois et même des textiles, des graines et des armes.

Un littoral submergé par 17 m de fond sous la mer Noire témoigne d'une inondation survenue il y a 7 500 ans, qui pourrait expliquer l'épisode de l'Arche de Noé (voir 8 sur la carte). Selon la Bible, Dieu ordonna à Noé de construire un bateau pour sa famille et pour des couples de toutes les espèces animales afin de les sauver du grand déluge qui allait punir l'humanité pour ses péchés. La mer Noire, qui était alors un lac d'eau douce, se trouvait à 100 m sous le niveau du Bosphore. Les scientifiques avancent l'idée qu'avec le réchauffement du climat, la fonte des glaciers fit monter le niveau de la Méditerranée. Les eaux auraient alors rompu une digue naturelle du Bosphore. Cette théorie est corroborée par les vestiges d'un village mésolithique englouti découvert près de la Turquie et celle d'un ancien canot en bois sur un autre site.

Ces découvertes donnent un précieux aperçu du visage de la planète à l'ère glaciaire, mais aussi de ce qui pourrait nous attendre si le niveau de la mer faisait une nouvelle montée spectaculaire.



Statue grecque en bronze d'un jeune athlète mesurant 1,92 m reposant dans les fonds maritimes de l'île de Vele Orjule en Croatie. La statue date du 1^{er} ou 2^e siècle avant J.C.

La Convention sur la protection du patrimoine culturel subaquatique

Adoptée en 2001 par les États membres de l'UNESCO, la Convention définit le « patrimoine culturel subaquatique » comme « toutes les traces d'existence humaine présentant un caractère culturel, historique ou archéologique qui sont immergées, partiellement ou totalement, périodiquement ou en permanence, depuis 100 ans au moins... ». La définition inclut les structures, bâtiments, objets et restes humains, carcasses de navires et d'aéronefs, ainsi que leur cargaison et les objets préhistoriques. Les pipelines, câbles ou installations encore en usage et posés sur les fonds marins, par exemple, ne seraient pas considérés comme faisant partie du « patrimoine culturel », pas plus que les fossiles. La référence aux 100 ans d'ancienneté ne devrait cependant pas empêcher les États parties de protéger des vestiges plus récents, tels que les carcasses submergées de navires des deux guerres mondiales (1914-1918 et 1939-1945).

La Convention se propose de protéger le patrimoine culturel subaquatique et de faciliter la coopération entre les États parties. Elle ne régit pas les droits de propriété des épaves ni des ruines englouties. Elle ne modifie pas, non plus, l'étendue de la juridiction ni de la souveraineté des États. Elle encourage le développement de l'archéologie subaquatique et l'accès raisonnable du public à ces sites. Elle offre également un cadre pour interdire le trafic illicite des reliques de ces sites. À la différence de la Convention sur le patrimoine mondial, les sites qu'elle protège ne font pas l'objet d'une Liste particulière, afin de ne pas révéler leur emplacement précis.

Elle repose sur quatre grands principes :

- ✓ l'obligation de préserver le patrimoine culturel subaquatique
- ✓ la recommandation de sa conservation *in situ* (sous l'eau) comme option prioritaire avant toute décision d'intervention
- ✓ le refus de l'exploitation commerciale de ce patrimoine
- ✓ l'encouragement à une coopération entre les États visant à protéger le précieux héritage submergé et promouvoir la formation en matière d'archéologie subaquatique et la sensibilisation du public quant à l'importance des biens culturels immergés.

L'Annexe à la Convention, qui pose les Règles relatives aux interventions sur le patrimoine culturel subaquatiques s'adresse aux professionnels et aux autorités nationales. Elles sont soutenues par les archéologues, qui attendent de voir l'Annexe établir des normes d'intervention sur les sites pour les professionnels.

Pour en savoir plus : www.unesco.org/culture/fr/underwater

Des plongeurs relèvent les coordonnées des restes humains découverts dans la grotte Chan Hol, près de Tulum, au Mexique (Chanhol signifie petit trou en langue maya). Dans une autre cénote toute proche, appelée Naharon, des plongeurs ont découvert un squelette féminin qu'ils ont qualifié d'Eve de Naharon : la datation au carbone 14 lui donne 11 670 ans. Sa structure osseuse est plus proche de celle des populations d'Asie du Sud, ce qui jette un doute sur la théorie du peuplement des Amériques par des groupes issus de l'Asie du Nord



©INAH/SAS J. Avilés/UNESCO

« Seahenge » et autres lieux sacrés

Beaucoup de populations de tradition marine ou côtière enterrent leurs morts en mer, comme les Vikings. Ces explorateurs, marchands et pirates scandinaves attaquaient et envahissaient de vastes régions de l'Europe entre les 8^{ème} et 11^{ème} siècles ap. J.-C. Il y eut aussi Alaric, roi des Wisigoths, tribu « barbare », connue pour avoir mis Rome à sac en 410 ap. J.-C. Selon la légende, il aurait été enterré dans le fleuve Busento en Italie. On n'a jamais pu retrouver ce site.

Certains lieux sacrés antiques en rapport avec l'eau sont toujours honorés, comme les viviers à poissons d'Hawaï. D'autres sont oubliés depuis longtemps, comme le « Seahenge » du littoral anglais (voir 27 sur la carte).

Grottes immergées et pièges à poissons

Le patrimoine culturel subaquatique comporte aussi des artefacts et des traces de vie humaine préservés dans des grottes immergées, qui l'ont toujours été, ou l'ont été après une élévation du niveau de la mer. De telles traces ont été trouvées dans une grotte peinte de la Méditerranée et dans des cénotes mexicaines, ces grottes karstiques à l'air libre qui se sont remplies d'eau au fil du temps (voir photo).

Des populations très anciennes fabriquaient des pièges à poissons, l'une des plus vieilles technologies opératoires encore en usage. Leurs modèles sont très variés, depuis les simples mares artificielles de roches entourées de murets de galets, jusqu'à des murs de pierre longs de plusieurs centaines de mètres. D'autres utilisaient des poteaux reliés par de la matière végétale, placés au milieu d'un ruisseau, d'un estuaire ou près du littoral. Les poissons étaient refoulés vers la zone fermée, où on pouvait les capturer. On a trouvé des pièges à poissons sur la côte sud-ouest du Cap en Afrique du Sud, dans le nord du pays de Galles et au Danemark, dans diverses îles du Pacifique comme à Hawaï, au Canada et en Australie (voir 16 sur la carte).

Un vide juridique enfin comblé

Tous les trésors décrits dans ces pages pourront être couverts par les dispositifs de la Convention sur la protection du patrimoine culturel subaquatique, à l'exception de ceux qui ont moins de 100 ans (voir encadré).

La Convention a pour objectif de contribuer à combler le vide juridique en matière de sites archéologiques immergés. Les pays disposeront désormais d'un instrument efficace pour protéger leurs trésors culturels subaquatiques dès lors que les États se

seront ralliés, en nombre aussi grand que possible, à la cause de la ratification de la Convention.

Ulrike Guérin et Katrin Köller⁸

6. Barbade, Bulgarie, Cambodge, Croatie, Cuba, Équateur, Espagne, Liban, Jamahiriya arabe libyenne, Lituanie, Mexique, Monténégro, Nigeria, Panama, Paraguay, Portugal, Roumanie, Sainte Lucie, Slovaquie, Ukraine

7. Le terme d'ère de la pierre désigne pour les archéologues une vaste période pré-métallique qui n'a laissé presque rien d'autre que des outils de pierre. Elle a commencé avec l'avènement de la première espèce d'Homo, il y a environ 2,5 millions d'années, pour se terminer avec le travail du cuivre, introduit il y a environ 5 000 ans. Elle se divise en paléolithique (début de l'ère de la pierre), mésolithique (milieu de l'ère de la pierre) et néolithique (fin de l'ère de la pierre)

8. Secrétariat de la Convention sur la protection du patrimoine culturel subaquatique: u.guerin@unesco.org; k.koeller@unesco.org

Agenda

2-8 Avril

Accès aux bénéfiques et partage

7^e réunion du groupe de travail ouvert spécial de la Convention sur la diversité biologique. UNESCO Paris : www.cbd.int/doc/?meeting=ABSWG-07

6-24 Avril

Négociation et médiation en gestion des conflits liés à l'eau

Cours proposé par le programme de l'UNESCO « Du conflit potentiel au potentiel de coopération » et par l'UNESCO-IHE. Pour gestionnaires, décideurs, étudiants. Delft, Pays-Bas : L.salame@unesco.org

1-5 mai

Thèmes fondamentaux de l'évolution

Symposium du 200^e anniversaire de la naissance de Charles Darwin. UNESCO, UISB et l'Institut vénitien des sciences, des lettres et des arts. Venise (Italie) : w.erdelen@unesco.org; bernardi@szn.it; www.iubs.org

4-7 mai

Utilisation durable des sols et préservation des écosystèmes

Conf. intern. du projet sino-germanique de recherche écologique pour préserver l'environnement en Chine (ERSEC). Min. de S&T, Min. de l'éducation, Université agronomique de Chine, UNESCO Beijing : www.unesco.org/beijing-new/index.php?id=3079

24-29 mai

Réserves de biosphère

Réunion du conseil international de coordination du MAB pour approuver les réserves de biosphère et les lauréats du MAB. Réserve de biosphère de Jeju (Rép. de Corée): mab@unesco.org; www.unesco.org/mab

3-5 juin

Programme hydrologique international

43^e session du Bureau. UNESCO Paris : a.tejada-guibert@unesco.org; www.unesco.org/water

8-26 juin

Commission océanographique intergouvernementale

Réunion du Conseil exécutif et Assemblée : www.ioc.unesco.org

9-11 juin

Localiser les produits

Vers une approche durable de la diversité naturelle et culturelle dans les pays du Sud ? Symposium scientifique MAB de l'UNESCO, IRD, CIRAD, MNHN, IDDRI etc. UNESCO Paris : www.mnhn.fr/colloque/localiserlesproduits/index_va.php

30 juin - 2 juillet

Gérer les risques hydro-climatiques

Stage pour professionnels de l'eau éthiopiens, djiboutiens et soudanais. UNESCO et IRI. Addis Abeba (Éthiopie) a.mishra@unesco.org; (Addis Abeba) a.makarigakis@unesco.org



2-5 Avril

100 heures d'astronomie

Opération de l'UAI visant à inciter le grand public à regarder dans un télescope, à un moment idéal d'observation, en début de soirée, lorsque la lune passe du premier quartier à la phase bousue. Pour découvrir ce projet phare de l'Année : www.100hoursofastronomy.org/

16-20 juin

Éducation à l'espace et astronomie

Atelier intl pour lycéens et enseignants, suivi d'un atelier pilote de formation des maîtres à l'astronomie (18-20 juin). UNESCO en coopération avec l'UAI. Salinas (Équateur) : www.unesco.org/science/earthsciences/space_education

23-27 juin

Éducation à l'espace et astronomie

Comme ci-dessus, atelier pilote : 25-27 juin. Lima et Cuzco (Pérou). www.unesco.org/science/earthsciences/space_education

Projets phares sur toute l'année : Journal intime du Cosmos (blog rédigé par des astronomes des cinq continents) ; Portail de l'Univers (en ligne dès 2009) ; Sensibilisation au ciel nocturne (la pollution lumineuse dans les villes) ; Elle est astronome (contre les préjugés et idées fausses sur les carrières des femmes) ; Astronomie et patrimoine mondial ; le Galiléoscope (offrant à 10 millions de personnes du monde entier leur première vision dans un télescope astronomique) ; Projet Galilée de formation des enseignants ; sensibilisation à l'Univers (pour très jeunes enfants de milieux défavorisés) ; l'Univers vu de la Terre (utilisation des jardins publics, stations de métro etc. pour présenter au public des images astronomiques) ; Développer l'astronomie dans le monde entier (pour écoles, universités et public de régions où cette science est peu connue) : www.astronomy2009.org/globalprojects/cornerstones/

Vient de paraître

Water in a Changing World

3^e édition du Rapport mondial sur l'évaluation des ressources en eau, produite par le Programme mondial de mise en valeur de l'eau, réunissant 26 organismes des Nations unies. Deux tomes, en anglais, vendus ensemble : Rapport principal (336 p.) avec CD-Rom ; et 20 Études de cas : 88 p. Co-publié par les Éditions UNESCO et Earthscan, au Royaume-Uni. ISBN : (UNESCO) : 978-92-3-104095-5, €45,00 ; (Earthscan) : 978-1-84407-840-0 (broché) et 978-1-84407-839-4 (cartonné). Voir éditorial et, page 16, l'étude du cas de la Chine. Lire le rapport : <http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/index.shtml>



Managing Water Resources

Methods and Tools for a Systems Approach

Slobodan P. Simonovic. Collection Études et rapports d'hydrologie. Éditions UNESCO/Earthscan, €43,00, ISBN 978-92-3-104078-8. En anglais, 680 p. Expose l'approche systémique interdisciplinaire et son application actuelle à la gestion des ressources en eau. Exposés et exercices sur le CD-Rom d'accompagnement. Pour étudiants et professionnels.

Rising tides

BBC Earth Report, produit avec le soutien de l'UNESCO, du bureau EuropAid de l'Union européenne et du PNUE, en anglais. 1^{ère} diffusion le 5 mars. La réserve de biosphère de Branton Burrows, au Royaume-Uni et celle de Malindi-Watamu, au Kenya, ont un problème commun : le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer affectent leur trait de côte et menacent les habitats de la faune. À quelle vitesse se fait cette élévation ? Quelles en seront les conséquences ? Les deux réserves se sont unies pour cartographier les scénarios du changement climatique, afin de préparer des stratégies d'adaptation. Pour le visionner : www.tve.org/earthreport/index.cfm?cat=thisweek; www.unesco.org/mab

Savoirs autochtones

Sept affiches produites par le programme de l'UNESCO sur les systèmes de savoirs locaux et autochtones (LINKS), au Centre culturel national de Vanuatu, en décembre 2008. En français, anglais, espagnol et Bislama (Vanuatu). Études de cas et images du monde mettant en lumière l'intérêt des concepts et des solutions proposées par les systèmes de connaissances des sociétés autochtones d'aujourd'hui. Leur contenu pédagogique renforce chez ces populations la prise de conscience des chances et des dangers qui leur sont propres. Pour télécharger ou demander une affiche : www.unesco.org/links/d.nakashima@unesco.org

International Research Centre on Karst

Rédacteur en Chef : Guo Fang. Brochure du Centre international de recherche sur le karst en Chine. En anglais, 28 p. Présente le Centre créé en 2008 sous l'égide de l'UNESCO dans le cadre de l'Année internationale de la planète Terre. Objectifs, fonctions, locaux et conseil d'administration. Voir Planète Science de juillet 2008. Découvrir le site : www.irck.edu.cn; demander un exemplaire à : r.missotten@unesco.org

Volga Kits

Mallettes produites par l'UNESCO-Moscou et Coca-Cola HBC Eurasia, avec la réserve de biosphère Astrakhanskiy, dans le cadre du programme Volga vivante. En russe, avec des parties en anglais. – Ces malettes, visant un large public, contiennent des brochures sur l'état de l'environnement dans la région, une stratégie et un plan d'action pour sensibiliser le public ; des cartes postales et affiches sur les espèces rares de faune et de flore ; une carte des réserves de biosphère du bassin de la Volga; une mallette destinée à la presse avec des dépliants sur le comportement écologique des diverses catégories d'usagers. Pour en savoir plus (page en anglais) : e.veritinaova@unesco.ru; www.unesco.ru/eng/articles/2004/e.veritinaova11032009142850.php

European Geoparks

Ouvrage richement illustré de la Section UNESCO de l'observation de la Terre et du Réseau des géoparks d'Europe. en vente (€35,00) auprès du Natural History Museum of Lesvos Petrified Forest. ISBN 978-960764691-0. En anglais, 176 p.

Ouvrage grand public faisant référence au Réseau mondial des géoparks et à l'Année internationale de la planète Terre. Destiné aux non spécialistes, décrit tous les géoparks d'Europe. Préface de Koichiro Matsuura et de Walter Erdelen. Pour le commander : www.europeangeoparks.org; www.lesvosmuseum.gr; pour en savoir plus : m.patzak@unesco.org et lesvospf@otenet.gr

Status of Coral Reefs of the World: 2008

Rédacteur en Chef : Clive Wilkinson. Produit par Global Coral Reef Monitoring Network, en anglais. ISBN:1447-6185, 298 p. Voir page 11. – Pour en savoir plus : clive.wilkinson@rrrc.org.au; m.hood@unesco.org; lire le rapport : www.gcrmm.org

The Future of Drylands

Rédacteurs en Chef C. Lee et T. Schaaf. Collection l'Homme et la biosphère, Éditions UNESCO/Springer Verlag, €95,00, ISBN 978-92-3-104052-8, en anglais, 872 p.

Actes de la conférence internationale de recherche sur la Désertification et les terres arides, tenue à Tunis (Tunisie) les 19-21 juin 2006. Voir également Planète science d'octobre 2006.

Towards Sustainable Agriculture

UNESCO-SCOPE-UNEP Policy Brief N°8, en anglais, 6 p.

Résume les conclusions de l'Évaluation citée ci-dessous, en indiquant des pistes pour rendre durable l'agriculture. Recommande des politiques et des aménagements aux institutions : www.unesco.org/mab; mab@unesco.org

Agriculture at a Crossroads

Sept volumes imprimés en anglais, vendus par Island Press, issus du projet triennal d'Évaluation des connaissances, des sciences et des techniques agronomiques en vue du développement, qui associe Banque mondiale, FAO, PNUD-FEM, PNUE, UNESCO et OMS. Composés d'un Résumé mondial à l'intention des décideurs (\$95,00), d'un Rapport de synthèse et de cinq Évaluations régionales (\$65,00 chacun) : Asie centrale et de l'Ouest, Afrique du Nord (Vol. I) ; Asie du Sud et de l'Est, Pacifique (II) ; Amérique latine et Caraïbes (III) ; Amérique du Nord et Europe (IV) ; Afrique sub-saharienne (V). Pour en savoir plus, voir Planète Science de juillet 2008. PDF à télécharger sur : www.agassessment.org. Les institutions de pays en développement peuvent en demander un exemplaire gratuit à l'UNESCO jusqu'à épuisement du stock : g.calvo@unesco.org; s.arico@unesco.org