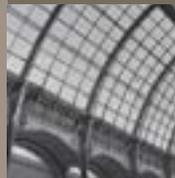




Paleoclimate  
from ice cores  
PAGE 18



Les conséquences  
de la dérive climatique :  
comment s'adapter ?  
PAGE 62



Changement climatique :  
un double défi pour  
le bâtiment  
PAGE 94

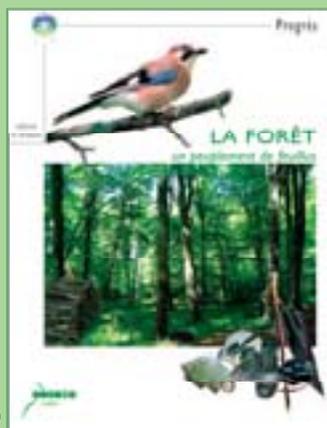
LA REVUE DU BRGM POUR UNE TERRE DURABLE  
*BRGM's journal for a sustainable Earth*

# géo**sciences**

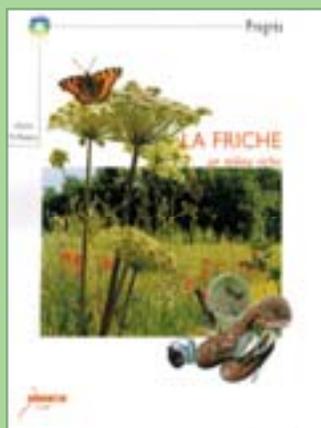
N°3 ► MARS 2006

## Le changement **climatique**

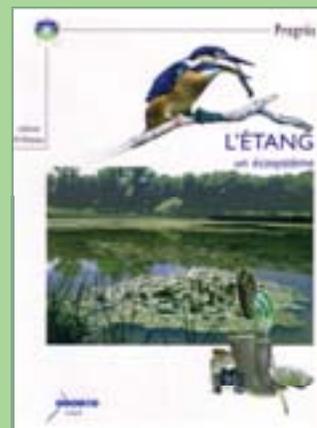
nouveauté



Cédérom PC et livret (112 p.)  
CNDP, 2005  
Licence monoposte  
Réf. 755A2165 – 49 €  
Licence établissement  
Réf. 755A2166 – 129 €



Cédérom PC et livret (112 p.)  
CNDP, 2003  
Licence monoposte  
Réf. 755A0471 – 49 €



Cédérom PC et livret (87 p.)  
CNDP, 2001  
Licence monoposte  
Réf. 755A0114 – 41,21 €

## Une éducation à l'environnement pour un développement durable

La collection « Progrès » propose des supports spécialement conçus pour l'approfondissement des connaissances, l'entraînement, le renforcement des compétences de l'élève, son travail personnel.

### Des itinéraires de découverte diversifiés

Ces cédéroms multimédia permettent de préparer des sorties sur le terrain pour appréhender le peuplement des milieux explorés ; identifier, classer les êtres observés et connaître leur biologie ; comprendre l'évolution des écosystèmes au cours des saisons et s'initier au respect de l'environnement en intégrant les enjeux économiques.

### Une source documentaire exceptionnelle

Chaque cédérom possède sa propre médiathèque proposant un glossaire, des fiches signalétiques, des illustrations originales, des animations infographiques, des séquences vidéo.

# Collection « Progrès » À la découverte des écosystèmes

**SCÉRÉN**

SERVICES CULTURE ÉDITIONS  
RESSOURCES POUR  
L'ÉDUCATION NATIONALE

[CNDP – CRDP]

### Où trouver ces produits ?

À la Librairie de l'Éducation  
13, rue du Four - 75006 Paris  
Métro Mabillon

Dans les librairies des CRDP et CDDP  
[www.sceren.fr/cndp\\_reseau/](http://www.sceren.fr/cndp_reseau/)

Sur la Cyberlibrairie  
[www.sceren.fr](http://www.sceren.fr)

- 02  **Edito** - CHRISTIAN BRODHAG
- 04  **Introduction scientifique** - SYLVIE JOUSSAUME
- 06  **Que nous disent les archives géologiques du CO<sub>2</sub> et du climat ?**  
PIERRE NEHLIG
- 12  **Les empreintes paléothermiques du sous-sol**  
LAURENT GUILLOU-FROTTIER
- 18  **Paleoclimate from ice cores**  
JEAN JOUZEL ET CLAUDE LORUIS
- 24  **Ruptures d'équilibre au sein du système climatique**  
JEAN-CLAUDE DUPLESSY ET MASA KAGEYAMA
- 30  **Variations climatiques naturelles et anthropiques**  
EDOUARD BARD
- 36  **Impact du changement climatique sur le littoral**  
NICOLE LENÔTRE ET RODRIGO PEDREROS
- 44  **Climate change and ground movements**  
HORMOZ MODARESSI
- 50  **Retrait-gonflement des sols argileux : un aléa géologique lié aux conditions climatiques**  
MARC VINCENT
- 56  **La sensibilité des eaux souterraines au changement climatique**  
JEAN-LOUIS PINAULT
- 62  **Les conséquences de la dérive climatique : comment s'adapter ?**  
MARC GILLET
- 72  **Capture et stockage du dioxyde de carbone : le rapport du GIEC**  
JACQUES VARET
- 78  **Capture et stockage géologique du CO<sub>2</sub> : un recours nécessaire pour lutter contre le réchauffement planétaire**  
ISABELLE CZERNICHOVSKI-LAURIOL
- 86  **Geothermal exploration and development in Ethiopia**  
MESERET TEKLEMARIAM
- 94  **Changement climatique : un double défi pour le bâtiment**  
MARC WECKSTEIN ET JEAN-LUC SALAGNAC
- 100  **Tribune ADEME** - FRANÇOIS MOISAN
- 102  **Tribune Ministère de l'industrie** - ALEXANDRE THROO
- 104  **Points de vue croisés** - DOMINIQUE DRON - PHILIPPE QUIRION
- 106  **Évènement** - MARTINE CASTELLO
- 110  **Chiffres clés**
- 112  **Brèves**



EDITO





# Géosciences et changements climatiques



**Christian Brodhag**

DÉLÉGUÉ INTERMINISTÉRIEL  
AU DÉVELOPPEMENT DURABLE  
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET  
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

[christian.brodhag@ecologie.gouv.fr](mailto:christian.brodhag@ecologie.gouv.fr)

© Eric Nocher

Sciences éclairantes, coutumières des échelles temporelles géologiques, les géosciences nous donnent les principales clés d'analyse du phénomène des changements climatiques. La connaissance des paléoclimats, rendue possible grâce aux échantillons d'atmosphère piégés dans les glaces, est sans doute l'élément le plus déterminant et immédiat dans la compréhension et la mobilisation des décideurs. Les modèles complexes et leurs incertitudes ne parlent pas aussi clairement à l'opinion que des « bulles fossiles ». La bonne connaissance des évolutions du climat, sa modélisation et une observation fine nous permettent d'identifier la contribution anthropique et, par conséquent, les responsabilités directes de nos modes de développement non durables.

La plupart des phénomènes actifs de ces changements se produisent aux interfaces entre les grands réservoirs, atmosphère, hydrosphère, biosphère et lithosphère. Ils ne peuvent être compris que par des approches transdisciplinaires, par le couplage entre des modélisations toujours plus complexes alimentées par des observations toujours plus diversifiées.

Certains de ces domaines d'interface sont traités dans cette édition, comme le retrait-gonflement des sols argileux, l'érosion du littoral et la dynamique des traits de côtes ou les eaux souterraines... Une bonne anticipation de ces changements est la condition d'un dimensionnement correct des politiques d'adaptation. La stratégie française d'adaptation aux changements climatiques, dont la rédaction vient d'être achevée, trace des premières pistes mais elle n'est qu'une première étape qui appelle à la mise en œuvre d'études régionales mobilisant largement les géosciences.

Sciences agissantes, les géosciences portent leur part de responsabilité dans les changements climatiques puisque l'exploration et l'exploitation des richesses fossiles du sous-sol ont permis l'utilisation massive des énergies fossiles carbonées ; ces gisements fossiles que les activités photosynthétiques du passé lointain ont pu péniblement retirer de l'atmosphère. Les mêmes connaissances vont nous permettre de stocker le CO<sub>2</sub>. Mais cette application d'avenir prometteuse risque toutefois d'apparaître comme la solution ultime permettant d'exploiter sans compter le charbon. Elle ne nous dispense pas de prendre des mesures d'économie d'énergie et de diversification vers les énergies renouvelables. Dans ce sens les géosciences peuvent aussi apporter leur contribution à la diète énergétique par la

géothermie et l'exploitation des énergies marines sur lesquelles la France et la Grande Bretagne mobilisent conjointement leur expertise.

Le monde qui s'ouvre est profondément différent de celui que nous devons abandonner. Au-delà des productions alimentaires, les agroressources seront mobilisées sur l'énergie (biocarburant et biocombustibles), les matériaux ou la chimie. Les tensions sur l'utilisation des terres s'accroîtront notamment en compétition plus forte avec les espaces naturels qui procurent de nombreux services écologiques. Ces services des écosystèmes, dont une récente étude des Nations Unies a montré la fragilité et l'importance, mériteraient d'être étudiés de façon approfondie.

La planification de l'usage des terres et la gestion des services écologiques et des agroressources devront s'appuyer sur un recours accru aux géosciences.

Le développement d'approches nouvelles, comme l'écologie industrielle, vise finalement à réguler les grands cycles biogéochimiques comme celui du carbone en intégrant une nouvelle sphère : la socio-technosphère. Si le protocole de Kyoto et la directive européenne sur les quotas ouvrent la piste à un marché des émissions de carbone, ce marché repose sur la capacité à définir des entités, des systèmes pour lesquels on pourra établir des bilans captation / émission de CO<sub>2</sub> et construire un système d'allocation vérifiable. Le Plan National d'Allocation des Quotas (PNAQ) ne concerne aujourd'hui que les grandes installations industrielles ; multiplier les projets domestiques, dans le domaine de l'agriculture, des transports ou du bâtiment, nécessite cette capacité de faire un bilan fiable et peu coûteux.

En effet les méthodes développées par les géosciences en termes d'observation, de modélisation, de gestion d'informations géoréférencées ou de représentation mériteraient d'être mobilisées plus largement dans la prise de décision et dans le soutien à des politiques innovantes.

Il faut en effet à la fois que la vérité sociale et économique s'appuie plus sur la vérité scientifique quand celle-ci est fondée, et sur des processus de précaution quand elle ne l'est pas. Les sciences en général, et les géosciences en particulier, sont au cœur des stratégies de développement durable, les connaissances scientifiques doivent donc être au cœur de la société, mais pour cela elles doivent apprendre à dialoguer avec les profanes, mettre leurs doutes et leurs certitudes sous les feux des interrogations profondes de la société. Il n'y a de connaissance scientifique aboutie qu'une fois partagée largement par la société.

Cette présente édition contribue à ce partage de la connaissance.



# Climat :

## revoir nos modes de vie, développer la recherche

*L'homme modifie la composition de l'atmosphère et renforce l'effet de serre en émettant gaz carbonique, méthane et d'autres composés absorbant le rayonnement infrarouge émis par la Terre. Ces modifications résultent des activités humaines : industrie, agriculture et déforestation.*

Les derniers résultats rassemblés par le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat en 2001 prévoient un réchauffement de la planète de 1,4 à 5,8 °C selon le scénario économique et démographique d'émission des gaz à effet de serre. Il conclut également que la majeure partie du réchauffement des cinquante dernières années résulte des activités humaines. Nous rentrons dans une nouvelle ère, l'Anthropocène, où l'homme devient un acteur majeur.

Un changement de 5 °C est loin d'être négligeable ; il y a 20 000 ans, en pleine glaciation, on estime qu'il devait faire environ 5 °C de moins à l'échelle de la planète ! Les analyses scientifiques nous montrent également que les niveaux de concentration en gaz carbonique et en méthane mesurés dans les glaces de l'Antarctique n'ont jamais atteint des valeurs aussi élevées qu'actuellement, et ceci depuis plus de 700 000 ans.

Demain, à quels changements devons-nous faire face ? Réchauffement, élévation du niveau des mers, pluies intenses ou sécheresses selon les régions, modifications des événements extrêmes, fonte des glaciers, impacts sur les écosystèmes : les changements sont importants et rapides si l'on considère les variations passées du climat.

Limiter l'ampleur du réchauffement climatique nécessite de revoir nos modes de production et de consommation de l'énergie. Si nous voulons stabiliser la concentration de gaz carbonique, il nous faut fortement réduire nos émissions de plus d'un facteur 3.

Energies nouvelles, énergies renouvelables, économies d'économie d'énergie deviennent nécessaires. Une solution complémentaire est également envisagée basée sur la capture du gaz carbonique lors de sa production et son stockage dans des formations géologiques.

S'il est certain que le climat va se réchauffer et qu'il faut agir, les incertitudes restent grandes quant à l'amplitude du réchauffement et à la répartition régionale. Ces incertitudes résultent pour partie du niveau d'émission de gaz à effet de serre et, d'une certaine façon, représentent notre marge de manœuvre. L'autre partie des incertitudes provient de la difficulté de représenter le climat et de la complexité du système climatique. De nombreuses recherches sont nécessaires pour :

- > mieux comprendre le rôle des aérosols et leur interaction avec les nuages,
- > prendre en compte la biosphère et son rôle dans le cycle du carbone,
- > mieux comprendre le fonctionnement de la circulation thermohaline et son rôle passé et futur sur le climat,
- > comprendre aussi comment les écosystèmes seront affectés...

Différentes disciplines concourent ensemble à améliorer notre connaissance du climat et de son évolution. Les géosciences en font partie, comme l'illustrent les articles de ce numéro. ■



**Sylvie Joussaume**

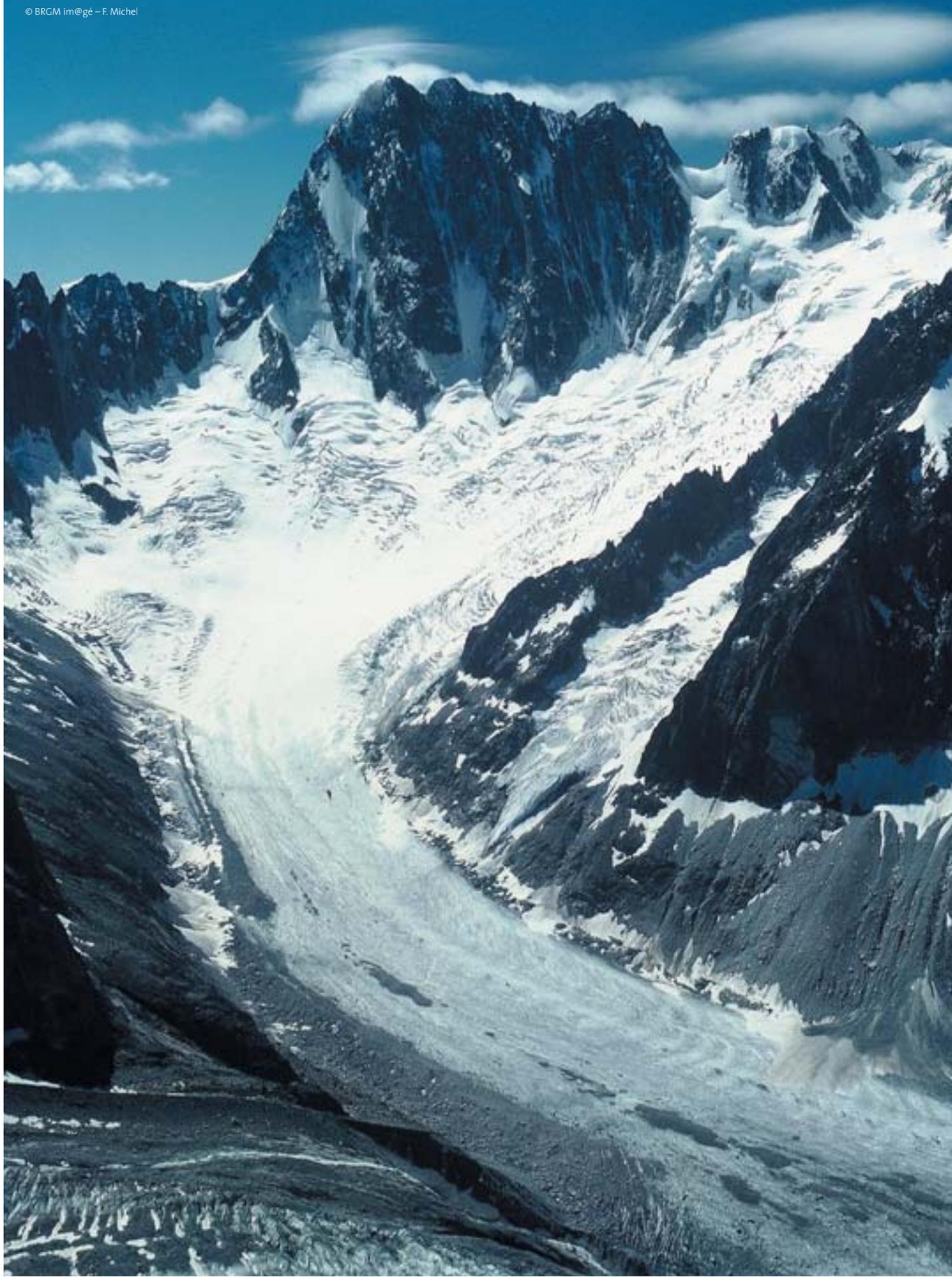
DIRECTRICE DE L'INSTITUT  
NATIONAL DES SCIENCES DE  
L'UNIVERS DU CNRS

Auteur du livre  
«Climat, d'hier à demain»,  
CNRS éditions, 2000.

**Recul du glacier de Leschaux,  
Massif du Mont Blanc.**

*The shrinking of the Leschaux  
glacier in the Mont Blanc Massif.*

© BRGM im@gé – F. Michel



Notre climat a connu par le passé d'importants changements même si l'histoire géologique indique que pendant plus de la moitié de l'histoire de la Terre, les oscillations thermiques moyennes ont été relativement faibles. Le recours aux géosciences sur de très longues périodes permet de reconstituer l'histoire géologique du CO<sub>2</sub>, ses liens avec les paléoclimats et l'importance capitale des gaz à effet de serre dans l'évolution du climat terrestre. Cette remontée dans le temps permet de mieux mettre en relief le parallélisme entre le réchauffement climatique récent et l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

## Que nous disent les archives géologiques du CO<sub>2</sub> et du climat ?



06



**Pierre Nehlig**

GÉOLOGUE  
RESPONSABLE DE L'UNITÉ  
MODÉLISATIONS ET APPLICATIONS  
SERVICE CONNAISSANCE ET DIFFUSION  
DE L'INFORMATION GÉOLOGIQUE - BRGM  
p.nehlig@brgm.fr

▲  
**Calcaires à stromatolithes du Néoprotérozoïque du Nord du bassin de Taoudenni (Nord Mauritanie), tronqués par une surface à stries glaciaires (glaciation néoprotérozoïque).**

*Stromatolithic limestone of Neoproterozoic age in the north of the Taoudenni Basin (northern Mauritania), truncated by a surface with glacial striations (Neoproterozoic glaciation).*

© J. Roger

Les travaux de l'IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change, (2001)] ont mis en évidence une variation rapide, depuis un siècle, du climat de la Terre qui pouvait être corrélée avec les importantes émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique (cf. E. Bard – Ce numéro, p. 30 à 35). Ces travaux ont mis au premier plan le rôle des gaz à effets de serre, notamment le CO<sub>2</sub> dans l'évolution du climat. Tous les scénarios d'émission de gaz à effet de serre indiquent un réchauffement moyen de l'ordre de 1 à 5 °C d'ici un siècle.

Les conséquences et la portée de ces changements d'origine anthropique devraient se traduire par d'importantes modifications climatiques qui auront une action sur tous les systèmes vivants. Si la prise de conscience de ce bouleversement potentiel vient pour l'essentiel des océanologues, glaciologues et climatologues, les géologues savent depuis longtemps que le climat de la Terre a connu par le passé d'importants et quelquefois brusques changements. La terre a en effet gardé des enregistrements des températures passées sur des dizaines de millions d'années.

Le parallélisme entre le réchauffement récent et l'augmentation de l'émission de CO<sub>2</sub> a conduit à accorder aux gaz à effet de serre une importance capitale dans l'évolution du climat terrestre. Encore faut-il s'interroger : qu'en est-il à l'échelle des temps géologiques ? Quels sont les outils des reconstructions paléoclimatiques ? Quelle est l'histoire géologique du CO<sub>2</sub> et ses liens avec le climat ?

“  
Tous les scénarios d'émission  
de gaz à effet de serre  
indiquent un réchauffement  
moyen de l'ordre de 1 à 5 °C  
d'ici un siècle.”

## La Terre : une planète à part au sein du système solaire

La Terre est unique parmi les planètes telluriques. Ainsi, malgré un ensoleillement et des températures très différents, Vénus et Mars ont pratiquement la même composition atmosphérique avec plus de 95 % de CO<sub>2</sub>, quelques % d'azote et moins de 1 % d'oxygène. L'atmosphère terrestre en revanche est très appauvrie en CO<sub>2</sub> (0,3 %) alors que l'oxygène est présent à plus de 20 %. Cette singularité est la conséquence de l'apparition de la vie sur Terre.

Pour connaître les teneurs initiales en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, il suffit de calculer les quantités de CO<sub>2</sub> stockées dans les roches carbonatées terrestres, ou alors, connaissant la quantité d'eau, d'appliquer le rapport CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O des chondrites représentatives de la Terre primordiale. Ces méthodes fournissent des pressions initiales de CO<sub>2</sub> près de 100 000 fois supérieures à l'actuelle.

## A l'échelle du milliard d'années : le paradoxe du soleil pâle

À l'échelle du milliard d'années, le problème fondamental concerne la puissance radiative du soleil. Les modèles standard indiquent que le rayonnement solaire il y a 4,5 milliards d'années était de 30 % inférieur à l'actuel et qu'il a ensuite évolué de manière plus ou moins linéaire. En prenant en compte l'albédo moyen de la Terre et les gaz à effet de serre actuels, ces modèles montrent que la température de la surface terrestre était inférieure à la température de congélation de l'eau avant 2 Ga et était donc totalement gelée. Pourtant, les premières traces de vie apparaissent dès 3,5 Ga et les premiers sédiments marins à près de 4 Ga. Ce conflit entre données géologiques et prédictions des modèles radiatifs solaires a été appelé le "Faint young sun paradox", paradoxe qui peut être résolu par l'abaissement de l'albédo terrestre (qui ne semble pas avoir varié de manière significative) ou par l'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre. Si l'on considère que le CO<sub>2</sub> est le principal gaz à effet de serre (ce qui n'est pas for-

cément le cas avant 2 Ga), on peut alors calculer la pression partielle requise pour compenser le rayonnement moindre du soleil. Cela conduit à des teneurs en CO<sub>2</sub> au minimum équivalente à 300 fois les concentrations actuelles il y a 4,5 Ga.

## L'apparition de la vie à l'archéen

C'est à l'archéen qu'apparaissent les premières formes de vie. Les plus anciens témoignages sont d'ordre biogéochimique avec des inclusions de kérogènes enrichis en <sup>12</sup>C contenus dans des apatites trouvés dans des métaquartzites du Groenland datées de 3,8 Ga. Dans l'ouest de l'Australie et au Zimbabwe les plus anciennes traces de vie (3,4 Ga) ont été découvertes sous forme de structures biosédimentaires appelées stromatolithes. Il s'agit, par analogie avec des formes de vie actuelles, de dépôts calcaires précipités autour de filaments de cyanophycées (algues bleues). Plus près de nous des micro-organismes analogues à des bactéries bourgeonnantes et à des algues bleues ont été découverts dans des silex datés à 2,5 Ga.

## Le changement de composition de l'atmosphère à la transition Archéen-Protérozoïque, entre 2,5 et 2 Ga

Avec le Protérozoïque apparaissent les premiers signes d'une atmosphère enrichie en oxygène. L'absence d'oxygène atmosphérique à l'archéen est attestée par la présence de dépôts d'uraninites (UO<sub>2</sub>), variété réduite de l'uranium. Dans une atmosphère dépourvue d'oxygène, jusque vers -2 Ga, UO<sub>2</sub>, insoluble, a pu être transportée et déposée sous forme de roches sédimentaires détritiques. A partir de 2 Ga, avec du dioxygène dans l'atmosphère, UO<sub>2</sub> n'est plus stable en surface et s'oxyde en UO<sub>3</sub>, soluble.

L'apparition d'oxygène est aussi attestée par l'existence d'abondants dépôts de minerais de fer rubanés (Banded Iron Formations, BIF) formés d'une alternance de lamines millimétriques d'hématite Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de quartzite. Avant 2 Ga, le fer mis en solution à l'état ferreux Fe<sup>2+</sup> est lessivé en grande quantité de la surface des continents et transporté par les eaux dans les bassins marins peu profonds. Il y est alors oxydé et précipité à l'état ferrique par l'oxygène produit par la biomasse photosynthétique marine. A partir de 2 Ga, on observe des couches rouges continentales riches en hématite où le fer est à l'état ferrique (Fe<sup>3+</sup>) du fait de la richesse en dioxygène de l'atmosphère.

“  
Les conséquences et  
la portée des  
changements d'origine  
anthropique  
devraient se traduire  
par d'importantes  
modifications  
climatiques qui auront  
une action sur  
tous les systèmes  
vivants”

Actuellement, une grande part du dioxyde de carbone terrestre est stockée dans les carbonates, essentiellement les roches calcaires mais aussi les squelettes (vertébrés, cnidaires et bryozoaires), coquilles (Mollusques, Brachiopodes) et tests (foraminifères) de la biomasse. La présence des premiers sédiments carbonatés vers 2 Ga puis des premiers organismes à coquille vers 0,6 Ga atteste de la diminution progressive du CO<sub>2</sub> atmosphérique.

## De 2,5 milliards à 542 millions d'années : le mystère des glaciations précambriennes et la Terre «boule de neige»

C'est au Protérozoïque que des continents stables apparaissent et qu'une tectonique des plaques se développe. C'est aussi pendant cette ère qu'apparaissent probablement les premières cellules eucaryotes, il y a 1,8 à 1,4 Ga. Des observations géologiques (Fig. 1) indiquent que les glaciations les plus intenses se sont produites au Protérozoïque entre 750 et 600 Ma [Hoffman et al. (1998)].

L'origine de ces glaciations généralisées est encore en débat, mais est certainement en partie liée à une distribution géographique particulière des plaques continentales à la fin du Protérozoïque. En effet, les données paléomagnétiques indiquent l'absence de continents aux hautes latitudes il y a 600 – 700 Ma. Cela limite l'effet tampon du cycle carbonate-silicate (cf. ci-dessous) et permet une progression rapide des glaces. Au-delà d'un certain seuil, l'albédo terrestre va jusqu'à entraîner la glaciation totale de la Terre, résumé par le concept de Terre «boule de neige». C'est aussi le cycle carbonate-silicate qui permet d'expliquer le réchauffement très rapide associé aux phases de déglaciation et déduit de l'association systématique des dépôts glaciaires avec des carbonates qui les surmontent. En effet, l'albédo glaciaire est tellement élevé que seule une augmentation significative de l'effet de serre est capable de faire fondre la glace. Cette augmentation est la conséquence logique de l'activité volcanique qui introduit du CO<sub>2</sub> dans le réservoir atmosphérique alors que le piégeage de ce gaz par l'altération chimique des roches est empêché par les glaces.

Paradoxalement, c'est à la fin de cette période de glaciation généralisée, entre 650 et 500 Ma, que les principaux embranchements et formes d'organisation du règne animal vont apparaître. Les premiers méazoaires incontestables, invertébrés marins de taille inférieure au mètre (cnidaires, méduses, polychètes, arthropodes) ont été trouvés à Ediacara en Australie et sont datés de 640 Ma. Cent millions d'années plus tard, la faune de Burgess au Canada témoigne de l'apparition massive de la carapace et de la coquille carbonatée et phosphatée.

## Les reconstructions paléoclimatiques au Phanérozoïque et les corrélations avec le CO<sub>2</sub>

A l'échelle de temps du Phanérozoïque, ce sont les sédiments océaniques et les fossiles qui nous renseignent sur l'évolution du climat. Ainsi, les climats sont contraints par :

► **la biostratigraphie**, étude des espèces fossiles que l'on rencontre dans les roches sédimentaires et qui varient dans le temps et en fonction des conditions écologiques, donc du climat ;

► **la composition isotopique des glaces et de l'eau des océans**. Les mesures des isotopes de l'oxygène de l'eau de pluie montrent un fractionnement important selon la latitude qui s'explique par une évaporation préférentielle dans les régions intertropicales et une migration par advection vers les pôles. Lors de ce déplacement, les premières gouttes d'eau contiennent une proportion légèrement plus importante d'<sup>18</sup>O car les molécules d'eau qui en contiennent se condensent plus facilement. Plus il fait froid, plus la vapeur d'eau se condense tôt au cours de son transit vers les pôles et moins il y a d'<sup>18</sup>O dans les précipitations aux pôles.



▲ Fig. 1 : Les falaises rocheuses le long de la côte namibienne ont fourni quelques-uns des plus beaux affleurements des dépôts fossiles associés à la "Terre boule de neige". On peut y voir des brèches qui correspondent à des dépôts glaciaires (le gros bloc clair a probablement été transporté par un iceberg et est tombé au fond de l'océan lors de la fusion de la glace) surmontés par des dépôts de carbonate caractérisés par de grandes gerbes de cristaux formés dans des eaux chaudes. La transition entre les deux dépôts illustre le passage rapide entre un environnement froid et l'effet de serre qui prolonge «La Terre boule de neige». Le dépôt glaciaire est daté à 635 Ma.

Fig. 1: The rocky coast of Namibia hosts one of the most beautiful outcrops of fossil deposits related to the "Snowball Earth". We see breccias that correspond to glacial deposits—the large light-coloured block probably was transported by an iceberg and fell to the ocean bottom as a 'drop-stone' when the ice melted—overlain by carbonate deposits characterized by great bundles of crystals that formed in warm waters. The transition between the two deposit types illustrates the rapid passage from a cold environment to a greenhouse effect that extended the «Snowball Earth». The glacial deposit has been dated at 635 Ma.

© P. Hoffman

# Surchauffe ?



## DNV Climate Change Services. Avant qu'il ne soit trop tard

En mai 2002, l'UE et tous ses Etats Membres ont ratifié le Protocole de Kyoto. Par cet acte, l'UE s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES) de 8%. Avec l'établissement du Système Européen d'Echanges des Crédits d'Emission, l'Europe incite les entreprises à gérer leurs émissions de GES. DNV Certification est le principal vérificateur indépendant pour les GES ayant conduit des opérations globales et disposant de plusieurs années d'expérience en vérification des schémas globaux d'émissions et d'une expertise technique dans les secteurs industriels concernés au sein de l'UE. **Pour plus d'informations, tél : 04 78 90 91 40.**

[www.dnv.fr](http://www.dnv.fr)



MANAGING RISK

Les glaces qui s'accumulent aux pôles peuvent donc être utilisées comme paléothermomètres. Inversement, puisque les glaces des pôles piègent l' $^{16}\text{O}$ , les océans s'enrichissent en  $^{18}\text{O}$  et permettent donc aussi d'utiliser les archives des sédiments océaniques sur une période de 100 Ma, imposée par le renouvellement des fonds océaniques ;

► **les foraminifères.** Ces coquillages marins unicellulaires de taille millimétrique s'accumulent, à la mort des organismes, au fond des mers. Dès le début du XX<sup>ème</sup> siècle, les biologistes et les paléontologues remarquent que la distribution des espèces de foraminifères est fonction de la température de l'eau. Dans les années 1950 et 1960, le développement de la géochimie isotopique a montré que les foraminifères fractionnent les isotopes de l'oxygène en fonction de la température. Les foraminifères peuvent donc être utilisés comme des paléothermomètres ;

► **les dépôts glaciaires** fossiles témoignent de paléolatitudes et constituent ainsi des indicateurs de paléotempératures.

Cette évolution du climat peut être mise en rapport avec les paléoteneurs en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère évaluées par un ensemble de mesures locales décrites ci-dessous et de modèles globaux (GEOCARB III).

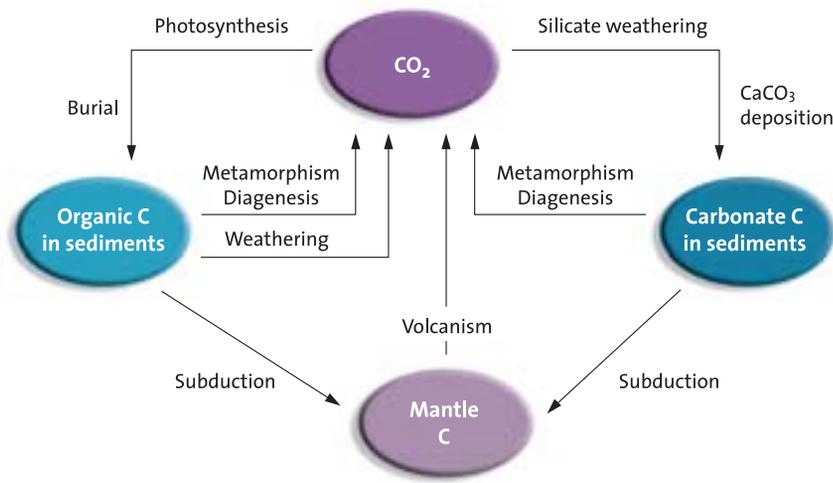
► **La composition isotopique du carbone des paléosols.** Cette méthode repose sur l'hypothèse que le carbone des carbonates pédogéniques est précipité en équilibre avec le carbone inorganique des eaux des sols et le  $\text{CO}_2$  des sols.

► **L'indice stomatique.** L'apparition des plantes au Dévonien permet d'utiliser l'indice stomatique des feuilles végétales pour estimer les teneurs en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère : plus il y a de  $\text{CO}_2$  et moins il y a de stomates. C'est ainsi que l'on sait qu'au Carbonifère, la teneur en  $\text{CO}_2$  était probablement aussi faible que de nos jours.

► **Les isotopes du bore** dans les carbonates. Cette méthode permet d'approcher les paléo Ph de l'eau en mesurant le rapport  $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$  d'organismes fossiles et donc, avec certaines hypothèses, d'approcher les teneurs en  $\text{CO}_2$  atmosphérique.

► **le cycle silicates-carbonates** et les reconstitutions géologiques. Sur des périodes supérieures au million d'années, les concentrations en  $\text{CO}_2$  atmosphériques sont d'abord contrôlées par le cycle carbonate-silicate. Une partie du  $\text{CO}_2$  atmosphérique est dissout dans l'eau de pluie formant de l'acide carbonique qui altère les roches siliceuses et libère des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$

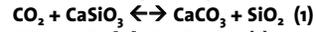
QUE NOUS DISENT LES ARCHIVES GÉOLOGIQUES DU CO<sub>2</sub> ET DU CLIMAT ?



◀ Fig. 2 : Modèle conceptuel du cycle du carbone à long terme.

Le cycle du carbone à long terme concerne les échanges de carbone entre les roches sédimentaires, le réservoir mantellique et l'atmosphère [Berner, (2003)].

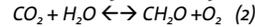
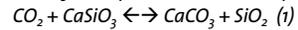
Il peut être résumé par les réactions suivantes qui sont la somme de multiples étapes intermédiaires :



L'équation (1), de gauche à droite, correspond au piégeage de dioxyde de carbone atmosphérique pendant l'altération des silicates et le transport des produits d'altération dans les océans où ils précipitent sous forme de carbonates. De droite à gauche cette réaction correspond aux réactions métamorphiques pendant l'enfouissement des roches carbonatées (zones de subduction...). L'équation (2), de gauche à droite correspond à la photosynthèse nette (=photosynthèse moins la respiration). Elle équivaut à l'enfouissement de matière organique dans les sédiments et à leur transformation en kérogène, huiles, gaz, charbon. De droite à gauche, elle correspond à l'altération de cette matière organique lorsqu'elle est exposée à l'oxydation par l'érosion ou lors du cracking thermique par enfouissement ou encore lorsqu'elle est brûlée par l'homme.

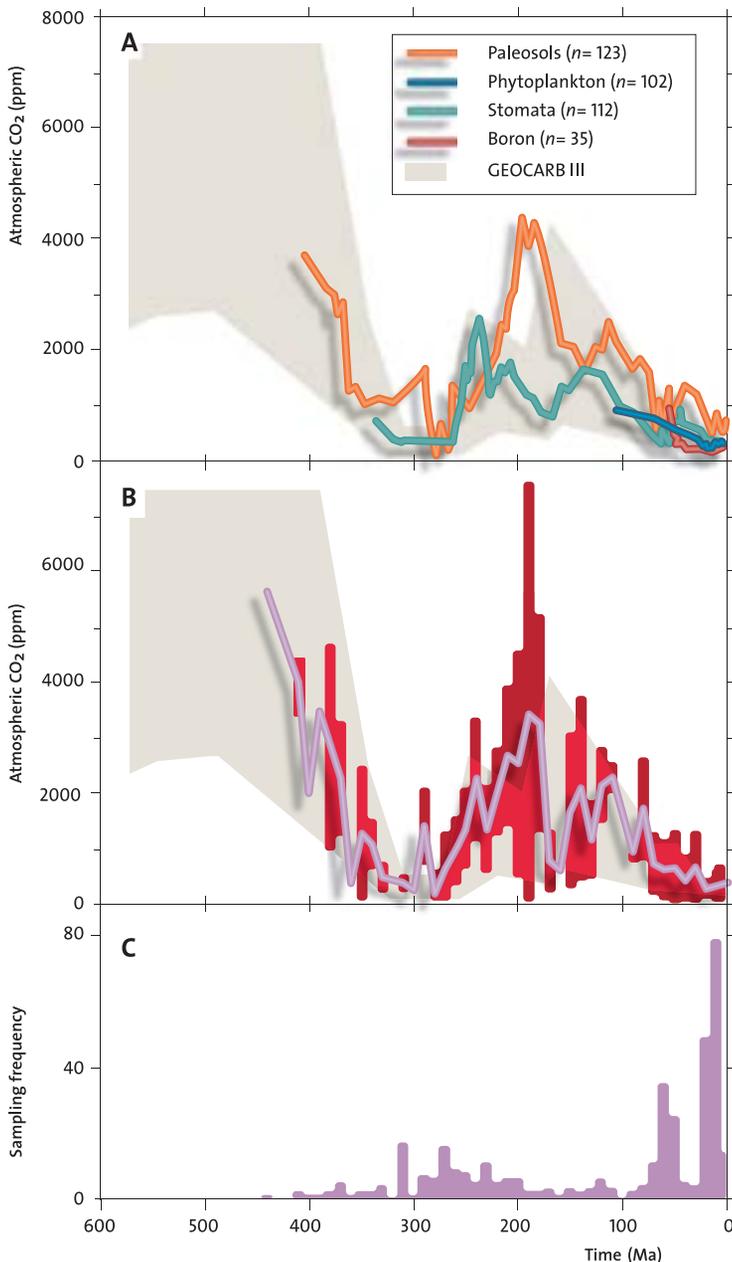
Fig. 2: Conceptual model of the long-term carbon cycle, concerning carbon exchanges between sedimentary rocks, the mantle reservoir, and the atmosphere [Berner, (2003)].

It can be summarized by the following reactions that are the sum of multiple intermediate steps:



Equation (1), from left to right, corresponds to the trapping of atmospheric carbon dioxide during the weathering of silicates and the transport of such weathering products into the oceans where they precipitate as carbonates. From right to left, this equation corresponds to the metamorphic reactions during the burial of carbonate rocks in subduction zones, etc. Equation (2), from left to right, corresponds to net photosynthesis (= photosynthesis less respiration). It is equivalent to the burial of organic matter in sediments and to its transformation into kerogen, oil, gas and coal. From right to left, it corresponds to the alteration of such organic matter when it is exposed to oxidation through erosion, or during thermal cracking as a result of burial, or when it is burned by Man.

Source : d'après Berner, 2003.



◀ Fig. 3 : Synthèse des teneurs en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère au cours du Phanérozoïque. A) Courbes = Synthèse de données paléosols, phytoplancton, stomates et bore (cf. texte), et en grisé l'estimation fournie par GEOCARB III. B) Courbe rose = Synthèse des données présentées en A (intervalles de 10 millions d'années) et histogramme rouge = Ecart type des données. C) Histogramme des quantités de données utilisées pour les reconstructions.

Fig. 3: Synthesis of atmospheric CO<sub>2</sub> contents during the Phanerozoic A) Curves = Synthesis of data from paleosols, phytoplankton, stomata and boron (cf. text); in grey the estimate provided by GEOCARB III. B) Pink curve = Synthesis of the data presented in A (intervals of 10 million years); red histogram = standard deviation of the data. C) Histogram of the data quantities used for the reconstructions.

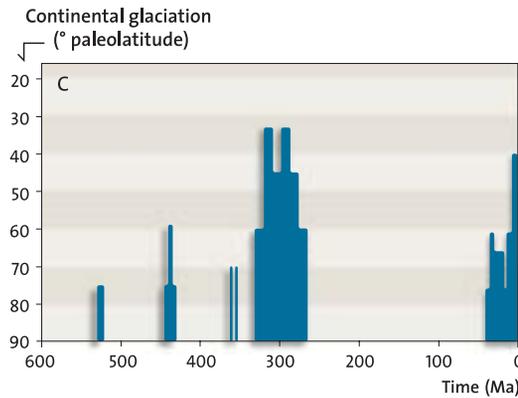
Source : d'après Royer et al., 2004

transportés vers les océans où ils sont transformés en carbonate de calcium par des organismes vivants. A leur mort ces organismes précipitent et forment les roches carbonatées qui s'accumulent sur le plancher océanique. L'expansion océanique les entraîne vers les zones de subduction où un ensemble de réactions métamorphiques transforme les carbonates en silicates et relâche du CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère. Ce processus recycle aujourd'hui une quantité équivalente à tout le CO<sub>2</sub> atmosphérique et océanique en moins d'un million d'années. Des reconstitutions géodynamiques et leurs effets sur le cycle silicate-carbonates (Modèles GEOCARB) ont permis d'affiner ces modèles d'évolution du CO<sub>2</sub> au cours de l'ensemble du Phanérozoïque (Fig. 2) [Berner et Kothalava, (2001)].

Le modèle GEOCARB III et les données fournies par les autres méthodes convergent (Fig. 3) et indiquent des teneurs élevées en CO<sub>2</sub> au début du Paléozoïque et une chute brutale au Permo-Carbonifère. Cette baisse est associée au développement des plantes vasculaires qui a accéléré l'altération des silicates et a entraîné une augmentation du piégeage de carbone organique dans les sédiments. Ce piégeage était d'autant plus important que les champignons capables de dégrader la lignine ne sont apparus que vers la fin du Paléozoïque entraînant une augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. C'est ce décalage entre l'apparition des plantes vasculaires et des champignons de type basidiomycètes capables de dégrader la lignine qui explique la concentration anormale de dépôts de matière organique (charbons, kérogènes, huiles, gaz) à cette époque. Après cela, le CO<sub>2</sub> est resté à des teneurs élevées pendant tout le Mésozoïque avant de baisser au Cénozoïque en partie grâce aux soulèvements orogéniques de cette période et à l'augmentation de l'altération.

“ Les minimums en CO<sub>2</sub> coïncident avec les deux grandes périodes glaciaires du Phanérozoïque autour de 330 et 270 millions d'années et pendant les 30 derniers millions d'années. ”

“ L'histoire géologique indique que pendant plus de la moitié de l'histoire de la Terre, les oscillations thermiques moyennes ont été relativement faibles. ”



**Fig. 4 : Distribution latitudinale des glaciations Phanérozoïques d'après les dépôts et les morphologies glaciaires (tillites, roches striées...).**  
 Fig. 4: Latitude distribution of Phanerozoic glaciations based on the occurrences of glacial deposits and morphologies (tillite, striated rock, etc.)

Source : d'après Royer et al., (1988)

Ces variations du CO<sub>2</sub> sont bien corrélées avec celles des paléoclimats [Royer et al. (2004)]. Les minimums en CO<sub>2</sub> coïncident avec les deux grandes périodes glaciaires du Phanérozoïque autour de 330 et 270 Ma et pendant les 30 derniers millions d'années (Fig. 4). Cela suggère qu'il puisse y avoir un lien à l'échelle des temps géologiques entre l'effet de serre associé au CO<sub>2</sub> et le climat.

### Conclusion

L'histoire géologique indique que pendant plus de la moitié de l'histoire de la Terre, les oscillations thermiques moyennes ont été relativement faibles, l'eau ne s'est jamais entièrement vaporisée et n'a été gelée que pendant de très courtes périodes. Pourtant, pendant la même période, la vie a profondément modifié la composition chimique de l'atmosphère et d'autres paramètres ont varié : augmentation du rayonnement solaire, refroidissement de la Terre, changement de régime de la tectonique des plaques. Les géosciences viennent donc corriger par la profondeur de champ que donne la très longue durée les modèles climatiques fondés sur des échelles de temps très courtes. ■



### A geological perspective on CO<sub>2</sub> and climate change

CO<sub>2</sub> variations are well correlated with paleoclimatic variations on a geological time scale. CO<sub>2</sub> minima coincide with the two great glacial periods during the Phanerozoic, around 330 and 270 Ma, as well as the one of the last 30 million years. This suggests that, at the scale of geological time, there could well be a link between climate and the greenhouse effect associated with CO<sub>2</sub>. During more than half of the Earth's history, average thermal oscillations have been relatively weak. However, during the same period, life has profoundly modified the chemical composition of the atmosphere; other parameters that have varied as well include the increase of solar radiation, cooling of the earth, and changes in the plate-tectonics regime. The depth of vision provided by the very long time scale of geosciences thus helps in correcting the climatic models based on - geologically-shorter time scales.

Les variations climatiques des derniers millénaires ont laissé des empreintes dans les profondeurs du sous-sol. Par simple diffusion thermique, les fluctuations de la température du sol se propagent lentement en profondeur. En analysant scrupuleusement les courbures des géothermes, il est possible de reconstruire les grands traits de l'histoire climatique d'une région, à une échelle de temps allant jusqu'à plusieurs millénaires. Les analyses globales des données géothermiques ont ainsi permis de déchiffrer les variations spatiales des tendances paléoclimatiques.

**Les carottes de forage nous apprennent que la diffusion thermique est un processus très lent dans le sous-sol.**

*Core samples tell us that thermal diffusion is a slow process in the subsurface.*

© Christian Judei / Palais de la découverte

# Les empreintes paléothermiques du sous-sol



**Laurent Guillou-Frottier**

GÉOPHYSICIEN  
SERVICE DES RESSOURCES  
MINÉRALES – BRGM  
l.guillou-frottier@brgm.fr

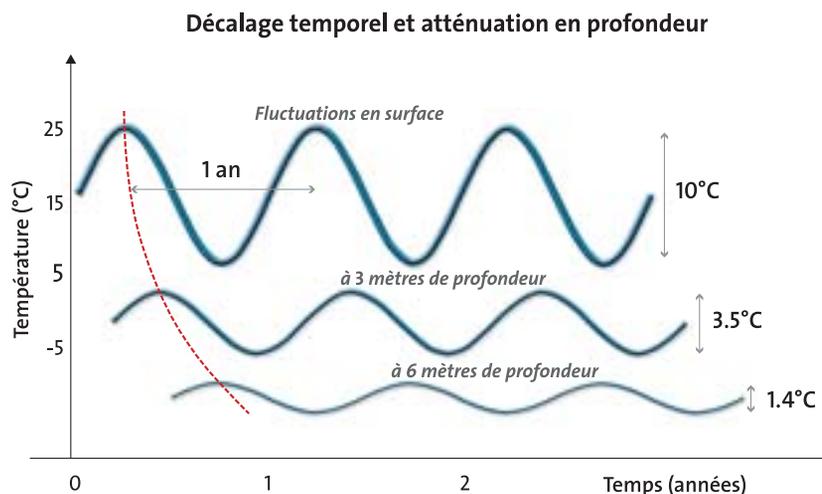
## Paléoclimat et forages

La paléoclimatologie consiste à reconstruire et à comprendre les changements du climat, qu'il s'agisse des derniers siècles, des derniers millénaires ou même encore des périodes plus reculées. Les données instrumentales des stations météorologiques sont trop rares et ne remontent, au mieux, qu'à quelques siècles. Ainsi, de nombreuses techniques ont été développées pour déchiffrer les variations anciennes de la température de l'air à la surface du globe. Parmi celles-ci, des méthodes dites "indirectes", permettent de retrouver les durées et les amplitudes anormales des saisons. On analyse par exemple l'air emprisonné dans les carottes de glace pour connaître l'évolution de l'atmosphère. L'étude des cernes des arbres ("dendrochronologie") permet également, selon l'espacement entre chacune, de préciser les périodes froides et chaudes du passé, par rapport à des "années repères". D'autres disciplines comme la palynologie (étude des pollens) renseignent également sur l'histoire de la végétation et donc sur les changements climatiques anciens.

Afin de retrouver "directement" les changements de température de la surface du sol pour une période donnée, une méthode simple et pourtant peu connue, a été développée puis validée dans les années 1980 [Vasseur et al. (1983)].

**Fig. 1 : Diagramme expliquant la propagation verticale d'une fluctuation de température en surface (ici la variation annuelle). Les trois courbes sont décalées verticalement pour la lisibilité, mais les amplitudes sont respectées.**  
*Fig. 1: Sketch explaining the vertical propagation of annual surface-temperature fluctuations. Curves are offset for better viewing, but respective amplitudes are conserved.*

Source : L. Guillou-Frottier



Elle consiste à mesurer – dans un forage de plusieurs centaines de mètres de profondeur – la variation verticale de la température (mesure du "géotherme"), et à transformer l'information spatiale obtenue en information temporelle, par le biais de la théorie de la diffusion thermique. En d'autres termes, le gradient thermique naturel, généralement considéré comme constant, est en réalité affecté dans les premières centaines de mètres par la variabilité temporelle de la température du sol. Ainsi, toute perturbation thermique en surface, qui s'est produite dans le passé, se propage dans le sous-sol en y laissant une empreinte caractéristique. La théorie de la conduction de la chaleur fournit les expressions exactes – au sens mathématique – de l'amplitude et du décalage temporel de cette empreinte, pour une profondeur donnée. L'exercice consiste donc à inverser le signal géothermique (température en fonction de la profondeur) pour en déduire une information paléoclimatique (température de surface en fonction du temps).

Les méthodes paléoclimatologiques classiques citées en introduction résolvent difficilement les paléoévolutions à long terme (plusieurs siècles) du climat. En effet, les techniques de reconstruction empirique des températures passées, utilisées par ces méthodes, ont été analysées statistiquement, et il apparaît que les amplitudes de la variabilité séculaire auraient été sous-estimées d'un facteur 2 [von Storch et al. (2004)].

*Toute perturbation thermique en surface, qui s'est produite dans le passé, se propage dans le sous-sol en y laissant une empreinte caractéristique.*

Grâce à la lenteur du processus de diffusion thermique, les géothermes filtrent les fluctuations de courte durée pour ne garder que l'empreinte des tendances paléoclimatiques séculaires. Les sources de perturbations thermiques du sous-sol sont toutefois nombreuses (voir encadré), et les incertitudes demeurent non négligeables : la comparaison des résultats issus de la méthode thermique avec ceux des autres méthodes reste donc indispensable.

### Diffusion des perturbations, atténuation et décalage temporel

Dans le cas où les transferts de chaleur dans le sous-sol sont purement conductifs (donc en l'absence de mouvement de fluides souterrains), la température du sous-sol à une profondeur donnée dépend principalement de trois paramètres, à savoir la température à la surface, la conductivité thermique du milieu et le flux de chaleur profond. En supposant que sur des périodes de plusieurs millénaires, les deux derniers paramètres restent constants, alors ce sont les variations temporelles de la température de surface qui régissent celles du proche sous-sol.

La théorie de la diffusion thermique fournit des outils analytiques pour déterminer quantitativement l'influence des conditions de surface sur les températures profondes. Pour donner un exemple concret, les variations annuelles de la température du sol, disons  $\pm 10^\circ\text{C}$ , se diffusent en profondeur à une "vitesse" verticale de 1,6 m/mois, tout en s'atténuant. Par exemple, le maximum estival ( $+10^\circ\text{C}$  début août) se traduira à une profondeur de 3 m par une perturbation maximum de  $+3,5^\circ\text{C}$ , mais que l'on mesurera 2 mois après ; à 6 m de profondeur, le maximum de la perturbation atteindra  $+1,4^\circ\text{C}$  et sera mesuré début décembre (voir fig. 1).

*“ La théorie de la diffusion thermique fournit des outils analytiques pour déterminer quantitativement l'influence des conditions de surface sur les températures profondes. ”*



Une perturbation climatique jouant sur 100 ans pénétrera dix fois plus profondément que la variation annuelle, mais à une vitesse dix fois moindre (valeurs issues de la théorie de la conduction). Lorsque l'on mesure la température à 100 mètres sous nos pieds, on obtient une information sur la température moyenne qui régnait à la surface il y a environ 300 ans, et l'effet des dernières glaciations (il y a environ 20 000 ans) se distingue dans les géothermes profonds de plusieurs milliers de mètres.

### Des gradients thermiques négatifs !

«La température augmente avec la profondeur». Cette affirmation - tout à fait correcte lorsque l'on considère un intervalle de plusieurs centaines de mètres de profondeur - peut être trompeuse si l'on examine les températures dans la première centaine de mètres. En effet, le réchauffement climatique du siècle dernier (de l'ordre de + 1 °C à la surface), s'est diffusé dans les profondeurs du sous-sol. Selon les conditions de surface qui caractérisent les échanges entre l'atmosphère et le sol (présence, nature et évolution du couvert végétal, en particulier), on enregistre ou non ce signal.

Dans le cas où les conditions thermiques de surface n'ont pas varié (voir un contre-exemple dans l'encadré ci-contre), on distingue aisément une courbure du géotherme, se traduisant par des gradients thermiques négatifs dans les premières dizaines de mètres de profondeur. C'est le cas de plusieurs profils montrés dans la figure 2, chacun étant mesuré dans la même région du bouclier canadien : le réchauffement climatique actuel se visualise aisément sur quatre profils (94-10, 94-11, 94-06, 94-07), mais cette courbure n'est pas présente sur certains (exemple 94-13), ce qui montre que les conditions de surface peuvent affecter les températures profondes.

### Inversion des géothermes

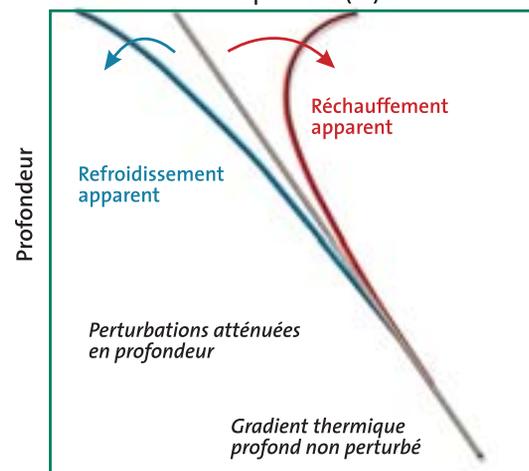
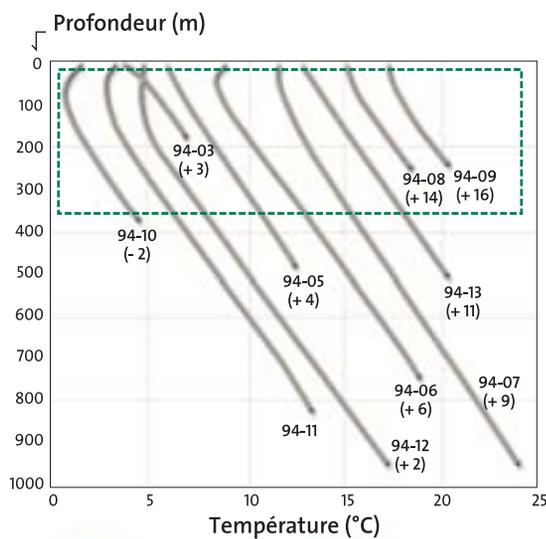
Afin d'éviter une interprétation qualitative trop hasardeuse, on procède à une analyse mathématique du signal (voir encadré page suivante). Pour décrypter les perturbations causées par des événements paléoclimatiques à la fois récents et anciens, on réalise une "inversion" des profils thermiques. En d'autres termes, on suppose que les mesures contiennent non seulement l'augmentation naturelle de la température avec la profondeur, mais également les signaux correspondant aux propagations successives d'un ensemble d'événements paléoclimatiques. La précision sur l'amplitude et la durée d'un événement paléoclimatique diminue dès que l'on examine des données très profondes, c'est-à-dire correspondant à des périodes très anciennes. Pour les siècles derniers, l'incertitude reste faible et l'on distingue facilement les "petits âges glaciaires" tout comme le réchauffement actuel.

## ▶ LES «FAUX» SIGNAUX PALÉOCLIMATIQUES

Les géothermes peuvent être perturbés de façon permanente par des hétérogénéités de la surface, menant à des courbures similaires à celles des signaux paléoclimatiques.

C'est le cas de profils thermiques situés au voisinage d'un corps géologique anormalement conducteur (comme les quartzites), et l'inversion des géothermes permet même de proposer une histoire paléoclimatique analogue à celle de la figure 3. C'est également le cas dans les

régions froides où des lentilles de pergélisol sont encore présentes. La figure 5 montre trois profils mesurés au nord du Canada. On remarque qu'en s'éloignant de la lentille, le profil thermique montre une courbure identique à un "réchauffement récent". Lorsque ces perturbations sont permanentes (plusieurs décennies à un siècle), alors il y a un risque à confondre les courbures dues à des hétérogénéités de surface, avec les signaux paléoclimatiques. ■



**Fig. 2 : En haut, les 10 profils de température mesurés dans une même région (ceinture de nickel de Thompson, Manitoba) montrent diverses courbures dans les 300 premiers mètres (zone encadrée). Le schéma du bas précise l'interprétation visuelle des courbures du géotherme. La présence d'un gradient thermique négatif (courbe rouge) est le signe du réchauffement récent.**

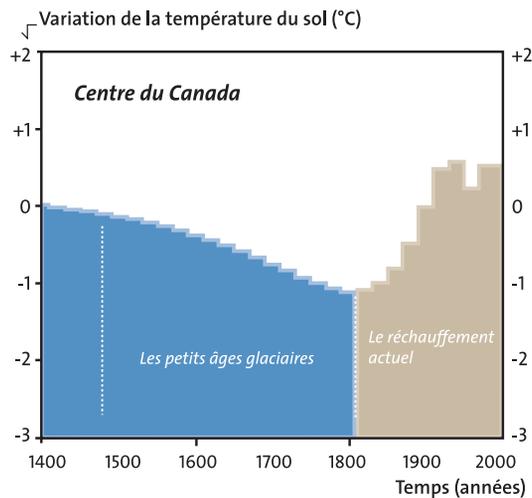
Fig. 2: Top: 10 temperature profiles measured in boreholes in the Thompson nickel belt, Manitoba, Canada, showing various curvatures within the first 300 m (dashed rectangle). Bottom: visual interpretation of geotherm curvatures. Presence of a negative temperature gradient (red curve) marks the signature of recent global warming.

Source : L. Guillou-Frottier et al. 1998

**Fig. 3 : Histoire de la température du sol obtenue par inversion simultanée de dix profils thermiques au centre du Canada.**

*Fig. 3: Ground-surface temperature history in central Canada as shown by simultaneous inversion of ten temperature profiles.*

Source : L. Guillou-Frottier



## Des résultats compatibles dans le monde entier

### Les «petits âges glaciaires»

La figure 3 montre l'histoire de la température du sol dans le centre du Canada, après avoir inversé simultanément 10 profils thermiques particulièrement adaptés à ce type d'études.

On distingue les "petits âges glaciaires", dont le minimum se situe vers 1820, suivi du réchauffement actuel, chacun des deux épisodes montrant des amplitudes d'environ 1°C. Toujours au Canada, mais dans la partie orientale, le signal du réchauffement actuel corrèle parfaitement avec l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> des carottes de glace. La chronologie des petits âges glaciaires a également été confirmée par des données dendrochronologiques [Beltrami et al. (1995)]. Dans le centre et dans l'ouest des Etats-Unis, des signatures similaires sont obtenues, mais les amplitudes des périodes anormales montrent clairement une dépendance avec la latitude.

Dans plusieurs régions d'Europe (République Tchèque, Bavière, centre de la France), les quelques forages très profonds (plus de mille mètres) ont permis d'identifier les petits âges glaciaires, mais également le "petit optimum climatique" de l'an Mil [Mareschal & Vasseur (1992)].

### ► LE RETOUR AUX CLIMATS ANCIENS

Pour «inverser» un profil thermique on isole la composante transitoire du signal. Un géotherme contient en effet la superposition de l'augmentation naturelle permanente de la température en fonction de la profondeur, et la réponse aux changements successifs de la température du sol. L'une des méthodes d'inversion, dite de "décomposition en valeurs singulières" permet de résoudre un système d'équations linéaires où les inconnues sont le géotherme d'équilibre, les amplitudes et les durées de chaque épisode paléoclimatique (fig. 6). ■



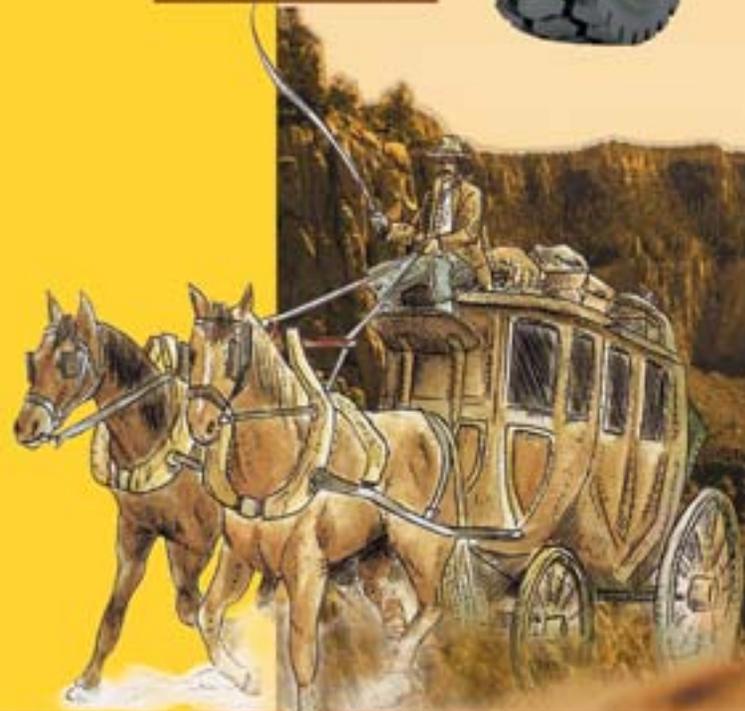
**WANTED**  
**GOODYEAR**

Les défricheurs  
d'espaces ont troqué  
la diligence pour  
les engins de travaux  
mais l'esprit est  
resté le même...

**GOODYEAR**

**L'ESPRIT**

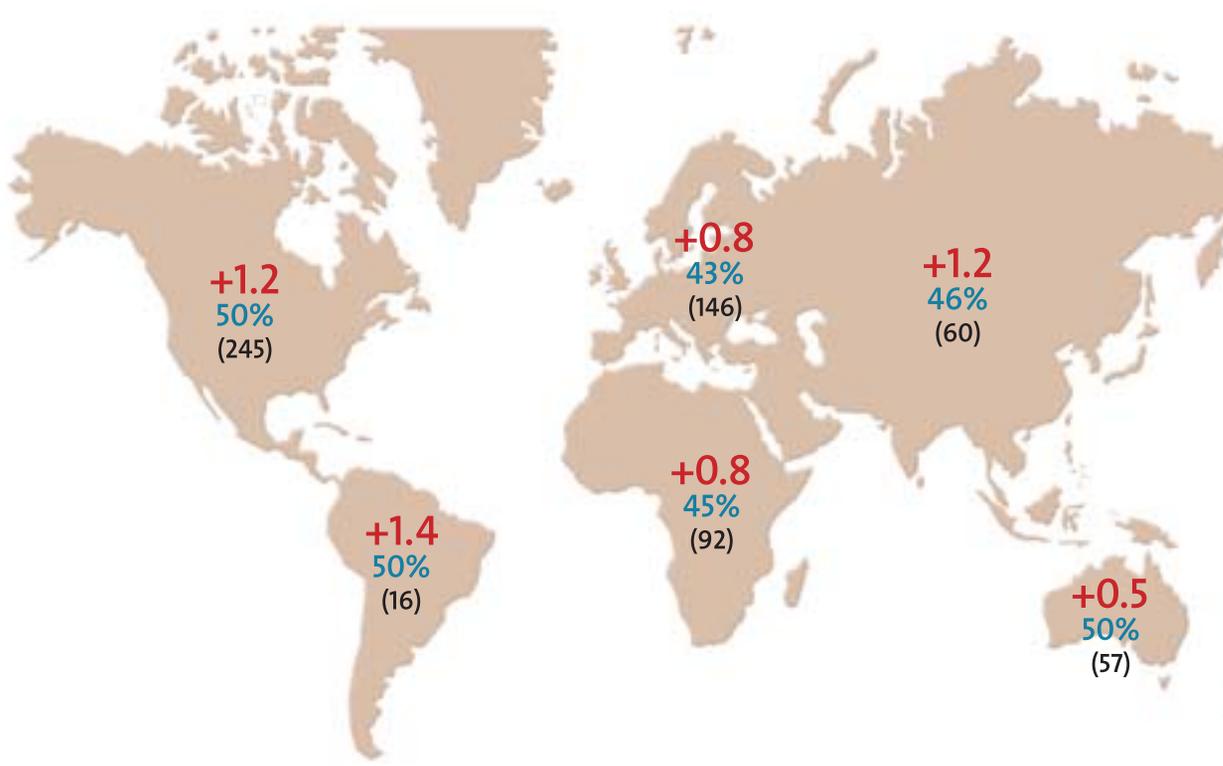
**PIONNIER**



\* Nous voulons Goodyear

GOODYEAR DUNLOP TIRES FRANCE

Tél. : 01 47 16 23 06 - Fax : 01 47 16 23 13



■ Élévation de la température du sol du continent (en °C) depuis 500 ans  
 ■ Pourcentage de cette élévation au cours du XX<sup>ème</sup> siècle  
 (Nombre de forages utilisés pour les reconstructions paléoclimatiques)

◀ Fig. 4 : Analyses globales des changements de la température du sol sur les 5 derniers siècles, à partir des mesures thermiques en forage, dont le nombre est indiqué entre parenthèses pour chaque continent. La moitié de cette élévation a eu lieu au cours du XX<sup>ème</sup> siècle (d'après Huang et al., 2000).  
 Fig. 4: Global analyses of ground-surface temperature changes over the past five centuries, as shown by inversion of borehole-temperature profiles. Number of used boreholes is indicated in brackets. Half of the temperature increase occurred during the 20<sup>th</sup> century (after Huang et al., 2000).  
 Source : L. Guillou-Frottier

### Le réchauffement actuel

L'ensemble des reconstructions paléoclimatiques (plus de 600 forages analysés) a été compilé pour donner une image globale sur les 5 derniers siècles (fig. 4, d'après Huang et al., 2000). Il apparaît que le réchauffement climatique est bien planétaire et, que sur tous les continents, c'est au cours du XX<sup>ème</sup> siècle que l'augmentation de la température à la surface du globe est la plus marquée. Toutefois, il est à noter que les amplitudes et le démarrage du réchauffement récent varient d'un continent à l'autre. Ces résultats, qu'ils concernent les petits âges glaciaires ou le réchauffement climatique actuel, confirment les modèles climatiques selon lesquels deux régions distantes d'au moins 500 km pourraient réagir différemment à des événements climatiques globaux.

“ Le réchauffement climatique est bien planétaire et, sur tous les continents, c'est au cours du XX<sup>ème</sup> siècle que l'augmentation de la température à la surface du globe est la plus marquée. ”

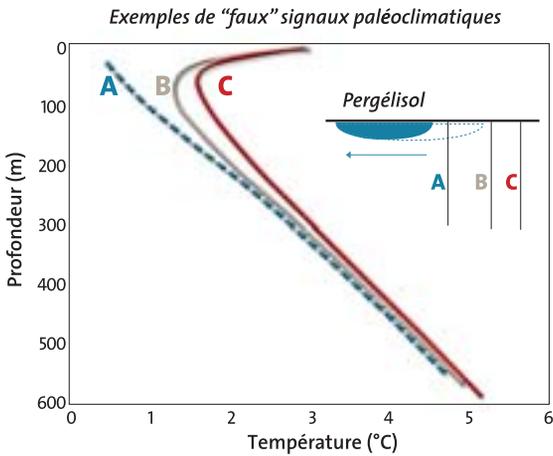
### Perspectives pour la paléoclimatologie thermique

La connaissance précise des variations anciennes du climat permet de tester des modèles prédictifs basés sur la simulation de l'évolution future du climat. Les modèles numériques de l'évolution du climat sont particulièrement sensibles à l'évolution à long terme de certains paramètres (concentration des gaz à effet de serre, température de l'eau de mer...).



### Paleoclimatic signatures in the subsurface

The knowledge and understanding of past climatic changes are essential and necessary for validating global climate models dedicated to predictive scenarios dealing with recent global warming. Numerous techniques allow inferring temperature histories over the past centuries. One way of directly obtaining past ground-surface temperatures consists in inverting temperature profiles measured in sufficiently deep boreholes. Transient surface-temperature perturbations propagate downward and, although attenuated, are recorded in the Earth's subsurface as perturbations of a steady-state temperature regime. In deep boreholes, two main episodes are clearly identified in the surface-temperature history: a cold period lasting several hundreds of years before the 19<sup>th</sup> century (the "Little Ice Ages") and the global warming trend of the past century. Comparisons between available reconstructions suggest that timing and amplitude of these climate episodes vary between regions. Amplitudes of long-term paleoclimatic trends derived from borehole temperatures are not easily decipherable with other techniques. Since numerous deep boreholes are still available in the world, it may be worth increasing the geothermal database on paleoclimatic signatures.



**Fig. 5 :** Profils de température mesurés dans trois forages adjacents, au voisinage d'une lentille de sol gelé. Les courbures des profils B et C ressemblent à celles des signaux paléoclimatiques concernant le réchauffement actuel (d'après Guillou-Frottier et al., 1998).

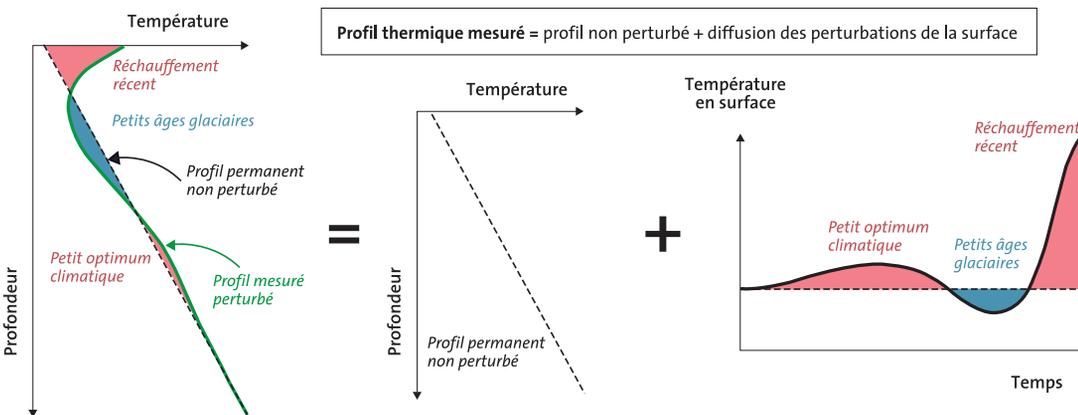
Fig. 5: Temperature profiles recorded in three neighbouring boreholes near a permafrost lens. Curvatures of profiles B and C look like those of paleoclimatic signatures related to recent warming (after Guillou-Frottier et al., 1998).

Source : L. Guillou-Frottier

Les différents scénarios prédictifs présentés par le GIEC, plus ou moins catastrophiques, montrent l'extrême sensibilité de ces modèles à l'estimation précise du réchauffement planétaire actuel. Aussi, c'est en affinant les différentes méthodes et en les comparant les unes aux autres que ces modèles prédictifs seront de plus en plus précis.

“ C'est en affinant les différentes méthodes et en les comparant les unes aux autres que ces modèles prédictifs seront de plus en plus précis. ”

Chaque année, on peut estimer le nombre de nouveaux forages suffisamment profonds à plusieurs milliers. Il n'est pas inconcevable d'imposer aux compagnies minières la mise à disposition et la conservation de ces nouveaux forages dans le but de réaliser de nouveaux profils thermiques. Par exemple, dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, certains projets industriels peuvent bénéficier de "crédits CO<sub>2</sub>", comme cela est le cas depuis l'année 2000 au travers du programme "Carbon Finance" de la Banque Mondiale. De tels engagements permettraient d'alimenter significativement la base de données "paléoclimats et forages", donc de parvenir rapidement à une couverture globale des archives paléoclimatiques du sous-sol. ■



**Fig. 6 :** Décomposition du signal mesuré en une composante permanente et une composante transitoire, qui représente la solution de l'inversion du géotherme, c'est-à-dire l'histoire de la température du sol.

Fig. 6: Break-down of the measured signal into a steady-state and a transient component, which is the solution of the temperature-profile inversion, i.e. the ground-surface temperature history.

Source : L. Guillou-Frottier

**Bibliographie :** Beltrami H., Chapman D.S., Archambault S., et Bergeron Y. (1995) - Reconstruction of high resolution ground surface temperature histories combining dendrochronological and geothermal data, Earth and Planetary Science Letters, 136, 437-445. Guillou-Frottier L., Mareschal J.C., et Musset J. (1998) - Ground surface temperature history in central Canada inferred from ten selected borehole temperature profiles, Journal of Geophysical Research, 103, B4, 7385-7397. Huang S., Pollack H.N., et Shen P.Y. (2000) - Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures, Nature, 403, 756-758. Mareschal J.C. et Vasseur G. (1992) - Ground temperature history from two deep boreholes in central France, Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, Global and Planetary Change section, 98, 185-192. Vasseur G., Bernard P., van de Meulebrouck J., Kast Y., et Jolivet, J. (1983) - Holocene paleotemperatures deduced from geothermal measurements, Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 43, 237-259. Von Storch H., Zorita E., Jones J., Dimitriev Y., Gonzales-Rouco F., et Tett S. (2004) - Reconstructing past climate from noisy data, Science, 306, 679-682.

# Paleoclimate from ice cores

Information available from ice cores has considerably increased over the last two years thanks to ice cores drilled at North GRIP in Greenland and at Dome C in Antarctica. We present these two successful international programs, in which French teams from Grenoble, Orsay and Saclay have been very active, and review the results currently available from these ice cores. The first one reaches the Eemian - the warmest part of the last interglacial around 120 ky BP (thousand years Before Present), which is the first time for a northern hemisphere ice core, whereas the second one extends the ice core record back to 800 ky BP.

**EPICA drilling - Dome C.**  
*Forage EPICA au Dome C.*

© S. Drapeau



**Jean Jouzel**

DIRECTEUR DE RECHERCHES AU CEA  
LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT ET  
DE L'ENVIRONNEMENT (CEA-CNRS-UVSQ)  
DIRECTEUR DE L'INSTITUT  
PIERRE-SIMON LAPLACE (IPSL)  
VICE-PRÉSIDENT DU GROUPE SCIENTIFIQUE  
DU GIEC  
jouzel@lsce.saclay.cea.fr

**Claude Lorius**

DIRECTEUR DE RECHERCHE  
ÉMÉRITE AU CNRS  
LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE  
ET GÉOPHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT  
(LGGE)  
MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES  
lorius@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

JEAN JOUZEL ET CLAUDE LORIUS ONT,  
EN 2002, REÇU CONJOINTEMENT LA  
MÉDAILLE D'OR DU CNRS.

One of the chapters of the Fourth assessment report to be published by the International Panel on Climate Change (IPCC Working Group I: the Science of Climate Change) in 2007 will deal with paleoclimate. This choice fully reflects the fact that past climates are providing a wealth of information relevant to the ongoing debate on future climate warming. Thanks to numerous results based on studies of tree-rings, ice cores and corals, combined with historical documentary sources, we now have a better knowledge of climate variability over the last centuries and millennia, which is important for detecting climate change. The climate of the Holocene, the warm period that since 11 ky (thousand years) has been highly favourable to the development of human societies, is significantly better documented than 10 years ago and it is the same for the succession of glacial and interglacial periods that have punctuated the Quaternary. At these longer timescales, we benefit from information extracted from various types of archives derived from the continent (lake sediments, speleothems, etc.), deep-sea sediments and deep ice cores drilled in Antarctica and Greenland, as well as from associated modelling. There is also an increasing amount of paleoclimatic information and modelling now available for longer geologic timescales, such as for the rapid global warming at the Paleocene - Eocene boundary, 55 million years ago.

“ Past climates are providing a wealth of information relevant to the ongoing debate on future climate warming. ”

Many aspects of past climate change are relevant to the future of our climate, including the existence of rapid changes first documented from ice cores and deep-sea cores and now also from numerous continental time-series. Polar ice cores have allowed us to track the increase in the concentration of the most important greenhouse gases since pre-industrial times and give indirect access to changes in other climate forcings. Comparison of climate changes and climate forcings at the glacial-interglacial timescale provides insight into the estimation of how climate reacts to forcings, showing that amplification processes have, as predicted by climate models, operated in the past. Records of past climates also contain information about climate mechanisms, such as those linked with changes in insolation, oceanic and atmospheric circulation and atmospheric composition. They also shed light on the complex interactions between climate and biogeochemical cycles.

It is beyond the scope of this article to review the results inferred from the different archives, each with their own limitations and drawbacks, but clearly providing useful complementary information. Rather, we will focus on polar ice cores that, as for most other oceanic or continental climate proxies, give access to local climate change data and to climate parameters of widespread geographical significance, and are unique in their capacity of tracking the composition of our past atmosphere through the analysis of entrapped air bubbles. By combining the data provided by both the ice and the air from the Antarctic and Greenland ice cores, key information directly relevant to the past and future evolution of our climate has indeed been acquired.

The climate in polar regions is reconstructed from water isotopes in ice from either deuterium or oxygen 18 concentrations, with the combination of the two providing information on the conditions prevailing in the oceanic moisture sources supplying polar precipitation. The temperature interpretation is straightforward over Antarctica where present-day observations can be used to calibrate the isotopic paleothermometer, whereas this method clearly underestimates temperature changes in Greenland by up to a factor of two for the Last Glacial Maximum, 20 ky ago. Most importantly, we note the discovery of a link between greenhouse gases and climate in the past, and the characterization of rapid climate changes. These results are based on the analysis of deep ice cores, such as the one drilled at the Vostok site (Fig. 1-a) that helps describe the evolution of Antarctic climate and atmospheric composition over the last 420 ky (Petit et al., 1999) and estimate global

“ Polar ice cores are unique in their capacity of tracking the composition of our past atmosphere through the analysis of entrapped air bubbles. ”

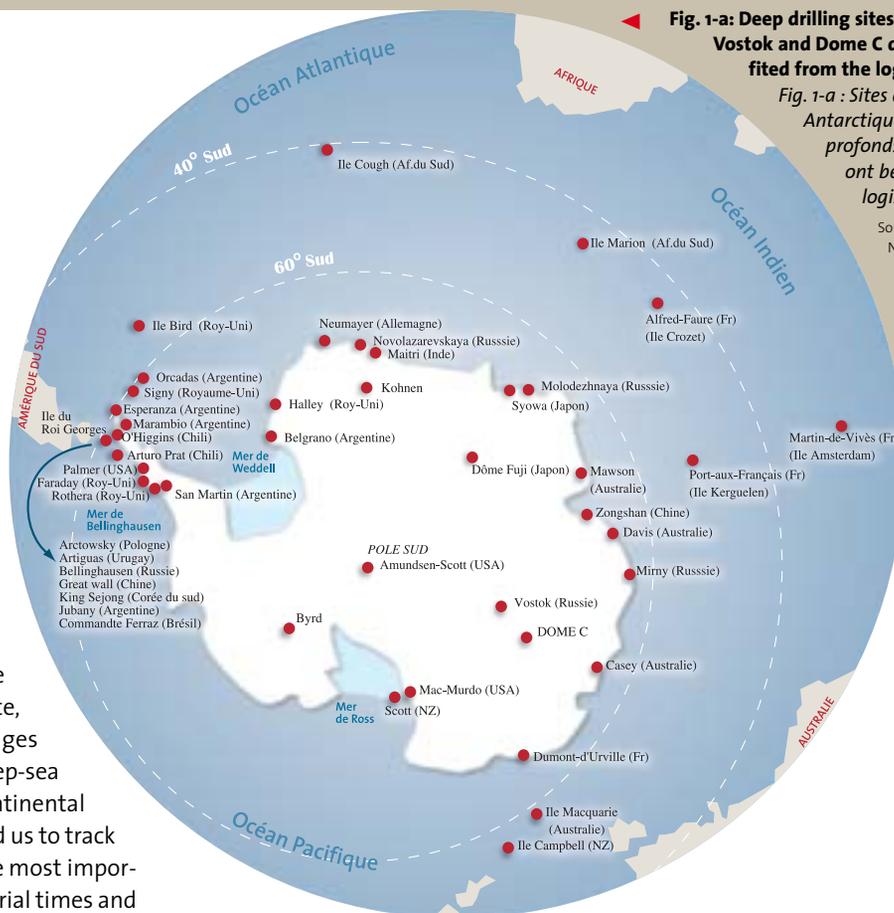


Fig. 1-a: Deep drilling sites in Antarctica. The deep Vostok and Dome C deep drilling have benefited from the logistic support of IPEV\*.

Fig. 1-a : Sites de forages profonds en Antarctique. Les sites de forages profonds Vostok et Dôme C ont bénéficié du soutien logistique de l'IPEV\*.

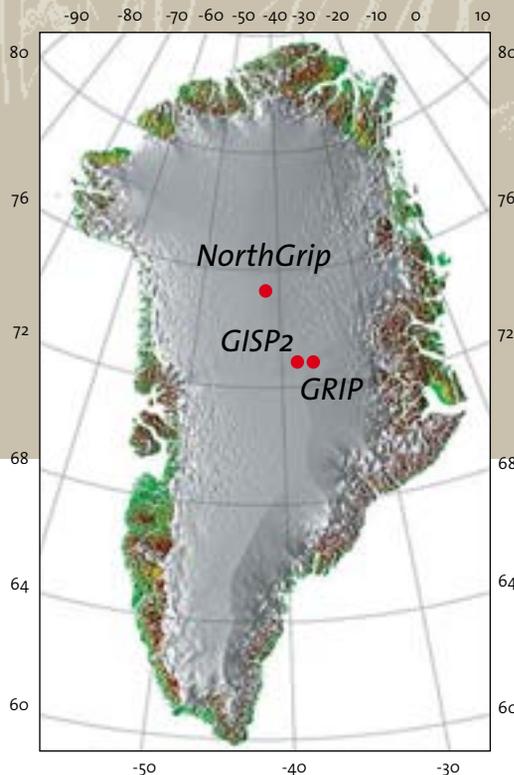
Source: adapted from North GRIP project members. \*IPEV: Institut Polaire Français Paul-Émile Victor.

“The North GRIP core extends uninterrupted back to 123,000 years ago.”

climate sensitivity (e.g. how our climate would react if the CO<sub>2</sub> atmospheric concentration were doubled), and such as GRIP and GISP<sub>2</sub> (Greenland, Fig. 1\_b) that precisely depict the rhythm of rapid changes during the last 100 ky. Other cores in high accumulation areas provide detailed access to more recent periods showing, in particular, the rapid increase in atmospheric concentrations of the main greenhouse gases influenced by anthropogenic activities (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O). The recent drilling of two new deep (>3 km) ice cores at the sites of North GRIP in Greenland and Dome C in Antarctica has considerably increased the climatic information available.

### The North GRIP deep ice core

The North GRIP drilling project (Fig. 1\_b) was undertaken by an international consortium directed and organized by the ice core group of Copenhagen University. The first drilling was unsuccessful (drilling stacked in 1997 at a depth of 1,372 m), but the second drilling reached the bedrock at a depth of 3,085 m in 2003 and liquid water was indeed encountered at the base. This initially unexpected finding results from an atypical high geothermal heat flow with basal melting having the advantage of preventing flow disturbances as observed in the last 10% or so of the GRIP and GISP<sub>2</sub> ice cores, with climatic records thus difficult to exploit for ages older than 100 ky BP. As a consequence, the North GRIP core (North Greenland Ice-core project, 2004 and Fig. 2) extends uninterrupted back to 123 ky BP (Fig. 3) within the last interglacial period (which was probably 5°C warmer than the Holocene). It thus allows an exceptionally detailed description of the last glacial inception with a Greenland record showing similarities with a deep-sea core on the Iberian margin. Comparison of the GRIP and North GRIP records over their common part (the last 105 ky) shows strong similarities as far as rapid changes are concerned, but also points towards regional climate differences between the two sites (Fig. 2). A temperature estimate methodology based on combined measurements of nitrogen and argon isotopes confirms that rapid warmings can reach up



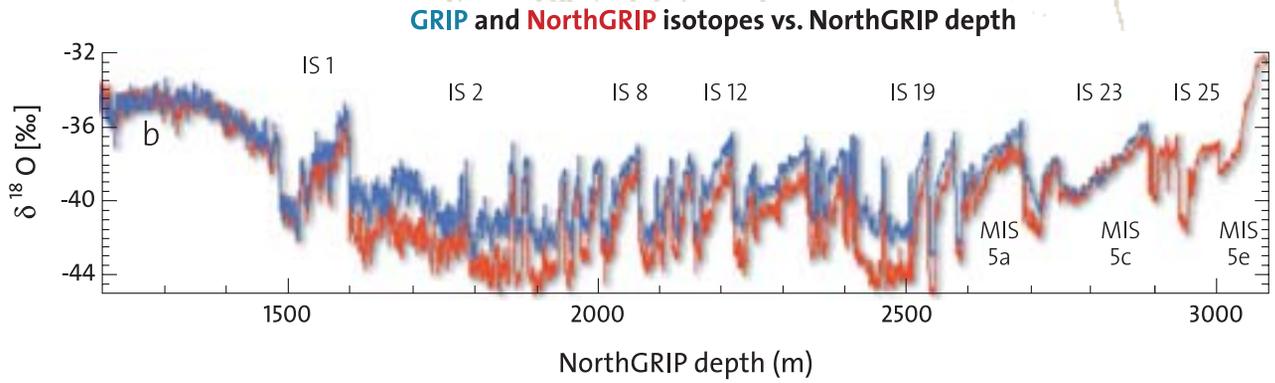
◀ Fig. 1\_b: Deep drilling sites in Greenland.  
Fig. 1\_b : Sites de forages profonds au Groënland.

Source: adapted from North GRIP project members

to 16°C, indicating that the conventional use of water isotopes underestimates temperature changes not only for the Last Glacial Maximum, but also for the so-called Dansgaard-Oeschger (DO) events, most likely due to changes in the seasonality of the precipitation under different climates.

### The Dome C deep ice core

The Dome C Antarctic site (Fig. 1-a), where a first core was drilled in the seventies, is ideal for sampling very old ice because of an ice thickness of more than 3 km and a low accumulation. It was chosen 10 years ago as one of the drilling sites of the European project EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) launched in 1995 by 10 European countries under the auspices of the European Science Foundation (ESF) with strong support of the European Communities. After a first drilling stacked at a depth of 780 m, a second drilling started in 2000 reached the bedrock (3,259.72 m) on December 29, 2004. The preliminary results published in 2004 (e.g. down to 3,139 m corresponding to an age of 730 ky BP) have since been extended down to the bottom of the core at a depth of 3,260 m. Figure 3 shows the deuterium profile, a proxy of local temperature change. Isotopic models confirm that the present-day isotope temperature relationship observed at the spatial scale on recent snow can be used, within ±20%, to interpret ice core deuterium profiles from East Antarctic cores in terms of local temperature change. Noticeably, the Last Glacial Maximum was about 10°C colder than the present day, whereas the corresponding temperature drop was more than two times greater in central Greenland.



**Fig. 2: Comparison of GRIP and North GRIP isotopic profiles over their common parts** This figure shows the oxygen-18 content of the ice (expressed in ‰ / V-SMOW, Vienna Standard Mean Ocean Water), according to depth, going back to ~ - 100,000 years for GRIP (blue) and ~ - 120,000 years for North GRIP (red).

*Fig. 2 : Comparaison des enregistrements isotopiques à GRIP et à North GRIP. Cette figure montre la teneur en oxygène 18 de la glace (exprimée en ‰ / V-SMOW, Vienna Standard Mean Ocean Water) en fonction de la profondeur jusqu'à ~ - 100 000 ans pour GRIP (courbe bleue) et jusqu'à ~ - 120 000 ans pour North GRIP (courbe rouge).*

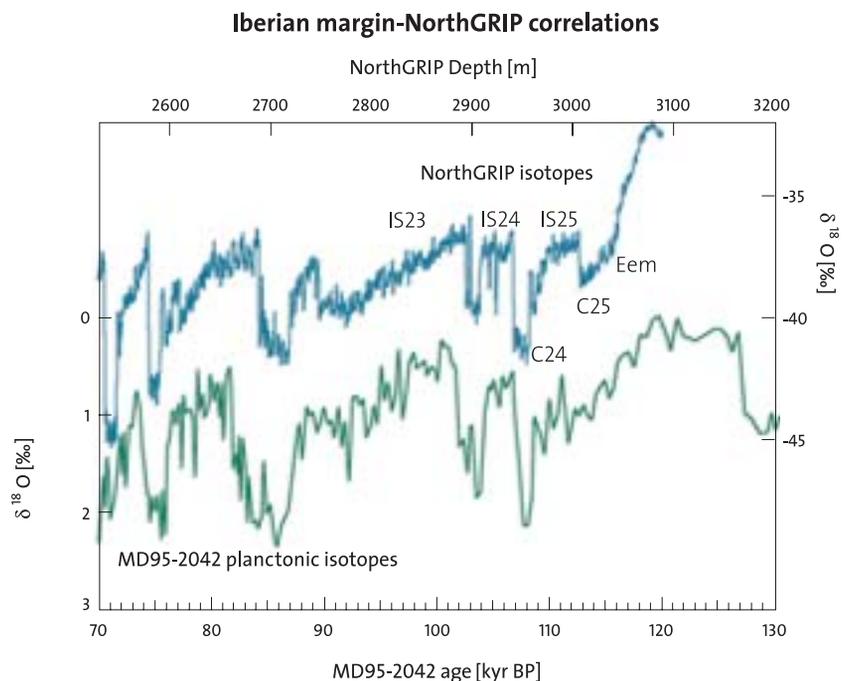
Source: adapted from North GRIP project members

The time scale developed for the Dome C deep ice core, still preliminary, is based on an inverse dating method that combines an ice-flow model and an accumulation history (accumulation is deduced from the deuterium content of the ice, whereas thinning rate is computed with a one-dimensional flow model). The Dome C isotopic profile (EPICA Community Members, 2004) is in excellent agreement with those available from Vostok and Dome F over their common part (Fig. 4 and 5) confirming that the Antarctic surface temperature was warmer by up to 5°C during interstadials 5.5 (125 ky BP) and 9.3 (335 ky BP). For the first time, the excellent quality and the high resolution of the deuterium last glacial record shows, independently of its size, that each Dansgaard/Oeschger rapid event recorded in the Greenland ice has an Antarctic counterpart (Fig. 5).

The most striking feature of the EPICA record, previously observed in the deep-sea core record, is the clear change in the amplitude of glacial-interglacial changes before and after isotope cold stage 12 (~430 ky BP) with consistently colder and longer interglacials for the older period. Explaining this change of pacing remains a challenge for the paleoclimate community. The transition between stage 12 and the following interglacial (11.3), identified as an exceptionally long interglacial (28ky), has been studied in great detail. It shows resemblances with the transition into the present interglacial in terms of magnitude of changes in temperature and greenhouse gases, but with significant differences in the pattern of change. The similarities between the orbital parameters and our current glacial may imply that without human intervention, a climate similar to the present one would extend well into the future.

**Fig. 3: The bottom part of the North GRIP isotopic record extending back to 123 ky BP (blue) compared to a deep-sea core record from the Iberian margin (green).**  
*Fig. 3 : La partie profonde de l'enregistrement isotopique de North GRIP jusqu'à ~ - 120 000 ans (courbe bleue) comparée à un enregistrement isotopique océanique (courbe verte) de la marge ibérique.*

Source: adapted from North GRIP project members





## Extending the greenhouse gas record

As far as greenhouse gases are concerned, Raynaud *et al.* (2005) have recently extended the Vostok record back to 436 ky BP, a period corresponding to glacial stage 12. These data are in excellent agreement with those measured at EPICA Dome C for the same period (transition from stage 12 to 11). At this latter site, the last deglaciation had previously been studied in detail both for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>.

22

### The Concordia dome in Antarctica. Recovery of an EPICA drill core.

Dôme Concordia en Antarctique. Forage EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) : extraction d'une carotte.

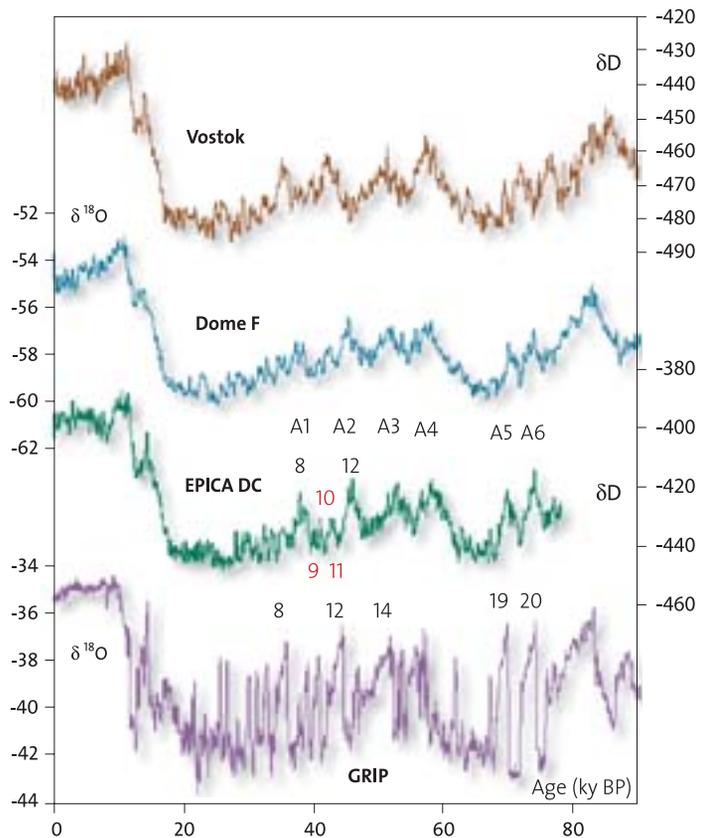
© CNRS Photothèque - L. Augustin



### The Concordia dome, Antarctica: EPICA drilling site.

Dôme Concordia, Antarctique : site de forage EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica).

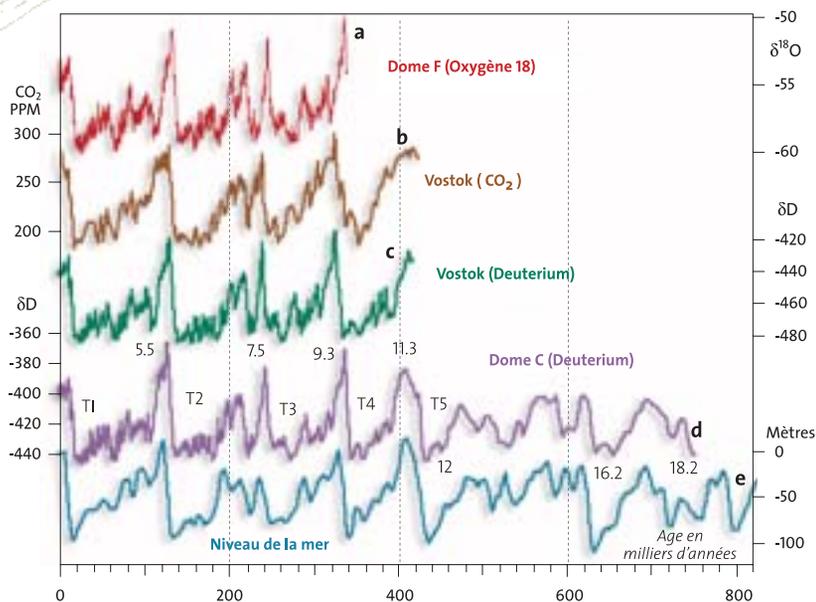
© CNRS Photothèque - L. Augustin



**Fig. 4: Comparison of the GRIP isotopic record (Greenland) and records from East Antarctic sites (Dome C, Dome F and Vostok) over the last glacial, each ice core being plotted on its own timescale. The major Antarctic events (A1, A2, etc.) are indicated, with the numbers corresponding to Dansgaard-Oeschger events and their Antarctic counterparts where possible.**

Fig. 4 : Comparaison des enregistrements isotopiques à GRIP (Groenland) et en Antarctique de l'Est (Dome C, Dome F et Vostok) au cours de la dernière période glaciaire. Les résultats de chaque forage profond sont reportés sur leur propre échelle de temps (figure adaptée de Jouzel *et al.*, en préparation). Nous avons indiqué les événements significatifs enregistrés en Antarctique (A1, A2...), ainsi que la numérotation des événements de Dansgaard-Oeschger et ceux qui leur correspondent en Antarctique, lorsqu'ils peuvent être aisément identifiés.

Source : adaptée de Jouzel *et al.*, en préparation.



**Fig. 5: Plot of records with respect to age:**  
**a) the Dome F isotopic record,**  
**b) the Vostok CO<sub>2</sub> record,**  
**c) the Vostok isotopic record,**  
**d) the EPICA Dome C isotopic record now extended back to 800 ky BP**  
**e) the deep-sea core isotopic record.**  
 Fig. 5 : Cette figure montre, par rapport à l'âge (en milliers d'années) a) l'enregistrement isotopique au Dome F, b) l'enregistrement du CO<sub>2</sub> au site de Vostok, c) l'enregistrement isotopique de Vostok, d) l'enregistrement isotopique au site EPICA Dome C, étendu aux 800 000 derniers milliers d'années e) l'enregistrement isotopique marin sur cette même période.  
 Source : adaptée de Jouzel et al., en préparation.

As shown at Vostok from detailed studies on an earlier deglaciation, it appears that at the start of such transitions, the CO<sub>2</sub> increase lags Antarctic climate (by some 800 years). Similarities between changes in atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic temperature suggest that changes around Antarctica play a role in the long term CO<sub>2</sub> change (whereas CH<sub>4</sub> changes are more under the influence of Northern Hemisphere processes). The situation thus differs from the recent anthropogenic CO<sub>2</sub> increase and we should distinguish between internal (such as the deglacial CO<sub>2</sub> increase) and external (such as the anthropogenic CO<sub>2</sub> increase) influences on the climate system. While the recent CO<sub>2</sub> increase has been clearly imposed first, as a result of anthropogenic activities, it naturally takes some time for CO<sub>2</sub> to outgas from the ocean once it starts to react to some climate change felt initially in the atmosphere. The sequence of events during deglaciations is fully consistent with CO<sub>2</sub> participating in the melting of the Northern Hemisphere ice sheet. The radiative forcing due to CO<sub>2</sub> may serve as an amplifier of initial orbital forcing, which is then further amplified by fast atmospheric feedbacks that are also at work for the present-day and future climate.

The EPICA Dome C core has now provided the opportunity of extending the record of CO<sub>2</sub> (Siegenthaler, 2005) and of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O (Spahni et al., 2005) beyond the last four glacial-interglacial cycles, with the key question of how the greenhouse gases behaved before the clear change of pacing that the Antarctic climate underwent around 430 ky BP. The new data cover two additional climatic cycles back to 650 ky BP.

The significant co-variation of deuterium and CO<sub>2</sub> on millennial time scales persists also in this time period and the relationship between Antarctic temperature and CO<sub>2</sub> remains stable throughout the six glacial cycles despite this change of pacing. In general, CH<sub>4</sub> is also well correlated with Antarctic temperature, at least on a glacial-interglacial timescale (>40 ky), and one can confidently extend the result that present-day concentrations of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O are unusual with respect to those encountered during the Late Quaternary to the last six glacial-interglacial cycles.

### Future drilling activities

There is still much measurement and interpretation work to be done on these EPICA and North GRIP cores (with a second EPICA drilling which has reached the bedrock at Kohnen station in January 2006 and a new, more than 3 km deep, drilling successfully recovered at Dome F by a Japanese team), but the international ice core community is already looking towards the future with three major objectives: <sup>(i)</sup> extract ice older than one million years in East Antarctica with the hope of accessing the climate period dominated by a 40 ky periodicity, <sup>(ii)</sup> drill an ice core covering the entire Eemian and reaching back to the previous glaciation in North Greenland and <sup>(iii)</sup> obtain a series of intermediate cores in coastal Antarctica. Projects aiming to fulfil the third objective are already in progress, whereas the Greenland project and a reconnaissance to identify potential sites to extract the oldest ice in Antarctica should be launched during the International Polar Year (2007-2009). ■



### Carottes de glace et paléoclimat

Les glaces de l'Antarctique et du Groenland ont, depuis une vingtaine d'années, fourni des résultats importants vis-à-vis de l'évolution passée et future de notre climat, en premier lieu la mise en évidence d'une relation entre climat et gaz à effet de serre dans le passé et la découverte de variations climatiques rapides. Les deux dernières années ont permis d'accroître considérablement l'information disponible à partir de ces glaces polaires grâce aux forages de North GRIP au Groenland et de Dome C en Antarctique, permettant respectivement d'étendre les enregistrements au dernier interglaciaire (North GRIP) et aux huit derniers cycles climatiques (Dome C). Ces résultats indiquent que le dernier interglaciaire était, aussi bien au Groenland qu'en Antarctique, plus chaud que l'Holocène, d'environ 5°C. Ils mettent en évidence un lien étroit entre les variations rapides caractéristiques de la dernière période glaciaire au Groenland et les variations millénaires enregistrées en Antarctique. Dans cette région, le rythme des variations climatiques s'est modifié de façon notable il y a un peu plus de 400 000 ans et ce même changement de rythme est observé pour les concentrations en CO<sub>2</sub> dont la relation avec le climat Antarctique a été remarquablement stable depuis 650 000 ans. A aucun moment de cette période, les concentrations de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O n'apparaissent avoir été aussi élevées qu'actuellement.

L'étude des glaces polaires et des sédiments marins a mis en évidence d'énormes fluctuations de température et de précipitation susceptibles de se développer en quelques siècles et d'être ressenties à l'échelle planétaire. En climat froid, elles résultent de débâcles massives d'icebergs relâchés par les calottes glaciaires. En période chaude, les variations de la circulation océanique peuvent provoquer l'entrée soudaine dans une glaciation. Nous ne sommes pas à l'abri de telles ruptures d'équilibre en raison de la perturbation anthropique du climat.

Icebergs au large de la Terre Adélie.  
*Icebergs offshore Adélie Land.*

© CNRS Photothèque - J. Duprat, C. Engrand

# Ruptures d'équilibre au sein du système climatique



**Jean-Claude Duplessy**

DIRECTEUR DE RECHERCHES  
*Jean-Claude.Duplessy@lsce.cnrs-gif.fr*

**Masa Kageyama**

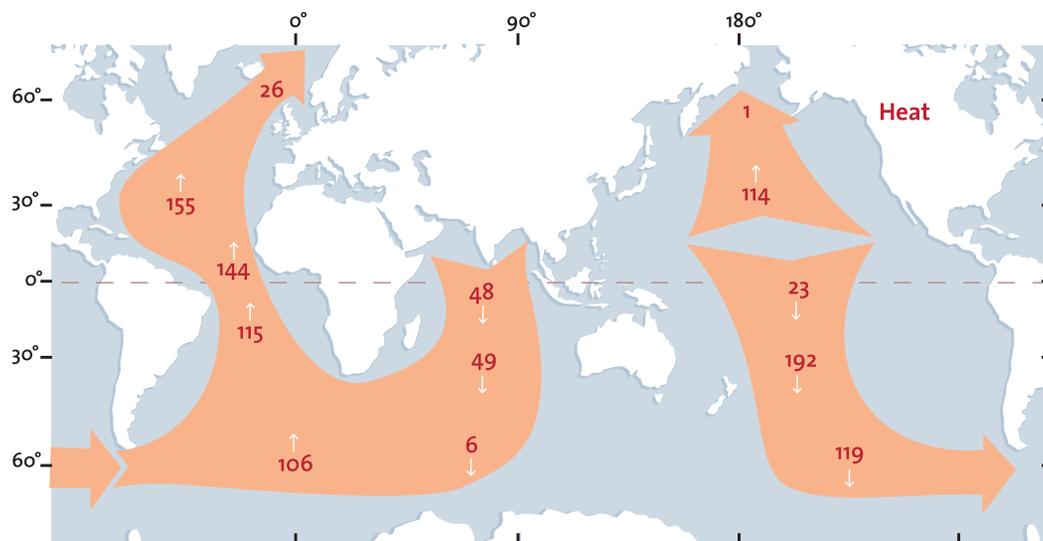
CHARGÉE DE RECHERCHES  
*Masa.Kageyama@cea.fr*

LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT  
ET DE L'ENVIRONNEMENT  
LABORATOIRE MIXTE CNRS-CEA

Les couches géologiques témoignent des énormes variations climatiques subies par notre planète, depuis une Terre qui aurait pu être complètement englacée à la fin du Précambrien jusqu'à un monde chaud au cours de l'ère Secondaire et au début du Tertiaire. Sur ces longues périodes, les changements de notre environnement font intervenir des facteurs multiples, tels les variations de l'énergie émise par le soleil, les déplacements des continents liés à la tectonique des plaques, la forme des bassins océaniques, la position et l'altitude des chaînes de montagne, les changements de l'activité volcanique et de l'érosion continentale qui gouvernent à long terme la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, etc. Les modèles simulant la physique du climat permettent de mettre en évidence la part de chacun de ces phénomènes dans l'histoire géologique de notre planète (Donnadieu *et al.*, 2004).

**Fig. 1 : Transport d'énergie par l'océan ( $10^{13}$  W).**  
 Fig. 1: The transport of energy by the ocean ( $10^{13}$  W).

Source : tiré du livre "Ocean Circulation," 1998.



Au cours du dernier million d'années, aucun de ces phénomènes n'a subi de fluctuations significatives. Cependant le climat de la Terre a présenté une succession de glaciations coupées de périodes interglaciaires de courte durée (environ dix mille ans) tous les cent mille ans. Superposées à ces grandes tendances, la température et les précipitations ont présenté des variations brutales à l'échelle planétaire. Le présent article vise à faire le point sur les mécanismes susceptibles de les engendrer.

### L'équilibre fragile du système climatique

L'énergie émise par le soleil est reçue au sommet de l'atmosphère et est en partie réfléchiée par les nuages. La fraction qui atteint le niveau du sol est soit absorbée par la surface des continents ou des océans, soit réfléchiée vers l'espace. Le pouvoir réflecteur des sols varie beaucoup en fonction de sa nature : les forêts absorbent une grande partie du rayonnement reçu, au contraire des glaces ou des neiges qui se comportent comme un miroir. La Terre se réchauffe donc au niveau du sol et transmet sa chaleur aux basses couches de la troposphère. Du fait de ces interactions multiples, on désigne sous le nom de système climatique, l'ensemble constitué de l'atmosphère, de l'océan, de la surface des continents avec leur végétation et des glaces. Les volcans n'interviennent que par les émissions de sulfates qui atteignent la stratosphère lors de très grandes éruptions et absorbent une fraction du rayonnement solaire, entraînant un refroidissement au niveau du sol pendant un à trois ans, temps nécessaire pour que la stratosphère se nettoie de ces aérosols.

La Terre reçoit davantage d'énergie aux basses latitudes que dans les zones polaires. Toutefois cette énergie est en partie transportée par les vents et les courants marins, ce qui atténue le gradient thermique entre

hautes et basses latitudes. En moyenne, les observations météorologiques montrent que l'océan et l'atmosphère contribuent de manière sensiblement équivalente à cette redistribution d'énergie. Cependant le rôle de l'océan est complexe. L'océan Pacifique transporte de la chaleur des zones tropicales vers les hautes latitudes des deux hémisphères, alors que l'Atlantique en transporte de l'hémisphère Sud vers l'hémisphère Nord au travers de l'équateur (Fig. 1).

Les cycles biogéochimiques constituent une source additionnelle de complexité. En effet, des gaz comme la vapeur d'eau, le  $\text{CO}_2$  ou le méthane, présents en faible quantité dans l'atmosphère sont transparents au rayonnement solaire incident, mais absorbent le rayonnement infrarouge que la Terre renvoie vers l'espace. C'est l'effet de serre, qui augmente la température moyenne de notre planète de  $33^\circ\text{C}$ , ce qui a notamment permis le développement de la vie.

Le système climatique est donc un système de très haute complexité. Chaque composante possède des temps caractéristiques différents : quelques jours pour l'atmosphère, quelques mois pour les eaux superficielles de l'océan, plus d'un millénaire pour l'océan profond, plusieurs dizaines de millénaires pour les calottes glaciaires. Toutefois, des perturbations brutales sont susceptibles d'affecter l'océan ou les calottes glaciaires avec des constantes de temps très inférieures à leur temps caractéristique usuel. Ces ruptures d'équilibre au sein du système climatique sont des phénomènes naturels, responsables de modifications de l'environnement sensibles à l'échelle d'une vie humaine.

“ On désigne sous le nom de système climatique, l'ensemble constitué de l'atmosphère, de l'océan, de la surface des continents avec leur végétation et des glaces. ”



Carotte glaciaire à la sortie de la tige de forage.

*Ice core within a drill pipe.*

© CNRS Photothèque - AUGUSTIN Laurent



Fraction supérieure à 150 microns de sédiments de l'Atlantique Nord. En haut : dans un sédiment déposé pendant une période glaciaire (éléments dominants : foraminifères). En bas : dans un sédiment déposé pendant un événement de Heinrich (éléments dominants : grains de quartz transportés par les icebergs).  
*A fraction of North Atlantic sediments coarser than 150 microns. Above: in sediment deposited during an ice age (dominant elements: foraminifers). Below: in sediment deposited during a Heinrich event (dominant elements: quartz grains carried by icebergs).*

© LSCE

### Ruptures d'équilibre en climat glaciaire

Les variations de l'ensoleillement liées à l'évolution des paramètres de l'orbite terrestre et dont l'échelle temporelle caractéristique est la dizaine de milliers d'années expliquent bien la succession des glaciations du Quaternaire (c'est la théorie astronomique des paléoclimats). Cependant, les enregistrements paléoclimatiques obtenus dans les carottes de glaces polaires et les sédiments de l'océan Atlantique Nord témoignent de l'existence, durant la dernière glaciation, d'une succession de changements climatiques sur des échelles de temps beaucoup plus courtes que celle des variations de l'ensoleillement (Fig. 2). Par exemple, la datation <sup>14</sup>C des foraminifères d'une carotte prélevée au large du Portugal montre que la fin de la dernière glaciation a été marquée par un réchauffement de 10 °C en moins de 400 ans. Le même événement est enregistré dans les glaces du Groenland. Ici les couches annuelles de glace peuvent être comptées, montrant que le réchauffement s'est produit en environ 70 ans.

Les principaux coups de froid se marquent dans l'Atlantique Nord par le dépôt de sédiments riches en éléments détritiques, volcaniques et en carbonates provenant du bouclier Laurentide (Ouest de l'actuel Canada). Ce sont les événements de Heinrich (HE) qui sont associés à des débâcles massives d'icebergs relâchés en quelques siècles par la calotte glaciaire Laurentide. L'enregistrement paléoclimatique obtenu au Groenland témoigne également d'une variabilité climatique à l'échelle millénaire. Ce sont les événements de Dansgaard-Oeschger (D-O) marqués par un réchauffement rapide suivi d'un lent refroidissement. Leur origine est encore mal comprise. Les réchauffements varient entre 10 °C et 16 °C selon les événements.

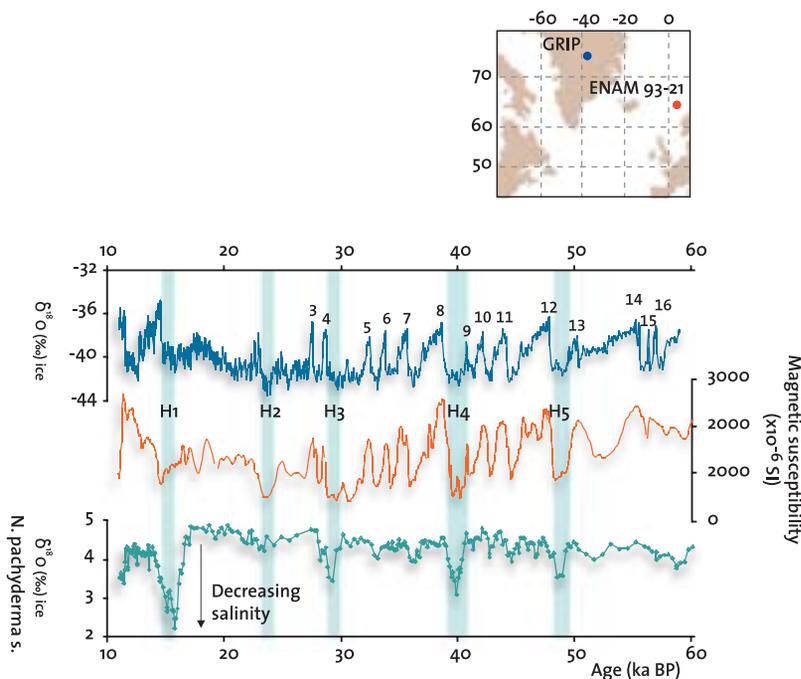


Fig 2 : Variations de la température de l'air déduites de la composition isotopique (<sup>18</sup>O/ <sup>16</sup>O) des glaces du forage GRIP effectué au Groenland (courbe bleue). Variations de la susceptibilité magnétique des sédiments, proxy de la circulation thermohaline (courbe orange). Variations de la composition isotopique (<sup>18</sup>O/ <sup>16</sup>O) des foraminifères planctoniques, proxy de la salinité des eaux de surface dans la carotte ENAM 93-21 (courbe verte). La carte indique les positions respectives du forage GRIP et de la carotte ENAM 93-21.

*Fig. 2: Variations in air temperature derived from the isotopic composition (<sup>18</sup>O/ <sup>16</sup>O) of ice in cores from the GRIP borehole drilled in Greenland (blue curve). Variations in the magnetic susceptibility of the sediments, a proxy for the thermohaline circulation (orange curve). Variations in the isotopic composition (<sup>18</sup>O/ <sup>16</sup>O) of plankton foraminifers, a proxy for the salinity of surface water in the ENAM 93-21 core (green curve). The map shows the respective locations of the GRIP borehole and the ENAM 93-21 core.*

Source : LSCE

“ Les enregistrements paléoclimatiques obtenus dans les carottes de glaces polaires et les sédiments de l’océan Atlantique Nord témoignent de l’existence, durant la dernière glaciation, d’une succession de changements climatiques sur des échelles de temps beaucoup plus courtes que celle des variations de l’ensoleillement. ”



◀ **Le Marion Dufresne, navire de recherche de l’Institut Paul-Emile Victor.**  
*The Marion Dufresne, a research vessel of the Paul-Emile Victor Institute.*

© IPEV

Ces événements sont associés à des réorganisations internes du système climatique. Les débâcles massives d’icebergs provoquent une injection d’eau douce dans l’océan. Celle-ci diminue la salinité et la densité des eaux de surface de l’océan Atlantique Nord. La plongée de ces eaux habituellement très denses est alors ralentie et la circulation océanique thermohaline ainsi que l’apport de chaleur provenant de l’hémisphère Sud. Lorsque les injections d’eau douce sont terminées, la circulation thermohaline reprend rapidement et est responsable du brusque réchauffement observé au Groenland et sur l’Europe occidentale. Ainsi est apparue l’idée que la circulation thermohaline pouvait passer rapidement d’un mode actif en climat chaud à un mode lent en période froide et inversement (Fig. 3).

On retrouve sur l’ensemble du globe le contrecoup des HE et D-O. On ne connaît pas encore l’ensemble des interactions qui permettent un changement rapide de la circulation atmosphérique. Le rôle de l’océan est certain en raison de sa capacité calorifique et de l’énergie qu’il transporte. Il explique la persistance des changements et une réponse différée de quelques siècles des hautes latitudes de l’hémisphère Sud. Quant aux mécanismes qui favorisent l’extension des changements à l’ensemble du globe, ils restent mal connus car les expériences conduites avec des modèles de circulation générale de l’atmosphère ne rendent que partiellement compte des variations observées.

# AlkorDraka

## geomembranes

La passion de l’étanchéité

**ALKORPLAN®**  
 Géomembranes PVC



Travaux souterrains

**ALKORTENE®**  
 Géomembranes PEHD



Travaux hydrauliques

**ALKORTOP®**  
 Géomembranes PP



Travaux d’environnement

Certification **ASQUAL**  
 Liste des géomembranes certifiées sur demande

Faxez au **01.49.47.07.39** la fiche de renseignements suivants afin de recevoir gratuitement une documentation sur CD



Société : .....

Nom/Prénom : .....

Fonction : .....

Tel. : .....

Fax : .....

e-mail : .....

Adresse : .....

Roissypôle – B.P. 10943 95733 Roissy CDG Cedex  
 e-mail : [alkordraka-geniecivil@solvay.com](mailto:alkordraka-geniecivil@solvay.com)  
 tel. 01 41 84 30 28 - Fax 01 49 47 07 39

“ Les analyses effectuées sur les glaces antarctiques ont montré que la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air ne diminuait que longtemps après la baisse des températures, de sorte que les gaz à effet de serre ne semblent jouer aucun rôle dans l'entrée en glaciation. ”

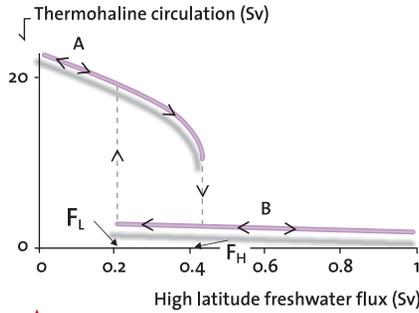
### La croissance d'une grande calotte glaciaire

Les mécanismes qui provoquent la fin d'un interglaciaire sont restés pendant longtemps énigmatiques. Les analyses effectuées sur les glaces antarctiques ont montré que la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air ne diminuait que longtemps après la baisse des températures, de sorte que les gaz à effet de serre ne semblent jouer aucun rôle dans l'entrée en glaciation. La théorie astronomique de Milankovitch postule que c'est la baisse de l'insolation sur les hautes latitudes de l'hémisphère Nord qui est à l'origine de l'englacement du Canada et du nord de l'Europe. Cependant, les modèles de circulation générale de l'atmosphère forcés par l'insolation ne simulent qu'un refroidissement modeste sur ces hautes latitudes. La neige qui tombe pendant l'hiver, en quantité plus élevée qu'en période chaude, fond pendant l'été. Il était donc nécessaire de rechercher une ou plusieurs rétroactions amplificatrices.

On a tout d'abord pensé que la disparition de la forêt boréale constituait un bon candidat. En effet, le remplacement de la forêt par une toundra permet à la neige de mieux tenir au sol, ce qui amplifie le pouvoir réflecteur du sol pendant l'hiver et le printemps, et donc la baisse des températures. Cependant les expériences effectuées à l'aide de modèles de circulation générale de l'atmosphère couplés à un modèle de végétation n'ont pas eu le succès escompté.

Il était donc clair que le rôle de l'océan avait été sous-estimé. Khodri *et al.* (2001) ont forcé un modèle de circulation générale couplant l'océan à l'atmosphère avec l'insolation de 115 000 ans. En réponse à la variation d'insolation, le refroidissement estival est amplifié par une augmentation de la glace de mer sur l'océan Arctique et un déplacement du front polaire vers le Sud. Le cycle hydrologique est amplifié en réponse à l'augmentation du gradient thermique apportant plus de neige aux hautes latitudes.

L'augmentation d'albédo de l'océan Arctique amplifie le refroidissement lié au forçage de l'insolation.



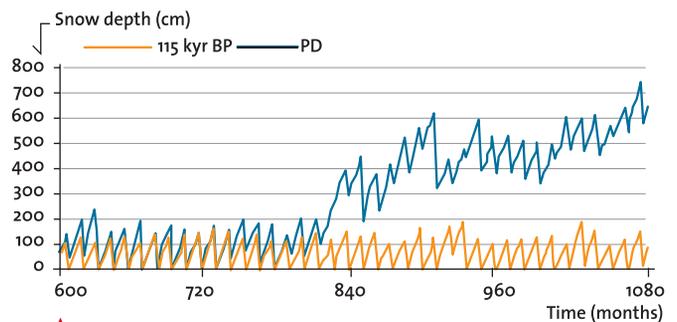
**Fig. 3 : Variations de la circulation thermohaline en fonction de l'injection d'eau douce dans les hautes latitudes (1 Sv = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s). Lorsque celle-ci dépasse un seuil haut (F<sub>H</sub>), la stratification des eaux de surface ralentit les plongées d'eau dans les abysses. La circulation ralentit et passe en mode faible. Elle y reste tant que l'injection d'eau douce reste supérieure à un seuil bas (F<sub>L</sub>), qui doit être franchi pour que la formation d'eau profonde puisse reprendre. Un scénario pour les HE est une alternance entre les positions A et B sur le diagramme. La calotte glaciaire croît lentement (A) jusqu'au point où se déclenche une décharge massive d'icebergs produisant une énorme injection d'eau douce (B). On revient rapidement en A lorsque la débâcle est terminée.**

**Si le point représentatif de l'océan en climat chaud a une abscisse très inférieure au seuil haut (F<sub>H</sub>), la circulation océanique est stable et il faut une injection d'eau douce très forte pour perturber le climat. Un climat froid est aussi stable si le point représentatif de l'océan a une abscisse très supérieure au seuil bas (F<sub>L</sub>). En revanche, si les abscisses des points A et B sont proches des seuils, la circulation devient très sensible à la moindre perturbation du flux d'eau douce dans les hautes latitudes et le climat est instable.**

*Fig. 3: Variations in thermohaline circulation versus high-latitude, freshwater flux (1 Sv = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s). When this latter exceeds an upper limit (F<sub>H</sub>), stratification in surface water inhibits the sinking of water into the abysses. The circulation slows and goes into weak mode. This state continues as long as the freshwater flux remains above a lower limit (F<sub>L</sub>), unless the flux falls below this point, thereby allowing deep water formation to resume. A scenario for HE's is an alternation between points A and B on the diagram. The icecap grows slowly (A) up to the time when a massive discharge of icebergs occurs, resulting in a huge freshwater flux (B). A rapid return to A ensues once the break-up has ended.*

*If the point representing the ocean in a warm climate has an abscissa well below the upper limit (F<sub>H</sub>), oceanic circulation remains stable, and a very strong freshwater flux is needed to disturb the climate. A cold climate is likewise stable if the point representing the ocean has an abscissa considerably higher than the lower limit (F<sub>L</sub>). However, if the abscissas of points A and B are close to these limits, the circulation becomes highly sensitive to the slightest disturbance in freshwater flux, and the climate is unstable.*

Source : D. Paillard (communication personnelle)



**Fig. 4 : Evolution de l'épaisseur de neige (en cm) simulée par le modèle LMD5.3-OPA pour le point à 70°N, 80°W (Khodri *et al.*, 2001). L'échelle de temps est en mois depuis le début des simulations, pour l'actuel (PD, trait orange) et pour l'entrée en glaciation (115 kyr BP, trait bleu).**

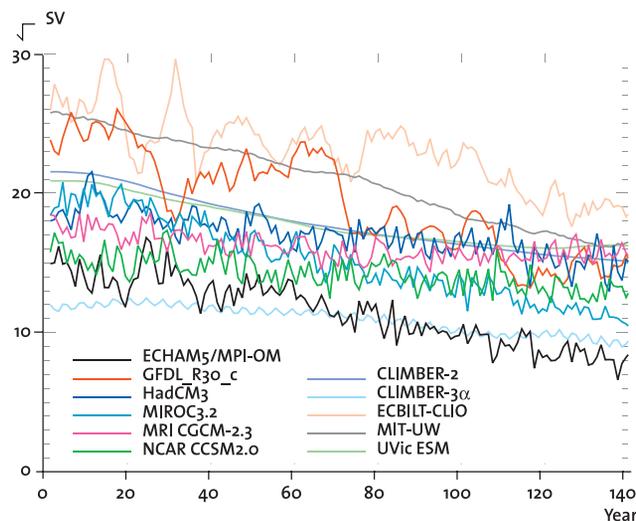
*Fig. 4: Evolution of snow thickness in cm simulated using the LMD5.3-OPA model for the point situated at 70°N, 80°W (Khodri *et al.*, 2001). The time scale is in months since the beginning of the simulations, for the present (PD, orange line) and for the onset of glaciation (115,000 BP, blue line).*

Source : Khodri *et al.*, 2001

**Fig. 5 : Evolution de la circulation thermohaline (en Sv) dans les simulations transitoires du projet d'intercomparaison CMIP (Coupled Model Intercomparison Project). Ces simulations démarrent de la situation actuelle et sont forcées par une augmentation en CO<sub>2</sub> de 1 % par an.**

Fig. 5: The evolution of thermohaline circulation (in Sv) in the transitory simulations of the Coupled Model Intercomparison Project. The starting point for these simulations is the present condition, and they are driven by a 1% annual increase in CO<sub>2</sub>.

Source : Gregory et al., 2005



“ On ne sait pas simuler l'accumulation de 25 millions de kilomètres cubes de glace sur l'Hémisphère Nord, comme cela s'est produit il y a 120 000 à 110 000 ans. ”

La circulation thermohaline ralentit et la Dérive Nord Atlantique apporte moins d'eaux chaudes en mer de Norvège. Le modèle simule alors le développement de neige pérenne sur le nord du Canada, sensiblement là où les reconstitutions géologiques placent le début du développement des calottes glaciaires (Fig. 4).

On est cependant loin d'avoir compris la totalité des mécanismes entrant en jeu : on ne sait pas simuler l'accumulation de 25 millions de kilomètres cubes de glace sur l'Hémisphère Nord, comme cela s'est produit il y a 120 000 à 110 000 ans. Un autre aspect reste mystérieux : la réponse de l'océan Atlantique n'est pas progressive, mais elle est marquée par un refroidissement brutal de 2° C qui survient à mi-chemin de l'entrée en glaciation. Un seuil a donc été franchi à ce moment, mais lequel ? Les modèles n'ont fourni aucun indice expliquant l'origine de cet événement.

## Des surprises pour le futur ?

La majeure partie des modèles utilisés pour simuler le devenir du climat lorsque la concentration de l'air en CO<sub>2</sub> augmente de 1 % par an simule un ralentissement de la circulation thermohaline au cours du prochain siècle (Fig. 5) en raison du réchauffement des eaux superficielles des hautes latitudes et de l'augmentation des apports d'eau douce à l'océan Arctique. La perturbation anthropique aurait le même effet sur la circulation océanique que les débâcles d'icebergs en climat glaciaire ! L'ampleur du phénomène varie selon les modèles, mais dans tous les cas le réchauffement domine à l'échelle globale avec de fortes disparités régionales (Gregory et al., 2005).

Les observations donnent un certain crédit à ces scénarios : depuis une cinquantaine d'années, le débit des fleuves qui se jettent dans l'océan Arctique a augmenté, le flux d'eau profonde de la mer de Norvège passant dans l'Atlantique par le seuil des Faeroe a diminué et les eaux profondes de l'océan mondial se sont réchauffées. Où va l'océan ?

D'autres surprises sont aussi possibles. La fonte des calottes glaciaires pourrait faire monter le niveau de la mer de plusieurs mètres. La stabilité de la calotte Antarctique de l'Ouest n'est pas garantie à échéance de 500 ans, même s'il est admis qu'aucun risque n'existe pour le siècle prochain. L'évolution du Groenland dépendra fortement de l'ampleur du réchauffement local : s'il atteint + 5,5 °C pendant un millénaire, la moitié de la calotte glaciaire Groenlandaise pourrait fondre, provoquant une montée de la mer de 3 mètres. La fonte des permafrosts consécutive au réchauffement de la Sibérie libérerait d'énormes quantités de méthane.

Paul Crutzen a introduit la notion d'anthropocène pour souligner que les hommes ont perturbé le déroulement de l'histoire géologique et que nous vivons dans une ère nouvelle. Si les activités humaines ne sont pas maintenues à un niveau écologiquement raisonnable, elles pourraient provoquer un bouleversement climatique d'ampleur géologique. ■

### Icebergs au large de la Terre Adélie. Icebergs offshore Adelie Land.

© CNRS Photothèque - J. Duprat, C. Engrand



## Breakdowns in equilibrium within the climate system

Apparent climate stability is determined by a complex balance of energy exchanges involving the atmosphere, the oceans, vegetation and ice masses. Reconstitutions of former climate conditions, which have become increasingly detailed over the past twenty years, have yielded evidence of breakdowns in this equilibrium, at times quite violent, and we are starting to gain an understanding of the mechanisms at work. Instabilities in the great icecaps that once covered Canada and Scandinavia led to their massive break-up into icebergs. Their melting caused stratification in the ocean, ended thermohaline circulation and decreased the heat flux conveyed towards Europe by the ocean currents. Other types of instability developed at the end of the last interglacial period. Due to decreased insolation in the upper northern latitudes, temperatures in summer fell, sea ice covered the Arctic Ocean, and the polar front migrated southwards. The resultant slowing of heat transport by the ocean enhanced the cold and favoured the persistence of snow in northern Canada, triggering the development of an icecap. The man-induced disturbance of the present climate, the effects of which are only now beginning to be felt, is liable to be associated with violent disorders in our environment.

Après des années de débats, il est désormais probable qu'une partie du réchauffement mondial des températures peut être attribuée à l'augmentation de l'effet de serre résultant des activités humaines. Ce phénomène, qui s'accélère encore depuis 1975, n'est pourtant pas une première historique : la terre a déjà connu durant certaines périodes des phénomènes de réchauffement avec élévation des gaz à effet de serre et montée du niveau des océans. Il importe donc de comprendre le climat du passé et de faire appel à la paléoclimatologie pour prévoir l'avenir.

Fonte d'un glacier des Alpes.  
*Melting of a glacier in the Alps.*

© E. Bard

# Variations climatiques naturelles et anthropiques



**Edouard Bard**

COLLÈGE DE FRANCE,  
CHAIRE DE L'ÉVOLUTION  
DU CLIMAT ET DE L'OcéAN  
CEREGE (UMR 6635)  
bard@cerege.fr

## Une planète habitable

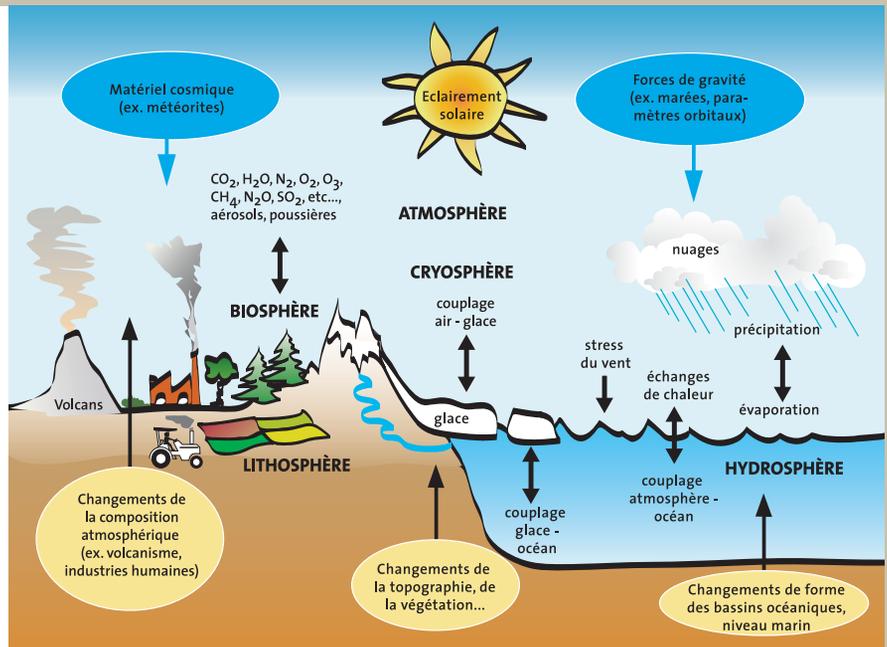
Comprendre l'évolution du climat nécessite de considérer le système climatique dans sa globalité avec des compartiments très divers comme l'atmosphère, l'hydrosphère, notamment les océans, la cryosphère, en particulier les calottes de glace polaires, la biosphère et enfin la lithosphère (Fig. 1). Ces différents compartiments échangent entre eux de la matière et surtout de l'énergie. Le soleil par son flux lumineux est un moteur qui met en mouvement les enveloppes fluides comme l'atmosphère et l'océan. Objet d'étude du météorologue, les turbulences rapides et incessantes de la basse atmosphère ne doivent cependant pas faire oublier que le climat mondial a atteint un équilibre dynamique dicté par l'éclairement solaire et la teneur en gaz à effet de serre.

Cet équilibre énergétique de la Terre s'établit entre le flux solaire, la propagation et finalement l'émission vers l'espace de ce flux énergétique. À la distance moyenne Terre-Soleil, une surface d'un mètre carré perpendiculaire aux rayons du Soleil reçoit actuellement 1 368 watts (cette valeur est appelée, un peu abusivement, la constante solaire). La valeur moyenne du flux solaire au sommet de l'atmosphère est donc de  $1\,368/4$  soit  $342\text{ W/m}^2$  car la surface de la sphère représente le quadruple de sa section diamétrale.

**Fig. 1 : Représentation schématique des composantes du système climatique mondial.** Modifié d'après Bradley (Paleoclimatology, Academic Press, pp. 610, 1999) et IPCC (Climate Change 2001. The Scientific Basis (vol. I). eds. J.T. Houghton et al. Cambridge Univ. Press, pp. 881, 2001).

Fig. 1: Schematic representation of the components of the Earth's climatic system. Modified from Bradley (Paleoclimatology, Academic Press, pp. 610, 1999) and IPCC (Climate Change 2001. The Scientific Basis (vol. I). eds. J.T. Houghton et al. Cambridge Univ. Press, pp. 881, 2001).

Source : E. Bard d'après Bradley (1999) et IPCC (2001)



Environ 30 % du flux solaire sont réfléchis directement vers l'espace par les nuages, les aérosols, l'atmosphère et la surface de la Terre. Les 70 % restants sont absorbés par l'atmosphère ou par la surface de la Terre et donc transformés en chaleur. La surface terrestre étant nettement plus froide que celle du Soleil, elle émet un rayonnement infrarouge qui ressortira après un cheminement complexe à travers l'atmosphère : plusieurs de ses composants chimiques, essentiellement transparents aux rayonnements visibles, absorbent les infrarouges qui retournent par émission vers la surface terrestre. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre.

Soulignons toutefois que l'image de l'effet de serre, bien que commode, n'est pas tout à fait exacte. Dans la serre, l'air chaud reste essentiellement piégé par la cage de verre où la convection thermique est bloquée : l'air chaud ne peut pas se propager vers l'extérieur alors que dans l'atmosphère, courants d'air chaud et d'air froid circulent librement. La chaleur est piégée à la surface de la Terre parce que certains composants chimiques absorbent les infrarouges émis par la surface.

La Terre n'est pas la seule planète concernée. Un effet de serre existe par exemple sur Vénus et sur Mars, qui possèdent une atmosphère opaque aux infrarouges. Plus proche du Soleil que la Terre, Vénus reçoit un flux énergétique presque double de celui reçu par la Terre. Mais, son atmosphère, très dense et nuageuse, en réfléchit environ 80 %. On pourrait donc penser que la température au sol est plus basse sur Vénus que sur la Terre. Pourtant, les sondes spatiales ont relevé quelque 460 °C. C'est qu'une atmosphère composée pour l'essentiel de gaz carbonique rend l'effet de serre particulièrement intense. Une situation équivalente à celle qui prévaudrait sur Terre si tout le carbone terrestre contenu dans les réservoirs géologiques (calcaires et carbone organique) et des océans était

“ L'effet de serre terrestre est aujourd'hui l'objet de nombreuses inquiétudes car les activités humaines ont perturbé notablement l'équilibre atmosphérique. ”

converti en gaz carbonique. Sur Mars, dont l'atmosphère est également plus riche en dioxyde de carbone que l'atmosphère terrestre, l'effet de serre est beaucoup plus modeste et ne réchauffe la surface que d'une dizaine de degrés (la température moyenne est de -55 °C). Trois raisons à cela : la faible pression au sol (cent fois plus faible que sur Terre), l'absence de vapeur d'eau et la présence de poussières - dont l'effet est globalement équivalent à celui de nos aérosols - injectées dans la haute atmosphère lors des tempêtes martiennes.

Les conditions hospitalières que nous connaissons sur Terre dépendent d'une combinaison fortuite de la distance par rapport au Soleil, de la présence de la Lune et de la composition chimique de l'atmosphère, paramètres qui conditionnent l'état physique de l'eau sur notre planète. Si le flux solaire était beaucoup plus important qu'il n'est actuellement, l'eau des océans serait rapidement vaporisée ce qui engendrerait un énorme effet de serre. Un emballement se produirait même si la température dépassait celle du point critique de l'eau, à partir de laquelle elle ne peut plus être sous forme liquide.

Au contraire, si le Soleil s'affaiblissait suffisamment longtemps pour que les océans gèlent et que la neige recouvre les continents, la surface de la Terre réfléchirait l'essentiel du flux solaire. De plus, l'effet de serre de la vapeur d'eau diminuerait considérablement. Ces conditions tendraient à établir un climat extrêmement froid et stable, tant que les volcans ne viennent, lentement mais sûrement, augmenter la concentration atmosphérique en gaz carbonique.

Fort heureusement, la catastrophe chaude n'est jamais arrivée car nous ne serions certainement pas là pour en parler. En revanche, un état de Terre gelée semble avoir eu lieu pendant certaines périodes très reculées, entre 3 milliards et 600 millions d'années ("snowball Earth").

### Un climat variable à toutes les échelles de temps

L'effet de serre terrestre est aujourd'hui l'objet de nombreuses inquiétudes car les activités humaines ont perturbé notablement l'équilibre atmosphérique. Les variations de la composition atmosphérique peuvent être converties en équivalent de forçage radiatif exprimé en Watts par mètre carré. Les changements dus aux gaz à effet de serre représentent au total une augmentation de l'ordre de 3 W/m<sup>2</sup>, c'est-à-dire environ 1% du flux solaire. Pour l'essentiel, cette augmentation est liée à la combustion de carbones fossiles et à leur transformation en gaz carbonique. La Figure 2 montre l'augmentation de la température atmosphérique moyenne depuis un peu plus d'un siècle. La tendance est clairement au réchauffement mondial. Après des années de doutes et de controverses, il apparaît maintenant qu'une partie de cette augmentation peut être attribuée à l'augmentation de l'effet de serre résultant des activités humaines ou anthropiques.

Le fait majeur est que l'atmosphère s'est globalement réchauffée d'environ huit dixièmes de degré depuis un siècle. Cette tendance n'a toutefois pas été régulière et l'on distingue clairement deux périodes : la première de 1920 à 1940 et la seconde commençant vers 1975. Celle-ci perdure encore car les quinze années les plus chaudes enregistrées ont toutes eu lieu après 1985.

Une conséquence directe du réchauffement actuel est une dilatation des couches superficielles de l'océan. Les estimations les plus récentes indiquent un taux de remontée du niveau marin de l'ordre de 25 cm par siècle. Ces fluctuations ont pu être suivies pendant la dernière décennie par altimétrie satellitale et sont résumées sur le premier panneau de la Figure 3. Les deux autres panneaux de ce graphique remettent en perspective les changements récents du niveau de la mer. Ceux-ci viennent se surimposer à des variations naturelles liées aux glaciations à l'échelle de plusieurs dizaines de milliers d'années et à des changements de la géométrie des océans à l'échelle de plusieurs centaines de millions d'années.

Cette mise en perspective n'est pas destinée à minimiser les variations récentes, mais souligne au contraire la nécessité de suivre et de quantifier les changements climatiques à toutes les échelles de temps afin de pouvoir détecter des variations significatives, en particulier celles effectivement liées aux activités humaines. Un diagramme très simplifié (Fig. 4) présente donc les principales causes des changements du climat en fonction de leurs constantes de temps en unités logarithmiques. En rouge et en vert sont distingués les forçages externes au système climatique, en bleu les réarrangements internes au système et finalement en noir les effets anthropiques. L'intérêt de ce diagramme est de montrer que les différentes origines de fluctuations climatiques possèdent leurs caractéristiques temporelles propres mais qu'elles peuvent aussi interférer les unes avec les autres.

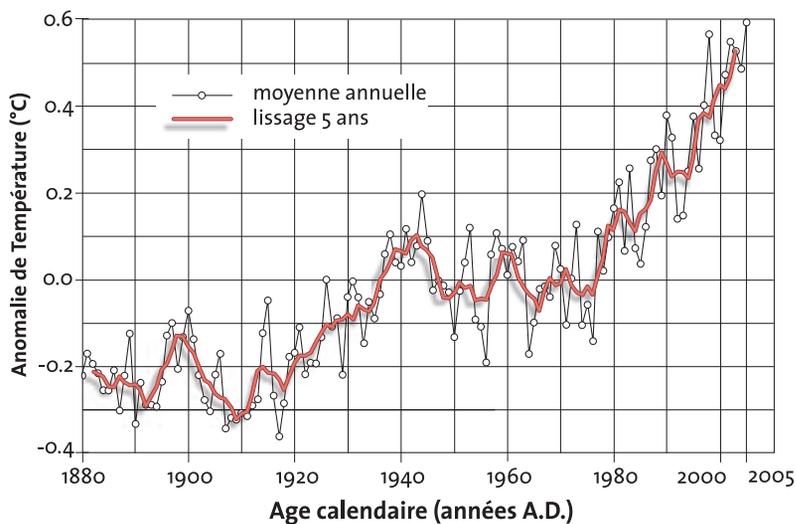
Tenir compte de la lente dérive des continents pour prévoir le climat du prochain siècle est sans doute superflu, mais il est indispensable de replacer les changements anthropiques dans un contexte plus large que le dernier siècle et donc de faire appel à la paléoclimatologie.

“ Le fait majeur est qu'en un siècle l'atmosphère s'est globalement réchauffée d'environ huit dixièmes de degré. ”

**Fig. 2 : Changements de la moyenne mondiale de température de surface.** Cette évolution moyenne est basée sur des mesures réalisées par les stations météorologiques et par les satellites pour la surface de l'océan (NASA-GISS).

Fig. 2: Changes in the world average of surface temperatures, based on measurements made by meteorological stations and ocean-surface measurements by satellites (NASA-GISS). In black: annual averages; in red: smoothed averages.

Source : E. Bard



Il est indispensable de replacer les changements anthropiques dans un contexte nettement plus large que le dernier siècle et donc de faire appel à la paléoclimatologie.

### Quelques exemples de reconstitutions paléoclimatiques

Pour connaître l'état de l'atmosphère en un point donné et à un moment précis, le climatologue réalise des observations à l'aide d'appareils basés sur des principes de physico-chimie. Les postes d'observation les plus nombreux relèvent la température de l'air, la nature et la hauteur des précipitations, la nébulosité, la force et la direction du vent, la pression atmosphérique, l'humidité de l'air et la chimie de l'air et des poussières.

Pour remonter plus loin que les deux derniers siècles, les spécialistes du climat ont aussi recherché d'autres sources documentaires, ou archives climatiques, dans lesquelles ils peuvent lire les fluctuations de paramètres comme la température, le niveau marin ou la pluviosité. Ces archives sont de nature géologique au sens large du terme. L'information climatique y est enregistrée par de nombreux paramètres physico-chimiques ou même biologiques qui sont liés aux conditions environnementales lors du dépôt de ces archives.

Pour les sédiments marins, on peut faire une liste des principaux outils du paléoclimatologue basés sur les microfossiles, des rapports isotopiques ou certaines molécules et atomes disséminés à l'état de trace dans les roches sédimentaires. On peut faire de même pour les glaces polaires avec une mention particulière pour les bulles d'air emprisonnées qui permettent de remonter aux teneurs passées des gaz à effet de serre. Les récifs coralliens donnent un accès privilégié aux variations du niveau marin. Ces listes ne sont évidemment pas exhaustives et l'on pourrait en détailler d'autres pour le bois fossile, les dépôts de lacs, les stalagmites et même les documents historiques pour les périodes plus récentes.

**Fig. 4 : Schéma en unité logarithmique présentant les principales causes de changements du climat ainsi que quelques exemples caractéristiques de fluctuations climatiques. En rouge et en vert sont distingués les forçages externes au système climatique, en bleu les réarrangements internes au système et finalement en noir les effets anthropiques. Modifié d'après Kutzbach (World Met. Org. Bull. 23, 155-163, 1974).**

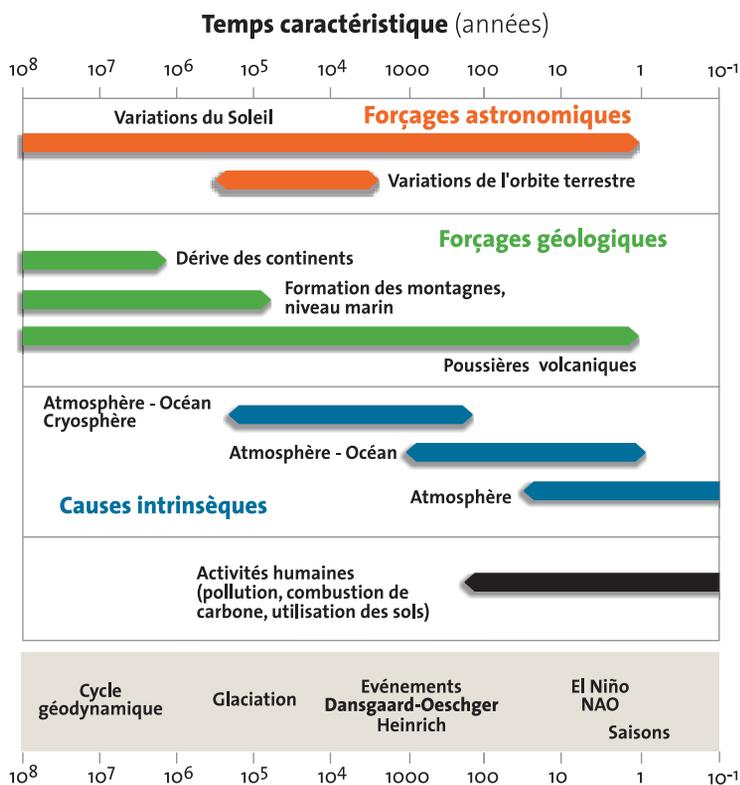
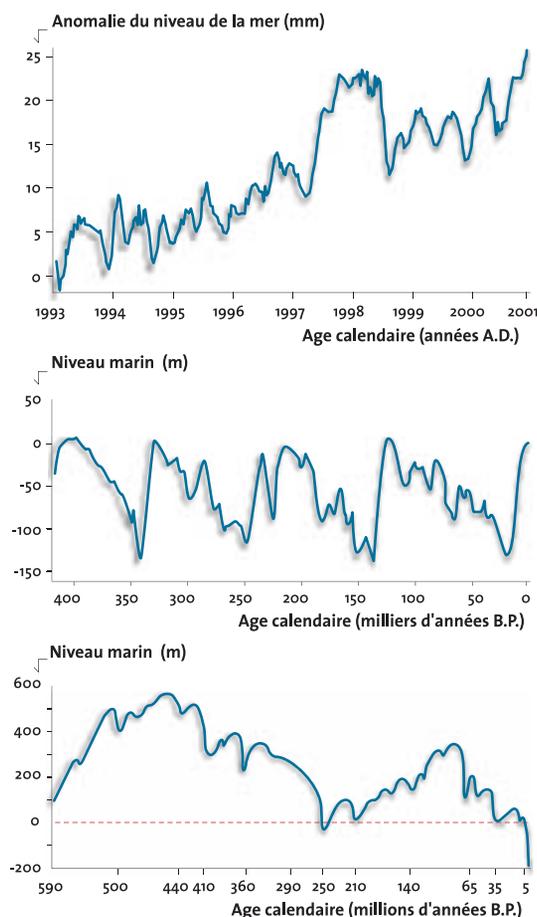
Fig. 4: Logarithmic unit scheme presenting the main causes for climate change as well as some characteristic examples of climate fluctuation. Red and green: external forces acting upon the climatic system; blue: internal rearrangements of the system; black: Man-made effects. Modified from Kutzbach (World Met. Org. Bull. 23, 155-163, 1974).

Source : E. Bard

**Fig. 3 : Variations à court, moyen et long termes du niveau de la mer. Il faut noter que les échelles de temps et de niveaux marins sont très différentes pour les trois panneaux de ce graphique.**

Fig. 3: Short-, medium- and long-term sea-level variations. N.B.: the time (abscissa) and sea-level (ordinate) scales are quite different for the three panels of this graph.

Source : Cabanes et al. (Science 294, 840-842, 2001), Waelbroeck et al. (Quat. Sci. Rev. 21, 295-305, 2002) et Vail et al. (Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 36, 129-144, 1984)



## VARIATIONS CLIMATIQUES NATURELLES ET ANTHROPIQUES

À l'échelle des dernières centaines de milliers d'années, l'évolution du climat se caractérise par des cycles glaciaires-interglaciaires. La cause principale est la cyclicité de la répartition géographique de l'insolation due à des changements des paramètres de l'orbite terrestre. Les trois cycles majeurs sont liés aux variations de l'excentricité de cette orbite, de l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre et enfin de la précession des équinoxes. La théorie astronomique des glaciations a été formulée dans les années 30 par l'astronome serbe Milutin Milankovitch. Néanmoins, ce n'est qu'au cours des dernières décennies que les chercheurs ont pu reconstituer des séries temporelles bien datées pour tous les compartiments du système climatique. Ces données confirment la puissance explicative de la théorie de Milankovitch.

Chaque transition glaciaire-interglaciaire, marquée par la fonte des calottes continentales et la remontée du niveau marin, est prévue par la théorie astronomique, mais sa vitesse et son amplitude sont amplifiées par des interactions complexes entre l'océan, l'atmosphère et les calottes de glace. Ainsi, la dernière déglaciation, entre 20 000 ans et 6 000 ans avant nos jours, a entraîné une formidable remontée du niveau marin d'environ 130 mètres. La chronologie précise de cette période tourmentée a pu être reconstituée grâce à des forages de récifs coralliens et des mesures géochronologiques précises. Durant cette période, de nombreux autres paramètres climatiques et océanographiques ont subi des variations de premier ordre : réchauffement mondial de l'ordre de 5 °C, augmentation d'environ 40 % des teneurs en gaz à effet de serre (gaz carbonique et méthane), diminution de la vitesse des vents, réorganisation de la circulation océanique... Un des résultats majeurs est aussi la découverte de variations brusques du niveau marin qui correspondent à des périodes de débâcle glaciaire. Par exemple, un tel événement a eu lieu vers 14 000 ans avant nos jours et a été marqué par une hausse rapide du niveau mondial à un taux supérieur au mètre par siècle, donc beaucoup plus rapide que la hausse observée pendant le dernier siècle.

À la fin des années 80, le géologue allemand Hartmut Heinrich a découvert que ces débâcles étaient très fréquentes en période glaciaire, lorsque les calottes continentales recouvraient le nord des continents. La calotte Laurentide qui couvrait alors le Canada « rabotait » littéralement les roches du socle nord-américain. Ces débris finement broyés étaient ensuite transportés par les icebergs qui les ont disséminés en Atlantique Nord. Ces débris détritiques glaciaires sont concentrés dans les sédiments marins sous la forme de couches dont l'épaisseur s'amenuise à mesure que l'on s'éloigne de la baie d'Hudson.

À l'échelle des dernières centaines de milliers d'années, l'évolution du climat se caractérise par des cycles glaciaires-interglaciaires. La cause principale en est la cyclicité de la répartition géographique de l'insolation due à des changements des paramètres de l'orbite terrestre.

L'injection d'énormes quantités de glaces continentales pendant les événements de Heinrich a diminué la densité de l'eau de mer, freinant considérablement la circulation océanique profonde. La conséquence directe de ces variations de la circulation océanique a été un refroidissement généralisé en Atlantique Nord et sur les continents limitrophes. Les fréquentes débâcles d'icebergs se sont conjuguées à d'autres modifications du cycle hydrologique, pour générer des fluctuations climatiques extrêmement brusques et de grande amplitude.

Ces variations ont été identifiées dans les années 80 par le glaciologue danois Willi Dansgaard et le géochimiste suisse Hans Oeschger. Lors de ces transitions climatiques, la température de l'air au niveau du Groenland change environ d'une quinzaine de degrés en moins d'un siècle.

Les fluctuations de la température de l'océan de surface sont plus limitées, mais peuvent atteindre plus de 5°C sur la même échelle de temps. Les enregistrements montrent que les refroidissements correspondent précisément aux injections de sédiments détritiques glaciaires, les fameux événements de Heinrich. À l'aide de marqueurs isotopiques, il est possible de suivre l'intensité de la circulation profonde atlantique. Les enregistrements montrent clairement que les variations de la température sont intimement liées à celles de la formation d'eau profonde.

Des études basées sur l'abondance relative des pollens préservés dans les sédiments océaniques ou lacustres permettent d'étudier l'impact de ces changements climatiques brusques sur l'Europe et la côte est de l'Amérique du Nord. La végétation du sud de l'Europe oscillait ainsi entre une steppe froide et sèche et des forêts arborées typiques d'un climat tempéré.



▲  
**Les forages de la barrière récifale de Tahiti sont étudiés pour reconstituer les fluctuations du niveau marin.**

*Borings of the barrier reef in Tahiti are studied to reconstruct sea-level fluctuations.*

© J. Oremüller/IRD

## Comprendre le climat du passé pour prévoir l'avenir

La prévision climatique n'est pas fondée sur de simples considérations historiques car les nombreux paramètres du système climatique ne se reproduisent jamais à l'identique. L'approche la plus fructueuse est de comprendre quantitativement les variations observées, en les simulant à l'aide de modèles numériques incluant toute la compréhension physique, chimique et biologique dont on dispose actuellement. Après les avoir testés à l'aide des variations du passé, ces mêmes modèles sont utilisés pour prévoir le climat futur en faisant certaines hypothèses sur l'évolution des paramètres externes au climat, notamment les activités humaines.

Ces modèles numériques ont fait d'immenses progrès, les capacités des ordinateurs autorisant des représentations de plus en plus fines conduisant à des résultats de plus en plus convergents. Il y a trente ans les simulations pour le prochain siècle se limitaient à des expériences de doublement du gaz carbonique uniquement dans des modèles atmosphériques. Les interactions entre les paléoclimatologues et les modélisateurs ont progressivement conduit à la prise en compte des autres compartiments du système climatique comme l'océan, les glaces, la biosphère, les sols et les cycles biogéochimiques fondamentaux.

La paléoclimatologie permet d'obtenir des données sur les variations de ces compartiments dont les constantes de temps sont longues par rapport à celles des processus atmosphériques. L'apport fondamental de ce domaine est donc d'élargir considérablement le spectre d'étude de la variabilité climatique en échantillonnant des périodes pendant lesquelles on peut être sûr que cette variabilité est naturelle. Il y a plus d'un siècle, le célèbre chimiste Svante Arrhenius l'avait déjà bien compris lorsqu'il considérait dans le même article le climat glaciaire et le climat futur perturbé par un doublement de gaz carbonique atmosphérique. ■

“ La prévision climatique n'est pas fondée sur de simples considérations historiques car les nombreux paramètres du système climatique ne se reproduisent jamais à l'identique. ”



IMPRIMERIE  
NOUVELLE  
Groupe Jouve

L'imprimé maîtrisé  
et une équipe de 90 personnes à votre service



1<sup>er</sup> Lauréat  
du Trophée de l'Environnement



93, avenue Denis-Papin - 45800 Saint-Jean-de-Braye - France  
Tél : + 33 (0) 2 38 70 94 94 - Fax : + 33 (0) 2 38 86 08 61



### Natural and man-made climatic variations

*The hospitable conditions found on Earth are due to a fortuitous combination of its distance from the Sun, the presence of the Moon, and the chemical composition of the atmosphere. This gaseous envelope as well as the oceans and the ice caps, each play a specific role in the climatic system, though with different reaction times. Recent advances in various disciplines, in particular paleoclimatology at the interface between climatology, oceanography and geology, have helped in documenting the various phenomena that act upon different compartments of the Earth's environment. The comparison between observed data and their simulation with mathematical models leads to a better understanding of the climatic variability at all time scales. Today, the greenhouse-gas effect is the subject of numerous worries as Man's activities have clearly disturbed the radiative equilibrium of the atmosphere. Research provides the means to place the recent period in the perspective of the last millennia, in order to detect and predict the influence of Man's activities upon the climate.*

**Erosion de la falaise basaltique et de la plage de la Souris Chaude (La Réunion).**  
*Erosion of basalt cliffs and the beach at Souris Chaude, Réunion Island, Indian Ocean.*

© BRGM im@gé - R. Pedreros

Le réchauffement climatique va se traduire par une nette élévation du niveau moyen de la mer comprise selon les différents modèles et études en cours, entre 9 et 88 cm à l'horizon 2100. Cette tendance inexorable aura des conséquences fortes sur le littoral qui va être fragilisé et modifié. Par ailleurs, la fréquence et l'intensité plus forte des tempêtes et des phénomènes climatiques extrêmes provoqueront une accélération de l'érosion des plages et falaises et une extension des submersions marines sur les côtes basses. Toutes ces évolutions pèseront lourdement sur les activités humaines au cours des prochaines décennies.



# Impact du changement climatique sur le littoral



**Nicole Lenôtre**

GÉOLOGUE OCÉANOGRAPHE  
RESPONSABLE DE L'UNITÉ EROSION  
DES SOLS ET LITTORAL  
SERVICE AMÉNAGEMENT ET  
RISQUES NATURELS - BRGM  
n.lenotre@brgm.fr

**Rodrigo Pedreros**

GÉOLOGUE OCÉANOGRAPHE  
SERVICE AMÉNAGEMENT ET  
RISQUES NATURELS - BRGM  
r.pedreros@brgm.fr

Le littoral est un territoire soumis à des pressions démographiques, avec des conséquences importantes sur l'urbanisation, ou d'usages (tourisme, industrie, pêche...) parfois conflictuels. Espace restreint et complexe à l'interface des milieux terrestre et marin, le littoral est menacé par un ensemble de phénomènes naturels comme l'érosion ou les inondations marines accrues par des risques émergents liés au changement climatique.

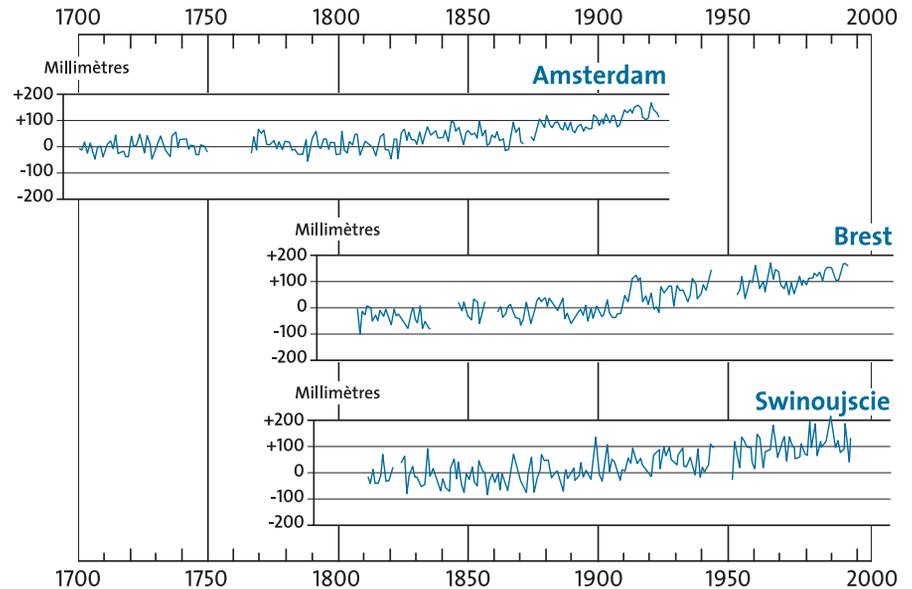
## Changement climatique sur le littoral

Le réchauffement climatique probablement lié à l'effet de serre additionnel d'origine humaine, devrait avoir des répercussions sur les écosystèmes et le milieu physique de la planète, en particulier sur le littoral. Ce changement climatique pourra en effet provoquer une élévation du niveau moyen de la mer et sera vraisemblablement accompagné de tempêtes plus fortes et plus fréquentes.

**Fig. 1 : Niveau de la mer relatif au cours des 300 dernières années.**

*Fig. 2: Relative sea levels during the past 300 years.*

Source : IPCC/GIEC 2001



L'élévation du niveau de la mer est enregistrée, depuis 300 ans (Fig. 1), par les marégraphes, également sensibles aux mouvements de l'écorce terrestre, qui peuvent aggraver ou diminuer le phénomène d'élévation du niveau de la mer. Dans la majorité des cas, ces mesures mettent en évidence une accélération de l'élévation du niveau de la mer sur les dernières décennies. Ainsi à Brest le niveau de la mer apparaît stable au 19<sup>ème</sup> siècle et ne cesse d'augmenter entre 1900 et 1994 (1,24 mm/an  $\pm$  0,13).

L'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) et son groupe d'experts, travaillent depuis plus d'une dizaine d'années sur ce problème afin de dégager des modèles d'évolution du climat. Les modèles sont fondés sur des lois physiques prenant en compte les principaux éléments du système climatique (atmosphère, océan, terres émergées, cryosphère et biosphère) ainsi que les processus qui se manifestent dans, et entre, ces divers éléments.

Les modèles ont d'abord été globaux avec des mailles unitaires de 250 km. Depuis quelques années, les prévisions ont été affinées avec des modèles climatiques régionaux produisant des simulations plausibles jusqu'aux échelles sous-continentales et à des échelles de temps allant de la saison à la décennie. Différents scénarii ont été étudiés en prenant en compte plusieurs critères : variations démographiques, développement socio-économique, degrés d'évolution technologique et de choix en matière d'énergie (fossile, renouvelable...).

“  
Le changement climatique  
pourra provoquer une  
élévation du niveau  
moyen de la mer et  
sera vraisemblablement  
accompagné de tempêtes  
plus fortes et  
plus fréquentes  
”

Selon les différents scénarii, et pour des projections basées sur la gamme de scénarii du RSSE<sup>(1)</sup>, le niveau moyen de la mer devrait augmenter de 9 à 88 cm entre 1990 et 2100 (Fig. 2).

Cette élévation sera principalement due à la restitution d'eau consécutive à la fonte des glaciers et des calottes glaciaires et à la dilatation thermique des eaux superficielles des océans. L'élévation du niveau de la mer se traduit par un recul de la ligne de rivage, donc par une perte nette de la surface émergée. En connaissant localement la profondeur limite de l'action des vagues et en imposant l'élévation du niveau de la mer, il est possible de chiffrer ce recul grâce à la règle de Bruun<sup>(2)</sup>: en considérant les caractéristiques moyennes des plages de l'Atlantique, du Pacifique et de l'océan Indien, l'élévation du niveau de 1 cm correspondrait à un recul de 1 m. L'extrapolation de cette correspondance aux élévations prévues par les modèles numériques pour 2100 (9 à 88 cm) indique que les plages auront reculé entre 9 et 88 mètres dans un siècle.

(1) RSSE : Rapport Spécial sur les Scénarios d'Emissions.

(2) Postulat selon lequel une élévation du niveau de la mer provoquerait une translation latérale et verticale du profil d'un littoral sableux, la translation latérale étant égale au rapport de l'élévation sur la pente. Par exemple, pour 1 m d'élévation du niveau de la mer et une pente de 1 %, le recul serait de 100 m.

“ Selon les différents scénarii, le niveau moyen de la mer devrait augmenter de 9 cm à 88 cm entre 1990 et 2100. ”

Par ailleurs, le changement climatique attendu devrait être à l'origine d'une accélération de la circulation atmosphérique, avec une fréquence plus élevée et une intensité accrue des tempêtes. À ces tempêtes, sont généralement associés des phénomènes de surcotes, élévations exceptionnelles du niveau de la mer durant quelques heures (lors du cyclone Katrina en 2005, la surcote a atteint 10 m sur les côtes du Mississippi). Ces surcotes s'expliquent par une baisse de la pression atmosphérique, par des vents forts et des houles de forte amplitude. Les événements météorologiques extrêmes avec l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et la modification des trajectoires des tempêtes et des cyclones ont une incidence directe sur :

- > l'amplitude et la propagation de la houle,
- > l'intensité et la direction des courants,
- > la fréquence et l'amplitude des surcotes.

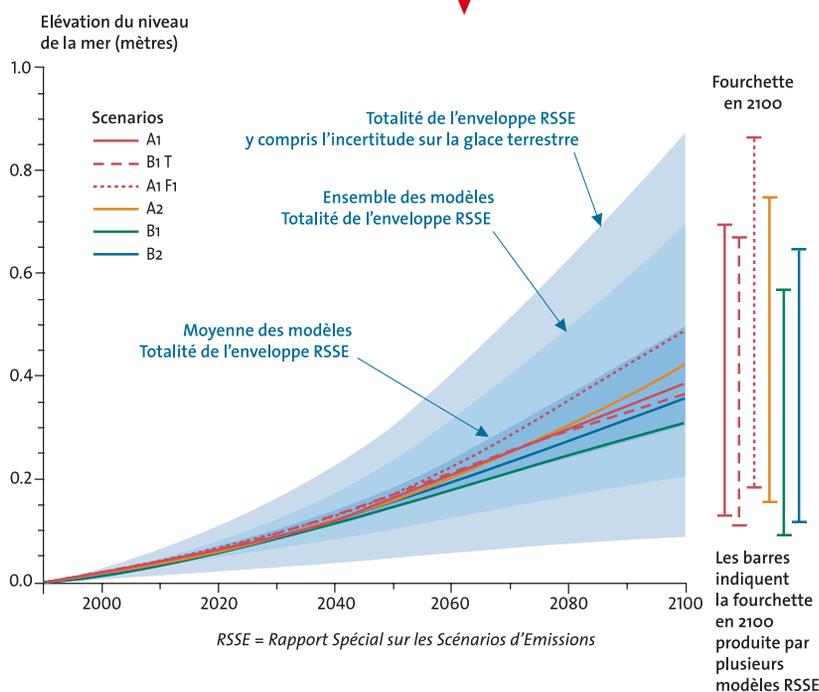
Ces différents phénomènes provoqueront une accélération de l'érosion des plages et des falaises, une extension des submersions marines temporaires ou permanentes en cas de rupture d'un bourrelet dunaire ou sur les zones côtières basses. Ce sont les grandes tempêtes qui font évoluer les rivages marins en provoquant de fortes érosions ou des submersions étendues comme ce fut le cas sur les côtes atlantiques françaises en décembre 1999.

Le Projet européen EUROSION (2002 – 2004) a réalisé une évaluation cartographique de la vulnérabilité des côtes européennes au risque d'érosion qui a permis de prendre conscience de l'ampleur du problème : plus de 30 % des côtes sableuses sont en érosion et depuis 1986, le « bétonnage » des côtes a progressé de 934 km dans l'Europe des 12.

Fig. 2 : Élévation moyenne mondiale du niveau de la mer de 1990 à 2100 pour les scénarii du RSSE cités à gauche.

Fig. 1: Average global sea levels from 1990 to 2100 for the Special Reports on Emissions Scenarios (SRES) cited on the left.

Source : IPCC/GIEC, 2001



## L'impact du changement climatique sur le littoral ne sera pas identique selon les types de côtes (source Pedreros, 2003)

### Plages : une érosion accélérée

Le changement climatique engendrera une accélération consécutive de l'érosion des plages tandis que leur reconstruction naturelle entre les tempêtes sera freinée. Autre conséquence possible : une modification de la circulation sédimentaire et des courants littoraux pouvant priver les plages de leur alimentation régulière en sédiments.

Les secteurs soumis à un grand marnage sont particulièrement vulnérables du fait de la conjugaison possible de grandes marées et de tempêtes. L'impact des vagues et de la surcote aurait alors un effet bien plus dévastateur.

	Falaise roche dure		Falaise roche tendre		Côte sableuse		Côte vaseuse		Total	
	UE	FR	UE	FR	UE	FR	UE	FR	UE	FR
<b>longueur (km)</b>	35 728	2 060	11 833	1 210	35 027	2 546	11 436	1 125	94 024	6 941
<b>en érosion(%)</b>	5	1	30	46	26	48	23	23	15	25
<b>stable (%)</b>	66	93,8	61	18,7	30	35,5	8	8	44	38
<b>engraissement (%)</b>	0	0	2	3,2	20	12	46,5	46,5	14	11

Tableau 1 - L'évolution des côtes françaises : UE = Union Européenne, FR = France.

Table 1 – Evolution of European (UE) and French (FR) coasts. Left to right: hard rocky coast, soft rocky coast, sandy coast, muddy coast; top to bottom: length, percentage of erosion, percentage of stable coasts, percentage of growing coasts.

Source : EUROSION, 2004 ; www.euroSION.org

Plus de 30 % des côtes sableuses sont en érosion et depuis 1986, le «bétonnage» des côtes a progressé de 934 km dans l'Europe des 12.

Localement et de façon actuellement imprévisible, les barres d'avant-côte<sup>(3)</sup>, les dunes bordières ou les ouvrages de défense pourraient ne plus suffire à contenir les assauts de la mer. Les plages seront alors soumises à des aléas locaux d'inondation avec, en outre, une possibilité d'ensablement de l'arrière-côte due aux vents transportant le sable des plages vers l'intérieur des terres. Ce sera particulièrement le cas pour les dunes sans végétation. Celle-ci protège la dune en faisant chuter la vitesse du vent près du substrat (frottement) et en piégeant les sédiments. Cette situation est bien connue sur certains secteurs du littoral aquitain.

### Côtes rocheuses : impact plus limité

L'élévation de la mer aura un faible impact direct sur les falaises. En revanche, l'action mécanique exercée lors de tempêtes par les vagues en pied de falaise sera plus importante en particulier pour les roches tendres. Par ailleurs, le phénomène de gel / dégel pourra gagner de nouvelles régions ou augmenter de fréquence fragilisant ainsi le haut de la falaise. L'augmentation des précipitations dans certaines régions accélérera également l'infiltration d'eau dans les zones fracturées, favorisant ainsi les phénomènes de dissolution des roches calcaires, comme les craies. Ces différents phénomènes toucheront probablement les falaises de Normandie.

### Estuaires : effets multiples

Les estuaires correspondent à un lieu de rencontre entre eaux douces et eaux salées avec une dynamique sensible à la houle, la marée, le vent, les apports en eau douce, les variations de température et de salinité et l'élévation du niveau de la mer.

Cette élévation favorisera la pénétration des eaux salées qui pourra être localement compensée par l'augmentation des débits des fleuves lors de fortes pluies. L'érosion des berges et la submersion dans les zones basses seront également favorisées.

L'érosion des rives dépendra des actions opposées exercées par l'élévation du niveau de la mer et les tempêtes, et par les apports fluviaux. Cela pourrait toucher les estuaires de la Loire et de la Gironde.

(3) Rides sous-marines parallèles à la côte qui jouent un rôle important de protection en amortissant l'énergie des vagues de tempête avant leur arrivée sur la plage.



#### Atlas thématique de l'environnement marin de la baie de Douarnenez

(C. Augris)  
70 €



#### Évolution morpho-sédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime

(C. Augris)  
30 €



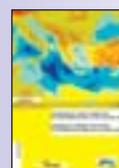
#### Cartographie géologique des fonds marins côtiers

(C. Augris & P. Clabaut)  
18,29 €



#### Carte morpho-bathymétrique du golfe du Lion

(S. Berné et al.)  
20 €



#### Morpho-bathymetry of the Mediterranean Sea

(Ifremer/Ciesm)  
30 €



#### Dredging and marine environment

(C. Alzieu)  
30 €



#### Bioévaluation de la qualité environnementale des sédiments portuaires et des zones d'immersion

(C. Alzieu)  
43 €



#### Hydrologie des écosystèmes marins : paramètres et analyses

(A. Aminot & R. Kérouel)

Éditions

**Ifremer**

BP 70, 29280 Plouzané, France  
Tél. 33 (0)2 98 22 40 13,  
Fax 33 (0)2 98 22 45 86  
Mél : [editions@ifremer.fr](mailto:editions@ifremer.fr)

#### Diffusion :

INRA Editions, RD10, 78026 Versailles Cedex  
Tél. 33 (0)1 30 83 34 06  
Fax 33 (0)1 30 83 34 49  
Mél : [INRA-Editions@versailles.inra.fr](mailto:INRA-Editions@versailles.inra.fr)

**Catalogue disponible gratuitement sur simple demande.**



## IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE LITTORAL



**Erosion active des falaises côtières du Pays de Caux, entre Le Havre et le port pétrolier d'Antifer, en Seine-Maritime.**  
*Active cliff erosion along the Pays de Caux coastline between le Havre and the Antifer oil port, Seine-Maritime.*

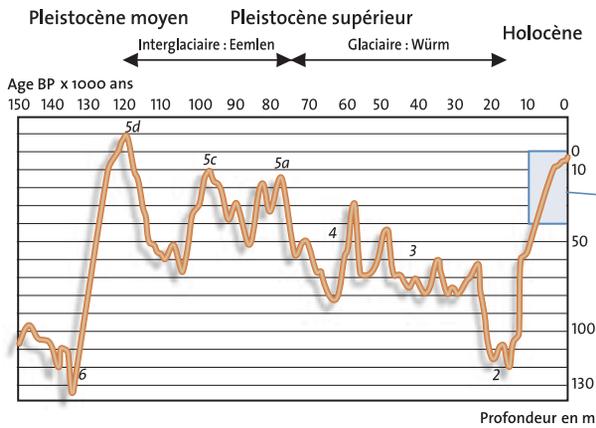
© BRGM im@gé - G. Bertrand

► **LES TÉMOINS DES VARIATIONS DU NIVEAU MARIN DEPUIS LE DERNIER ÉPISODE GLACIAIRE** - Pol Guennoc - p.guennoc@brgm.fr

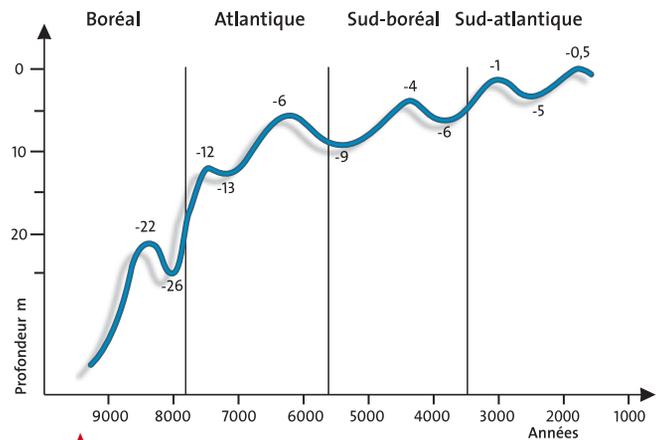
Lors du dernier maximum glaciaire, il y a – 22 000 ans, le niveau marin est descendu jusqu'à –130 m (Fig. A). La remontée de la mer a été rapide (1,5 cm/an) de –15 000 ans à –8000 ans avec quelques courtes périodes de «stationnement» du niveau marin (Fig. B). Les témoins, aujourd'hui submergés, de la dernière remontée de la mer sont nombreux et

variés: paléovallées fluviales comblées ou non, dépôts continentaux (ex. tourbe), dépressions karstiques (dolines) sur les plates-formes calcaires (anciens «causses» maintenant submergés), témoins d'occupation humaine... Parmi ces derniers témoins, le plus célèbre est la grotte Cosquer au large de Marseille, dont l'entrée, aujourd'hui située à 40 m, dominait la mer de

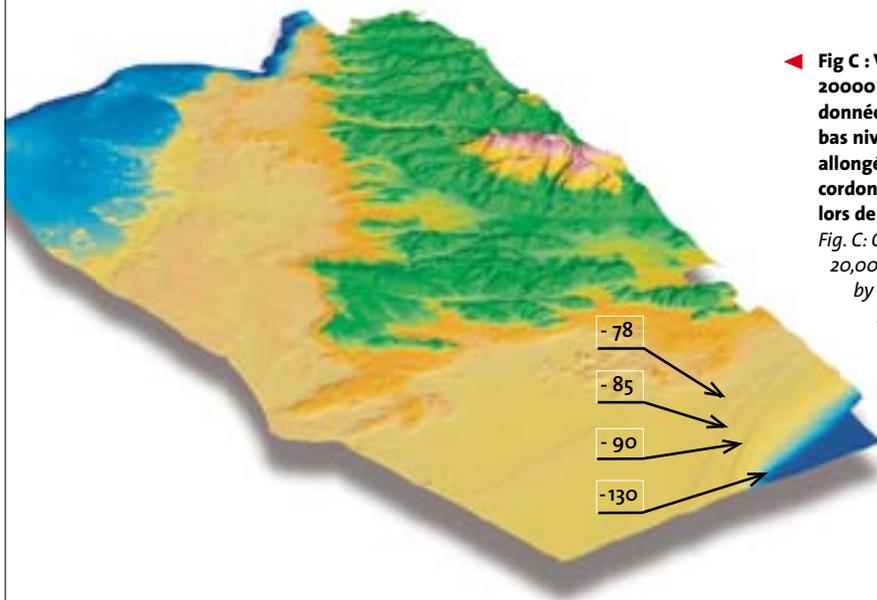
près de 70 mètres au moment de son occupation la plus ancienne (vers –28000 ans). Les stationnements de la mer à différentes profondeurs lors de la remontée (anciennes lignes de rivage) sont repérées par des cordons littoraux (Fig. C), des replats, des encoches d'abrasions marines, des constructions algaires ou récifales. ■



▲ **Fig. A : Courbe de variation du niveau marin depuis 140000 ans à l'Actuel.**  
 Fig. A: Sea-level variations over the past 140,000 years.  
 Source : d'après Imbrie et al., 1988, in D. Menier, 2003



▲ **Fig. B : Courbe des variations apparentes du niveau marin.**  
 Fig. B: Apparent sea-level variations.  
 Source : d'après Morzadec-Kerfourn, in D. Menier, 2003



◀ **Fig C : Vue terre-mer des reliefs de la Corse du Sud il y a 20000 ans (traitement BRGM à partir du MNT IGN et des données hydrographiques du SHOM). Au-dessus du dernier bas niveau marin (-130 m), à l'Est des Bouches, les rides allongées sur plusieurs kilomètres représentent d'anciens cordons littoraux témoignant de stationnements de la mer lors de la dernière remontée du niveau marin.**  
 Fig. C: Combined land/sea view of southern Corsica 20,000 years ago (BRGM processing from a DEM provided by IGN and hydrographic data from the French Naval Hydrographic Service - SHOM). Above the lowest sea level at -130 m, the east side of the image shows several old strand lines that witness temporary interruptions in the rising sea level.  
 Source : BRGM

**Marais maritimes : en équilibre**

En équilibre avec le niveau de la mer, les marais maritimes qui s'ajustent à la hausse du niveau de la mer en élevant leur surface sont actuellement en développement. Des études menées aux USA ont permis de définir la limite de cet ajustement : pour des conditions optimales d'apports sédimentaires, de salinité et de qualité des eaux, les marais maritimes pourraient s'adapter jusqu'à une élévation maximale de 1 cm / an, soit une valeur plus forte que celle prévue par les modèles. L'élévation du niveau de la mer ne représente pas un danger même s'il est difficile de prévoir leur comportement face à l'augmentation des événements extrêmes.

**Zones deltaïques : très sensibles**

L'ensemble des plaines deltaïques parsemées d'étangs et de lagunes, et possédant une topographie à fleur d'eau, est très sensible à l'élévation du niveau de la mer avec la possible disparition de grandes étendues par submersion. Des études menées par le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) sur le delta du Nil, révèlent qu'une élévation de la mer de 50 cm provoquerait la perte de 1 800 km<sup>2</sup> de terres, et toucherait 3,8 millions de personnes. Cela pourra être aggravé localement et temporairement par des événements météorologiques extrêmes.

**Littoraux à mangrove : impact localement destructeur**

L'évolution du climat devrait renforcer le cycle hydrologique avec une accélération de l'érosion favorisant ainsi les apports sédimentaires à la côte. Toutefois, la houle et les surcotes associées à des cyclones tropicaux puissants et plus fréquents auront localement un impact très destructeur en déracinant les arbres et en érodant les sédiments. Ces impacts seront accentués par l'élévation du niveau de la mer.

**Récifs coralliens : une menace réelle**

Les récifs coralliens semblent grandement menacés par les changements climatiques. L'augmentation de la température de l'eau modifiera la répartition des récifs : les zones avec des eaux d'environ 20° C verront apparaître des récifs au détriment des zones chaudes où les coraux pourraient dépérir. Les événements chauds renforceront les périodes de blanchissement des coraux pouvant parfois causer leur mort à l'image des récifs frangeants de l'île de La Réunion affectés par El Nino en 1998. L'élévation du niveau de la mer aura un effet plutôt positif car elle permettra de coloniser de nouveaux secteurs à peine immergés actuellement. La multiplication des événements extrêmes avec les apports terrigènes souvent associés mais aussi l'augmentation du CO<sub>2</sub> induisant une baisse du taux de calcification des coraux comprise entre 17 et 35 % en 2100 selon des études récentes contribueront à la dégradation des récifs coralliens.



**Vulnérabilité des plages étroites aux tempêtes.**  
*The vulnerability of narrow beaches to storms.*

© BRGM im@gé - N. Lenôtre

**Les baies: comblement progressif**

Les baies, souvent à dominantes vaseuses et partiellement protégées des houles, verront leur comblement s'accroître, comme on le constate déjà dans le fond du Bassin d'Arcachon ou de la baie de Somme.

**Les impacts possibles en France**

En France, la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES, 2000) a pour mission de suivre les impacts potentiels du changement climatique. Le Conservatoire du Littoral a lancé en 2002 une étude (Clus-Auby et al., 2004) afin de réaliser une analyse prévisionnelle de la submersion et de l'évolution du trait de côte (érosion / engraissement) sur la base d'une remontée du niveau moyen de la mer de 44 cm (valeur la plus probable) en 2100.

Cette étude a déjà démontré plusieurs faits :

- > en Camargue, si le niveau de la mer s'élève de 50 cm à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle, la période de retour d'une surcote de 1 m pourrait passer d'une fois tous les 10 ans aujourd'hui à une fois par an ;
- > des gains de terrains sont attendus dans les baies comme à Audierne ;
- > les terrains de la façade Nord-Pas-de-Calais semblent être les plus exposés aux phénomènes d'érosion ;
- > le site des Veys en Normandie en cours de dépoldérisation est exposé à la submersion ;
- > en Aquitaine, la plage de l'Amélie pourrait perdre 76 % de sa surface et celle de la dune du Pyla plus de 80 %.

*On assiste actuellement à un changement d'orientation, passant de la construction de structures de protection en dur à des mesures de protection plus douces.*

Dans les zones côtières, les risques d'inondation, d'érosion et de disparition de zones humides augmenteront considérablement, avec de lourdes conséquences pour les activités humaines, l'industrie, le tourisme, l'agriculture, et les habitats naturels côtiers.

Plusieurs stratégies d'adaptation au changement climatique sont possibles: protéger (maintenir la ligne de rivage), composer (intervention limitée ou aménagement en retrait) ou se retirer. On assiste actuellement à un changement d'orientation, passant de la construction de structures de protection en dur (ouvrages longitudinaux, épis...) à des mesures de protection plus douces de maintien de la ligne de rivage (rechargement des plages), au retrait planifié et à l'augmentation de la résilience des systèmes biophysiques et socio-économiques. ■



### The impact of climate change on coastlines

Alternating glacial and interglacial periods have caused strong sea-level variations during the Quaternary. For instance, a lowering of -130 m was measured for the last glacial period on the continental shelf of Corsica, one of several ancient shorelines visible in the present sub-marine morphology. Future climate change will have a severe impact on shorelines. International programmes such as IPCC are developing models concerning the evolution of the climate and its potential impact. The different models produced from different scenarios give mean sea-level rises of 9 to 88 cm in 2100. An increase in the intensity and frequency of storms is expected as well, which will accelerate the erosion of beaches and (soft) cliffs as well as the flooding of marine lowlands and deltaic areas. Coral reefs will be damaged because of increasing temperatures (whitening of corals) and increased terrestrial sediment input. Mangroves, coastal wetlands and estuaries will also be affected, though many bays and salt marshes may suffer relatively less from such climate change. Today, the mean erosion rate of the sandy parts of the Aquitaine coast (southwestern France) is 2.5 m/year, whereas its cliffs erode by about 30 cm/year. In coastal areas, erosion and submersion will cause the disappearance of ground with an adverse effect on human habitations and goods, tourism, agriculture and natural habitats. Three strategies of adaptation are possible to face climate change: to protect (hold the line), to compose (managed realignment or limited intervention), or to retreat.

### ► EXEMPLE DE LA CÔTE AQUITAINE

Cyril Mallet - c.mallet@brgm.fr

En Aquitaine, environ 38 % du littoral (527 km, estuaires compris) sont en érosion avec un recul moyen d'environ 2,5 m/an sur la côte sableuse alors que 31 % sont équipés d'ouvrages de protection ou constituent des plages artificielles (rechargées) (Site internet: littoral.aquitaine.fr). Les superficies des secteurs soumis à l'érosion représentent 11 % de zones urbaines ou industrialisées et 34 % de zones à fortes valeurs écologiques (EuroSION, 2004). Ainsi (Aubié et al., 2005), le recul moyen du littoral rocheux aquitain (basque) sur la période 1829-2000 est de 30 cm/an  $\pm$  10 cm/an, avec un recul maximal estimé à 80 cm/an dans la baie d'Erromardie (Fig. 1).

Le réchauffement climatique entraînera une augmentation de la vulnérabilité du littoral suite à l'action marine (montée du niveau, intensification probable des houles et tempêtes), et une éventuelle modification des régimes hydrologiques jouant un rôle majeur sur les instabilités littorales basques. Globalement, la côte aquitaine subit une érosion inexorable préoccupante pour l'aménagement. Mais elle possède encore des falaises non urbanisées ou des systèmes plage-dune non endurcis, véritables barrières naturelles de protection laissant la possibilité d'un recul contrôlé. ■



▲ Fig. 1 : Evolution du trait de côte entre 1829 et 2000 sur le secteur d'Erromardie à Saint-Jean-de-Luz.

Fig. 1: Evolution of the coastline between 1829 and 2000 in the Erromardie area of Saint-Jean-de-Luz (SW France).

Source : BRGM



◀ Erosion de la plage et de la dune d'Hourtin (Aquitaine) montrant un recul de plusieurs dizaines de mètres en 50 ans : le blockhaus construit initialement sur le sommet de la dune est actuellement sur la plage.

Beach and dune erosion at Hourtin (Aquitaine), showing a shoreline retreat of several tens of metres in 50 years: the bunker, initially built on the dune, now lies on the beach.

© BRGM im@gé

**Bibliographie :** S. Aubié, A. Genna, J. Petitjean avec la collaboration de C. Mallet et J. P. Capdeville (2005) - Evolution historique du littoral basque français, Rapport BRGM / RP-53454 -FR, 32 illustrations, 1 ann., 59 p. - C. Clus-Auby, R. Paskoff et F. Verger (2004) - Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du Littoral, Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100 - Synthèse, 44 p., site internet : www.conservatoire-du-littoral.fr. EUROSION (2004) - Living with coastal erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability - Part II - Maps and statistics, 29 May 2004, 25 p., site internet : www.euroSION.org. - GIEC (2001) - Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques. Rapport du Groupe de travail III du GIEC. 92 p., site internet : www.ipcc.ch. - D. Menier (2003) - Morphologie et remplissage des vallées fossiles sud-armoricaines : apport de la stratigraphie sismique. Thèse Université de Bretagne Sud, 211 p. - MIES (2000) (2ème édition) - Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle. 53 p. R. Pedreros (2003) - Impact du changement climatique sur les zones côtières, Rapport BRGM / RP-52803-FR.

**Landslide following heavy rainfall (Drôme).**  
*Glissement de terrain suite à de fortes précipitations (Drôme).*  
© BRGM im@gé - M. Vincent

Climate plays an essential role in triggering ground instabilities through factors such as precipitation, temperature change and humidity evolution. The acceleration of climate change due to anthropogenic activities, together with the increased exposure of human infrastructure, will inevitably result in higher risks associated with ground instabilities. Understanding instability mechanisms and the role of triggering factors, in conjunction with appropriate development plans including identification and mapping the most vulnerable areas, will result in a better adaptation to the unavoidable climate change – at least in the short to medium term.



# Climate Change and ground Movements



**Hormoz Modaressi**  
PROFESSOR,  
PIERRE ET MARIE CURIE  
UNIVERSITY (PARIS VI)  
HEAD, DEVELOPMENT PLANNING  
AND NATURAL RISKS DIVISION -  
BRGM  
h.modaressi@brgm.fr

Thousands of deaths and injuries and enormous economic losses around the world are the regrettable evidence of ground movements (e.g. landslides, mudflows, debris flows, subsidence and erosion). They form an increasing threat due to world population growth, intensive land use and climatic change, and their impact is growing at an unsustainable rate. Destructive effects have been reported in recent years, even in developed countries (25 to 50 deaths annually in the USA and almost twice this amount in the EU), whilst the situation in developing countries is alarming (approximately 1,000 deaths per year).

Evidence of climate change is already apparent in many systems, physical as well as biological. They are consistent with the global warming observed over recent decades. Although no correlation has yet been established between climate change and the growing number of ground instabilities, it is assumed that the size of triggering factors is greatly increasing. For instance, the water cycle, highly sensitive to climate, is being modified and will provoke landslides or subsidence.

The sensitivity of soils to climate change may be understood through observation. The prediction of potential changes in the magnitude, frequency, location, sequence and the persistence of climate extremes as well as climate variability, together with the evaluation of exposure and vulnerability of exposed elements, can be used to estimate the level of risk predicted for this century.

## Physical system and triggering mechanisms

Ground movements are among the most widespread geological hazards on Earth and include various phenomena. Their common feature is ground failure, observable through excessive displacements and deformations. The term ground instability is sometimes used instead of ground movement to define the transformations to which the ground is subjected between two equilibrium states. These transformations may be very rapid to very slow with respect to the mechanisms triggered during the process and their consequences depend on the exposed elements and their vulnerability.

It is commonly agreed that many fundamental aspects of ground instabilities are not yet well understood. This is mainly because of the complex structure of natural ground, the variety of triggering factors and the time-space scales involved in the process.

Over the past decades research has focused on several topics to predict the probability, occurrence, location and size of ground instabilities. In other words, the aim is to answer the following questions concerning the occurrence of ground instabilities: why? how? where? when? and to what extent? The scientific community has been able to answer these questions with different levels of success.

**Why ground instabilities occur** is mainly understood by investigating what the triggering factors are and how the processes involved may be identified. The origin of triggering factors may be natural and/or human.

The triggering factors of natural origin embrace a wide range of phenomena such as geodynamics and climate. The human actions may break the natural equilibrium and result in ground instabilities. Excavation, slope modification, deforestation and irrigation are amongst the well-known triggering factors.

Hence, climate change, either directly (e.g. rain, snowmelt, erosion and floods) or combined with human action (deforestation, irrigation, etc.), may accentuate ground instabilities.



### ◀ Mud flow at Boulc en Diois (Drôme, France).

**This landslide, active for the past 15 years and involving 10 millions m<sup>3</sup> of material, causes major periodic flows.**

*Coulée de boue de Boulc en Diois (Drôme, France). Glissement de terrain de 10 million de mètres cubes, actif depuis 15 ans, à l'origine de coulées volumineuses périodiques.*

© BRGM im@gé - M. Saint Martin

The ground instability hazard assessment is problematic due to inherent inaccuracy of evaluation techniques. The uncertainties related to climate change make hazard assessment even more complex.

Identification of processes and mechanisms responsible for loss of strength and eventually instability is the main step in understanding and mitigating ground instabilities. Despite great progress over the past decades in our knowledge of some processes such as natural erosion, influence of water regime change, effects of weathering and the role of shocks and vibrations, we still need a much more comprehensive scientific understanding of instability processes and occurrence.

Once the processes and mechanisms have been identified, it is possible to establish physical and mathematical models for carrying out sensitivity analysis. The difficult task is then to provide the physical properties and other parameters for these models, bearing in mind the heterogeneous nature of natural ground and the random behavior of the majority of triggering factors.

For climate change, robust and realistic physical-based models are required to provide detailed estimates. Such models cannot yet simulate all aspects of climate and there are particular uncertainties to be evaluated. However, confidence in their ability to provide useful projections of future climate has improved due to their demonstrated performance on a range of time-space scales.



It is possible to obtain a good enough estimate for ground instabilities triggered by climatic factors by discounting minor factors as being unimportant and extreme factors as unlikely. However, minor factors can become major due to climate change and extreme factors can occur more frequently than expected. Even in the present climate, extreme factors occur chaotically and result in more complex and uncertain situations.

**How ground instabilities take place** refers to our knowledge of the mechanisms in the framework of a conceptual model based on the physics of the process. The remobilization of mechanisms results progressively in stress concentration, strain localization and/or loss of strength. These are the recognized steps towards ground failure. A change in the hydro-mechanical loading conditions, phase transform and/or chemico-mechanical actions are at the origin of the process. Soil moisture is essential to soil behavior in general and to ground instability in particular. It depends on the precipitation rate, actual evaporation, groundwater recharge and the water-holding capacity of the soil. In fact, soils with lower water-holding capacity are more vulnerable to climate change. This latter aspect not only modifies the moisture content, but may also interact with soil characteristics through mechanical and morphological changes such as cracking and alteration, which in turn may affect water-holding properties and infiltration capacity. Also, the mechanical behavior of soils is largely influenced by the frequency and intensity of freezing.

Depending on the problem in hand, some properties such as fissure/fracture density and orientation, water content, internal friction angle, ground surface state, topography and slope angle are in general identified as major factors in the description of failure mechanisms.

**Where instabilities start** depends on several factors such as the stress state, local properties, existing or induced strain anisotropy and possible hydromechanical heterogeneity in the ground before the onset of instability, as well as anthropogenic or natural actions. The superficial state of the ground, related to the degree of alteration, the presence of fissures and fractures as well as the evaporation mechanism, may determine where instability begins. The modification of vegetation cover by climate change may also be a determining factor.

**When failure happens** is conceivably the most difficult challenge for scientists. When it is possible to provide such information, evacuation plans may be envisaged, hence the paramount importance for authorities and civil security services. The uncertainties associated with climate change make prediction even more difficult. Appropriate monitoring and alert systems are required for such purposes.

**To what extent the ground is affected** is important in two ways: it determines the mass in movement and also the affected area beyond the destabilized zone, and is essential for prevention plans and hazard mapping.

**Mud flow following the rupture of a blockage caused by a mass flow of volcanic rocks (Le Prêcheur, Martinique).**

*Lave torrentielle. Rupture d'embâcle générée par un éboulement en masse de matériaux d'origine volcanique (Le Prêcheur, Martinique).*

© BRGM im@gé - O. Sedan

“Ground instabilities are increasingly recognized as being especially vulnerable to certain triggering factors, themselves highly sensitive to climate change.”



**Subsidence due to a drop in the mechanical properties of the roof of a subsurface cavity.**  
*Affaissement de terrain induit par la baisse des propriétés mécaniques au toit d'une cavité souterraine.*

© BRGM im@gé - M. Vincent



## Climate change projections

Ground instabilities are increasingly recognized as being especially vulnerable to certain triggering factors, themselves highly sensitive to climate change (e.g. glacial melting, change in vegetation context, precipitation-regime change, sea-level rise, floods, immersion-emersion of coastal zones, thermal effects such as freezing-melting, swelling-shrinkage and thermal gradient). The many interactions of climate change with human populations, the so-called second-order impacts such as deforestation and irrigation, aggravate the situation. It is therefore interesting to consider the climate change projections for some of these factors.

**Temperature:** The global average surface temperature has increased over the past century by about 0.6°C. This increase is probably the largest for any century during the past 1,000 years.

**Precipitation regime change:** Global warming can induce either an increase or decrease in precipitation, depending on the region. In the latter half of the 20<sup>th</sup> century, the average frequency of heavy precipitation per decade has shown a 3% increase in the northern hemisphere compared to a 0.3% decrease in sub-tropical regions. All models predict that during this century, global averaged annual precipitation will increase, although at regional scale both increases and decreases of typically 5 to 20% are projected. It is likely that precipitation will increase in high-latitude regions in both summer and winter.

**Flooding:** Greater extremes of rainfall (low and high) are projected and an increased risk of droughts and floods both in terms of magnitude and frequency. Floods in river channels result in erosion and sedimentation and may trigger landslides.

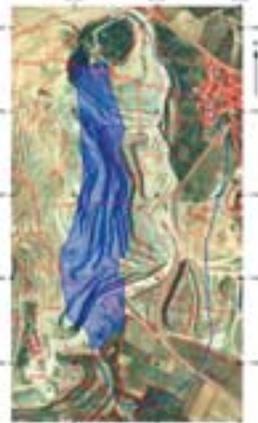
**Droughts:** Droughts may be caused, for example, by rainfall deficit, heat waves and high temperature-low humidity periods, soil moisture deficit, lack of flow in a river and low groundwater and reservoir levels. Many of these situations are inter-related but are clearly correlated to the potential impact of global warming and may result in ground instabilities.

**Glacial melting:** The extent of snow and ice cover has probably decreased by about 10% since the late 1960<sup>s</sup>. There has also been a widespread retreat of mountain glaciers in non-polar regions during the same period.

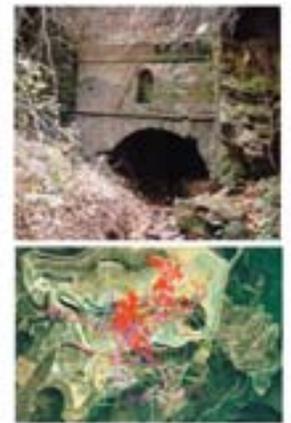
**Sea level rise:** Global average sea level has risen and ocean heat content has increased. Global mean sea level is projected to rise by 0.09 to 0.88 m between the years 1990 and 2100, with significant regional variations.

# MINELIS :

## VOTRE INTERLOCUTEUR POUR L'APRES-MINE



Réhabilitation de sites Industriels et miniers (mines souterraines, carrières, usines de traitement, résidus.....),  
Gestion de sites pollués,



Audits, études et suivis environnementaux (ESR, EDR.....),

Gestion technique et administrative de vos dossiers



**MINELIS S.A.R.L.**

33 rue Chanzy, 92600 Asnières, France,  
Tél/Fax: +33 (0)1 47 90 24 83  
Email: [contact@minelis.com](mailto:contact@minelis.com)  
[www.minelis.com](http://www.minelis.com)

Besides the variation in mean values and the extremes of the above triggering factors, the temperature-humidity variation cycles will also affect ground stabilities. In fact the cumulative effects are of great interest as soil and rock type materials are particularly sensitive to cyclic loading.

### Risk assessment

Risk is the convolution of hazard and the vulnerability of exposed elements. It is common to refer to ground instability risk as the risks encountered by populations and infrastructures subjected to the ground instability hazard.

However, in the context of climate change and ground instabilities, it is possible to propose a paradigm in which the potentially vulnerable ground is assumed to be subjected to the climate change hazard. In this way, the already existing methodologies available for ground instability risk assessment may be employed.

The evaluation of the climate change hazard requires efficient prediction models such as those developed during the past decade and which are being continuously improved.

“It is difficult to discriminate between the damage related to changes in the frequency and intensity of extreme weather conditions and that related to changes in exposure due to land-use modifications.”



## CLIMATE CHANGE AND GROUND MOVEMENTS



**Ground movement and rock falls along road 213 between Petites Anses and Grande Anse on Terre de Bas, Les Saintes islands, Guadeloupe.**

*Mouvements de terrain, chutes de blocs rocheux sur la route départementale 213 entre Petites Anses et Grande Anse, dans la Terre de Bas, sur l'île des Saintes, à la Guadeloupe.*

© BRGM im@gé - S. Bès de Berc

Ground vulnerability assessment requires the evaluation of predisposition factors such as geomechanical properties, geometry and hydro-mechanical characteristics. The combination of these parameters results in the evaluation of the susceptibility of the ground or its vulnerability. The risk will then be evaluated by associating this with the climatic hazard. Nevertheless, much more work is still needed to evaluate the climate change hazard and the natural and anthropogenic vulnerability. Actually, there is a recent trend towards greater damage from extreme climatic events. However, it is difficult to discriminate between the damage related to changes in the frequency and intensity of extreme weather conditions and that related to changes in exposure due to land-use modifications.

### Mitigation and adaptation

Mitigation is generally considered as the human intervention to reduce the risk to exposed elements. Ground instability mitigation in this context is either considered in the global framework of climate change mitigation (decreasing the hazard, for example, by reducing the sources of greenhouse gases or enhancing carbon sinks), in a more standard way by reducing the vulnerability of the ground (for example, by standard engineering techniques) or by limiting exposure by identifying the most vulnerable zones and/or setting up early warning systems for evacuation purposes. Some mitigation techniques may become infeasible in view of the amplitude of events predicted for certain regions.

Vulnerability reduction and exposure control are also considered as adaptation measures in the technical literature dedicated to climate change.

### Projected climate-change-induced ground instabilities in France

Models show that, except in the case of a chaotic event (disruption of Gulf Stream), the predicted temperature increase in France could be 1.5 times greater than the average global value. The average hypothesis results in a temperature increase of 5°C by 2100, whereas the most optimistic estimations nevertheless show an increase of 3°C. This warming will be least along the Atlantic coastline and greatest over southern France with a strong south-to-north gradient.

Prediction models for general patterns of future change in annual precipitation in France show an increase in the north and a small decrease in the south. While winters will become more humid, summers will experience a sharp gradient between the north and south of the country.

“The climate change predictions show that France will unfortunately become more vulnerable to ground instabilities over the coming decades.”

It is very likely that frequencies and intensities of heat waves and drought will increase during the summer, especially in the south, while intense precipitation events will increase in frequency during the winter. The global mean sea level will rise by the middle of the century by 13–68 cm.

Climate changes will also result in modification of the freezing-melting cycles, as well as increased precipitation at high altitudes.

All these factors will result in an increased risk of ground instability in France during the present century.

### Conclusion

Evidence of global warming will undoubtedly modify the hydrological cycle. If we exclude any chaotic phenomenon, for instance the modelisation or disruption of the Gulf Stream process and its impact, there will be an increase in global averaged precipitation together with the accentuation of extreme events. The sea level will rise and severe coastal inundations will be recurrent. Ground instabilities will be consequently more frequent, while intensive land use and population growth will also increase ground instability risk.

Risk mitigation measures include the vulnerability analysis of sectors and sensitive geographical regions together with proposals for appropriate adjustments.

Besides mitigation techniques, which might fail in some cases due to extensively affected areas or extreme conditions, several adaptation strategies should also be considered, such as restricting agglomeration development in certain zones.

The climate change predictions show that France will unfortunately become more vulnerable to ground instabilities over the coming decades. ■



### Changement climatique et mouvements de terrain

Il existe désormais un consensus général - confirmé par de nombreuses observations - sur le fait que les activités humaines ont progressivement induit un réchauffement général du climat accompagné d'événements extrêmes en termes de fréquence-magnitude. Les mouvements gravitaires qu'il s'agisse de glissements de terrains, des débris, des coulées boueuses, des chutes de blocs ou encore de la subsidence ou de l'effondrement des cavités sont en général déclenchés par des facteurs climatiques (variation de l'humidité et de la température) et/ou telluriques (séisme, volcanisme). Par ailleurs, l'exposition aux mouvements gravitaires d'une population en croissance, notamment dans les pays en voie de développement où les moyens insuffisants aboutissent à des constructions très vulnérables, augmente les risques associés. S'il n'est pas possible d'arrêter à court ou à moyen terme la tendance observée de l'évolution climatique, il est au moins envisageable de mettre en œuvre une stratégie d'adaptation. Pour y arriver, il faut mieux appréhender les mécanismes physico-chimiques à l'origine des instabilités gravitaires ainsi que les facteurs principaux responsables de leur déclenchement. Ces derniers peuvent également provoquer la dégradation des propriétés mécaniques et ainsi accentuer les mouvements gravitaires.

Plusieurs dizaines de milliers de maisons individuelles construites sur des sols argileux se sont fissurées durant l'été 2003 à la suite de phénomènes de retrait-gonflement, ce qui a conduit plus de 7000 communes à demander la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. Après les nombreux dégâts survenus au cours d'autres périodes sèches en 1989-91 et 1997-98, cette constatation conduit à s'interroger sur les causes, y compris climatiques, de cet aléa géologique coûteux pour la collectivité alors que l'on pourrait assez facilement le prévenir.

# Retrait-gonflement des sols argileux : un aléa géologique lié aux conditions climatiques



Maison fissurée dans le Pas-de-Calais, août 2003.  
Cracked wall of a Pas-de-Calais house.

© BRGM im@gé - P. Burchi



**Marc Vincent**  
INGÉNIEUR GÉOLOGUE  
SPÉCIALISÉ EN MOUVEMENTS  
DE TERRAIN  
SERVICE AMÉNAGEMENT ET  
RISQUES NATURELS - BRGM  
m.vincent@brgm.fr

## Un phénomène de nature géologique

Les sols argileux possèdent la particularité de se rétracter lorsqu'ils se dessèchent, avec des variations de volume d'autant plus importantes que leur fraction fine est riche en certains minéraux argileux (de la famille des smectites notamment, ainsi que des interstratifiés de type illite-smectites). Ces derniers se caractérisent en effet par une structure en feuillets avec de faibles liaisons internes et une grande surface spécifique qui leur permet d'absorber et de relâcher des quantités importantes d'eau. En période sèche, la dessiccation de ces sols argileux se traduit souvent par l'apparition de fissures de retrait (Fig. 1) et par des tassements verticaux dont l'amplitude varie en fonction du degré de dessiccation et des hétérogénéités locales de la nature du sol.

Il apparaît ainsi des gradients importants de teneur en eau et de pression interstitielle entre des zones imperméabilisées en surface (du fait notamment de la présence d'un bâtiment) et d'autres directement exposées à l'évaporation ou à une dessiccation encore plus profonde liée, par exemple, à la succion des racines d'arbres ou à un drainage. Ces gradients se traduisent par des tassements différentiels du sol qui peuvent s'avérer

très dommageables pour les constructions lorsqu'elles sont fondées de manière trop superficielle ou sont insuffisamment rigides pour résister à de telles sollicitations (Fig. 2). Les dommages se manifestent généralement par l'apparition de fissures sur façades, d'orientations diverses, souvent concentrées dans les angles et traversant les portes et fenêtres. Dans de nombreux cas, le préjudice subi dépasse largement le stade esthétique et peut aller jusqu'à la ruine complète de la maison, même si la détérioration est suffisamment lente pour ne pas constituer une menace directe pour ses occupants.

### Des manifestations coûteuses pour la collectivité

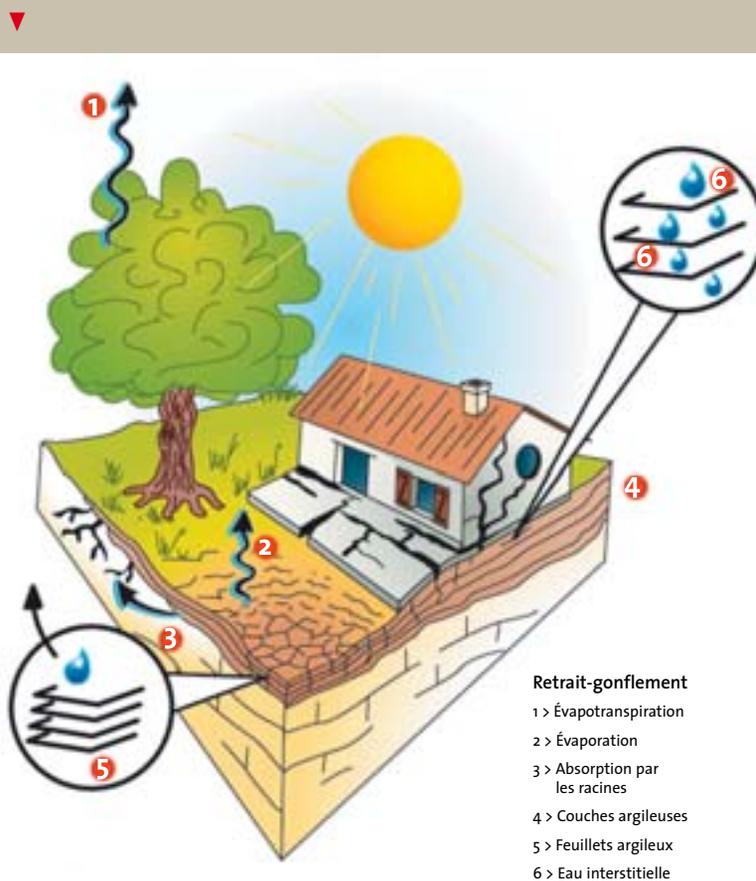
Les manifestations de ce phénomène ont été mises en évidence dès les années 1950 en Angleterre et sont désormais bien connues des géotechniciens. En France, elles ont été observées lors de la sécheresse de 1976 qui est notamment à l'origine de nombreux désordres dans des pavillons de la région parisienne. En climat tempéré, où les sols sont souvent proches de la saturation, les périodes de sécheresse sont surtout à l'origine des mouvements de sols les plus intenses. De ce point de vue, l'été 2003, caractérisé par des températures élevées avec une très forte évapotranspiration pendant une période relativement courte mais succédant à un hiver assez pluvieux, a été particulièrement virulent. De très nombreuses maisons se sont fissurées, parfois en l'espace de quelques jours : plus de 7 300 communes (une commune française sur cinq !) ont déposé une demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

En France, ce phénomène de retrait-gonflement est en effet considéré comme «catastrophe naturelle». À ce titre, les sinistres attribués à cette cause sont susceptibles d'être indemnisés par les assureurs en application

**Fig. 2 : Mécanisme de fonctionnement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux.**

*Fig. 2: Functioning mechanism of shrinking-swelling in clay soils.*

Source : BRGM – Michel Villey



**Fig. 1 : Fissures de retrait consécutives à la dessiccation d'un sol argileux.**

*Fig. 1: Cracks caused by shrinking when clay soil dries.*

© BRGM – Jocelyn Bouchut

de la loi du 13 juillet 1982. Entre 1990, date des premiers arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle spécifiques au retrait-gonflement et fin 2003 (donc avant la prise en compte des sinistres constatés cette année-là), près de 5 000 communes françaises, réparties dans 75 départements, ont bénéficié d'un tel arrêté. Un grand nombre de ces communes a même bénéficié de plusieurs arrêtés successifs, parfois pour des périodes se succédant sur plus de 10 ans. En 2002, le montant des indemnités versées pour réparer les dégâts était évalué par la Caisse Centrale de Réassurance (toujours avant prise en compte des effets de la sécheresse 2003) à 3,3 milliards d'euros pour l'ensemble du territoire national, ce qui en fait la deuxième cause d'indemnisation des catastrophes naturelles, derrière les inondations. Avec un coût moyen du sinistre évalué à un peu plus de 10 000 euros, cela signifie qu'au moins 300 000 maisons auraient été touchées entre 1989 et 2002 (et probablement davantage car tous les sinistres survenus à cette date n'avaient pas été indemnisés fin 2002).



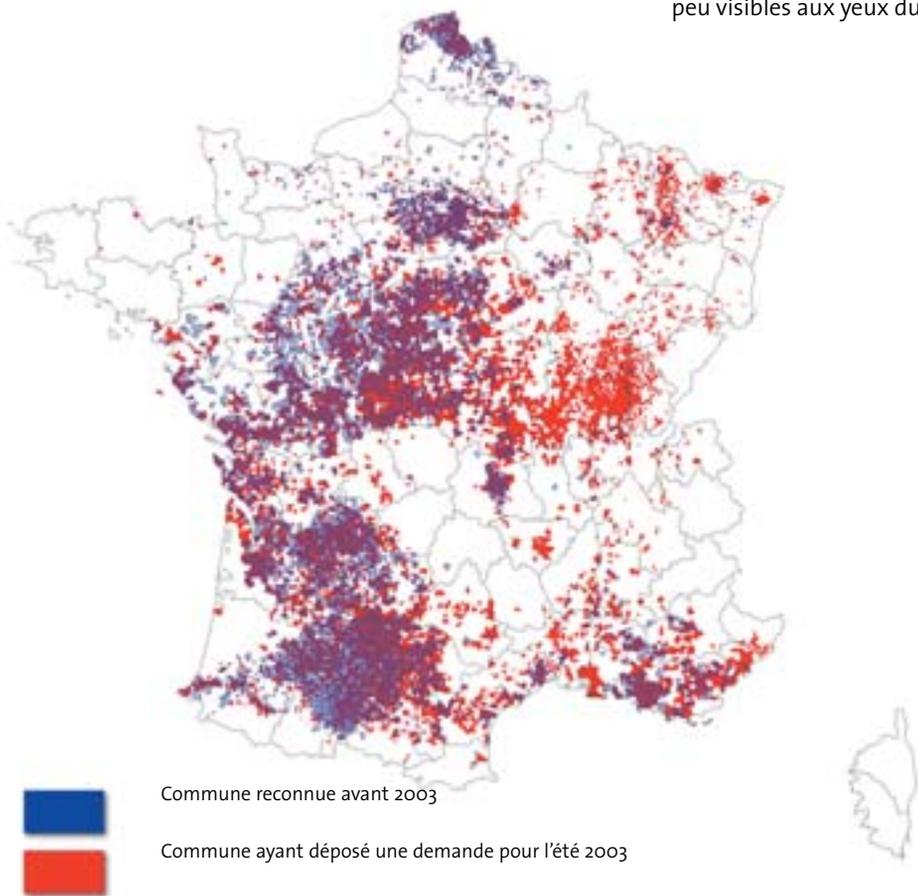
La comparaison entre la répartition géographique des communes touchées par les premières vagues de sécheresse prises en compte pour l'indemnisation (1989-91 et 1997-98 pour l'essentiel) et celles concernées en 2003 (Fig. 3), montre une très nette progression des superficies atteintes. Une quinzaine de nouveaux départements, jusqu'à présent épargnés par le phénomène, ont subi de nombreux sinistres, attribués a priori au retrait-gonflement, en particulier dans l'Est de la France. C'est vrai notamment en Bourgogne où plus de 300 communes de Saône-et-Loire ont signalé des sinistres en 2003 alors qu'une seule commune avait jusque là bénéficié de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse dans ce département.

### Des liens étroits avec la qualité des constructions

Cette nette extension géographique du phénomène qui a touché une grande partie du territoire métropolitain en 2003, amène naturellement à s'interroger sur l'existence d'un lien éventuel entre cette hausse récente de la sinistralité sécheresse et les évolutions climatiques observées à l'échelle mondiale (VDLC H. Modaressi, ce numéro, p. 44 à 49) :

ces maisons fissurées seraient-elles un révélateur d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des périodes de sécheresse en France ? En réalité, les données statistiques manquent pour établir ou rejeter une telle corrélation. Cela est d'autant plus vrai que les critères qui permettraient de corréler les périodes de sécheresse aux sinistres dans une zone potentiellement sujette au retrait-gonflement restent à préciser. Des projets de recherche, auxquels participe le BRGM, devraient d'ailleurs permettre d'apporter des éléments de réponse.

En revanche, il est certain qu'en dehors d'une éventuelle évolution climatique généralisée, d'autres facteurs d'origine purement anthropique, contribuent à expliquer cette augmentation récente des sinistres attribués au retrait-gonflement : accroissement, depuis les années 60, du rythme de construction de maisons individuelles (200 000 construites chaque année en moyenne en France), extension des zones urbanisées dans des secteurs autrefois réservés à l'activité agricole, phénomène de bouche-à-oreille et effet d'aubaine, etc. Les contraintes économiques propres au marché fortement concurrentiel de la maison individuelle peuvent aussi expliquer, dans certains cas, un déficit de qualité des fondations qui sont, par nature, peu visibles aux yeux du client.

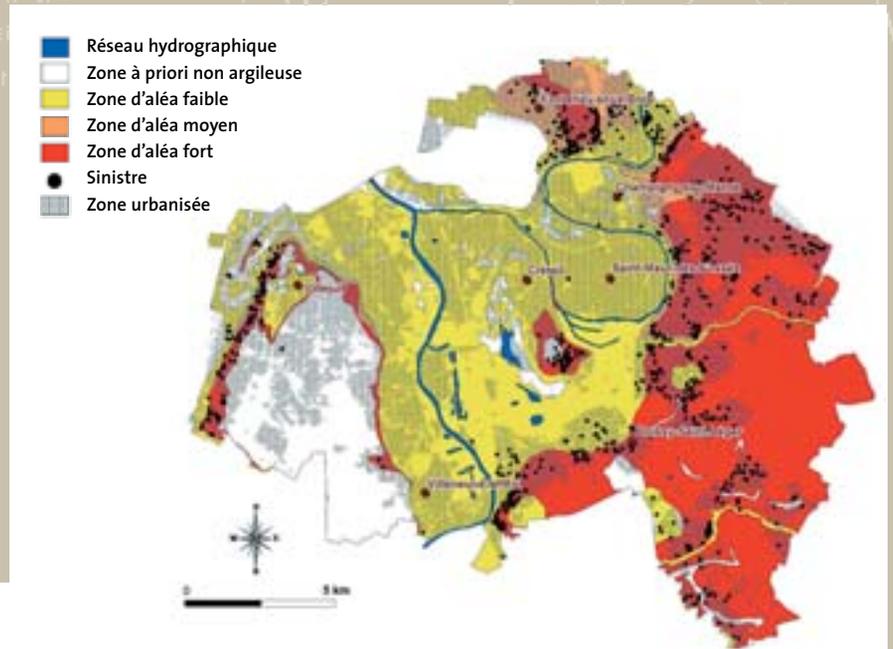


“ Ces maisons fissurées seraient-elles un révélateur d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des périodes de sécheresse en France ? ”

◀ **Fig. 3: Communes françaises ayant formulé une demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse pour l'été 2003.**  
*Fig. 3: French towns having applied for designation as drought natural disaster areas for the Summer of 2003.*

Source : MEDD, août 2005 BRGM - Marc Vincent

Il est certain qu'en dehors d'une éventuelle évolution climatique généralisée, d'autres facteurs, d'origine purement anthropique, contribuent à expliquer cette augmentation récente des sinistres attribués au retrait-gonflement.



**Fig. 4: Carte départementale d'aléa retrait-gonflement : exemple du Val-de-Marne.**

*Fig. 4: Departmental map of shrinking-swelling for the Val-de-Marne.*

Source: BRGM – Extrait rapport BRGM/RP-52224-FR, mai 2003

### Cartographier les zones d'aléa pour développer la prévention

Mais ce type de sinistralité ne touche pas que des maisons neuves construites un peu hâtivement. D'anciennes bâtisses en pierre ayant traversé les siècles (et ayant probablement subi de multiples désordres à l'occasion de sécheresses antérieures, jadis réparés sans faire appel aux assureurs) ont ainsi été endommagées récemment, notamment en Dordogne ou dans le Gers.

Si les dégâts causés par le retrait-gonflement ne sont probablement pas un phénomène aussi nouveau qu'on pourrait le penser, ils n'en restent pas moins préoccupants. Ils sont en effet excessivement coûteux pour la collectivité (et pas uniquement en France puisqu'ils sont évalués aux Etats-Unis à environ 2 milliards de dollars par an) mais aussi souvent traumatisants pour les victimes, d'autant plus que la réparation des dommages doit parfois faire appel à des techniques de confortement longues et délicates. Pourtant, il est tout à fait possible de construire en toute sécurité, y compris des maisons individuelles économiques, sur des sols argileux sujets au retrait gonflement. À condition cependant de respecter quelques mesures préventives relativement simples et peu coûteuses (cf. encadré).

Encore faut-il, pour faciliter la diffusion et la mise en application de ces règles de prévention, parvenir à délimiter les zones les plus exposées. C'est pourquoi, le ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD) a demandé au BRGM d'établir une cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans les départements les plus touchés par le phénomène.

Dès les années 1995-96, le BRGM, dans le cadre d'un travail de recherche-développement, avait élaboré une méthodologie de cartographie de cet aléa, à l'échelle communale puis départementale. Cette méthodologie a ensuite été affinée, en collaboration avec les mutuelles d'assurance et la Caisse Centrale de Réassurance. Elle est maintenant appliquée, de manière homogène, dans le cadre d'un programme concernant à ce jour 44 départements (dont 28 pour lesquels les cartes sont disponibles au 15 janvier 2006) et susceptible d'être étendu rapidement à l'ensemble du territoire métropolitain.

Il est tout à fait possible de construire en toute sécurité, y compris des maisons individuelles économiques, sur des sols argileux sujets au phénomène de retrait gonflement, à condition de respecter quelques mesures préventives relativement simples et peu coûteuses.



**Fig. 5 : Écran d'accueil du site internet [www.argiles.fr](http://www.argiles.fr).**  
 Fig. 5: Home page of the [www.argiles.fr](http://www.argiles.fr) Web site.  
 © BRGM – Marc Vincent

Les formations argileuses ainsi identifiées font ensuite l'objet d'une hiérarchisation en fonction de leur susceptibilité au retrait-gonflement. Celle-ci est évaluée sur la base de trois critères qui se recoupent partiellement : leur nature lithologique (importance et disposition des termes argileux au sein de la formation), la composition minéralogique de leur phase argileuse (critères paléogéographiques et essais de diffractométrie aux rayons X) et enfin leur comportement géotechnique (essais de laboratoire). La combinaison de ces différentes observations permet d'établir une carte de susceptibilité au retrait-gonflement. La carte d'aléa est réalisée à partir de cette carte de susceptibilité en intégrant également les sinistres enregistrés depuis 1989 (Fig. 4). Cela nécessite de recenser mais aussi de localiser avec précision le plus grand nombre possible de sinistres survenus dans le département, afin d'obtenir une représentation statistique réaliste des probabilités d'occurrence du phénomène. Le nombre de sinistres ainsi pris en compte atteint généralement plusieurs milliers par

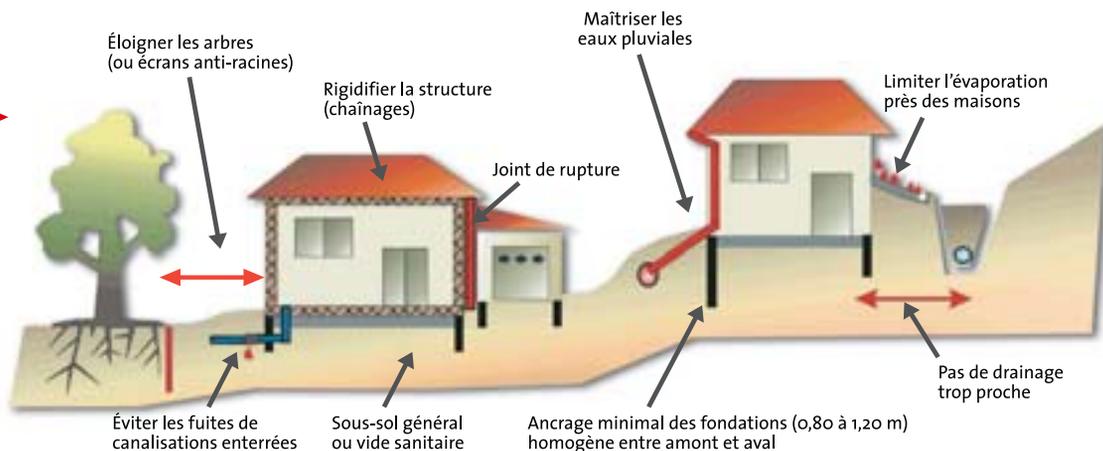
La donnée de départ utilisée pour cartographier les zones sujettes au phénomène de retrait-gonflement est celle des cartes géologiques publiées par le BRGM à l'échelle 1/50 000. Leur analyse permet d'identifier les formations argileuses affleurantes ou sub-affleurantes et d'en établir une cartographie homogène à l'échelle départementale. Cette phase nécessite en réalité un important travail de numérisation et surtout d'harmonisation des cartes disponibles, les formations les plus superficielles ayant souvent été diversement interprétées d'une feuille à l'autre. Des regroupements de formations sont aussi opérés afin d'obtenir un document synthétique exploitable à l'échelle départementale. Des compléments ou des précisions sont apportés ponctuellement pour actualiser la connaissance en intégrant notamment les informations de la Banque des données du Sous-Sol, gérée par le BRGM.

**► QUELQUES MESURES SIMPLES POUR ÉVITER DE FUTURS SINISTRES :**

- Reconnaître la nature du sol avant construction.
- Éviter de planter des arbres trop près de la maison.
- Réaliser un trottoir ou une terrasse tout autour de la maison pour limiter l'évaporation à proximité immédiate des fondations.
- Éviter tout pompage, drainage ou apport localisé d'eau (descente d'eau pluviale ou fuite de canalisation enterrée par exemple) trop proche de la maison.
- Assurer un ancrage homogène et suffisamment profond des fondations.
- Renforcer la rigidité de la construction au moyen de chaînages horizontaux et verticaux.

**Fig. 6 : Principales mesures préventives préconisées pour construire sur un sol sujet au phénomène de retrait-gonflement.**  
 Fig. 6: Main preventive measures recommended when building on a soil that is subject to shrinking-swelling.

Source : BRGM – Marylène Imbault



Plus de 1300 PPR concernant spécifiquement l'aléa retrait-gonflement des argiles ont d'ores et déjà été prescrits (dont 221 adoptés à mi-2005) et d'autres devraient l'être très prochainement.

département (plus de 5 200 en Haute-Garonne par exemple). Le croisement avec la carte géologique permet de calculer, pour chacune des formations argileuses identifiées, une densité de sinistres qui est ramenée, pour faciliter les comparaisons, à 100 km<sup>2</sup> de surface d'affleurement réellement urbanisée. Il est en effet nécessaire de tenir compte du taux d'urbanisation qui peut présenter des disparités importantes d'un point à l'autre du département et fausser ainsi l'analyse (les sinistres étant évidemment plus nombreux dans les zones fortement urbanisées).

L'échelle de validité de ces cartes départementales d'aléa est celle de la donnée de base utilisée, à savoir le 1/50 000. Elles ne permettent donc pas de déterminer avec certitude la présence d'argile gonflante à l'échelle d'une parcelle. Elles suffisent néanmoins à circonscrire les zones potentiellement sujettes au phénomène. L'objectif principal de ces cartes est d'attirer l'attention des maîtres d'ouvrages, des particuliers et des professionnels de la construction sur la nécessité de prendre des précautions particulières lors de la construction d'une maison dans un secteur susceptible de contenir des argiles sujettes au retrait-gonflement. C'est pourquoi, à la demande du MEDD, le BRGM a élaboré un site internet spécifique, librement accessible (<http://www.argiles.fr>) et destiné à l'affichage des cartes d'aléa au fur et à mesure de leur publication (Fig. 5). Ouvert au public depuis novembre 2004, ce site permet de consulter les cartes d'aléa par département ou par commune, de s'informer sur les manifestations du phénomène et la manière de les prévenir, et de télécharger les rapports et les cartes d'aléa déjà parus.

La diminution de la sinistralité passe par une diffusion la plus large possible de ces mesures de prévention. Dans ce domaine, de nombreuses actions d'information ont été entreprises récemment, par les pouvoirs publics comme par certains assureurs et professionnels de la construction. Parallèlement, il est prévu, dans les sec-

teurs les plus touchés, d'exploiter les cartes d'aléa en vue de l'élaboration de Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR), les plans de zonage communaux servant de support à la réglementation préventive étant directement dérivés des cartes départementales d'aléa (moyennant l'intégration d'une marge de sécurité). Contrairement à d'autres risques naturels comme les inondations, les PPR proposés ne prévoient aucune mesure d'interdiction de construire, même sur les zones considérées en aléa élevé.

Les mesures préventives préconisées n'entraînent qu'un surcoût modéré, de l'ordre de 3 à 8% du coût de la construction, et restent donc compatibles avec la construction de maisons individuelles économiques. Plus de 1 300 PPR concernant spécifiquement l'aléa retrait-gonflement des argiles ont d'ores et déjà été prescrits (dont 221 adoptés à mi-2005) et d'autres devraient l'être très prochainement. La mise en place d'une telle politique active de prévention du risque lié au retrait-gonflement des sols argileux devrait permettre de diminuer sensiblement, dans les années à venir, la sinistralité associée à ce phénomène et ceci, même en cas d'augmentation de la fréquence des périodes de sécheresse. En effet, même si les mécanismes climatiques à l'origine du déclenchement de cet aléa restent à préciser dans le détail, il est à craindre que la tendance actuelle au réchauffement climatique global se traduise, dans les prochaines années, par de nouveaux épisodes extrêmes de déficits pluviométriques et de fortes chaleurs, susceptibles d'engendrer de nouvelles vagues de sinistres sur des maisons individuelles conçues et réalisées sans précaution particulière. ■



◀ **Fissuration dans une maison individuelle.**  
Fissuring in a house.

© BRGM im@gé



### **Shrinking-swelling of clay soils: a geological hazard associated with weather conditions**

*Regarded, in France, as a "natural disaster" since 1989, the shrinking and swelling of clay soils causes extensive damage, especially to houses that are, in many cases, not sturdy enough and have shallow foundations, and has recently become the second greatest object of insurance claims, just behind flooding. After the extensive damage observed during the summer of 2003, which was characterized by very high temperatures, we could assume that the rapid rise in losses attributed to this geological hazard was caused by climate. However, purely anthropic causes can largely explain this increase in declared losses, which could be significantly decreased if inexpensive preventive building regulations were systematically adopted and strictly adhered to. This would require the prior identification of vulnerable areas so that the preventive building regulations, which are for the most part a question of common sense and do not in any way hinder future urbanization, can be disseminated. BRGM is therefore creating departmental maps of the shrinking-swelling hazard, to inform the general public, notably on the Internet, and to support a risk prevention policy initiated by the Ministry of Ecology and Sustainable Development together with construction and insurance professionals.*

La cyclicité des épisodes de sécheresse et d'humidité modifie en profondeur notre perception de la ressource en eau dont la gestion doit maintenant se faire de manière pluriannuelle. Les phénomènes de recharge et de vidange des nappes souterraines se faisant souvent sur plusieurs années consécutives, les variations à long terme de la pluviosité engendrent des oscillations parfois très importantes du niveau des nappes.

Une zone urbaine inondée.  
Urban flooding.

© BRGM im@gé

# La sensibilité des eaux souterraines au changement climatique



**Jean-Louis Pinault**

INGÉNIEUR - CHERCHEUR  
SERVICE EAU - BRGM  
jl.pinault@brgm.fr

“  
*La Somme venait de quitter son lit pour plusieurs mois, inondant plusieurs milliers d'habitations, coupant les principaux axes de communication et paralysant la vie économique de toute une région.*  
”

Le dernier train est parti vendredi 6 avril à 13 h 46. L'eau léchait les rails. Deux jours plus tard, la gare d'Abbeville, bâtiment rococo de 1912, émerge seule d'un immense lac. Entre les quais, les voies ressemblent à des canaux.» C'est ce que l'on pouvait lire dans le quotidien Le Monde du 10 avril 2001 [Belleret (2001)]. La Somme venait de quitter son lit pour plusieurs mois car le débit franchissait la barre fatidique de 90 m<sup>3</sup>/s, inondant plusieurs milliers d'habitations, coupant les principaux axes de communication et paralysant la vie économique de toute une région. C'était la première fois de mémoire d'homme que cette zone urbanisée était ensevelie par les eaux.

## Des pluies abondantes en 2000 et 2001

La hauteur de pluie cumulée de juillet 2000 au mois de juin 2001, bien qu'abondante, n'est pas exceptionnelle car elle fut dépassée plusieurs fois au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, sans pour autant provoquer de crues catastrophiques (Fig. 1). Toutefois, le caractère tout à fait exceptionnel des pluies de ce début du 21<sup>ème</sup> siècle apparaît lorsque l'on représente non plus la pluie cumulée sur une année, mais sur deux années consécutives.

En effet, deux records furent atteints en 1999-2000 et 2001-2002. Ce caractère exceptionnel se retrouve également chez certains épisodes de pluie qui survinrent après la crue de 2001 et qui, de par leur caractère sporadique, n'eurent que des conséquences limitées : la lame d'eau a atteint 95 mm les 6 et 7 juillet 2001 et dépassa 120 mm du 1<sup>er</sup> au 10 novembre 2002 alors qu'au pas décadaire aucun épisode n'avait atteint les 95 mm au cours du 20<sup>ème</sup> siècle!

### Mais l'abondance des pluies ne peut tout expliquer

Les pluies exceptionnelles ne peuvent expliquer, à elles seules, les volumes d'eau impliqués dans le processus de crue. Pendant le premier semestre 2001 le débit moyen de la Somme atteignit en effet 84,0 m<sup>3</sup>/s alors que 72,7 m<sup>3</sup>/s seulement sont imputables aux précipitations, ce qui équivalait à une lame d'eau de 32l/m<sup>2</sup> distribuée de manière uniforme sur le bassin. Une autre explication doit donc être trouvée à partir de l'analyse des mécanismes de transfert de l'eau de pluie vers les cours d'eau.

*“ Les pluies exceptionnelles ne peuvent expliquer, à elles seules, les volumes d'eau impliqués dans le processus de crue. ”*

### Un peu d'histoire

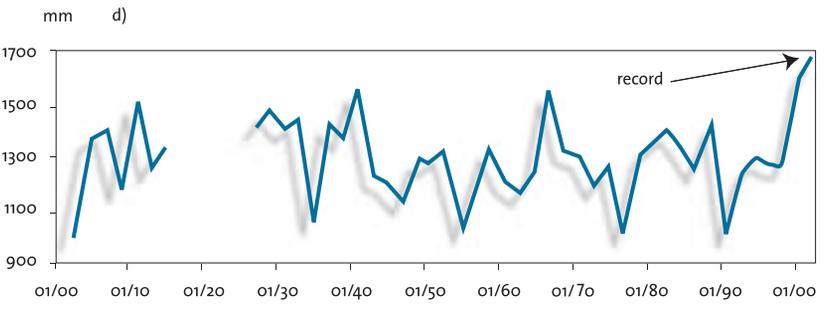
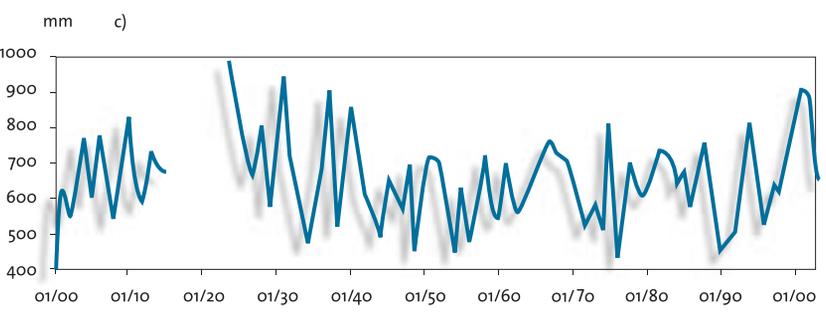
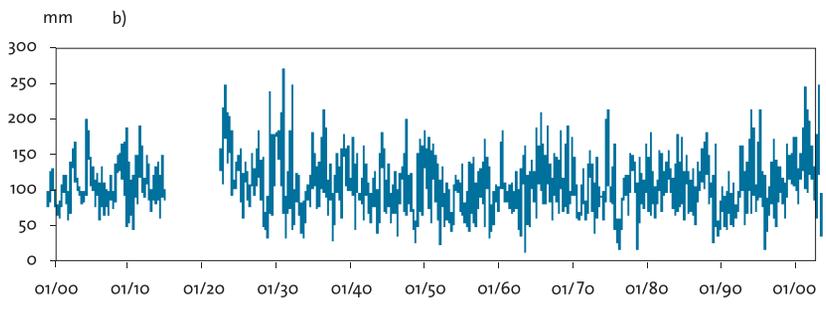
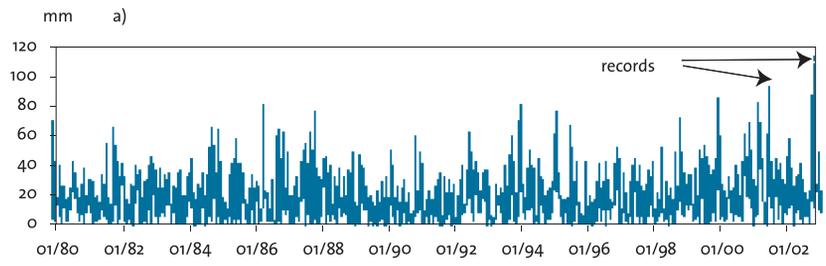
Le bassin de la Somme, qui fait partie du bassin parisien, est le résultat de dépôts marins qui se sont accumulés au Jurassique, suite aux transgressions marines. A la fin du crétacé, la mer a entamé sa régression et les sédiments se sont transformés en craie, roche compacte et consolidée. A l'ère tertiaire, le niveau de la mer a fluctué de manière importante et des dépôts continentaux se sont accumulés dans la partie nord-est du bassin, à l'origine des formations argileuses et sableuses. Enfin, au quaternaire, les alternances de périodes de glaciation ont provoqué un refroidissement important et une baisse sensible du niveau marin. Les phases périglaciaires ont contribué à la fissuration de la craie en diaclases qui favoriseront quelques millions d'années plus tard l'infiltration d'eau vers les aquifères de la craie.

**Fig. 1 : Hauteur de pluie à Amiens cumulée au pas a) 10 jours b) 2 mois c) une année d) 2 ans.**

**Pour une meilleure lisibilité, l'échelle des temps est dilatée en a). Les séries b), c), d) sont interrompues suite à la guerre de 14-18.**

*Fig. 1: Cumulative rainfall height at Amiens aggregated over a) 10 days, b) 2 months, c) 1 year, d) 2 years. The time scale is expanded in a) for better legibility. Series b), c) and d) are broken due to the First World War.*

Source : J.L. Pinault



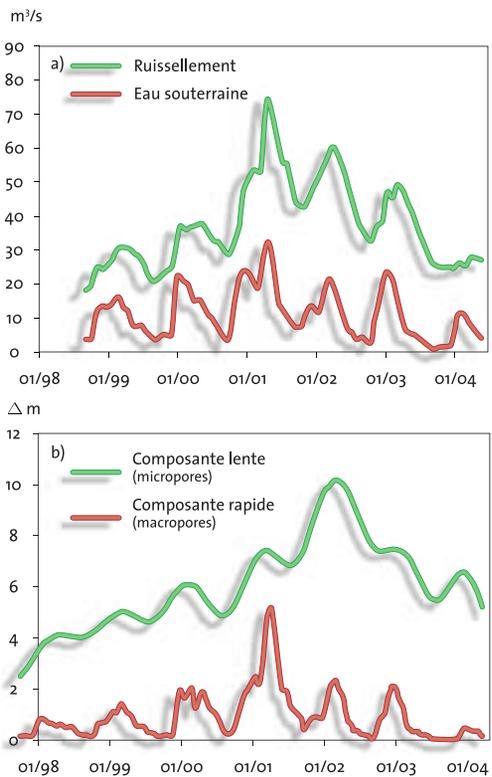
### La nappe de la craie signe ses méfaits

Le faciès chimique de l'eau, qui est initialement celui de l'eau de pluie, se modifie dès lors que l'eau s'écoule, en surface ou en profondeur, et se trouve en contact avec des roches chimiquement actives. Que l'eau de la rivière provienne de processus de ruissellement ou bien de la vidange de la nappe, les analyses renseigneront sur leur origine. C'est ainsi que la signature chimique et isotopique des eaux souterraines a pu être mise en évidence à la fois en période de hautes et basses eaux [Amraoui et al. (2002)].

Une autre approche consiste à décomposer l'hydrogramme de la Somme en ses diverses composantes, ruissellement et vidange de la nappe. Cette technique consiste à représenter le débit de la Somme qui constitue la sortie d'un modèle de transfert à partir de plusieurs entrées, la pluie efficace qui traduit le ruissellement et un ou plusieurs piézomètres qui reflètent les processus de vidange de la nappe vers le réseau de surface (Fig. 2). La pluie efficace est ce qui reste de la lame d'eau après que le prélèvement a été effectué par l'évaporation et par la végétation. Une partie de cette eau de pluie ruisselle vers les cours d'eau, le reste participe à la recharge des nappes. Les deux composantes de l'hydrogramme sont représentées sur la Figure 2. Bien que le ruissellement contribuât pour 30 % au débit de crue de la Somme en avril et mai 2001, l'essentiel du débit fut en effet fourni par la nappe de la craie. Le pic dû au ruissellement déclencha le processus de crue, le maximum étant atteint début avril, puis fut relayé par la vidange des nappes dont le maximum fut atteint fin mai, début juin. Il faudra attendre la fin du mois de juin pour retrouver un débit en dessous des 80 m<sup>3</sup>/s en raison de l'apport de la nappe de la craie [Pinault et al. (2005)].

### La zone non saturée se lâche !

De la même manière, la décomposition des variations piézométriques de la nappe de la craie met en évidence deux modes d'infiltration au travers de la zone non saturée (Fig. 3). La composante lente résulte de la migration de l'eau au travers de la porosité matricielle de la craie qui présente un effet de mémoire de plusieurs années. Un transfert de pression s'exerce toutefois au travers de cette porosité matricielle doublée d'un réseau de fractures très étroites qui assurent à la fois des fonctions capacitives et transmissives. La composante rapide, quant à elle, représente un transfert achevé au bout de quelques mois, qui ne peut se réaliser qu'au travers d'un réseau de fractures très développé. Elle n'intervient que certaines années très arrosées. Le transfert rapide est à l'origine de la crue catastrophique,



◀ Fig. 2 : (a) Décomposition de l'hydrogramme de la Somme b) Décomposition des variations piézométriques de la nappe de la craie (bassin de l'Hallue).  
Fig. 2: (a) Hydrograph separation of the Somme flow (runoff in red, groundwater flow in green); (b) Separation of pressure-head variations of the chalk water table, Hallue catchment (Slow (micropore) and rapid (macropore) components respectively in green and red).

Source : J.L. Pinault

s'étant superposée à la composante lente qui était très élevée en avril et mai 2001 car elle augmentait régulièrement depuis 1997 en raison de la forte pluviométrie.

Ce comportement est propre à la craie qui présente à la fois une porosité très fine et un réseau de fractures bien organisé. La teneur en eau de la matrice reste toujours élevée, proche de la saturation, en raison à la fois de la migration des fluides vers la nappe et de la remontée capillaire, la zone non saturée se comportant comme un morceau de sucre trempé dans une tasse de café. Cette teneur en eau élevée de la matrice explique pourquoi l'eau emprunte le réseau de fractures après des pluies abondantes car l'augmentation de la pression capillaire permet à l'eau de la matrice d'accéder aux fractures conductrices, ceci n'étant rendu possible que lorsque la teneur en eau dépasse une valeur seuil. En dessous de ce seuil, l'eau est très peu mobile car piégée dans les pores fins de la craie.

“ Les difficultés surgissent quand on s'exerce à imaginer de quelle manière la crue de 2001 aurait pu être prévue. ”

### De l'Art de jouer au devin...

Les difficultés surgissent quand on s'exerce à imaginer de quelle manière la crue de 2001 aurait pu être prévue. C'est que la période de retour<sup>(1)</sup> d'un tel événement qui ne fut jamais observé antérieurement

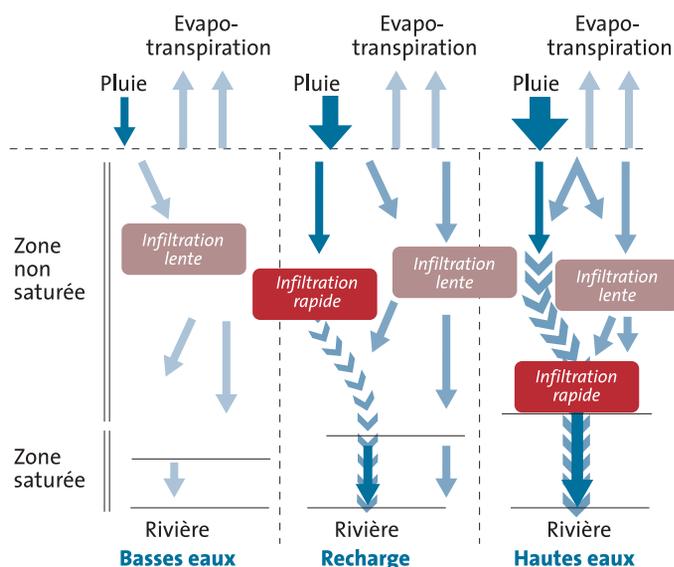
(1) La période de retour d'un événement est le temps qui s'écoule en moyenne entre deux événements consécutifs.

est étroitement liée aux hypothèses formulées sur l'évolution du climat (Fig. 4). Dans l'hypothèse d'un climat stationnaire<sup>(2)</sup>, la période de retour d'un débit supérieur ou égal à 90 m<sup>3</sup>/s est de 100 ans, compatible avec l'absence de crue catastrophique au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Lorsqu'on introduit dans le modèle prévisionnel la cyclicité du régime pluviométrique, la période de retour d'un tel événement est seulement de 20 ans. Ce contraste est tout aussi saisissant pour la période de retour de la crue de 2001 au cours de laquelle le débit atteignit 104 m<sup>3</sup>/s. Son estimation varie entre 250 et 60 ans en fonction des hypothèses, un événement très exceptionnel devenant ainsi hautement probable à l'échelle d'une vie humaine.

On découvre là la difficulté de prévoir les crues exceptionnelles dues aux remontées de nappe pourtant caractérisées par leur très grande inertie. Les différences d'appréciation des périodes de retour des événements exceptionnels, qui conditionnent la manière de gérer une crise, résultent de la structure temporelle imposée au régime des précipitations, ainsi qu'au comportement non linéaire<sup>(3)</sup> du bassin ; lors d'une succession d'années humides le niveau des nappes monte.

(2) L'hypothèse du régime stationnaire de la pluie revient à supposer que les propriétés statistiques des précipitations (moyenne annuelle, variabilité temporelle) n'évoluent pas de façon durable au cours du temps.

(3) Un processus est dit non linéaire si ses effets ne sont pas proportionnels aux phénomènes qui en sont la cause.



**Fig. 3 : Représentation de la migration de l'eau de pluie vers la rivière.**  
 Fig. 3: Rainwater migration to the river.  
 Basses eaux = Low water - Hautes eaux = High water  
 Zone non saturée = Unsaturated - Zone saturée = Saturated  
 Infiltration lente = Slow infiltration  
 Infiltration rapide = Rapid infiltration - Pluie = Rain.

Source : J.L. Pinault

# UN radar pour mesurer les précipitations



radar Hydrisix

**Novimet** a mis au point, via l'algorithme ZPHI® (2 brevets CNRS), un radar météo permettant de mesurer précisément la hauteur d'eau et d'identifier la nature des précipitations (pluie, neige, grêle). Cette offre unique dont le rayon d'action atteint 60 km coûte au minimum quatre fois moins chère que les systèmes actuellement utilisés.

**Novimet** répond ainsi à une demande pour des applications variées :

- **Anticiper les crues dans les zones sensibles.**
- **Gérer l'irrigation et les traitements dans l'agriculture.**
- **Surveiller l'environnement météo des aéroports.**



10-12 avenue de l'Europe 78140 Vélizy (France)  
 E-mail : novimet@novimet.com  
 Site : www.novimet.com  
 Tél : 33(0)1 39 25 47 76 - Fax : 33(0)1 39 25 48 22

Dans ces conditions, il peut se trouver une période de quelques mois pendant laquelle la hauteur de pluie est exceptionnellement élevée, ce qui a pour conséquence de saturer les fractures conductrices de la zone non saturée et ainsi de précipiter le transfert des eaux pluviales vers le réseau hydrographique après qu'une continuité hydraulique a été établie entre le réseau de fractures et la nappe. Ce phénomène d'effet de chasse, bien connu des spécialistes du karst, a pour conséquence d'accroître la charge de la nappe proportionnellement à la hauteur d'eau et de manière très rapide (Fig. 3).

### Le phénomène d'Oscillations Nord – Atlantique (ONA)

L'ONA a été mise en évidence par les météorologues cette dernière décennie [Hurrell (1995) ; Cassou et al. (2004)]. C'est un phénomène de balancement à grande échelle de la masse atmosphérique entre les régions sub-tropicales et les régions polaires, et l'étude des carottes de glace du Groenland a démontré son influence sur la variabilité du climat en hiver sur une bonne partie de l'hémisphère nord.

L'ONA est mesurée par un indice à partir de la différence de pression observée entre Ponta Delgada aux Açores et Reykjavik en Islande. Un indice positif correspond à des pressions subtropicales plus élevées et des pressions polaires plus basses. L'accroissement de la différence de pression engendre la formation de tempêtes traversant l'océan Atlantique par le nord. Les hivers en Europe, en Afrique du Nord, dans le bassin méditerranéen et à l'est des Etats-Unis sont doux et humides alors qu'ils sont froids et secs au Canada et au Groenland. Un indice négatif révèle un affaiblissement des hautes pressions subtropicales. L'abaissement de la différence de pression réduit le nombre de tempêtes ainsi que leur intensité, celles-ci traversant l'Atlantique plus au sud. Elles apportent de l'air humide dans le bassin méditerranéen et de l'air froid au nord de l'Europe. La côte est des Etats-Unis est soumise à des hivers froids et neigeux alors que le Groenland connaît des températures hivernales plus clémentes.

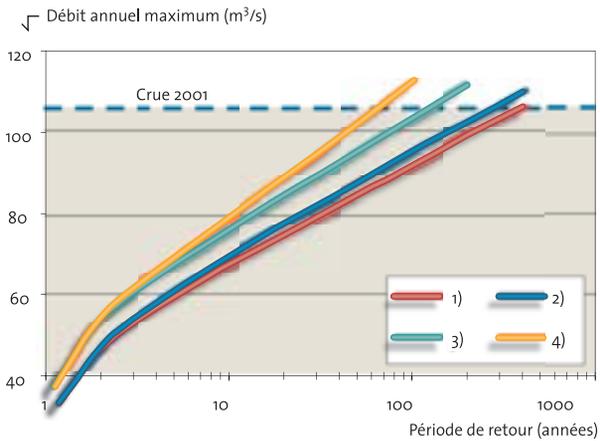


Fig. 4 : La période de retour de la crue de 2001 calculée à partir de différents modèles climatiques.

- 1, 2) Hypothèse de l'indépendance du climat d'une année à l'autre
- 3, 4) Hypothèse de la cyclicité du climat
- 1, 3) Hauteur de pluie décennale maximale = 100 mm
- 2, 4) Hauteur de pluie décennale maximale = 120 mm.

Fig. 4: The return period of the 2001 flood estimated from different climatic models.

- 1, 2) Assumption of the independence of climate from year to year
- 3, 4) Assumption of climate periodicity
- 1, 3) Maximum decadal rainfall height = 100 mm
- 2, 4) Maximum decadal rainfall height = 120 mm.

Source : J.L. Pinault

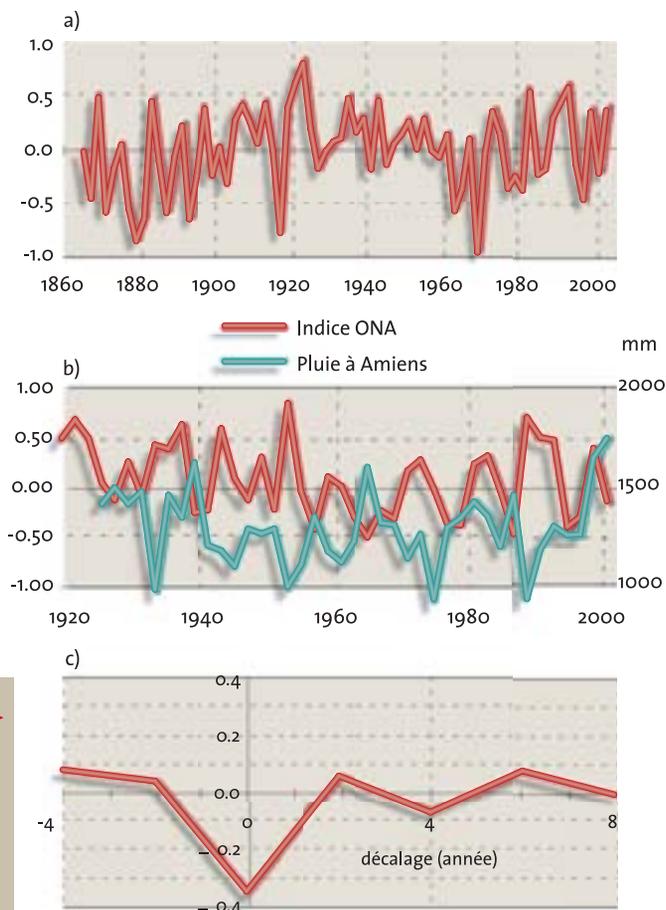


Fig. 5 : a) L'indice ONA au pas de 2 ans depuis 1865  
b) Représentation de l'indice ONA et de la pluie à Amiens  
c) Corrélogramme entre l'indice ONA et la pluie à Amiens.  
Période d'observation : 1925-2002.

Fig. 5: a) The NAO (North Atlantic Oscillation) index accumulated over two years since 1865;  
b) NAO index and rainfall at Amiens; c) Correlogram between NAO index and rainfall at Amiens. Observation period 1925-2002.

Source : J.L. Pinault



### The sensitivity of groundwater to climate change

The periodicity of droughts and wet periods, which has become apparent since the 1970s, implies a multi-annual management of aquifers and streams. In 2001, the new phenomenon of flooding through a rise in the groundwater table affected the Somme valley; the duration of this flooding attested to the quite exceptional character of this type of event, which was the result of the three successive wet years 1999, 2000 and 2001. The study of long rain-fall sequences shows that certain years were much wetter than each of these three years taken separately, but that such wet years followed upon normal years and thus did not result in catastrophic flooding. In the same vein, the year 2005 was one of drought, following upon a very low groundwater level in some aquifers that were only slightly recharged during the water-deficit years of 2003 and 2004. Once more, the succession of several dry years is exceptional; this phenomenon, whose oscillation period is of the order of ten years, could well be part of a context of generalized climate change affecting North America, Europe and parts of Asia.

“ La cyclicité des épisodes de sécheresse et d’humidité modifie en profondeur notre perception de la ressource en eau qui doit maintenant se faire de manière pluriannuelle. ”

La mise en relation de la pluie mesurée à la station d’Amiens depuis 1925, et de l’indice ONA met clairement en évidence l’anti-corrélation des événements à long terme ; le corrélogramme montre qu’au pas de 2 ans, un indice positif favorise des épisodes de sécheresse dans le nord de la France alors qu’un indice négatif ou nul provoque des hivers et des printemps arrosés (Fig. 5). C’est ainsi que le phénomène de cyclicité faisant alterner des épisodes de sécheresse aux années humides et qui est particulièrement frappant depuis les années 1970, est probablement imputable aux variations à long terme de l’ONA dont la périodicité est actuellement de 10 ans.

### Une gestion pluriannuelle de la ressource en eau

La cyclicité des épisodes de sécheresse et d’humidité modifie en profondeur notre perception de la ressource en eau qui doit maintenant se faire de manière pluriannuelle. En effet, les phénomènes de recharge et de vidange des nappes souterraines se faisant souvent sur plusieurs années consécutives, les variations à long terme de la pluviosité engendrent des oscillations des niveaux des nappes parfois très importantes conduisant soit à

des débordements, soit au contraire au tarissement de cours d’eau, phénomène amplifié par les prélèvements, qu’ils soient destinés à la consommation des particuliers ou à l’irrigation (Fig. 6). La rythmicité des phénomènes climatiques a également de nombreuses répercussions sur la période de retour des inondations à l’échelle de grands bassins qui se trouvent à la croisée de plusieurs régimes pluviométriques, et dont l’estimation dépend étroitement de la cohérence des phénomènes. C’est par exemple le cas du bassin de la Loire dont les crues centennales sont le résultat de la conjonction de pluies d’origine océanique sur la Loire moyenne et de pluies cévenoles sur le bassin amont. La mise en relation des différents régimes climatiques préciserait la probabilité d’occurrence de phénomènes exceptionnels, que ce soit dans le cadre de la prévision à long terme ou bien en période de crise. ■



◀ Fig. 6 : La Tardoire (Charente) en juillet 2004.

Fig. 6: The Tardoire river bed (Charente) in July 2004.

© F. Bichot



Face au réchauffement climatique, deux types d'actions de prévention sont possibles : l'atténuation d'une part, qui s'adresse à la cause du phénomène en cherchant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, l'adaptation d'autre part, qui vise à se protéger des conséquences du changement climatique désormais inévitable. Le degré d'incertitude sur l'aggravation des phénomènes climatiques extrêmes varie selon le type de phénomène. On s'attend cependant à une aggravation des canicules, des sécheresses, des inondations, dans un contexte d'augmentation rapide de notre vulnérabilité. Il est donc nécessaire de s'adapter à ces nouvelles conditions.

Feu de forêt. A forest fire.

© CEMAGREF - Laurent Joël

## Les conséquences de la dérive climatique : comment s'adapter ?

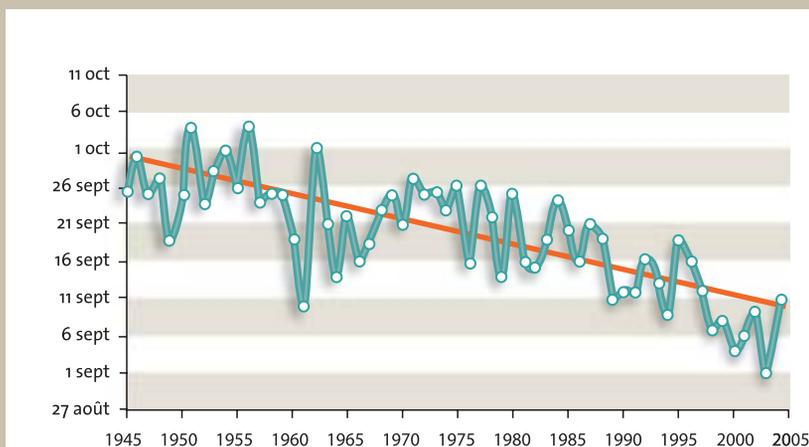


**Marc Gillet**

DIRECTEUR  
OBSERVATOIRE NATIONAL SUR LES  
EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT  
CLIMATIQUE (ONERC)  
marc.gillet@onerc.pm.gouv.fr

L'Onerc a remis au Premier ministre et au Parlement en juin 2005 un rapport, présentant les principales conséquences du réchauffement climatique en France et contenant des recommandations en matière d'adaptation (Onerc, 2005). Ce rapport attire notamment l'attention sur les observations qui suivent. Le réchauffement constaté en France métropolitaine au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, proche de 1° C, est d'environ 50 % plus important que le réchauffement moyen sur le Globe. De nombreuses perturbations sont d'ores et déjà observées, qui peuvent être associées à ce réchauffement : recul des glaciers, les dates de vendanges ont avancé de près de trois semaines en 50 ans (Fig. 1) la croissance des peuplements forestiers (c'est-à-dire la croissance annuelle moyenne en volume du bois des arbres) a augmenté de plus 30 % en un siècle. Nombre de déplacements vers le nord de certaines espèces animales ont également été observés, y compris dans les océans. Un opuscule recensant un certain nombre d'observations dans le domaine de la biodiversité a été publié (Rac-France *et al.*, 2005).

Cependant, les observations ne mettent pas en évidence d'augmentation de la fréquence des tempêtes en France métropolitaine, ni de celle des cyclones tropicaux dans les DOM-TOM ; plusieurs travaux scientifiques concluent pourtant à une probable intensification des cyclones tropicaux dans le futur.



◀ **Fig. 1 : Évolution depuis 1945 des dates de vendanges à Châteauneuf-du-Pape.**

*Fig. 1: The progression of harvest dates in the Châteauneuf-du-Pape vineyards since 1945.*

Source : Service technique Inter Rhône

Les travaux sur les modèles de simulation offrent des descriptions du changement climatique pour une variété de scénarios d'émissions. Le scénario « optimiste » B1 conduit à une concentration en dioxyde de carbone d'environ 550 ppm en 2100, alors que le scénario « pessimiste » A2 aboutit à plus de 800 ppm. En moyenne sur le globe, ils indiquent à l'horizon 2100 un réchauffement par rapport à l'année 1990 de l'ordre de 2 à 3 °C pour le premier et de 3,5 à 4,5 °C pour le scénario A2. En France, le réchauffement devrait être un peu plus important, notamment sur les régions méditerranéennes et en été, et s'accompagner d'une augmentation des précipitations hivernales et d'une diminution des précipitations estivales. Globalement, on assisterait à une diminution des précipitations annuelles sur notre pays, plus marquée au sud, contraste qui se trouvera accentué dans les bilans hydriques du sol. Dans les deux cas, les conséquences seront importantes. Ces modèles confirment notamment que des épisodes caniculaires similaires à ou pires que celui de 2003 se représenteront inévitablement beaucoup plus fréquemment.

### Les incidences prévues de ces changements climatiques

Le réchauffement a déjà commencé à provoquer un recul du manteau neigeux dans les Alpes et les Pyrénées, recul qui s'accroîtra, avec des conséquences socio-économiques importantes, notamment sur la diminution des activités touristiques liées aux loisirs de la neige. Ainsi, les simulations de Météo-France montrent que les stations alpines situées aux environs de 1500 mètres d'altitude perdraient environ un mois d'enneigement vers 2050, dans le cas du scénario B1, pourtant optimiste. L'accélération de la fonte des neiges et glaciers au printemps augmenterait les risques d'avalanches et de glissements de terrain en montagne et de crues intenses dans les vallées du Rhône et de la Garonne.

D'une façon générale le risque d'inondations en hiver et au printemps augmenterait, ainsi que la durée des étiages (de juin/juillet à octobre/novembre). Plusieurs études ont été conduites sur les ressources en eau (cf. Redaud *et al.*, 2002) qui montrent des crues plus fréquentes et plus intenses, p.ex. du type la Somme en 2001 [cf. J.L. Pinault – *Ce numéro*, p. 56 à 61].

Les risques de vagues de chaleur devraient se multiplier, au point que la canicule observée en 2003 devrait correspondre à un été normal, peut-être dès le milieu de ce siècle. C'est là un des aspects les plus préoccupants des impacts du réchauffement climatique. Outre ses effets directs sur la santé de la population, la canicule a mis en évidence la vulnérabilité de certains systèmes (production et distribution d'électricité, transports, télécommunications...) aux événements extrêmes. Il faut compter aussi sur les incendies de forêt et aux dégâts sur les constructions liés au retrait des sols argileux [cf. M. Vincent – *Ce numéro*, p. 50 à 55].

“ Le réchauffement constaté en France métropolitaine au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, proche de 1°C, est d'environ 50 % plus important que le réchauffement moyen sur le Globe. ”

## LES CONSÉQUENCES DE LA DÉRIVE CLIMATIQUE : COMMENT S'ADAPTER ?

La diminution des réserves en eau du sol en été entraînerait des dépérissements importants et des pertes de productions agricoles et surtout forestières, notamment dans les régions du Sud. Par exemple, les cultures intensives du maïs et du pin maritime pourraient être compromises et la forêt méditerranéenne fortement endommagée par une sécheresse accrue et des incendies plus fréquents... Des études dendroclimatiques (relations cernes-climat) montrent que les hêtraies de plaine et de moyenne altitude en Lorraine sont particulièrement sensibles au stress hydrique, de même que les pins dans certaines zones des Alpes du Sud. Les dépérissements forestiers dus à la sécheresse pourraient être aggravés par l'invasion d'insectes ou de champignons pathogènes (scolytes, armillaires...). Heureusement, des mesures d'adaptation sont possibles et sont préconisées dès aujourd'hui : limitation des cultures intensives irriguées et/ou amélioration de l'efficacité des systèmes d'irrigation, sélections variétales ou génétiques, réduction de la densité des peuplements forestiers monospécifiques, mélange d'essences forestières résistantes à la sécheresse pour les nouvelles plantations... Il est à noter que certaines de ces mesures peuvent d'ores et déjà être qualifiées de « sans regrets » dans la mesure où elles remplissent simultanément des fonctions positives au regard de différents critères : économie de ressources naturelles, maintien de la biodiversité, adaptation aux événements extrêmes, etc. La surveillance de l'état de santé des forêts devra être renforcée.

Pour les prairies et les exploitations d'élevage dans le Massif Central, les simulations indiquent une augmentation de la production annuelle d'herbe de l'ordre de 20 % (compte non tenu des risques d'épisodes secs) et des modifications de la qualité des fourrages, ce qui pourrait inciter les éleveurs à reconvertir des prairies temporaires en prairies permanentes, changement qui tendrait à augmenter le stock de carbone des sols.

Dans l'hypothèse d'une surélévation (de 30 à 50 cm) du niveau de la mer, plusieurs conséquences seraient à craindre : aggravation des submersions sur les côtes basses, en particulier les espaces deltaïques (delta du Rhône...), les lagunes, les marais maritimes, les récifs coralliens (qui risquent en plus de souffrir du réchauffement : cf. le blanchissement des coraux en Polynésie) ; accélération des érosions sur les falaises et les plages ; renforcement de la salinisation dans les estuaires ; réduction du volume des nappes d'eau douce.

Ainsi, l'intrusion d'eaux salées dans les nappes phréatiques, par l'effet conjugué de la montée des eaux et de la subsidence des terres, est-elle déjà observée dans le delta du Rhône. Ces phénomènes pourraient être aggravés si les cas de "surcote" (montée brutale et temporaire du niveau de la mer) étaient rendus plus fréquents qu'aujourd'hui en raison d'une possible intensification des tempêtes et des cyclones tropicaux.

Face à ces risques pour les zones côtières, différentes options d'adaptation sont possibles. Il conviendra tout d'abord d'éviter de construire sur les zones menacées. Dans tous les cas, deux options sont à considérer :

- ▶ la résistance s'impose là où il est nécessaire de protéger une agglomération urbaine. On peut recourir à l'alimentation artificielle des rivages marins en sédiments, manière "douce" de compenser l'élévation du niveau de la mer ;
- ▶ le recul s'impose là où les rivages sont inoccupés. Par exemple, en Petite Camargue où l'espace côtier est resté largement naturel, le libre recul de la côte se traduit par une translation progressive des différents milieux qui le composent.

### Episode caniculaire, sécheresse, été 2003.

*The heat wave and drought in the summer of 2003.*

© Pixtal



“  
En l'état actuel des connaissances,  
il apparaît qu'en métropole, les zones  
les plus vulnérables aux changements  
climatiques se situent dans le Sud  
méditerranéen et dans les secteurs de  
la moitié Nord du pays exposés aux  
tempêtes et/ou aux inondations.”

L'épisode caniculaire de l'été 2003, qui a fait près de 15 000 victimes en France, a démontré l'importance des impacts possibles sur la santé. Si l'on s'attend à une augmentation de la fréquence des canicules et des dommages associés, on constatera en revanche sans doute une diminution des décès liés aux grands froids en hiver. Les fortes chaleurs exigeront une surveillance accrue des personnes âgées et vulnérables, et une amélioration de la sécurité alimentaire et de la chaîne du froid. Dans d'autres domaines liés à la santé, les allergies aux pollens suivront la remontée vers le nord de certaines plantes. Les oiseaux et moustiques venus d'Afrique avec le virus West Nile semblent déjà atteindre le littoral méditerranéen à certaines périodes. D'autres maladies infectieuses "à vecteurs", comme les arboviroses et les leishmanioses, aujourd'hui limitées au pourtour méditerranéen, pourraient s'étendre vers le nord. Les propagations de la dengue et, à un degré moindre, du paludisme pourraient également se trouver favorisées, notamment dans les départements et territoires d'Outre-Mer. L'Entente interdépartementale de démolition de l'Hérault surveille l'évolution de ces insectes et de leurs méfaits sur le pourtour méditerranéen. Il conviendrait de renforcer encore la surveillance épidémiologique de ces maladies, combinée à celle de leurs vecteurs (oiseaux, moustiques, tiques, acariens...) et des facteurs environnementaux qui favorisent leur propagation.

Les évaluations des conséquences socio-économiques des changements climatiques prédits en France demeurent peu convaincantes. Les coûts (ou bénéfices) des impacts « progressifs » escomptés (pertes ou gains de productions agricoles et sylvicoles, diminution de la fréquentation des stations de sports d'hiver moins enneigées, augmentation ou diminution des dépenses de santé liées aux maladies climato-dépendantes...) ont donné lieu à un certain nombre d'études, mais n'ont pas été évalués de manière exhaustive. Les coûts



28, rue de La Baume  
75008 Paris  
Tél. 01 53 75 99 11  
Fax 01 53 75 99 05  
www.sade-cgth.fr

La Sade est l'un des acteurs importants, en France et dans le monde, de la conception, la construction et la maintenance des réseaux et des ouvrages associés, dans les domaines de l'eau potable et de l'assainissement.

Sa longue expérience, la permanence de ses métiers, conjuguées à la recherche constante de la qualité, de l'innovation et du progrès, constituent ses forces et ses principaux atouts.

Une organisation privilégiant la proximité géographique et un Bureau d'Etudes intégré assurent à ses clients publics et industriels un service de qualité, dans le respect de leurs contraintes économiques, techniques et environnementales.

### **Des solutions techniques pour la mise aux normes environnementales**

**Mal entretenus ou sous-dimensionnés, les équipements hydrauliques peuvent avoir un impact sur l'environnement : fuites, risques de pollution, incidences sur la fourniture et la qualité de l'eau, arrêt des outils de production, ...**

**Apportant des solutions techniques innovantes répondant aux préoccupations économiques et environnementales des industriels, la Sade réalise tous les travaux correspondant aux besoins et aux pathologies des réseaux : forages, systèmes de défense incendie, transport et distribution des fluides, stations de pompage et de traitement, bassins de rétention ou de stockage, séparateurs d'hydrocarbures, réhabilitation des ouvrages existants, etc.**



Année	Période	Lieu	Aléa	Dommages	Indemnités versées (M€ - Source CCR)
1990	jan-mars	moitié Nord	inondations		183
1992	sept	Vaison-la-Romaine et Sud	inondations		244
1993	oct		inondations		305
1993-1994	déc-janv	Nord et Est	inondations		259
1994	nov	Nice	inondations		122
1995	févr	Nord, Est et Ouest	inondations		365
1995	août-sept	Antilles	ouragans		110
1996	déc	Sud-ouest	inondations		76
1997	juin	Normandie	inondations		40
1998	juin	Nord - Pas de Calais	inondations		20
1999		Antilles	ouragans José et Leny		60
1999	nov	Grand Sud, Aude	inondations		250
1999	déc	Europe	tempêtes Lothar et Martin	4 500 M\$ et 150 victimes en Europe, 170 M m <sup>3</sup> de chablis en France	230
2000	19 avr	Guyane	glissement de terrain à Remire Montjoly	10 morts	
2000	déc	Bretagne	inondations		70
2000	janv	Bretagne, Normandie	inondations		50
2001	janv-mai	Somme	inondations		80
2002	janv	Réunion	cyclone Dina	dégâts matériels importants	93
2002	8-13 sept	Gard, Hérault et Vaucluse	inondations	24 morts, rupture d'une digue à Aramon, 3 000 personnes déplacées, nombreuses coupures de routes	650
2003	4-5 janv (vendredi)	Région parisienne	neige et verglas	30 000 automobiles bloquées sur A10 et A11	
2003	6-18 août	France	canicule	15 000 victimes en France	
2003	1-8 déc	Régions Auvergne, Bourgogne, Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Rhône-Alpes, Centre	inondations	7 décès, 1 300 communes sinistrées, 1 100 millions d'euros de dommages	700



**Tableau 1 - Principaux événements climatiques catastrophiques récents en France.**

Ce tableau recense un certain nombre d'événements climatiques qui se sont produits récemment en France, dont la plupart ont été classés comme « Catastrophe naturelle ». On remarquera cependant qu'un poste particulièrement conséquent en termes financiers, celui des indemnisations suite aux phénomènes de subsidence (phénomènes de retrait-gonflement en terrain argileux), qui s'est élevé à 3.200 millions d'euros sur la période 1989-2000, n'y est pas inclus. On notera également que les indemnisations hors régime «Catastrophe naturelle» consécutives aux effets du vent, du poids de la neige, de la grêle, prises en compte par le régime d'assurance normal, ne sont pas comptabilisées.

*Table 1 - The main recent climate-related disasters in France. This table lists a certain number of climatic events that have occurred in recent years in France, most of which were classed as "natural disasters." It should be noted, however, that a heading particularly significant from a financial standpoint, that of compensation relative to subsidence phenomena (shrinkage-swelling effects in clayey terrains), which attained the level of 3,200 million euros for the period from 1989 to 2000, has not been cited. It should also be noted that compensation linked with damage from wind, the weight of snow and hail, that do not come under the "natural disaster" scheme but are covered under the normal insurance system, have not been included either.*

Source : Onerc

# 2<sup>e</sup> SALON EUROPÉEN DE LA RECHERCHE & DE L'INNOVATION

Paris-France ● Porte de Versailles  
8 ► 11 juin 2006

**Le carrefour des sciences et  
des nouvelles technologies**  
20 000 m<sup>2</sup> et 4 jours pour tout découvrir

[www.salon-de-la-recherche.com](http://www.salon-de-la-recherche.com)

Organisé par Fondamental ● Expo  
+33 (0)1 56 68 00 00



Direction générale de la recherche



des catastrophes naturelles passées sont évalués par la Fédération française des sociétés d'assurances et augmentent rapidement. Le Tableau 1 présente les montants des indemnités versées par les assureurs français suite aux principales catastrophes naturelles d'origine climatique, ainsi que d'autres informations utiles sur ces événements. Cependant, il n'est pas possible aujourd'hui d'affirmer que le changement climatique contribue à cette augmentation, alors que la vulnérabilité et les enjeux eux-mêmes croissent très rapidement. Enfin l'estimation des coûts de l'adaptation reste à faire. Actuellement, seule l'approche statistique (évaluation probabiliste) semble possible, en la fondant sur l'analyse des données historiques disponibles, y compris de celles relatives aux événements extrêmes. Ceci montre l'intérêt de pousser plus avant ce type d'évaluation.

En l'état actuel des connaissances, il apparaît qu'en métropole, les zones les plus vulnérables aux changements climatiques se situent dans le Sud méditerranéen et dans les secteurs de la moitié Nord du pays exposés aux tempêtes et/ou aux inondations. L'ensemble de la métropole est par ailleurs susceptible de souffrir en cas d'épisodes caniculaires intenses. Les DOM-TOM sont très vulnérables, car ils possèdent des écosystèmes extrêmement sensibles, comme les récifs coralliens, et ont déjà à faire face à de nombreuses autres pressions.

### Le contexte législatif et réglementaire de l'adaptation

Il existe des lois sur l'aménagement du territoire et sur la protection de l'environnement et des plans (découlant de ces lois) de prévention des risques naturels et de gestion intégrée des espaces, milieux et ressources naturels. Par l'intégration progressive dans ces plans des connaissances sur les caractéristiques futures du climat et de ses impacts potentiels sur les milieux et

secteurs concernés, on pourra les adapter à la « nouvelle donne climatique ». Une bonne information des acteurs publics, et en premier lieu des collectivités locales, est nécessaire. L'Onerc a publié récemment à leur attention un guide sur l'adaptation (Onerc, 2004). Les politiques et mesures devraient se répartir en priorité dans les trois domaines qui suivent.

#### Prévention des risques naturels

La Loi de 1995 sur le renforcement de la protection de l'environnement et le Code de l'environnement de septembre 2000 rendent obligatoire l'élaboration, sous l'autorité des Préfets, de plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) dans les zones dont la vulnérabilité face aux phénomènes extrêmes (tempêtes, cyclones, inondations, feux de forêt, avalanches, mouvements de terrain, séismes, éruptions volcaniques...) est connue (retour d'expériences de catastrophes naturelles) ou déduite d'une analyse de risques. L'identification/cartographie des zones à risques et la définition des mesures inscrites dans les PPR (interdiction de construire dans les zones inondables ou dans les couloirs d'avalanches, renforcement des outils pour l'annonce des crues, renforcement des moyens d'intervention et de secours sur place...) reposent sur les conditions climatiques passées. Les PPR pourront être révisés en fonction des progrès dans les prédictions de l'impact potentiel des changements climatiques.

L'efficacité des systèmes d'alerte a été considérablement améliorée avec la mise en place par Météo-France des « Cartes de vigilance », à la suite des tempêtes qui ont ravagé le pays en 1999. La présentation de ces cartes à la télévision permet à chacun d'être prévenu de l'arrivée imminente d'un phénomène dangereux. Elles alertent sur les risques de vents violents, de fortes précipitations, d'orages, de neige/verglas, d'avalanches, de grands froids et de vagues de chaleur.

Plus récemment, suite à l'adoption de la Loi de modernisation de la sécurité civile du 13 août 2004, le Ministère de l'intérieur refond entièrement les plans de secours, dans un cadre structuré. La doctrine est fixée au plan national, et donne lieu à des plans de secours au niveau des départements. Les nouveaux plans, actuellement à l'étude, seront passablement différents des anciens.

◀ **Les réserves en eau ne sont pas inépuisables (barrage de Migouelou dans les Pyrénées).**  
*Water resources are not endless (the Migouelou Dam in the Pyrenees).*

© Patrick Girard ([www.lacsdesspyrenees.com](http://www.lacsdesspyrenees.com))



### Aménagement du territoire

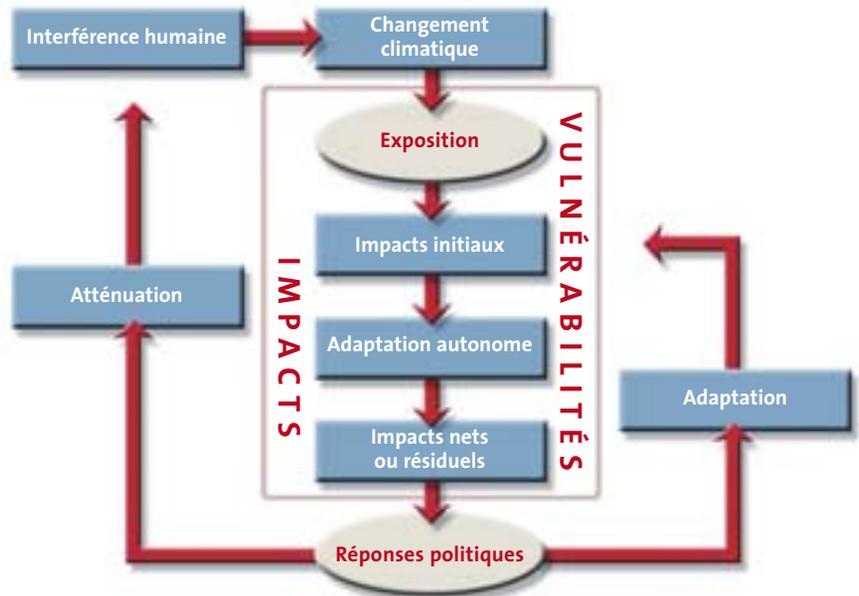
La Loi d'orientation de l'aménagement et du développement durable du territoire de juin 1999 a prévu l'élaboration dans chaque Région des outils de planification à vingt ans que sont les schémas de services collectifs. Ces schémas couvrent l'ensemble des politiques sectorielles structurant le territoire et prennent en compte les contraintes climatiques dans les secteurs concernés : espaces naturels et ruraux (p. ex. : restaurer ou élargir le lit des rivières... pour diminuer les risques d'inondations) ; énergie (p. ex. : sécuriser le transport d'électricité face aux risques de tempêtes) ; transport de fret et de voyageurs (p. ex. : adapter le dimensionnement et la résistance des ouvrages et installations nécessaires à la pluviométrie des secteurs...).

### Gestion des ressources en eau, agriculture

La nouvelle Loi sur l'eau de 2005 répond à une demande croissante de transparence, d'équité et de solidarité dans la gestion et les divers usages de l'eau et met la législation française en conformité avec la directive cadre adoptée par l'UE. La loi renforce le principe d'une facturation proportionnelle aux volumes d'eau consommés, y compris pour les prélèvements effectués par les agriculteurs. Cela incitera chacun à économiser l'eau et constitue donc indirectement une mesure d'adaptation aux risques de sécheresse et de pénurie d'eau.

Les collectivités locales pourront mieux gérer les zones inondables en instaurant des servitudes, dites de surinondation, pour aménager les zones d'expansion des crues. Il faudrait à terme intégrer la "nouvelle donne climatique" dans les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) au niveau des bassins versants, afin de préserver les multiples fonctions et usages de cette ressource et de prévenir les conflits d'usage. Plus globalement, les questions relatives au climat devront être abordées à l'échelle du territoire dans son ensemble notamment aux échelles régionales par les six agences de l'eau, via en particulier leurs schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE).

“Le Plan climat (Mies, 2004) prévoit que la France se dote d'une stratégie nationale d'adaptation au changement climatique.”



▲ Face aux changements climatiques, il existe deux types de politiques de prévention : l'atténuation, d'une part, qui s'adresse aux causes du changement en s'efforçant de réduire les gaz à effet de serre présents dans l'air, et l'adaptation au nouveau climat, d'autre part.

*To cope with climate change, two types of prevention policies can be implemented: firstly mitigation, which targets the causes of change by endeavouring to reduce the levels of greenhouse gases present in the atmosphere, and secondly, adaptation to the new climate conditions.*

Source : GIEC

Il conviendra également de prendre en compte le lien avec la production et les pratiques agricoles, qui risquent, en s'orientant vers les biocarburants, de devenir encore plus intensives en ressources naturelles.

### La stratégie d'adaptation

Le Plan Climat (Mies, 2004) prévoit que la France se dote d'une stratégie nationale d'adaptation au changement climatique. Un groupe de travail, présidé par le Délégué Interministériel au Développement Durable, a été mis en place en 2005, auquel les administrations potentiellement concernées ont été associées. Le Commissariat général du Plan et la Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale ont également contribué aux réflexions. Un certain nombre d'organismes dont la vocation est en lien étroit avec le climat ont aussi été associés : ADEME, Anah, Conservatoire du Littoral, CSTB, EID, IFB, Ifremer, Inra, Insu-CNRS, Météo-France, Mies, ONF...

A la suite des travaux du groupe de travail, un projet de « stratégie d'adaptation au changement climatique », a été proposé par l'Onerc et mis en ligne sur le site Internet du MEDD pour une consultation publique de deux mois et demi.

Dans ce document, quatre grandes finalités sont identifiées :

► **Agir pour la sécurité et la santé publique.** Le nombre considérable de victimes lors du drame de la canicule de 2003 et les difficultés éprouvées par l'aide sociale et le système de soins à réagir a posé la question de l'efficacité de nos systèmes techniques et



## LES CONSÉQUENCES DE LA DÉRIVE CLIMATIQUE : COMMENT S'ADAPTER ?



### Recul de la langue du glacier des Bossons, à Chamonix.

*The Bossons glacier tongue, Chamonix.*

© BRGM im@gé - F.Michel

organisationnels à assurer la protection des personnes et des biens dans des situations aujourd'hui considérées comme extrêmes, mais demain peut être largement dépassées.

► **Aspects sociaux : les inégalités devant le risque.**

L'exemple de 2003 montre bien - confirmant par là l'avertissement donné par le GIEC - que les effets de l'évolution climatique s'exerceront sans doute de façon disproportionnée sur les populations déshéritées.

► **Limiter les coûts, tirer parti des avantages.** Le changement climatique induira des coûts que des politiques préventives d'adaptation auront à cœur de réduire ou d'éviter. Dans certains cas, le réchauffement climatique pourra se traduire par des effets positifs, dont l'anticipation permettra d'en tirer un plus grand avantage.

► **Préserver le patrimoine naturel.** Les écosystèmes qui subissent des pressions ont d'ores et déjà un potentiel d'adaptation naturelle amoindri qui rendra d'autant plus difficile l'action de l'homme. En préservant le patrimoine naturel, l'homme pourra tirer profit de celui-ci pour atténuer les impacts du changement climatique.

“  
L'adaptation peut réduire les effets néfastes des changements climatiques et permet d'obtenir des bénéfices accessoires immédiats, sans toutefois prévenir tous les dommages  
”

Huit axes stratégiques d'action sont ensuite proposés et détaillés :

- 1) développer la connaissance scientifique
- 2) consolider le dispositif d'observation
- 3) informer, sensibiliser tous les acteurs
- 4) promouvoir une approche territorialisée
- 5) financer les actions d'adaptation
- 6) utiliser les instruments législatifs et réglementaires
- 7) tenir compte de la spécificité de l'Outre-Mer
- 8) contribuer aux échanges internationaux

En raison de la nature multidisciplinaire de l'adaptation, on examine en premier lieu les approches transversales suivantes : **l'eau, les risques, la santé, la biodiversité.**

Des éclairages sont ensuite apportés sur les secteurs économiques suivants : **l'agriculture, l'énergie & l'industrie, les transports, le bâtiment & l'habitat, le tourisme.**

Enfin, l'adaptation doit aussi se penser de façon intégrée, en considérant cette fois-ci des « milieux » sélectionnés en raison de leur vulnérabilité particulière : la ville, le littoral et la mer, la montagne, la forêt.

De façon générale, l'appréciation stratégique de l'adaptation au sein des approches transversales, sectorielles ou par milieux repose sur la capacité que l'on a à identifier au préalable les impacts. C'est sans doute là que les progrès les plus urgents doivent être accomplis.

## Conclusion

L'adaptation peut réduire les effets néfastes des changements climatiques et permet d'obtenir des bénéfices accessoires immédiats, sans toutefois prévenir tous les dommages. Les coûts des conséquences du changement climatique et ceux de l'adaptation, qui sont intimement liés, demeurent très mal connus et dépendent fortement des références retenues. Il n'est pas possible sur la base des connaissances scientifiques actuelles de proposer un niveau d'adaptation et un niveau d'atténuation qui, pris ensemble, permettraient d'amener au minimum les coûts additionnés des impacts, de l'atténuation et de l'adaptation.

C'est sur la foi des conclusions du GIEC que l'Union européenne, considérant qu'une augmentation de la température moyenne globale supérieure à 2 °C ne serait pas acceptable, a décidé de tout faire pour maintenir la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre en dessous du niveau de concentration 550 parties par million. L'examen des scénarios présentés par le GIEC montre que pour avoir une bonne probabilité de tenir cet objectif, il faut diviser par 2 les émissions mondiales par rapport à ce qu'elles sont aujourd'hui. Ceci implique une division par 4 ou 5 des émissions des pays développés, compte tenu du niveau élevé de leurs émissions par habitant, et des besoins croissants des pays en développement. Ce sont là les objectifs fixés par le gouvernement.

Les conclusions du GIEC comme celles des scientifiques français sont bien entendu entachées d'incertitudes, mais les niveaux d'incertitudes sont variables, et les conclusions qualifiées de probables, très probables ou pratiquement certaines sont déjà très préoccupantes. Certains événements à caractère cataclysmique y sont également évoqués, mais les données scientifiques demeurent généralement insuffisantes pour leur attacher un degré de probabilité : on reste alors encore dans le domaine de l'ignorance. ■



## The consequences of climate shift: how can we adapt?

*Today, a great deal of reliable information is available concerning the possible consequences of climate change in France. This will bring about changes that are gradual, but also an increase in certain types of risk. The information in question has been furnished by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2003), but also very largely by research conducted within the programme "Management and Impacts of Climate Change". The National observatory on impacts of climate warming (ONERC) has collected the results of certain of these studies by means of its network of correspondents, and has notably organized two symposia bringing together scientists and decision-makers. The first of these events dealt with the issue of extreme weather phenomena, while the second presented the topic of adaptation before an audience composed of elected officials. It appears that our vulnerability to climate effects has a tendency to rise. The heat wave of the summer of 2003 clearly demonstrated the vulnerability of city dwellers and has prompted the authorities to institute wide-scale prevention and management efforts. Surrounding urban areas, the territory becomes less uniform, exposing it to conflicts over usage, notably between areas designated for residential, farming, public or natural uses. The challenges are posed by natural risks, including those due to landslide, mudslide and flooding, that result from having housing spread into vulnerable zones and from making the ground surface impermeable.*

*Coastal areas have in general been increasingly built up over the past ten years. Thus, housing is moving more and more into zones at risk, and its vulnerability to climate has increased accordingly. Other useful information about vulnerability and adaptability has been derived from experience gained from the storms that struck France in December 1999, notably in forestry and the electricity generating/distribution, construction and insurance sectors. Public awareness has, likewise, been focused on water resource-related aspects following the droughts suffered by virtually the whole of France in 2003 and again in 2005. As to the institutional aspects, Parliament adopted a law in 2001 that accorded combating the greenhouse effect and preventing risks associated with global warming - the status of a national priority. This law set up the National observatory on impacts of climate warming (ONERC) for continental France and the overseas departments and territories, which gives concrete expression to the government's determination to take into account the issues associated with the effects of climate change. ONERC's mission is to gather and disseminate information, studies and research on risks generated by global warming and extreme weather phenomena. This mission was reinforced by the Climate Plan (Mies, 2004), which presents the policy instituted by the government to combat climate change. The Climate Plan calls on ONERC to propose a strategic framework for adaptation in France.*



# Capture et stockage du dioxyde de carbone

## Le rapport du GIEC<sup>(1)</sup>

Le GIEC a présenté en 2005 un rapport sur la capture et le stockage du CO<sub>2</sub>. Cette nouvelle technologie pourrait permettre, dans les prochaines décennies, de contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, là où l'usage des énergies fossiles reste nécessaire au développement.

72

STOCKAGE CO<sub>2</sub>

### Jacques Varet

DIRECTEUR  
DE LA PROSPECTIVE BRGM  
PRÉSIDENT DU COMITÉ  
DE COORDINATION  
DE L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE  
AUPRÈS DE LA MIES  
(MISSION INTERMINISTÉRIELLE  
DE L'EFFET DE SERRE)  
j.varet@brgm.fr

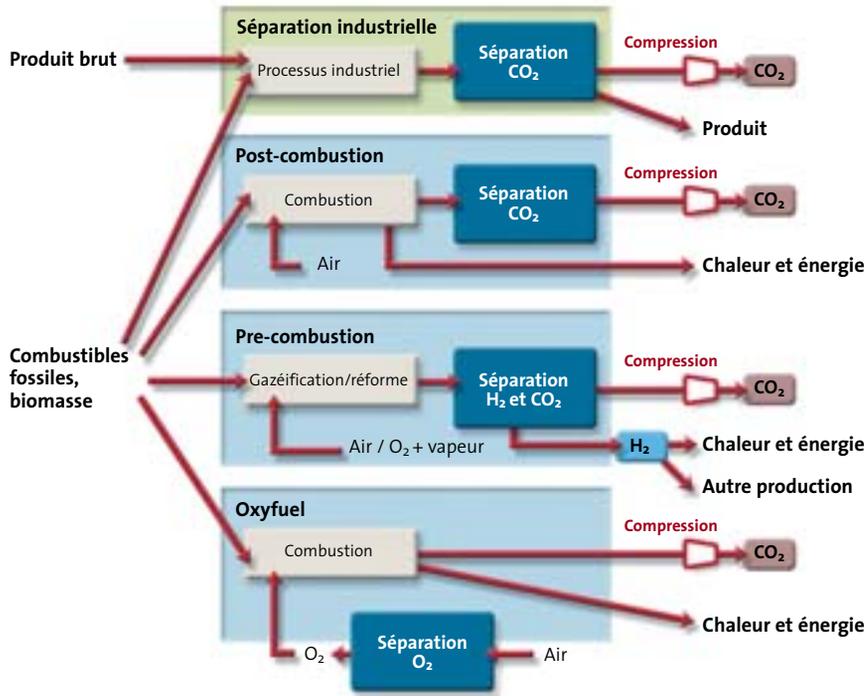
Le GIEC (IPCC<sup>(2)</sup> en anglais) est un groupement scientifique international sur le changement climatique mis en place par l'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) qui fonctionne comme l'organe d'expertise scientifique de la convention climat (UNFCCC). Il comporte trois groupes de travail, le premier sur les bases scientifiques du changement climatique, le second sur les impacts, l'adaptation et la vulnérabilité, et le troisième sur la mitigation. C'est sous les auspices de ce troisième groupe de travail que la rédaction d'un rapport spécial sur la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> a été décidée<sup>(3)</sup>.

Le 24 septembre 2005 à Montréal (cf encadré), le "résumé pour décideurs" (SPM : *summary for policymakers*) de ce rapport a été adopté à l'unanimité des représentants de l'ensemble des pays membres de la convention climat. Préparé par un groupe de rapporteurs qui a travaillé pendant près de deux ans à partir de l'ensemble des données scientifiques publiées, il comporte 24 pages, et se décompose en 35 questions, réponses et explications. Il aborde tous les aspects de la question du stockage du CO<sub>2</sub>, depuis le cadre général et les définitions,

(1) Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

(2) Intergovernmental Panel on Climate Change.

(3) Ce rapport est téléchargeable sur le site : <http://www.ipecc.ch/> - La contribution française à cette technologie, notamment celle du BRGM, est traitée par I. Czernichowski - Lauriol et M. Castello (ce numéro, p. 78 à 85 et p. 104 à 107).



► Fig. 1 : Représentation schématique de systèmes de capture du CO<sub>2</sub>. Les combustibles et les produits sont indiqués pour la combustion oxyfuel, la pré-combustion (en incluant la production d'hydrogène et d'engrais), la post-combustion et les sources industrielles de CO<sub>2</sub> (en incluant le traitement du gaz naturel et la production de ciment et d'acier).  
 Fig. 1: Schematic representation of capture systems. Fuels and products are indicated for oxyfuel combustion, pre-combustion (including hydrogen and fertilizer production), post-combustion and industrial sources of CO<sub>2</sub> (including natural gas processing facilities and steel and cement production).

Source : Intergovernmental Panel on Climate Change

jusqu'aux niveaux de maturité des technologies et leurs perspectives de développement, selon les ressources et les caractéristiques des systèmes d'émissions. Il traite aussi des dimensions économiques, sociétales et juridiques, et évalue à quel point cette technologie peut contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre tout en maintenant l'usage des énergies fossiles nécessaire au développement de certains pays, notamment ceux producteurs de charbon.

La technologie de la capture et du stockage du CO<sub>2</sub> est tout d'abord décrite : la capture du CO<sub>2</sub> qui implique le plus souvent sa séparation des autres composants émis, sa compression, son transport et son stockage profond. On montre que la consommation de ressources fossiles, dans le cas de la mise en place de cette

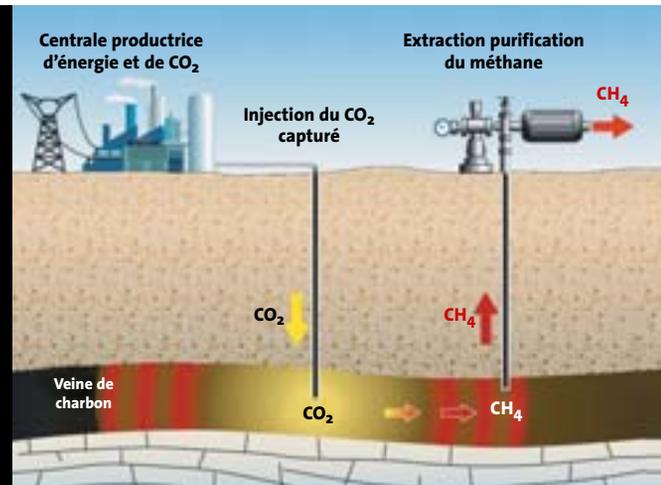
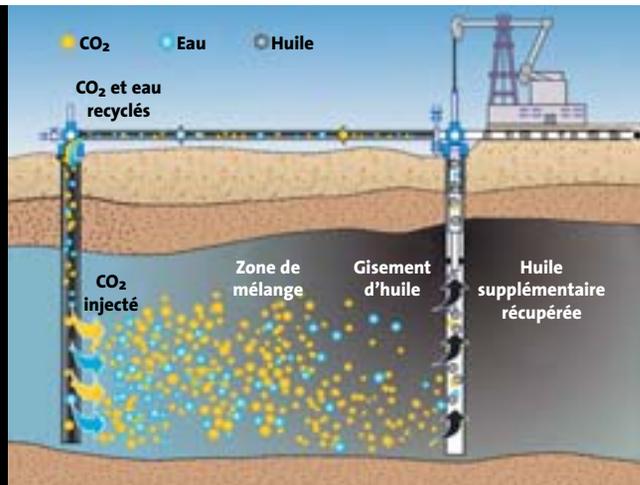
technologie, est de 10 à 40 % supérieure à celle d'une installation traditionnelle de production d'énergie, mais que la quantité nette d'émissions de CO<sub>2</sub> évitées ainsi atteint néanmoins 80 à 90 %.

Concernant la capture du CO<sub>2</sub>, le rapport du GIEC distingue 4 cas (Fig. 1). De même, 4 options de stockage géologique (cf. article I. Czernichowski-Lauriol, ce numéro, illustration générale sur ce sujet, p 82) sont précisées :

- > dans les gisements de pétrole ou de gaz déprimé ;
- > dans les gisements exploités, en récupération assistée (Fig.2 a) ;
- > dans les aquifères salins profonds ;
- > dans les gisements de charbon, avec récupération de méthane (Fig.2 b).

► Fig.2a : Injection de CO<sub>2</sub> lors de la récupération assistée de pétrole et de gaz. Use of CO<sub>2</sub> in enhanced oil and gas recovery.

Source : BRGM



► Fig.2b : Injection du CO<sub>2</sub> lors de la récupération assistée de méthane. Use of CO<sub>2</sub> in enhanced coal bed methane recovery.

Source : BRGM

## CAPTURE ET STOCKAGE DU DIOXYDE DE CARBONE : LE RAPPORT DU GIEC

Composante CCS	Technologie CCS	Phase de recherche	Phase de démonstration	Faisabilité économique sous certaines conditions	Marché à maturité
Capture	Postcombustion			X	
	Précombustion			X	
	Oxycombustion		X		
	Séparation industrielle (traitement de gaz naturel, production d'ammoniac)				X
Transport	Canalisation				X
	Voie maritime			X	
Stockage géologique	Récupération assistée du pétrole (EOR)				X <sup>(a)</sup>
	Gisements de gaz ou de pétrole			X	
	Formations salines			X	
	Récupération assistée de méthane (ECBM)		X		
Stockage sous-marin	Injection directe (type "dissolution")	X			
	Injection directe (type "lac")	X			
Carbonatation minérale	Minéraux silicatés naturels	X			
	Déchets industriels		X		
Utilisation industrielle du CO <sub>2</sub>					X

◀ **Table 1 : Etat actuel de maturité des différentes composantes du système CCS. La lettre x indique le niveau maximal de maturité atteint par chaque composante. Pour la plupart des composantes, des technologies moins matures existent également.**  
*Table 1: Current maturity of CCS system components. The X's indicate the highest level of maturity for each component. For most components, less mature technologies also exist.*

Source : Intergovernmental Panel on Climate Change

(a) L'injection de CO<sub>2</sub> pour la récupération assistée de pétrole est une technologie de marché à maturité, mais si cette technologie est appliquée pour le stockage du CO<sub>2</sub>, elle n'est économiquement faisable que sous certaines conditions.

Les hypothèses de stockage sous-marin sont également décrites (fixes ou mobiles), mais le rapport montre bien que seules les options géologiques ont atteint un niveau acceptable de maturité technologique (Table 1).

Le rapport compare ensuite la géographie des sites d'émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde avec celle des gisements géologiques (Fig. 3) : à l'horizon 2050, 20 à 40 % des émissions mondiales produites à partir des ressources fossiles pourraient être stockées de manière économique dans des formations géologiques.

En termes économiques, le coût de production d'énergie électrique à partir de ressources fossiles,

“ A l'horizon 2050, 20 à 40 % des émissions mondiales produites à partir des ressources fossiles pourraient être stockées de manière économique dans des formations géologiques. ”

**Fig. 3a : Répartition mondiale des sources concentrées du CO<sub>2</sub> (réalisée à partir d'une compilation d'informations publiques sur les sources d'émissions mondiales ; IEAGHG 2002).**  
*Fig. 3a: Global distribution of large stationary sources of CO<sub>2</sub> (based on a compilation of publicly available information on global emission sources; IEAGHG 2002).*

Source : Intergovernmental Panel on Climate Change





## CPA Experts

Ingénieurs - Experts près  
les Compagnies d'Assurances

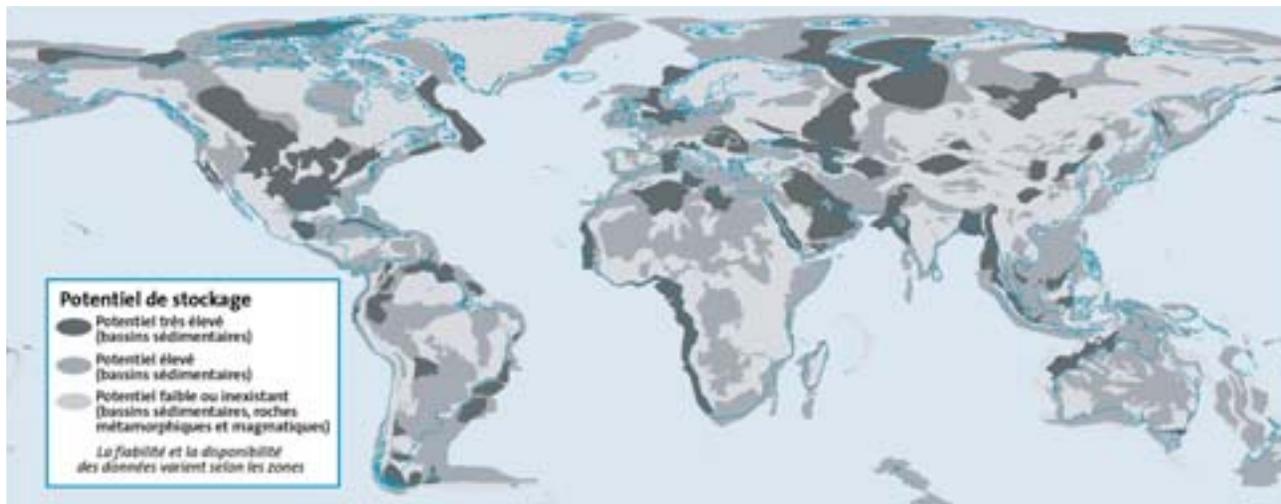
EXPERTISES EN RISQUES  
TECHNIQUES ET INDUSTRIELS

- CONSTRUCTION - BÂTIMENT
- RC PROFESSIONNELLE
- RC PRODUITS
- BRIS DE MACHINES
- TRC - ESSAIS MONTAGE
- RISQUES SPECIAUX

112 bis rue Cardinet 75017 Paris  
Tél. : 01 53 70 14 60 - Fax : 01 53 70 84 45  
www.cpa-experts.com - Email : cpa@cpa-experts.com

avec capture et stockage géologique, varierait de 0,04 à 0,08 \$/kWh pour les cycles combinés à gaz naturel, de 0,06 à 0,10 \$/kWh pour le charbon pulvérisé, et de 0,05 à 0,09 pour les cycles combinés à gazéification intégrée ; ceci sur la base de la valeur marchande du pétrole en 2002 (15 à 20 \$/baril). On atteint ainsi en moyenne des coûts de 20 à 90 \$/t CO<sub>2</sub> évité (Table 2).

L'inventaire des sources fixes d'émissions de plus de 0,1 Mt CO<sub>2</sub>/an dans le monde montre que le gisement est important : on dénombre près de 8 000 sources de cet ordre de grandeur unitaire (dont près de 5 000 pour la production d'électricité) totalisant plus de 13 000 Mt CO<sub>2</sub>/an. Si on se limitait aux seules opérations les plus rentables, avec les coûts de capture les plus bas, et des transports à faible distance (moins de 50 km) vers des gisements d'hydrocarbures nécessitant de la production assistée, la quantité de CO<sub>2</sub> stockée dans le monde ne dépasserait pas 360 Mt CO<sub>2</sub>/an. Cela permettrait néanmoins de développer cette technologie au niveau industriel. Mais si l'on tient compte des aquifères salins profonds, ce sont des capacités de stockage pouvant atteindre jusqu'à 2 000 Gt CO<sub>2</sub> qui pourraient être trouvées dans le monde. Ainsi, le stockage géologique pourrait représenter - avec 220 à 2 200 Gt CO<sub>2</sub> stockés au total - au moins 15 % et jusqu'à 55 % des efforts cumulés de réduction des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2100 ;



**Fig. 3b : Zones prometteuses au sein des bassins sédimentaires comportant des aquifères salins, des gisements de pétrole ou de gaz ou des veines de charbon. Les sites de stockage en veines de charbon n'y figurent que partiellement. Le terme potentiel signifie une évaluation qualitative de la probabilité qu'un site de stockage approprié soit présent dans une zone donnée, fondé sur des informations disponibles. Cette figure est à prendre en compte à titre indicatif, car elle est établie à partir de données partielles dont la qualité peut varier d'une région à l'autre et qui en outre sont susceptibles d'évoluer au cours du temps et en fonction d'informations nouvelles.**

*Fig. 3b: Prospective areas in sedimentary basins where suitable saline formations, oil or gas fields or coal beds may be found. Locations for storage in coal beds are only partly included. "Potential" (Prospectivity) is a qualitative assessment of the likelihood that a suitable storage location is present in a given area based on the available information. This figure should be taken as a guide only because it is based on partial data, the quality of which may vary from region and which may change over time and with new information.*

Source : Intergovernmental Panel on Climate Change

cela dans l'hypothèse d'une stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre entre 450 et 750 ppmv<sup>(4)</sup> de CO<sub>2</sub>. Cela représenterait un nombre d'installations important : plusieurs centaines de milliers de systèmes d'une capacité de 1 à 5 Mt CO<sub>2</sub> par an devraient être installés au cours du prochain siècle.

Dans sa dernière partie, le rapport traite de la question des risques sanitaires et environnementaux induits par les installations de stockage du CO<sub>2</sub>. Il souligne la nécessité de disposer de systèmes de sécurité et de surveillance des installations, et montre que les options géologiques sont susceptibles de garantir un stockage sur des durées dépassant mille ans, voire des millions d'années. Mais dans la plupart des pays, les mesures légales et réglementaires restent à définir.

Au plan international, le guide que doit publier l'IPCC en 2006 sur les inventaires d'émissions devrait préciser les méthodes de comptabilité des émissions découlant de l'usage des systèmes de stockages géologiques. Devraient être précisées, par exemple, les modalités de prise en compte lorsque le site de stockage géologique n'est pas situé dans le pays émetteur du CO<sub>2</sub> séquestré. La prise en compte de la séquestration géologique dans les instruments du protocole de Kyoto, le marché du carbone et les mécanismes de développement propre (MDP) notamment doivent être précisés lors des négociations à venir (Conférences des Parties de l'UNFCCC).

Les contributions françaises à l'adoption de ce rapport ont porté sur 3 points sur lesquels des améliorations ont été apportées au texte d'origine :

- > le fait que le rapport traite en même temps de stockage géologique et de stockage océanique, qui sont deux options de maturité et "d'acceptabilité" fort différentes, notamment pour ce qui concerne l'impact sur les milieux vivants ;
- > la dimension économique du rapport qui donne des chiffres en \$ par tonne de CO<sub>2</sub> stocké, alors que les calculs ont été effectués pour un pétrole à 15 - 20 \$/baril<sup>(5)</sup>, contre 50 à 100 aujourd'hui (les coûts de séparation et de compression étant largement dominés par l'énergie) ;
- > la place donnée au stockage en gisements pétroliers et gaziers, au détriment des opportunités offertes par les aquifères profonds et autres formations géologiques potentielles (comme les basaltes qui devraient permettre une séquestration minérale in situ). ■

(4) Parties par million en volume.  
 (5) Dollars par baril.

*“ Pas de doute : le stockage géologique du CO<sub>2</sub> ouvre désormais de nouvelles options au développement énergétique de l'humanité. Il ne doit pas, cependant, dissuader le développement des solutions alternatives, notamment celles des économies d'énergie et des énergies renouvelables. ”*

Composante	Gamme des coûts	Remarques
Capture auprès d'une centrale électrique à charbon ou à gaz	15-75 US\$ / t CO <sub>2</sub> net capturé	Coûts nets de CO <sub>2</sub> capturé en comparaison à ceux de la même centrale n'ayant pas procédé au piégeage de CO <sub>2</sub>
Capture lors de production d'hydrogène ou d'ammoniac et de traitement du gaz naturel	5-55 US\$ / t CO <sub>2</sub> net capturé	Concerne les sources ultra-pures nécessitant uniquement séchage et compression
Capture auprès d'autres sources industrielles	25-115 US\$ / t CO <sub>2</sub> net capturé	La différence de coût reflète le choix entre diverses technologies et types de combustibles.
Transport	1-8 US\$ / t CO <sub>2</sub> capturé	Pour 250 km par canalisation ou bateau pour un débit variant de 5 (prix + élevé) à 40 (prix -élevé) Mt CO <sub>2</sub> /an.
Stockage géologique <sup>(a)</sup>	0,5-8 US\$ / t CO <sub>2</sub> net injecté	En excluant les recettes financières potentielles issues de la récupération assistée (pétrole, méthane).
Stockage géologique : surveillance et vérification	0,1-0,3 US\$ / t CO <sub>2</sub> injecté	En incluant la surveillance préinjection, injection et postinjection, et suivant les obligations réglementaires.
Stockage sous-marin	5-30 US\$ / t CO <sub>2</sub> net injecté	En incluant le transport maritime sur 100-500 km, et en excluant la surveillance et la vérification.
Carbonatation minérale	50-100 US\$ / t CO <sub>2</sub> net minéralisé	Gamme de coût basée sur le meilleur scénario. Inclut l'utilisation d'énergie supplémentaire pour la carbonatation.

**Table 2 : Gamme des coûts des différentes composantes d'un système CCS dans le cadre d'une application à un type donné de centrale ou de source industrielle. Dans ce système, le coût du CO<sub>2</sub> évité en USD ne peut s'obtenir en faisant simplement la somme des coûts des composantes individuelles. Tous les chiffres reflètent les coûts correspondant aux installations nouvelles de grande taille et tiennent compte d'un prix du gaz naturel compris entre 2,8 et 4,4 USD GJ<sup>-1</sup> et d'un prix du charbon entre 1,0 et 1,5 USD GJ<sup>-1</sup>.**

*Table 2: Cost ranges for the components of a CCS system as applied to a given type of power plant or industrial source. The costs of the separate components cannot simply be summed to calculate the costs of the whole CCS system in US\$/CO<sub>2</sub> avoided. All numbers are representative of the costs for large-scale, new installations, with natural gas prices assumed to the 2.8-4.4 US\$ GJ<sup>-1</sup> and coal prices 1-1.5 US\$ GJ<sup>-1</sup>.*

Source : Intergovernmental Panel on Climate Change

(a) Sur le long terme, des coûts supplémentaires peuvent apparaître pour les mesures correctives et les responsabilités encourues.

Réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.  
Reducing greenhouse gas emissions.

© BRGM im@gé



## Carbon dioxide capture and storage: Summary for Policymakers

The Intergovernmental Panel on Climate Change, or IPCC, is a body set up by the World Meteorological Organization (WMO) and the United Nations Environment Programme (UNEP) and that acts as UNFCCC's (the United Nations Framework Convention on Climate Change) vehicle for scientific evaluation. It includes three working groups: the first is concerned with the scientific bases of climate change, the second, with its impacts, as well as adaptation and vulnerability, and the third with mitigation. The decision to draft a report on the capture and storage of CO<sub>2</sub> was taken under the auspices of this third working group. On 24 September 2005 in Montreal, the summary for policymakers (SPM) was adopted unanimously by the representatives of the member nations of the climate change convention. Prepared by a team of rapporteurs, it addresses all aspects of the CO<sub>2</sub> storage issue, ranging from the overall framework and definitions to the levels of maturity of the involved technologies and their prospects for development. It also deals with economic, societal and legal facets and assesses to what extent this technology may contribute to reducing greenhouse gas emissions while at the same time allowing for the continued use of fossil fuels, which conditions the development of a number of countries, particularly coal-producing ones.

### ► STOCKAGE ET CAPTURE DU CO<sub>2</sub> : COMMENT SE NÉGOCIE UN RAPPORT DU GIEC - Jacques Varet MONTRÉAL, 22-24 SEPTEMBRE 2005

Participer à la discussion et à l'adoption d'un rapport du groupe intergouvernemental sur le changement climatique (IPCC en anglais, GIEC en français) laisse l'impression d'avoir contribué à un événement historique. Il faut imaginer une très vaste salle, plus grande que n'importe quelle grande salle de cinéma (au siège de l'organisation de l'aviation civile), dans le centre d'une ville fait de gratte-ciel, qui a tout d'une ville américaine... et surtout une langue... bien française. Il faut imaginer des représentants de tous les pays du monde, y compris les pays les plus pauvres, avec des délégations plus ou moins fournies (les plus nombreuses dépassant 5 personnes : Etats-Unis, Australie, Canada, Japon, Chine, Hollande...). Un travail qui se déroule sur trois jours... et deux nuits !

Il s'agissait en l'occurrence de débattre du rapport sur "la capture et le stockage du CO<sub>2</sub>", et plus exactement du "résumé pour décideurs" du dit rapport... le fameux "SPM" (Summary for Policymakers). Le seul document que le commun des mortels aura le courage de lire (24 pages, au lieu des quelques centaines de pages du rapport principal). Ce "SPM" avait été diffusé avant l'été à tous les Etats signataires de la convention climat des Nations Unies (UNFCCC). En France, la MIES l'avait fait relire aux organismes concernés (Industrie et Recherche) et avait transmis au secrétariat de l'IPCC une

synthèse des remarques reçues. A l'ouverture, les délégués prennent connaissance de la totalité des remarques, soit un volume de plusieurs centaines de pages, dûment consignées page par page, § par §, ligne par ligne. En séance le président affiche à l'écran le premier § en mode correction, et justifie des remarques prises en compte ou non, en rappelant celles qu'il a reçues. La discussion s'engage. S'il y a consensus, on procède à l'adoption ligne par ligne. De nouvelles discussions s'engagent. Si elles se prolongent, un groupe de travail est constitué avec les principaux protagonistes pour dégager un compromis. *In fine...* 3 jours et deux nuits auront été nécessaires à l'adoption de ce rapport constitué de 24 pages et de 32 questions, réponses et explications ; chaque ligne aura été remise en cause et adoptée en séance plénière.

Est-ce trop cher payer ? Tout bien réfléchi, certes non ! C'est le prix à payer pour le multilatéralisme ! Pour un rapport qui fait désormais consensus dans tous les pays du monde après avoir été rédigé par les meilleurs scientifiques et passé au crible de la critique de tous les experts nationaux ! Et les conséquences ne sont pas minces : à partir de ce jour où le rapport est adopté, les opérations de stockages géologiques pourront entrer dans les mesures et les mécanismes reconnus de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Au total, les décisions prises à Montréal auront un impact majeur sur le futur de l'économie pétrolière et, plus généralement, des ressources fossiles. Il devient possible de continuer à utiliser ces ressources fossiles sans endommager plus avant l'atmosphère. Pas de doute : le stockage géologique du CO<sub>2</sub> ouvre désormais de nouvelles options au développement énergétique de l'humanité. Il ne doit pas, cependant, dissuader le développement des solutions alternatives, notamment celles des économies d'énergie et des énergies renouvelables. Au contraire, en augmentant les prix de l'énergie de référence, cette solution aide au développement de ces filières. Encore faut-il que le stockage géologique devienne, pour les énergies fossiles, la seule solution acceptable, à l'exclusion de toute autre (émission atmosphérique).

Enfin, le stockage géologique du CO<sub>2</sub> émis par des installations utilisant de la biomasse (qu'il s'agisse de centrales thermiques ou de production de combustibles hydrogénés - voire d'hydrogène -) présente un attrait exceptionnel, celui de produire des émissions négatives, c'est-à-dire capturer du CO<sub>2</sub> atmosphérique au lieu d'en émettre plus. En d'autres termes, c'est une des rares solutions - la seule à ma connaissance - qui permette de nettoyer l'atmosphère ! ■

Pour relever le défi du réchauffement planétaire, un ensemble de mesures s'impose d'urgence : économies d'énergie, transports propres, développement des énergies renouvelables... Vient s'y ajouter aujourd'hui la capture du CO<sub>2</sub> au niveau des sources d'émissions industrielles massives et son stockage dans les couches géologiques profondes. Recours nécessaire pour parvenir à diviser par deux les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050 et éviter un bouleversement climatique majeur, la filière capture et stockage géologique du CO<sub>2</sub> est en plein développement. Les projets de recherche et les pilotes industriels se multiplient dans le monde.

**Tête de puits de production de gaz carbonique à Montmiral (Drôme) : ce gisement naturel de CO<sub>2</sub> à une teneur de 97 % est étudié par le BRGM et des équipes de recherches européennes pour comprendre le comportement à long terme du CO<sub>2</sub> dans le sous-sol.**  
*Head of the carbon-dioxide production well at Montmiral in the Drôme Département: this natural deposit of 97% pure CO<sub>2</sub> is being studied by the BRGM and European research teams in order to understand the long-term behaviour of CO<sub>2</sub> in the subsurface.*

© BRGM im@gé

# Capture et stockage géologique du CO<sub>2</sub> :

## un recours nécessaire pour lutter contre le réchauffement planétaire



**Isabelle Czernichowski-Lauriol**

CHEF DE PROJET SUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE CO<sub>2</sub>  
 SERVICE EAU – BRGM  
 i.czernichowski@brgm.fr

avec la collaboration de

**Martine Castello**

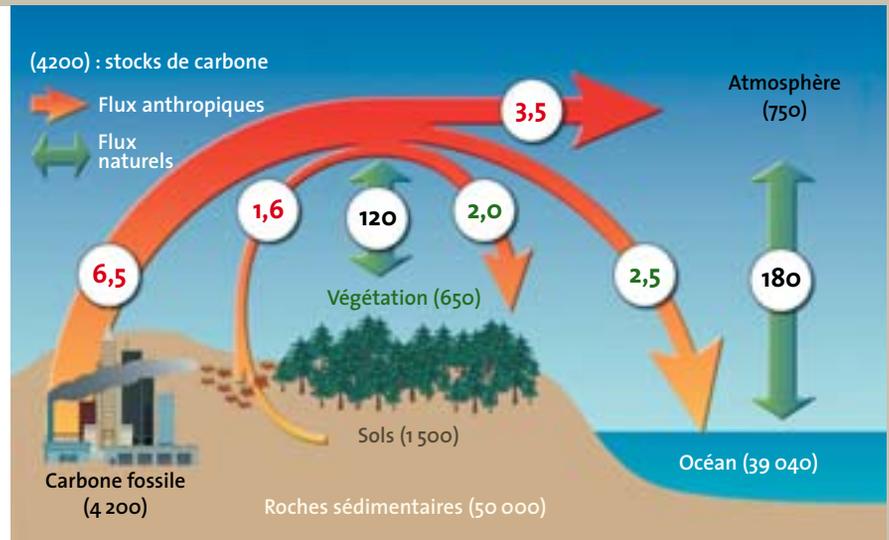
En 1895, le savant Arrhenius, prix Nobel de chimie, explique à ses collègues de l'Académie des Sciences de Suède que la vapeur d'eau et le gaz carbonique jouent un rôle majeur dans l'équilibre thermique de la Terre. Il en déduit logiquement que l'utilisation intensive des énergies fossiles pourrait augmenter l'effet de serre. Aujourd'hui, la prédiction d'Arrhenius s'est accomplie : la Terre chauffe anormalement, le climat se dérègle, et les coupables identifiés par la grande majorité des experts de la planète sont effectivement les gaz dits "à effet de serre" (GES). Parmi eux le gaz carbonique, ou dioxyde de carbone, engendre environ les deux tiers de l'effet de serre anthropique. Les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> n'ont cessé de croître depuis le début de l'ère industrielle du fait de deux composantes essentielles de nos modes de développement : les profonds et rapides changements dans l'affectation des terres avec une colonisation de plus en plus importante d'espaces naturels,

et surtout la dominance écrasante des combustibles fossiles (charbon, pétrole ou gaz) dans notre approvisionnement énergétique. La problématique de l'énergie est en effet la question centrale du dossier du changement climatique. 80 % des émissions sont dues à l'utilisation des combustibles fossiles et 20 % à la déforestation et aux changements de pratiques agricoles. Heureusement ces émissions anthropiques ont pour l'instant été résorbées pour moitié par les puits de carbone naturels que sont les océans et la biosphère terrestre. Mais l'autre moitié s'est accumulée dans l'atmosphère.

Depuis le début de l'ère industrielle, la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique est passée d'une valeur quasiment stable de 280 ppm<sup>(1)</sup> (0,028 % en volume) à une valeur de 365 ppm, jamais atteinte dans les derniers 400 000 ans. Très fortement corrélée à la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la température moyenne mondiale à la surface de la Terre s'est élevée de 0,6 °C au cours du XX<sup>ème</sup> siècle. Les experts du GIEC<sup>(2)</sup> prévoient qu'en l'absence de mesures fortes pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, la température moyenne du globe pourrait s'élever de 1,4 à 5,8 °C supplémentaires entre 1990 et 2100. L'écart dans les prévisions reflète les différents scénarios envisagés, basés sur des hypothèses socio-économiques diverses (démographiques, sociales, économiques et technologiques) et prenant en compte les incertitudes quant au comportement des systèmes naturels. Quelques degrés de plus en 100 ans, comparés à quelques degrés de plus sur 10 000 ans caractérisant le passage entre ères glaciaires et interglaciaires, c'est prendre la mesure du bouleversement climatique qui nous attend si nous ne prenons pas d'urgence des mesures spécifiques. L'espoir est de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C afin d'éviter des catastrophes majeures, ce qui implique de stabiliser les concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphériques à 450 ppm. Il faut pour cela parvenir à diviser par 2 (- 50 %) à l'horizon 2050 les émissions mondiales annuelles de CO<sub>2</sub> par rapport à leur niveau de 1990 - soit une division par 4 (- 75 %) ou 5 dans les pays industrialisés. La France s'est engagée sur le «Facteur 4» dans sa Loi d'orientation sur la politique énergétique adoptée en 2005. Le Protocole de Kyoto, signé en 1997 et ratifié en 2005, n'est qu'un tout petit

(1) ppm = parties par million.

(2) Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat



▲ **Schéma des flux nets de dioxyde de carbone terre/atmosphère en 1997 (exprimés en milliards de tonnes de carbone/an) : 3,5 milliards de tonnes de carbone de trop ! Les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> liées aux activités humaines atteignent 30 milliards de tonnes (Gt) par an, ce qui correspond à 8,1 Gt de carbone : 6,5 Gt (soit 80 %) proviennent de la combustion d'énergies fossiles et 1,6 Gt (20 %) de la déforestation et des pratiques agricoles. Ces émissions anthropiques ne sont qu'à moitié résorbées par les puits de carbone : 2,5 Gt par les océans et 2 Gt par la végétation et les sols. Et donc, chaque année, 3,5 Gt de carbone viennent s'accumuler dans l'atmosphère et perturber le climat.**

*Net Earth-to-atmosphere carbon dioxide fluxes in 1997 (in billions of metric tons of carbon per year): 3.5 billion tons of surplus carbon. Global CO<sub>2</sub> emissions linked to man's activities amount to 30 billion tons (Gt) per year, corresponding to 8.1 Gt of carbon: 6.5 Gt (or 80%) are derived from burning fossil fuels, while 1.6 Gt (or 20%) are the result of deforestation and agricultural practices. These man-induced emissions are only partially absorbed by CO<sub>2</sub> sinks: 2.5 Gt by the oceans and 2 Gt by vegetation and soils. And so, each year, 3.5 Gt of carbon end up accumulating in the atmosphere and upsetting the climate.*

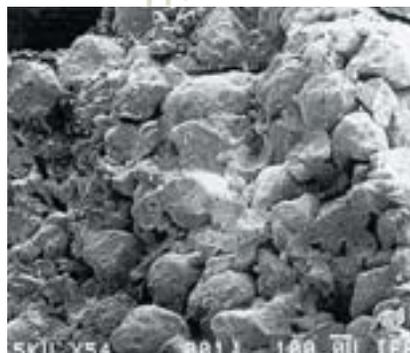
Source : BRGM

“ Le dioxyde de carbone issu de l'exploitation intensive des énergies fossiles depuis la révolution industrielle est le principal responsable du réchauffement climatique. ”

pas vers une nécessaire réduction des émissions, puisqu'il fixe pour les pays développés des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre de 5,2 % à l'horizon 2008-2012 par rapport au niveau de 1990. Mais il a le mérite d'enclencher une mobilisation internationale. Elle devrait se renforcer à l'occasion des négociations post-2012 qui ont déjà démarré.

## Mesures préventives et curatives

La lutte contre le changement climatique impose en premier lieu « d'agir à la source » pour contrôler les émissions de CO<sub>2</sub>. Il s'agit principalement de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer l'efficacité dans la conversion ou l'utilisation de l'énergie dans le logement, le bâtiment, les transports ou l'industrie; d'opérer un transfert depuis des énergies fortement émettrices de CO<sub>2</sub> à des énergies en générant peu ou



◀ Échantillon de roche gréseuse réservoir prise au microscope électronique à balayage avec un grossissement de 54 fois : on y distingue les vides de la roche dans lesquels peuvent circuler l'eau, le pétrole ou le gaz. SEM image (X54) of a reservoir sandstone: note the interstices where water oil or gas can circulate.

© Minefi

sphérique) mais surtout à recueillir le CO<sub>2</sub> émis par les sources massives industrielles pour le stocker à l'abri de l'atmosphère (capture et stockage de CO<sub>2</sub>), la voie privilégiée étant le stockage en couches géologiques profondes. Seule cette deuxième option peut permettre un stockage immédiat et permanent de grandes quantités de CO<sub>2</sub>.

Le recours à la capture et au stockage géologique de CO<sub>2</sub> s'avère être indispensable, en complément d'autres moyens, pour atteindre les objectifs de réduction d'ici à 2050. Il s'agit en fait de remettre dans le sous-sol, sous forme de CO<sub>2</sub>, une partie du carbone qu'on y a extrait sous forme d'hydrocarbures ou de charbon. La filière, aujourd'hui en plein développement, offre une solution de transition en attendant l'arrivée de nouvelles formes d'énergie non polluantes et des changements dans les modes de vie. Elle ne s'applique pour l'instant qu'aux émissions massives localisées (centrales thermiques, cimenteries, raffineries, usines sidérurgiques...), qui représentent tout de même la moitié des émissions liées à l'énergie. Mais elle possède aussi d'autres avantages. Elle devrait permettre le développement de la filière « charbon propre » et assurer un nouvel avenir au charbon dont les réserves mondiales sont importantes et bien réparties. Ce qui devrait faciliter considérablement le développement des pays les plus pauvres comme la Chine et l'Inde. De même l'utilisation des énergies non conventionnelles dont le potentiel est énorme (huile lourde et extra lourde, bitume, schiste bitumineux, hydrates de gaz) pourrait se développer. La capture et le stockage du CO<sub>2</sub> ouvrent également la voie à l'introduction de l'hydrogène comme nouveau vecteur énergétique, lequel peut ensuite être utilisé pour produire de l'électricité via des turbines ou des piles à combustibles. L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel et sa production massive ne pourra se faire dans un premier temps qu'à partir de combustibles fossiles, comme c'est déjà le cas pour certains usages industriels.

“ La capture et le stockage géologique de CO<sub>2</sub> s'avère être un recours indispensable, en complément d'autres moyens, pour atteindre les objectifs de réduction d'ici à 2050. Il s'agit en fait de remettre dans le sous-sol, sous forme de CO<sub>2</sub>, une partie du carbone qu'on y a extrait sous forme d'hydrocarbures ou de charbon. ”

quasiment pas (gaz de préférence au charbon, nucléaire, énergies renouvelables : solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, biomasse) ; enfin, d'améliorer la gestion des stocks naturels de carbone (forêts, sols). Mais ces mesures préventives seront insuffisantes pour diviser par deux les émissions annuelles mondiales d'ici à 2050, dans un contexte de forte croissance démographique mondiale, d'augmentation de la demande énergétique des pays en développement (qui devrait être multipliée par un facteur 3 à 5 d'ici 2050), et de la place incontournable qu'occuperont encore les combustibles fossiles dans les prochaines décennies. Il sera donc également nécessaire d'agir en aval sur les émissions que l'on ne peut éviter grâce à des mesures que l'on pourrait qualifier de curatives. Elles visent à augmenter les réserves de carbone organique des forêts, des sols et des océans (séquestration dans la biomasse à partir de CO<sub>2</sub> atmo-

“ La filière, aujourd’hui en plein développement, offre une solution de transition en attendant l’arrivée de nouvelles formes d’énergies non polluantes et des changements dans les modes de vie. ”

Le passage à l’hydrogène permettra de résoudre aussi les émissions du transport, qui représentent 23 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. En effet la capture de CO<sub>2</sub> ne peut pas s’appliquer aux sources d’émission mobiles et diffuses, mais pourra être mise en œuvre plus en amont dans les gros centres de production d’hydrogène qui permettront de substituer le litre d’essence par de l’électricité. Enfin le recours à la capture et au stockage de CO<sub>2</sub> peut favoriser le développement de nouveaux carburants, toujours carbonés mais plus propres et permettant de s’affranchir des hydrocarbures. Ainsi, la production de carburants synthétiques à partir de charbon pourrait se développer, avec capture et stockage de la moitié du carbone contenu dans le charbon. Par ailleurs, la production de biocarburants associée à la capture et au stockage de CO<sub>2</sub> aurait même l’avantage inouï d’épurer l’atmosphère puisque les trois quarts du carbone contenu dans la biomasse pourraient être stockés dans le sous-sol.

## Capter le CO<sub>2</sub>

La principale difficulté est liée à la faible concentration de CO<sub>2</sub> dans les fumées. Selon l’industrie concernée, cette teneur peut aller de quelques pour cent à 20 % des effluents. D’autres gaz, tels l’oxygène, la vapeur d’eau ou l’azote, se retrouvent dans le panache des fumées. Il serait impensable de vouloir tous les compresser pour les stocker, pour des raisons d’énergie et de place. Des méthodes de séparation sont donc nécessaires pour pouvoir capturer essentiellement le gaz carbonique. Des procédés industriels de séparation existent déjà sur le marché, puisque certaines industries comme la production d’ammoniac ou la production de gaz naturel doivent éliminer le CO<sub>2</sub>, sous-produit indésirable traditionnellement renvoyé à l’atmosphère alors qu’il pourrait être facilement stocké aujourd’hui.

Mais ces procédés induisent une surconsommation énergétique de 10 % et leur coût est très élevé (actuellement de l’ordre de 50 euros la tonne de CO<sub>2</sub> évitée, soit 80 % du coût total de la chaîne capture-transport-stockage). Des efforts de recherche et développement intensifs sont en cours avec pour objectif d’améliorer les technologies de capture pour les rendre plus efficaces et plus rentables. Ils explorent trois voies. La première récupère le CO<sub>2</sub> dilué dans les fumées de combustion (capture post-combustion). La seconde consiste à réaliser une combustion à l’oxygène pur et non pas à l’air, de manière à obtenir des fumées



concentrées en CO<sub>2</sub> (capture par oxy-combustion). La troisième vise à transformer le combustible fossile en CO<sub>2</sub> et hydrogène, lequel sera utilisé pour produire de l’énergie tandis que le CO<sub>2</sub> pourra être facilement récupéré (capture pré-combustion).

## Transporter le CO<sub>2</sub>

Après sa capture, le gaz carbonique doit être dirigé vers son lieu de stockage. Compte tenu des volumes, les seules solutions possibles à grande échelle passent par l’usage des pipelines ou des navires. Dans les canalisations terrestres et maritimes, le CO<sub>2</sub> sera transporté essentiellement en phase dense sous une pression supérieure à 74 bars (état supercritique). 3 000 km de pipelines de CO<sub>2</sub> sont déjà opérationnels dans le monde (depuis 1980), essentiellement en Amérique du Nord, car le CO<sub>2</sub> est utilisé pour la récupération assistée de pétrole. Des réseaux pourraient être construits sur le modèle de distribution du gaz naturel. Dans le cas du transport maritime, avec des bateaux du même type que ceux utilisés pour le gaz de pétrole liquéfié (GPL), le CO<sub>2</sub> peut être transporté sous phase liquide à pression modérée (7 bars) et

▲ **Le premier pilote industriel de capture sur fumées sera installé dans la centrale au charbon d’Esbjergværket au Danemark. Capacité prévue 1 tonne de CO<sub>2</sub> par heure.**  
*The first industrial pilot for flue-gas capture is to be installed at the coal-burning Esbjergværket power station in Denmark. Expected capacity is one ton of CO<sub>2</sub> per hour.*

© Elsam



basse température. Depuis 1989 en Norvège, quatre navires transportent du CO<sub>2</sub> entre des sites de production (usines d'ammoniac) et des villes portuaires où le CO<sub>2</sub> est utilisé pour la production alimentaire. Mais des navires de capacité beaucoup plus importante devront être construits pour transporter du CO<sub>2</sub> à des fins de stockage. Les coûts du transport dépendent essentiellement de la distance et sont de l'ordre de 0,5 à 10 euros la tonne de CO<sub>2</sub> pour 100 km de transport. Ils représentent de 0 à 25 % du coût total de la chaîne capture-transport-stockage, sachant qu'ils peuvent être nuls dans les conditions favorables où le stockage peut se faire sur le site d'émission.

## Stocker le CO<sub>2</sub>

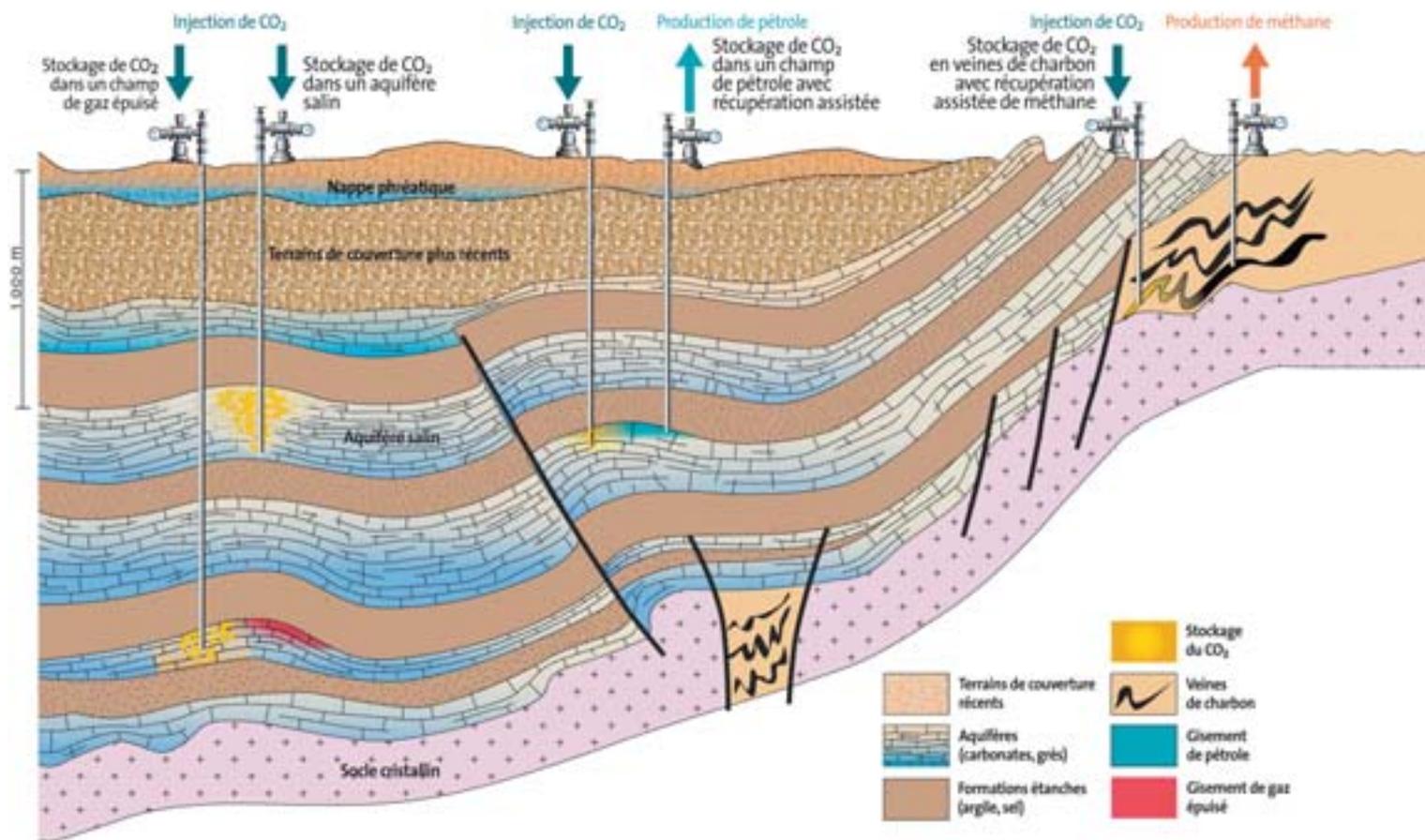
Le CO<sub>2</sub> doit pouvoir être stocké en grandes quantités et pendant au moins plusieurs siècles si l'on veut résoudre le problème climatique. Les formations géologiques profondes s'y prêtent parfaitement. Trois options sont privilégiées. Les aquifères profonds offrent les capacités de stockage les plus importantes (de l'ordre de 10 000 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>) et sont bien répartis et très étendus géographiquement. Constitués de roches perméables et poreuses remplies d'eau salée impropre à la consommation, le CO<sub>2</sub>

peut être piégé dans les pores des roches en chassant l'eau. Localement ces aquifères contiennent des gisements d'hydrocarbures qui sont la preuve d'une structure de piège, d'où la deuxième option qui est le stockage dans des gisements de pétrole et de gaz naturel épuisés (capacités de l'ordre de 1 000 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>). La troisième option est le stockage dans des veines de charbon profondes inexploitées, qui bénéficie de l'affinité du CO<sub>2</sub> pour le charbon (capacités de l'ordre de 100 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>). Ces deux dernières options offrent des potentiels de stockage beaucoup plus limités, en terme de capacité et en terme de répartition géographique, mais elles permettent la récupération supplémentaire de pétrole ou de gaz naturel qu'on pourra commercialiser. L'injection de CO<sub>2</sub> dans les réservoirs d'hydrocarbures est une méthode de récupération assistée, et dans le cas du charbon, permet de chasser le gaz naturel qui y est souvent piégé (grisou).

Les capacités de stockage dans le sous-sol sont donc considérables quand on les compare aux 23 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> émises annuellement dans le monde par les activités humaines liées à l'énergie. La technologie de capture et de stockage de CO<sub>2</sub> est donc bien de nature à jouer un rôle significatif dans la lutte contre le réchauffement climatique.

**Les différents types de stockage géologique du CO<sub>2</sub>.**  
*Various possibilities for the geological storage of CO<sub>2</sub>.*

Source : BRGM





◀ **Installation de capture du CO<sub>2</sub>, centrale de Warrior Run (Etats Unis).**  
*CO<sub>2</sub> capture at the Warrior Run plant (USA).*

© AES

## Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

Établissement public industriel et commercial, placé sous la tutelle des ministères chargés de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement

## A long terme, en toute transparence

Casiers de stockage. Centre de l'Atelier / Crédits photos: André - Ph. Demal / D. Gros / Films R. Leffler



Trois missions



### Industrie

Gestion, sûreté, mémoire

### Recherche

Expérimentations, partenariats, projets

### Information

Dialogue, clarté, inventaire

Certifications ISO 9001 et 14001



**ANDRA**

Parc de la Croix Blanche  
 177, rue Jean-Monnet  
 92238 Châtigny-Malabry Cedex  
 Tél: 01 48 11 80 00  
 www.andra.fr

## ► LE DÉFI CARBONE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE :

François Clin - francois.clin@technologie.gouv.fr

Les filières industrielles de valorisation des ressources minérales (hors combustibles fossiles) sont responsables de près de 10 % des émissions de gaz à effet de serre sur le territoire français. Ce secteur présente de réelles opportunités pour l'optimisation d'un développement raisonné de la gestion du cycle du carbone.

Tout d'abord ses unités comptent parmi les premières en consommations d'énergie n'ayant pas à la redistribuer autrement que sous forme de matériaux plus ou moins élaborés. Il sera donc l'un des premiers secteurs industriels à réellement payer la taxation environnementale locale de l'énergie sans la transférer à un consommateur final, ses produits étant de plus mondialisés sur les marchés internationaux. Pour assurer sa compétitivité, il aura recours à ses

talents tout particuliers dont il a déjà fait démonstration dans certaines démarches pionnières :

> maîtrise du cycle du carbone comme il en a été des cycles des matériaux (règle des 3R : réduction, récupération, mais aussi recyclage du carbone qui peut aussi bien s'imaginer qu'une filière hydrogène),

> connaissances des corrélations géochimiques entre produits carbonatés du sous-sol et ressources à diversifier et économiser en alcalins et alcalino-terreux face à l'acidification de l'oxydation biologique vitale :

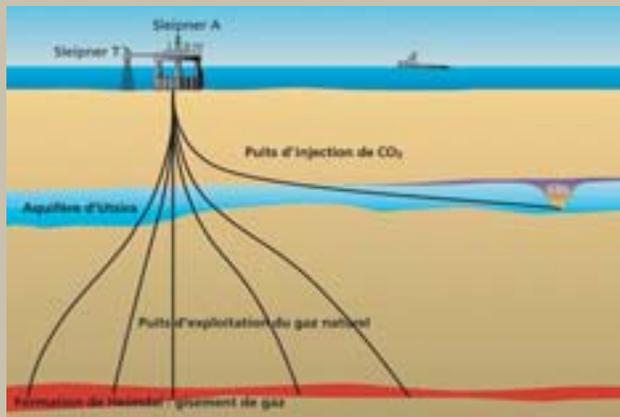
- économie du calcium des liants hydrauliques,
- tris physiques non destructifs des gangues carbonatées des minerais notamment de phosphate,
- séquestrations par carbonatations secondaires de résidus de valorisation

des métaux dans les roches basiques, ou «recarbonatation» des cendres..., > génie géologique proposant les volumes considérables du sous-sol non seulement en stockage mais aussi en réacteurs susceptibles de tirer bon profit de l'énergie (thermique ou chimique) des roches, biomasse du milieu souterrain pouvant s'imaginer mis en culture...

Ainsi, même pour des industries parfois perçues à tort comme traditionnelles, les barrières de l'utopie technologique reculeront vite devant l'ampleur des enjeux du changement climatique. ■

### François Clin

DIRECTEUR ADJOINT - DÉPARTEMENT ÉNERGIE, TRANSPORTS, ENVIRONNEMENT ET RESSOURCES NATURELLES  
 MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET À LA RECHERCHE



**Premier site mondial de stockage de CO<sub>2</sub> en aquifère profond à Sleipner, en mer du Nord (Norvège). Le gaz naturel est extrait à 2 500 m de profondeur depuis la plate-forme de forage et fait l'objet d'une séparation du CO<sub>2</sub> qu'il contient sur la plate-forme de traitement du gaz (Sleipner T).**

**Le CO<sub>2</sub> est alors injecté dans l'aquifère sableux d'Utsira situé à 1 000 m de profondeur.**

*The world's first site of CO<sub>2</sub> storage in a deep saline aquifer, the Norwegian Sleipner site in the North Sea. The natural gas is tapped at a depth of 2500 m beneath the drilling platform and separated from CO<sub>2</sub> on the gas-processing platform (Sleipner T). The CO<sub>2</sub> is then injected into the sandy Utsira aquifer at a depth of 1 000 m.*

Source : Statoil

Le CO<sub>2</sub> doit être injecté au-delà de 800 m de profondeur afin d'atteindre les conditions de pression et de température qui déterminent son passage à l'état supercritique (plus de 31 °C et 73 bars). Dans cet état, le CO<sub>2</sub> est dense et occupe beaucoup moins de volume qu'à l'état gazeux. Il est donc stocké essentiellement sous forme dense dans la porosité de la roche ou adsorbé sur le charbon. Pour garantir l'étanchéité du stockage, il faut s'assurer de la présence, au-dessus de la roche réservoir, d'une couche écran imperméable composée d'argiles ou de sels empêchant toute remontée du CO<sub>2</sub> vers la surface. Au cours du temps, une partie du CO<sub>2</sub> peut se dissoudre dans les eaux interstitielles et entraîner des réactions géochimiques avec les minéraux des roches. Ces processus, bien que lents, engendrent un piégeage de CO<sub>2</sub> sous forme dissoute, et même sous forme minérale si les conditions sont propices à la formation de minéraux carbonatés. Cela accroît la capacité du stockage et sa sécurité. Toutefois il faut vérifier que ces réactions géochimiques n'aient pas de conséquences géomécaniques indésirables.

## ► L'IMPLICATION DE LA FRANCE



La France joue en Europe un rôle important dans la recherche sur la capture et le stockage du CO<sub>2</sub>, et ceci depuis le premier projet européen "The underground disposal of carbon dioxide" (Joule II Project 1993-1995) qui a permis de démontrer la préfaisabilité de cette technologie et auquel le BRGM a participé. Depuis plus de dix ans, des équipes françaises participent ainsi à la plupart des projets européens et à certains projets internationaux, en particulier ceux liés aux premières applications industrielles (Sleipner, Weyburn). Le

BRGM, l'IFP et quelques industriels (Gaz de France, Alstom, Total, Air Liquide, Schlumberger) sont membres de CO<sub>2</sub>Net, réseau thématique européen sur la capture et le stockage de CO<sub>2</sub>. Le BRGM et l'IFP font aussi partie de CO<sub>2</sub>GeoNet, réseau d'excellence sur le stockage géologique de CO<sub>2</sub> qui a pour but de favoriser l'intégration et la coordination de 13 instituts de recherche européens dont l'expertise est reconnue au niveau international.

A l'échelle nationale, les efforts ont commencé à se structurer à partir de 2001. Le Club CO<sub>2</sub> est né en 2002 à l'initiative de l'ADEME, avec l'appui de l'IFP et du BRGM qui assurent son

secrétariat. Réunissant les acteurs majeurs du monde industriel et de la recherche concernés par la capture et le stockage du CO<sub>2</sub>, il répond à la nécessité de mieux fédérer les actions nationales, tout en leur donnant une meilleure visibilité. La France participe au programme de l'Agence Internationale de l'Energie sur la réduction des gaz à effet de serre (IEA GHG). Elle est également membre du CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum), un forum intergouvernemental créé sur initiative américaine pour promouvoir les technologies performantes et économes de capture, transport et stockage du CO<sub>2</sub>. ■



## CO<sub>2</sub> capture and geological storage

The carbon dioxide given off during the intensive exploitation of fossil energy since the industrial revolution is the main culprit for global warming. The temperature of planet Earth could rise by 1.4 to 5.8 degrees during the 21<sup>st</sup> Century. It is thus imperative that we reduce our greenhouse gas emissions if major disasters are to be averted.

There are no miracle solutions to be had to win this battle, only an assortment of channels to explore that call upon precautionary and treatment measures: energy savings, renewable energy, clean transport, the fight against deforestation, etc. In a context of booming world population, growing energy demands by developing countries, and in view of the unavoidable role that fossil fuels are yet to play over the coming decades, the capture and storage of CO<sub>2</sub> constitutes a vital approach if we are to succeed in cutting our worldwide emissions in half between now and 2050. Since year 2000, a true momentum has been developing on the international scene in support of finding technological solutions. Research programmes and industrial pilot projects are proliferating the world over. Their aim is to overcome the economic and technical stakes associated respectively with CO<sub>2</sub> capture and CO<sub>2</sub> storage in geological formations, thus guaranteeing the efficiency and security of this technology over centuries to come. Such technologies could begin to unfold from year 2010.

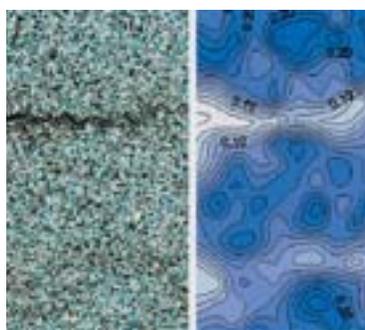
“ Les gisements naturels de CO<sub>2</sub> qui existent dans le sous-sol de nombreux pays nous montrent que les formations géologiques peuvent stocker efficacement du CO<sub>2</sub> pur pendant des milliers et millions d’années. ”

Le stockage du gaz carbonique est un domaine bénéficiant déjà d’acquis technologiques et scientifiques importants, même s’il reste à opérer un transfert d’échelle pour garantir la sécurité du stockage sur de grandes surfaces et sur le long terme.

Des expériences pionnières de stockage de CO<sub>2</sub> de taille industrielle ont vu le jour ces dernières années : Sleipner en aquifère profond offshore en Norvège (1 Mt CO<sub>2</sub> par an depuis 1996), Weyburn en réservoir pétrolier onshore au Canada (1,8 Mt CO<sub>2</sub> par an depuis 2000), In Salah en aquifère profond onshore en Algérie (1 Mt CO<sub>2</sub> par an depuis 2004). Les gisements naturels de CO<sub>2</sub> qui existent dans le sous-sol de nombreux pays nous montrent que les formations géologiques peuvent stocker efficacement du CO<sub>2</sub> pur pendant des milliers et millions d’années. Le gisement de Montmiral dans la Drôme est étudié par le BRGM et les chercheurs européens pour comprendre le comportement à long terme du CO<sub>2</sub> dans le sous-sol. Les coûts du stockage sont faibles ramenés à la tonne de CO<sub>2</sub> : de 1 à 10 euros par tonne de CO<sub>2</sub>, soit actuellement 1 à 15 % du coût total, de la chaîne capture-transport - stockage.

## Une mobilisation internationale

Depuis l’année 2000, une dynamique s’est enclenchée au niveau international en faveur de la capture et du stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Les projets de recherche et les pilotes industriels se multiplient dans le monde (Europe, Australie, Canada, États-Unis, Japon). Ils ont pour but de relever les enjeux économiques de la capture et les enjeux techniques du stockage, c’est-à-dire de garantir son efficacité et sa sécurité pendant plusieurs siècles. Les aspects juridiques et réglementaires sont à l’étude. La communication avec le public a été engagée. Le rapport spécial du GIEC (Voir J. Varet, ce numéro, p. 72 à 76) sur la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> paru fin 2005 va permettre une prise en compte de la technologie au niveau politique dans le cadre de la Convention Cadre sur les changements climatiques des Nations-Unies. Des incitations économiques sont en train de voir le jour par le biais du système européen d’échange de quotas d’émission de CO<sub>2</sub>, qui a démarré en janvier 2005, puis du marché international prévu par le Protocole de Kyoto à l’horizon 2008. Grâce aux efforts de R&D et de standardisation, le coût moyen actuel de la chaîne capture-transport-stockage devrait diminuer, passant de 60 euros la tonne de CO<sub>2</sub> évitée, à 15 euros. Progressivement, un consensus à l’échelle planétaire se fait jour autour de la nécessité de mettre en œuvre le plus rapidement possible la filière de capture et de stockage du dioxyde de carbone. Elle pourrait se déployer à partir de 2010, recours indispensable en complément à d’autres moyens si l’on veut avoir divisé par deux par rapport à leur niveau de 1990 en 2050 les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> et espérer ainsi écarter la menace d’un bouleversement climatique de grande ampleur dont les conséquences pourraient être catastrophiques pour les populations. ■



▲  
**Carte de répartition de la porosité à l’échelle centrimétrique dans une lame mince de grès.**  
 (Sur la photo de gauche, la porosité apparaît en bleu).  
 Map of porosity distribution at cm-scale and the corresponding sandstone thin section.  
 (On the left-hand photo, porosity is shown in blue).

© CO<sub>2</sub> capture project

Ethiopia launched a long-term geothermal exploration undertaking in 1969. Over the years, a good inventory of the potential target areas has been built up and about 16 geothermal prospects are judged as having potential for electricity generation. Considering the shortage of modern energy supplies in the country and the climate change issue due to greenhouse emissions, there is a need to develop geothermal energy in Ethiopia in order to (i) help substitute imported fossil fuel, (ii) provide a major backup to an uncertain hydropower supply, (iii) serve the arid and semi-arid areas of the country where hydropower is unavailable and, finally, (iv) contribute to the UNFCCC effort to reduce global warming.

**Shallow well of the Tendaho geothermal field.**  
*Puit superficiel du champ géothermique de Tendaho.*

© Geological Survey of Ethiopia

# Geothermal exploration and development in Ethiopia



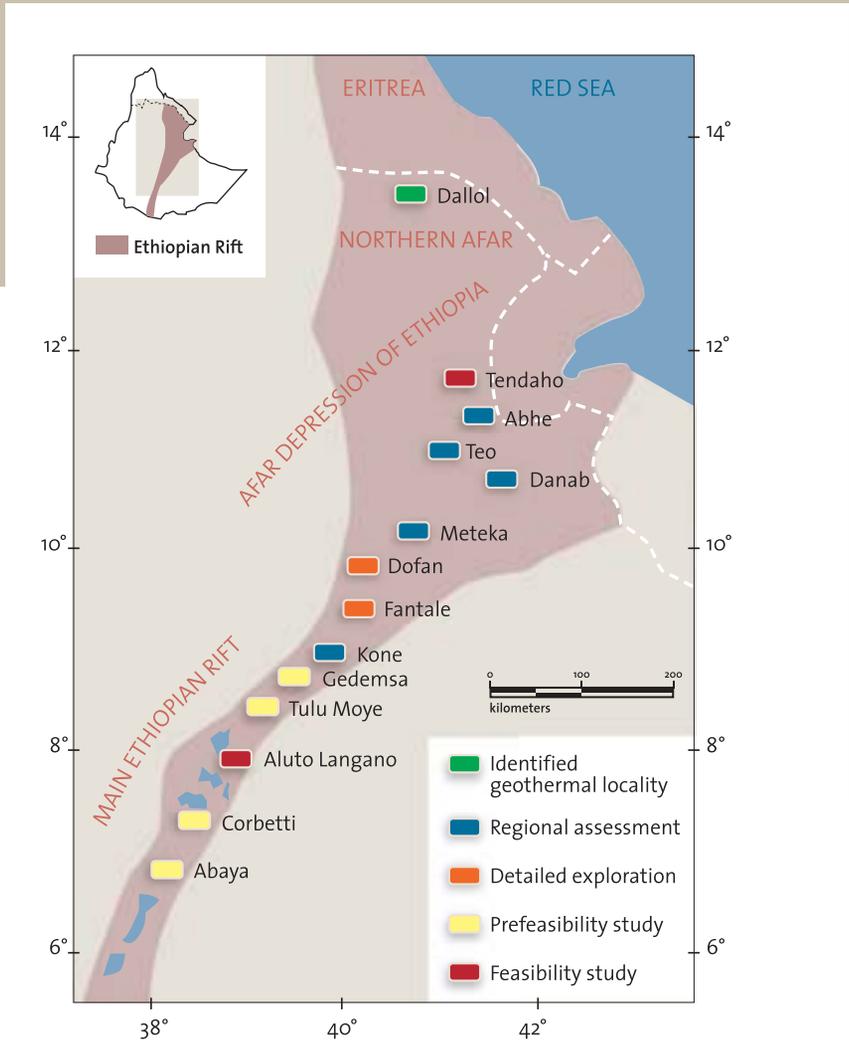
**Meseret Teklemariam**

HEAD OF THE HYDROGEOLOGY,  
 ENGINEERING GEOLOGY AND  
 GEOTHERMAL DEPARTMENT  
 GEOLOGICAL SURVEY OF ETHIOPIA  
 hydrogeology@ethio.net.et

Energy is an important element in Ethiopia's development strategy, because it could become a source of foreign exchange and is a catalyst for industrial progress. Although Ethiopia has a diversity of energy sources (hydro, geothermal, solar, natural gas, etc.), it still relies on imported petroleum and petroleum products.

Energy consumption in Ethiopia comprises about 1% electricity, about 5.4% hydrocarbon fuels, with traditional biomass fuels making up the balance. Most petroleum products are consumed in the transport sector and in view of the low availability of electricity, household energy is primarily supplied by biomass fuels (charcoal, firewood and dung). It is estimated that 39.4 million tons of fuel wood and 7.6 million tons of agri-residue and animal waste are used for fuel annually. Fuel wood use has contributed to environmental degradation (indoor pollution, deforestation, soil erosion, etc.). The use of crop residues and animal waste for fuel is at the expense of soil fertility and contributes to decreasing farm yields.

**Fig. 1: Location map of the geothermal prospect areas within the Ethiopian Rift Valley.**  
 Fig. 1 : Plan de situation des zones de prospection géothermique dans la Rift Valley éthiopienne.  
 Source : Geological Survey of Ethiopia



Considering the shortage of modern energy supplies in the country and the climate change issue due to greenhouse emissions, there is a need to develop geothermal energy in Ethiopia to serve as a source of reliable base load power generation to increase its hydro-power generation, which relies on highly seasonal fluctuations. The diversification of energy sources is essential in order to ensure a sustainable energy supply. The development of geothermal power would (i) help substitute imported fossil fuel; (ii) provide a major backup to an uncertain hydropower supply; (iii) serve the arid and semi-arid areas of the country where hydropower is unavailable and, finally, (iv) contribute to the UNFCCC effort to reduce global warming.

### Geothermal resources of Ethiopia

Ethiopia is among the few countries in Africa with a significant amount of geothermal resources. These resources are found scattered throughout the Ethiopian Rift valley and in the Afar Depression, which are both part of the Great East African Rift System. The Ethiopian rift extends from the Ethiopia-Kenya border to the Red Sea in a NNE direction for over 1 000 km within Ethiopia, and covers an area of 150,000 km<sup>2</sup> (Fig. 1). Based on the results of the investigations, Ethiopia could possibly generate more than 1000 MWe of electric power from geothermal resources alone. This is substantially in excess of its annual requirement of around 780 MWe from all energy sources for the current Inter connected and Self Contained Systems.

Ethiopia launched a long-term geothermal exploration undertaking in 1969. Over the years, a good inventory of the potential target areas has been built up and a number of the more important sites have been explored. About 16 geothermal prospects are judged as having potential for electricity generation. A much larger number are capable of being developed for applications in agriculture, agro-industry etc.

Exploration work peaked during the early to mid-1980s when exploration drilling was carried out at the Aluto-Langano geothermal field. During the early 1990s, exploration drilling was also carried out at Tendaho.

The identified “geothermal prospect areas” are widespread throughout the whole Ethiopian rift valley. Prominent among the geothermal prospect areas are (Fig. 1):

- (i) Lakes District**  
Aluto-Langano, Corbetti, and Abaya;
- (ii) Southern Afar**  
Tulu-Moye, Gedemsa, Dofan, Fantale, Meteka, Teo, Danab;
- (iii) Northern Afar**  
Tendaho and Dallol (Danakil Depression).

These geothermal prospect areas are at different levels of study; the Aluto Langano (Lakes District) and Tendaho geothermal fields (Northern Afar) are at an advanced exploration stage, including deep exploratory wells. Other geothermal prospect areas have been subjected to detailed geoscientific investigations, including the drilling of shallow temperature gradient wells. A number of prospects are at reconnaissance level. The data from these prospects are outlined below.

*“Ethiopia could possibly generate more than 1000 MWe of electric power from geothermal resources alone.”*

**The more advanced prospects, including exploration drilling**

Only two prospect areas have been subjected to exploration drilling to date.

***The Aluto-Langano geothermal field***

The Aluto-Langano geothermal field is located on the floor of the Ethiopian Rift Valley about 200 km south east of Addis Ababa (Fig. 1). Eight deep exploratory wells were drilled to a maximum depth of 2500 m between 1981 and 1985, of which four are potentially productive. The maximum reservoir temperature encountered in the productive wells is about 350°C.

A 7.3 MW pilot geothermal plant was installed in 1999 on the basis of the exploration wells that had been drilled. As mentioned earlier, the plant was not fully operational mainly due to technical limitations in appropriate field and plant management skills.

In 2005, the Ethiopian Electric Power Corporation (EEPCo) sought international bids for problem identification and bringing the plant back into operation. A number of companies submitted bids and Geothermal Development Associates (GDA), an American firm, was awarded the contract. The work is to begin shortly.

***The Tendaho geothermal field***

Geothermal exploration was carried out in the Tendaho area with economic and technical support from Italy between 1979 and 1980. Between 1993 and 1998, three deep (2100 m maximum) and three shallow (500 m) exploration wells were drilled and yielded a temperature of over 270°C.

**Prospects where detailed investigations have been carried out**

Over the years, a number of prospects have been subjected to surface investigations: geology, geochemistry and geophysics, including drilling of shallow temperature-gradient (TG) wells.

***The Corbetti geothermal prospect area***

The Corbetti geothermal prospect area (Fig. 1) is located about 250 km south of Addis Ababa. Corbetti is a silicic volcano system within a 12-km-wide caldera that contains widespread thermal activity, such as fumaroles and steam vents. Detailed geological, geochemical and geophysical investigations conducted in the Corbetti area indicate the presence of potential geothermal reservoirs with temperatures exceeding 250°C. Eight temperature-gradient wells have been drilled to depths ranging from 93-178 m (Kebede, 1986). A maximum temperature of 94°C was recorded.

“Detailed geological, geochemical and geophysical investigations conducted in the Corbetti area indicate the presence of potential geothermal reservoirs with temperatures exceeding 250°C.”

No further work has been carried out since. The data show the probable existence of a deep reservoir with temperatures exceeding 250°C.

***The Abaya geothermal prospect area***

Abaya is located on the northwest shore of Lake Abaya, about 400 km south by road from Addis Ababa. The Abaya prospect exhibits a widespread thermal activity mainly characterized by hot springs, fumaroles and altered ground. Spring temperatures are as high as 96°C with a high flow rate. Integrated geoscientific studies (geology, geochemistry, and geophysics) have identified the existence of a potential geothermal reservoir with temperatures exceeding 260°C (Ayele *et al.*, 2002). Further geophysical studies, including drilling of shallow temperature-gradient wells, are recommended here.

***The Tulu Moye - Gedemsa geothermal prospect area***

The area is characterized by volcanism dating from Recent (0.8–0.08 Ma) to historical times. Volcanism involved the extrusion of per alkaline felsic lava associated with young tensional and transverse tectonic features dating from (0.1–1.2 Ma) with abundant silicic per alkaline volcanic products (Di Paola, 1976) in the Tulu Moye-Gedemsa prospect area (Fig. 1).



◀ **Fig. 2: Discharging well (LA-6) of the Aluto-Langano geothermal field. Total Depth = 2.5 km. Max. Temperature = 350°C.**  
 Fig. 2 : Puits de décharge (LA-6) du champ géothermique d'Aluto-Langano.  
 Profondeur totale = 2,5 km.  
 Température maximale = 350 °C.

© Geological Survey of Ethiopia



This suggests the existence of a deep-seated magma chamber with a long residence time. The area is highly affected by hydrothermal activity with the main hydrothermal manifestation being weak fumaroles, active steaming (60-80°C) and altered ground. The drawback of the hydrothermal manifestations is related to the relatively high altitude of the prospect area and the considerable depth to the groundwater table. During 1998-2000, integrated geological, geochemical and geophysical studies, including shallow temperature-gradient surveys (150-200 m), confirmed the existence of potential geothermal reservoirs with temperatures of about 200°C (Ayele *et al.*, 2002) and delineated target areas for further deep exploration wells.

This prospect area is located close to the Koka and Awash II and III hydroelectric power stations, the associated 230 and 132 KV substations and transmission lines.

### ***The Dofan geothermal prospect area***

Geological, geochemical, and geophysical investigations in the Dofan geothermal prospect (*Fig. 1*) show that the area is characterized by a complex volcanic edifice that erupted a considerable volume of pantelleritic lava from numerous eruptive centers between 0.5-0.2 Ma (*Cherinet and Gebreegziabhier, 1983*). The presence of several hydrothermal manifestations (fumaroles and hot springs) within the graben, together with an impervious cap, needs to be regarded with high priority for further detailed exploration and

development. Based on this approach and the estimated reservoir temperature of > 200°C (Teclu, 2002/2003), the Geological Survey of Ethiopia is carrying out detailed geological, geochemical and geophysical investigations in order to delineate and select target areas for deep exploration wells. The area is located about 40 km from the high-voltage substation in Awash town.

### ***The Fantale geothermal prospect area***

The Fantale geothermal prospect is characterized by recent summit caldera collapse, felsic lava extrusions on the caldera floor and widespread fumarolic activity, suggesting thereby the existence of a shallow magma chamber. Active tensional tectonics form fissures up to 2-m wide near the volcanic complex. Groundwater discharge to the system is assured by the proximity of the area to the western escarpment. The results of an integrated interpretation of previous data suggest that the area is potentially prospective for future detailed geothermal resource investigations. Therefore, due to the presence of an impervious cap rock, the western part of the prospect particularly deserves to be investigated during a more detailed geothermal exploration programme. In this view, the Survey has carried out detailed geological, geochemical and geophysical investigations in order to delineate and select target areas for deep exploration wells.

▲  
**Fig. 3: One of the shallow wells (TD-5) of the Tendaho geothermal field. Total depth = 516 m. Maximum temperature = 253°C.**  
*Fig. 3 : Un des puits superficiels (TD5) du champ géothermique de Tendaho.*  
*Profondeur totale = 516 m.*  
*Température maximale = 253 °C.*

© Geological Survey of Ethiopia

### Prospects at reconnaissance level

#### The Kone, Meteka, Danab, Teo and L. Abhe geothermal prospects

During the 1980s, reconnaissance geological, geochemical and geophysical investigations were conducted in these areas and revealed the existence of young volcanic features and active surface thermal manifestations. Meteka and Teo hold potential for the discovery of economically exploitable geothermal resources at high temperature and warrant detailed surface investigations, followed by exploratory drilling. Detailed exploration studies will be conducted in the near future to test the presence of economically exploitable geothermal resources.

#### Current geothermal activities and perspectives

The on-going geothermal activities of the Geological Survey of Ethiopia are: <sup>(i)</sup> Detailed geoscientific studies

(geophysics & geology) and monitoring (geochemistry and reservoir engineering) of the Tendaho geothermal field (Dubti); <sup>(ii)</sup> Report compilation of detailed geological mapping, geochemical and geophysical studies of the Southern Afar area (e.g. Dofan and Fantale, etc.); <sup>(iii)</sup> Assisting EEPCo in the rehabilitation programme of the Aluto geothermal pilot power plant.

#### Isotope geochemical studies in the Rift System

In order to acquire experience and knowledge in using isotope techniques for geothermal exploration and exploitation, the Geological Survey of Ethiopia started in 1993 a Technical Cooperation (TC) agreement, through the Ethiopian Science and Technology Commission (ESTC), with the International Atomic Energy Agency (IAEA). Since then, the TC projects of IAEA are helping Ethiopia develop its experience and knowledge through the training of local personnel, expert advice, and the provision of equipment.

### ► LA GÉOTHERMIE POUR LE CHAUFFAGE EN FRANCE - Jacques Varet

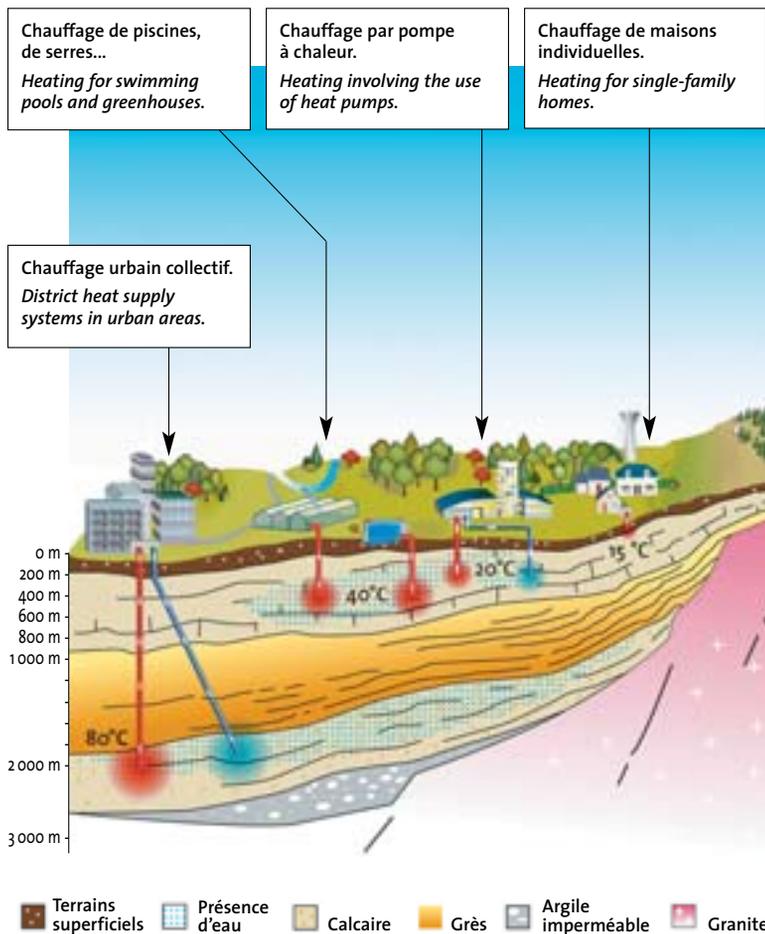
Outre les applications pour la production d'électricité, la géothermie peut contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les secteurs de l'habitat et du tertiaire, pour la production de chaleur (chauffage, eau chaude sanitaire)<sup>(1)</sup>.

Les technologies développées en France incluent diverses formes d'exploitation de la chaleur du sous-sol, à diverses profondeurs.

Dans les **bassins sédimentaires profonds**, comme le Bassin de Paris ou le Bassin aquitain, il est possible d'exploiter des réservoirs profonds pour la production d'énergie alimentant des réseaux de chaleur urbains (ressources de 70 à 90 °C, exploitées par doublet, alimentant des unités de 3 000 à 20 000 logements). Dans bien des régions, des **nappes plus superficielles** peuvent être exploitées, par forages couplés à des pompes à chaleur, pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire pour des maisons individuelles ou des petites installations collectives.

Partout ailleurs, la chaleur du **sous-sol superficiel** (12 °C) peut être exploitée, avec des pompes à chaleur et des capteurs horizontaux ou verticaux, pour le chauffage des maisons individuelles.

L'enjeu de ces technologies, en plein développement pour le neuf, concerne aussi l'habitat existant où la géothermie peut se substituer aux énergies fossiles, fuel domestique ou gaz naturel. ■



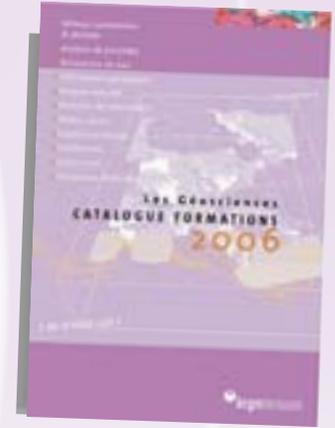
(1) Voir la plaquette La géothermie dans la collection « Les enjeux des géosciences » Coédition BRGM – ADEME, 2005.

# Se former aux Sciences de la Terre

## Quarante ans d'expérience dans le domaine du sol et du sous-sol

- Vous êtes acteurs et décideurs de l'environnement et de l'aménagement des territoires, services techniques de l'État et des Collectivités territoriales, entreprises, chambres consulaires, bureaux d'études et de contrôle, experts, maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre...
- Nous vous proposons des formations présentées sur catalogue dans des domaines très divers : sites et sols pollués, eau, aménagement durable et risques naturels, cartographie et connaissances géologiques, systèmes d'information numérique, géothermie, analyses et procédés en environnement, ressources minérales et après mine.  
(<http://formation.brgm.fr/>)
- Pour s'adapter au mieux à vos besoins, nous proposons des formations à la carte. Nous mettons en place chez vous une formation spécifique, " sur mesure ", ajustée à un besoin précis.

Contactez nous : [brgmformation@brgm.fr](mailto:brgmformation@brgm.fr)



Furthermore, water samples from the whole Ethiopian Rift Valley and its escarpments are being analyzed at the IAEA isotope hydrology laboratory. This has helped improve the infrastructure and also strengthened local capability to study geothermal resources using stable and radioactive isotopes.

### Future plans for geothermal resources

Future geothermal exploration and development programmes will take into consideration the logistic and socio-economic framework of each prospect. Therefore, each prospect is qualified with respect to the probability of having an economically viable geothermal resource. In addition to the Aluto-Langano and Tendaho geothermal fields, the following is a list of prospects in order of their level of exploration:

➤ **Detailed investigation (Completed):** Corbetti, Tulu-Moye, Abaya, Dofan and Fantale

**Reconnaissance:** Kone, Meteka, Danab, Teo and Abhe. In Ethiopia, local financing limitations exist due to the high investment required to carry out the pre-investment (reconnaissance and pre-feasibility studies) and capital-investment (geothermal exploration drilling, field development and plant construction) phases of geothermal resource development.

Ethiopia could generate a huge amount of energy from geothermal resources, which could supply both local consumption and export. However, an important constraint, as indicated above, is the lack of finance. On this point, the government is considering various options that could help develop the resource while reviewing the overall energy policy of the country. One option would be to invite private investors to participate in the sector. Another option, as was the case with the development of hydroelectric power, would be to seek loans and grants from international financial institutions.

In the above perspective, the government is planning to increase the country's power generation capacity by developing the identified geothermal resources in the prospect areas. Consequently, the government's plan for the next five years includes:

- rehabilitation of the Aluto-Langano geothermal pilot plant;
- work progress at Tendaho to bring it nearer to development;
- and completion of the detailed exploration works at two more geothermal prospects.



► **LA CENTRALE GÉOTHERMIQUE DE BOUILLANTE** (Guadeloupe)

La centrale de Bouillante, en Guadeloupe, est la seule exploitation géothermique fournissant de l'électricité en France. Elle est composée de deux unités. La première a été construite par EDF dans les années 1980, après les travaux d'exploration menés par le BRGM et la mise en production du gisement par la société EURAFREP. Elle a commencé à produire de l'électricité en 1986. D'une puissance nominale de 5 MW, sa production est tombée à 3 MW et elle a été arrêtée en 1992. Elle a été reprise en 1995 par la société Géothermie Bouillante constituée à cet effet et ayant comme actionnaires le groupe BRGM à 60 % et le groupe EDF à 40 %. Certes déjà vieille, elle a été réhabilitée par CFG et produit à nouveau depuis 1996 à plus de 4 MW.

Géothermie Bouillante a construit une deuxième unité de 11 MW de 2002 à 2004, de nouveaux puits ayant été forés en 2001 à l'extérieur de la centrale. Trois puits sont productifs et alimentent maintenant les deux unités

pour une puissance globale de plus de 15 MW. La nouvelle unité a commencé à fonctionner à l'essai en octobre 2004. Elle produit en continu à sa puissance nominale depuis janvier 2005.

L'exploitation de l'ensemble, puits, conduite diphasique et centrale électrique, est sous-traitée à CFG depuis 1996. Au total la centrale géothermique livre au réseau EDF de la Guadeloupe plus de 14 MW nets, en base, c'est-à-dire qu'elle fournit environ 110 000 MWh par an, soit 8 à 9 % des besoins en électricité de l'île. Son coût de production est nettement inférieur au coût des moyens de production conventionnels alimentés au fuel.

Les géologues du BRGM ont déterminé, pour le compte de Géothermie Bouillante, d'autres sites à potentiel géothermique en Guadeloupe. Ainsi un nouveau projet, a priori plus important, est envisagé au nord de la ville de Bouillante. ■

▲ **Vue aérienne de la centrale de Bouillante.**

*Aerial view of the Bouillante plant.*

© BRGM im@gé

The objective of the ARGeo project is to promote geothermal resources by removing the risks associated with resource exploration and development and by reducing the cost of power development project implementation.

Towards the objective of developing this energy resource, a number of multi and bilateral agreements are underway. Amongst these, the African Rift Geothermal Development Facility project (ARGeo), a 10-year Eastern Africa Regional Geothermal programme financially supported by the Global Environment Facility of the World Bank and the German Development Bank (KfW), is a critical component. The objective of the project is to promote geothermal resources by removing the risks associated with resource exploration and development and by reducing the cost of power development project implementation<sup>(1)</sup>. A total of US\$250 million in project finance will be allocated over 10 years.

The countries targeted by the project are Kenya, Ethiopia, Djibouti, Tanzania, Uganda, Eritrea, Malawi, Rwanda and Zambia.

For Ethiopia, the Tendaho geothermal prospect is being considered for further assistance in resource assessment and development.

ARGeo will benefit Ethiopia by <sup>(i)</sup> making available the financial resources and know-how transfer required to bring geothermal work to the resource utilization stage, and financing cost-effective power development, and <sup>(ii)</sup> unfolding the way for regional collaboration in the spirit of the objectives of the African Union, NEPAD and our other regional affiliations.

Such support for geothermal resource development in Ethiopia will also contribute to realizing the full potential of the resource by enabling its use as an energy supply in a wide range of agro-industrial activities and as a means of microclimate control in high-value horticulture, floriculture and animal breeding and growing, which are our priority areas of development. ■

<sup>(1)</sup> The project's implementation agency is the United Nations Environmental Programme (UNEP). Its executing agencies are UNEP and Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW). Other institutions that are involved in development financing will also contribute resources, including the Global Environment Fund (GEF) of the World Bank.



### Exploration et développement de la géothermie en Éthiopie

*L'Éthiopie a entrepris en 1969 un projet d'exploration géothermique de longue durée. L'étude a mis en évidence l'existence de ressources géothermiques de basse comme de haute enthalpie au sein de la Rift Valley éthiopienne et de la dépression de l'Afar, faisant toutes deux partie du grand système de rifts de l'Afrique orientale.*

*A partir de 1969, un inventaire des zones à potentiel géothermique a donc été dressé, et plusieurs des sites les plus importants ont ainsi pu être explorés. Environ seize zones prospectées sont considérées comme prometteuses quant à la production d'électricité. Et un nombre bien plus important seraient probablement exploitables pour des applications en agriculture, agro-industrie, etc. L'effort de prospection a atteint son apogée durant la première moitié des années 80, quand des forages d'exploration ont été pratiqués dans le champ géothermique d'Aluto-Langano. Huit puits profonds d'exploration ont été forés, dont quatre potentiellement productifs. Au début des années 90, des sondages ont également été effectués sur le site de Tendaho, où trois puits profonds et trois puits superficiels ont été forés.*

*Ces puits ont permis d'établir l'existence de hautes températures et de fluide sous pression. Dans le domaine de l'exploitation de cette ressource, une nouvelle ère a démarré en 1998 avec l'installation d'une station pilote à 7,2 MWe nets, sur le site d'Aluto-Langano. Le manque de compétence appropriée n'a pas permis une gestion optimale de la ressource ni de la centrale, cependant les problèmes de fonctionnement qui en ont résulté sont en cours de résolution. Grâce à l'appui d'une compagnie étrangère, on peut s'attendre à ce que la centrale fonctionne de façon plus fiable, en permettant un transfert d'expérience indispensable pour l'exploitation de cette importante ressource en Éthiopie. Dans le champ géothermique de Tendaho, un essai de production et une étude de faisabilité en cours indiqueraient que sur six puits productifs dans ce champ géothermique quatre seraient en mesure d'alimenter une station pilote de 5 MWe. Par ailleurs, des études géologiques, géochimiques et géophysiques détaillées ont été menées depuis vingt ans dans les zones géothermiques de Corbetti, de Tulu-Gedemsa et d'Abaya.*

La perspective du changement climatique expose le bâtiment à un double défi : adapter le parc bâti et à bâtir aux conséquences de l'aggravation possible des risques climatiques, et diminuer sa contribution (importante) aux émissions de gaz à effet de serre. Les actions menées sur ces deux fronts devront être cohérentes pour que leurs effets ne s'opposent pas mais se développent au contraire en synergie.

**Cette architecture sera-t-elle possible demain (Grand Palais – Paris) ?**  
*Will this type of architecture -the Grand Palais in Paris- still be possible tomorrow?*

© CSTB

# Changement climatique : un double défi pour le bâtiment



## Marc Weckstein

INGÉNIEUR CIVIL DES PONTS ET CHAUSSÉES  
CHARGÉ DES ASPECTS ÉNERGÉTIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX, DIRECTION RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT, CSTB  
weckstein@cstb.fr

## Jean-Luc Salagnac

INGÉNIEUR DE L'ÉCOLE CENTRALE PARIS  
CHARGÉ DU PROJET DE RECHERCHE «IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE PARC BÂTI», CSTB  
salagnac@cstb.fr

Dans une société industrielle développée comme la France, on considère que chacun passe en moyenne 22 heures par jour dans un espace bâti clos ou semi-clos, et ce dans un environnement de plus en plus urbanisé. Par ailleurs, en France le secteur résidentiel et tertiaire est le **premier consommateur d'énergie finale** avec 43,5 % de la consommation en 2004<sup>(1)</sup> ; ce secteur est également, après celui des transports, le **second en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>** avec 24,3 % des émissions totales de CO<sub>2</sub><sup>(2)</sup> en 2004.

Ces quelques données font immédiatement comprendre que face au changement climatique, le bâtiment va devoir faire face à un double défi qui, pour être relevé, mobilisera des actions en matière à la fois d'adaptation et d'atténuation :

> mettre au point des dispositifs de tous ordres qui permettront au parc bâti et plus largement à l'environnement urbain de mieux résister aux conséquences du changement

(1) Source : statistiques énergétiques France (mars 2005) – Observatoire de l'énergie, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, Direction générale de l'Energie et des Matières Premières.

(2) Source : inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France (février 2005) – séries sectorielles et analyses étendues – CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique).

climatique, en particulier à l'augmentation éventuelle de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques (tempêtes, inondations, sécheresses...) - il s'agira ici d'actions « d'adaptation » ;

> engager dès maintenant des actions visant à réduire de façon drastique sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre, et donc sa consommation d'énergie, de manière à provoquer des effets durables à long terme - il s'agira ici d'actions « d'atténuation ».

## Construction et climat

Par nature, et depuis toujours, une construction (bâtiment, pont, réseau enterré, route...) est soumise aux agents climatiques. La fonction de base d'un bâtiment est en particulier de protéger les occupants et les biens de ces agents : protection contre le froid et le chaud, contre la pluie et la neige, contre le vent...

Afin de limiter les impacts de ces aléas naturels, des savoir-faire portant sur les « bonnes manières de construire » ont été élaborés au fil du temps et transmis de génération en génération, et adaptés selon les régions en fonction des aléas dominants, des matériaux disponibles, du relief, des habitudes...

Ces préoccupations ancestrales ne font l'objet d'une démarche scientifique et technique que depuis relativement peu de temps. La deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle marque un moment important avec l'apparition de réglementations techniques spécifiques à quelques agents climatiques (règles « neige et vent » en 1946 par exemple).

Les phénomènes climatiques varient dans le temps et d'une région à une autre. La prise en compte de mesures techniques nécessite de caractériser l'intensité des aléas dans chaque région. La réglementation s'accompagne donc d'une cartographie précisant les intensités à prendre en compte pour des projets de construction. On dispose à ce jour de cartes relatives aux températures, aux vents, à la nature du sol...

Les règles techniques évoluent du fait des avancées dans la connaissance des phénomènes. Les moyens d'observation d'une part, les progrès dans la modélisation du comportement des structures soumises à des sollicitations climatiques d'autre part participent de ces avancées. Par ailleurs la formulation de ces règles doit être faite de manière à ce qu'elles soient utilisables « normalement » par les professionnels.

Les zonages, notamment au niveau local, sont également affinés au cours du temps pour tenir compte de l'évolution du tissu, de progrès faits dans la connaissance du sous-sol...

“ Face au changement climatique, le bâtiment va devoir faire face à un double défi qui mobilisera des actions en matière à la fois d'adaptation et d'atténuation. ”

## Bâtiment et adaptation au changement climatique

Se poser la question de l'impact du changement climatique sur le cadre bâti conduit à interroger les deux dimensions évoquées : technique et géographique.

Concernant cette dernière dimension, surgit immédiatement une difficulté liée à l'insuffisante précision des prévisions « régionales » actuelles des évolutions du climat. L'échelle de description de ces évolutions probables n'est pas celle des projets de construction. Il est encore hasardeux de transposer les tendances globales résultant de simulation du climat à des zones intéressant les constructeurs.

La finesse de prévision ne peut que s'améliorer, appuyée par des observations croisées de multiples paramètres liés au climat (déplacement des zones de végétation, élévation du niveau de la mer, changement des dates de récolte, mouvement de populations animales...), ce qui plaide pour une approche pluridisciplinaire de ces questions.

Compte tenu de ce contexte, une posture réaliste en ce début du XXI<sup>ème</sup> siècle est d'explorer des scénarios d'adaptation du cadre bâti en cas de modifications des valeurs de paramètres climatiques et d'apparition de phénomènes liés à ces évolutions.

Ces scénarios doivent prendre en compte à la fois les futures constructions et les constructions existantes puisqu'une des caractéristiques du secteur de la construction est de produire des biens ayant une (très) longue durée de vie.

“ La prise en compte de mesures techniques nécessite de caractériser l'intensité des aléas dans chaque région. ”

Cet exercice prospectif est utilement éclairé par les évènements vécus au tournant du siècle qu'il s'agisse de la tempête de décembre 1999, des inondations récurrentes ces dernières années, de la recrudescence des désordres de fondation dus aux mouvements de sols argileux ou de la canicule de 2003.

Pour ce qui est des tempêtes, les travaux du programme IMFREX (IMpact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes Extrêmes de vent, de température et de précipitations : <http://medias.dsi.cnrs.fr/IMFREX/bienvenue.jsp>) associant de nombreux laboratoires parmi lesquels le CSTB, ne laissent pas présager de modification significative de variations des vitesses extrêmes de période de retour cinquantennale à l'horizon 2100 par rapport à la situation actuelle. Ceci n'exclut cependant pas l'existence d'épisodes violents comme celui de 1999 [Photo 1]. A la lumière de l'analyse de cet évènement, il est ressorti que le cadre réglementaire en vigueur était bien dimensionné et qu'un facteur explicatif des désordres constatés était une application défectueuse des règles soit au stade de la conception des ouvrages, soit au stade de la réalisation [Photo 2].

Le cas des inondations<sup>(3)</sup> relève déjà des règlements d'urbanisme couplés à l'élaboration progressive des Plans de Prévention des Risques (PPR) prévus par la loi. Les règles techniques ont bien entendu leur importance mais il existe peu de règles relatives à la prise en compte de cet aléa si ce n'est l'effet de la poussée d'Archimède sur certains ouvrages. Le champ de l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments à l'inondation est exploré depuis seulement quelques années. Concernant l'adaptation des bâtiments existants, des clarifications sont à opérer sur des notions

**Photo 1 : Effets de la tempête de 1999.**  
Photo 1: Effects of the 1999 storm.

© CSTB



**Photo 2 : Comment protéger le patrimoine architectural ?**  
Photo 2: How can we protect our architectural heritage?

© CSTB

actuellement imprécises comme celle de « matériaux peu sensibles ». Pour les bâtiments futurs, on ne compte plus les projets de bâtiments « flottants » destinés à permettre de « construire en zone inondable ».

Le cas des argiles gonflantes<sup>(4)</sup> est encore différent. Les manifestations massives du phénomène (déstabilisation des structures par suite du retrait de certaines argiles au cours d'un dessèchement intense et de leur gonflement lors d'une réhydratation soutenue) en 1976 ont alors alerté sur son ampleur et sur l'importance de ses conséquences. Trente ans plus tard, les connaissances tant sur les techniques de fondations adaptées à ces terrains que la cartographie des zones à risques sont de nature à rendre potentiellement exceptionnel ce genre d'incident.

Autant les trois sujets évoqués brièvement jusqu'ici (vent, inondation, argile gonflante) sont relativement indépendants du mode d'occupation, autant l'examen de l'adaptation à une variation de température ambiante extérieure est intimement lié au comportement des occupants. Parmi les mesures d'adaptation spontanées des personnes gênées par la canicule de 2003, l'installation de climatiseurs individuels a parfois été fustigée au motif que ces décisions étaient de nature à augmenter le phénomène que l'on entendait combattre.

Ce n'est pas faux sur le principe mais il faut bien prendre conscience que certains locaux sont définitivement mal orientés par rapport aux flux solaires et qu'il est impossible de les ventiler correctement. L'adaptation à ces situations constitue un sujet de réflexion à part entière s'il s'avère que la situation exceptionnelle de 2003 devienne une situation « normale » au cours du siècle.

“ Une posture réaliste en ce début du XXI<sup>ème</sup> siècle est d'explorer des scénarios d'adaptation du cadre bâti en cas de modifications des valeurs de paramètres climatiques et d'apparition de phénomènes liés à ces évolutions. ”

(3) cf. article de J.L. Pinault – Ce numéro, p. 56 à 61.  
(4) cf. article de M. Vincent – Ce numéro, p. 50 à 55).

## Vers des bâtiments à énergie « positive »

Le Plan Climat, adopté en 2004 par le gouvernement, rappelle que les travaux du GIEC (Groupe Intergouvernemental pour l'Évolution du Climat) concluent à la nécessité de réduire de moitié les émissions mondiales d'ici 2050, soit par 4 ou 5 celles des pays industrialisés dans leur ensemble, et donc de la France.

Pour le bâtiment, la satisfaction de cette exigence aujourd'hui désignée par le vocable «FACTEUR 4» requiert un choix judicieux d'objectifs ambitieux et réalistes concernant les parcs existants et les prochaines générations de constructions neuves d'une part, et d'autre part une démarche de Recherche et Développement visant de véritables ruptures.

En effet, il faut garder à l'esprit que le parc de résidences principales est aujourd'hui d'environ 30 millions de logements et qu'il se construit environ 300 000 logements neufs par an, c'est dire qu'en ordre de grandeur la moitié du parc de 2050 existe aujourd'hui ! De plus les caractéristiques techniques, architecturales, d'occupation et de gestion des parcs existants limitent leurs marges d'améliorations énergétiques envisageables dans des conditions technico-économiques réalistes<sup>(5)</sup>. Une piste prometteuse est la transposition pour l'amélioration du parc existant des «meilleures technologies disponibles» utilisées pour la construction neuve, cette transposition devant prendre en compte les processus spécifiques à chaque segment de ce parc pour la décision d'engager des travaux de modernisation. Dans le cas d'un immeuble collectif en copropriété, il serait indispensable de proposer des dispositifs qui pourraient être mis en œuvre dans un logement indépendamment du reste de l'immeuble - par exemple, «kits» de rénovation énergétique associés à des travaux d'aménagement intérieur.

Dans ces conditions, il est impératif, pour obtenir cette réduction par un facteur 4 en moyenne sur le parc de 2050, de viser une véritable révolution pour l'horizon long terme (2030-2050) avec la mise au point puis la banalisation de «bâtiments à énergie positive» [Photo 3], c'est-à-dire de bâtiments lieux de production décentralisée d'énergie utilisant les EnR (énergies nouvelles et renouvelables) – vent, soleil, géothermie superficielle<sup>(6)</sup>, biomasse – assurant leurs propres consommations et restituant au réseau l'énergie non consommée. Cette perspective, dont on mesure qu'elle est très ambitieuse et constituerait

“ On devra associer à la fois une meilleure isolation des bâtiments, le stockage de l'énergie, l'optimisation des apports gratuits, et la production décentralisée avec des EnR (énergies nouvelles et renouvelables) pour un bâtiment ou un ensemble de bâtiments. ”

une véritable rupture, repose sur la combinaison d'une réduction drastique des besoins en énergie, d'équipements très performants sur le plan énergétique et d'une généralisation du recours aux EnR.

C'est pourquoi on devra associer à la fois une meilleure isolation des bâtiments (matériaux super-isolants tels qu'isolants sous vide ou isolants nano-structurés), le stockage de l'énergie (stockage quotidien de la chaleur grâce à l'inertie de la construction et par exemple à des matériaux à changement de phase, stockage saisonnier de la chaleur, stockage de l'électricité produite localement), l'optimisation des apports gratuits (enveloppe active multi-fonctionnelle) et la production décentralisée avec des EnR pour un bâtiment ou un ensemble de bâtiments (cellules photovoltaïques à rendement et prix de revient améliorés, capteurs solaires hybrides, pompes à chaleur et réseaux de chaleur géothermiques, micro-cogénérateurs dont les piles à combustibles...).<sup>[1]</sup>

### Photo 3 : Mettre au point et réaliser des "bâtiments à énergie positive".

Photo 3: Design and construct buildings with positive energy.

© Sinergie/Nemec



(5) Ce rythme de renouvellement est plus élevé pour les bâtiments tertiaires mais le raisonnement reste valide.

(6) Voir encadré géothermie, p 90, ce numéro.

## ► ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LE PARC RÉSIDENTIEL ET TERTIAIRE

Depuis le premier choc pétrolier, on constate une augmentation significative de la consommation en énergie finale du parc résidentiel et tertiaire. Toutefois, cette augmentation de la consommation pour le parc résidentiel

et tertiaire doit être mise en perspective avec l'évolution de la taille du parc qui a connu également une croissance significative.

### Évolution de la consommation en énergie finale par secteur depuis 1973

(en millions de tonnes équivalent pétrole = Mtep)

SECTEUR	1973	1979	1985	1990	2000	2002	2003	2004
Sidérurgie	12,52	11,41	7,97	6,96	6,18	6,02	5,82	5,80
Industrie	35,49	35,91	29,70	31,54	33,05	32,66	31,61	31,92
<b>Résidentiel Tertiaire</b>	<b>56,22</b>	<b>56,94</b>	<b>54,01</b>	<b>59,28</b>	<b>66,89</b>	<b>70,68</b>	<b>69,59</b>	<b>69,80</b>
Agriculture	3,03	3,18	2,95	3,09	3,00	3,03	2,88	2,92
Transports	26,30	31,54	33,76	41,72	49,42	50,89	50,42	50,78

Source : Observatoire de l'énergie – Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie

### Évolution du parc de logements (en milliers de logements)

	1984	1985	1990	2000	2001	2002	2003
Résidences principales	20 541	20 799	22 129	24 778	25 097	25 419	25 747
individuel	11 325	11 515	12 500	13 939	14 105	14 276	14 449
collectif	9 216	9 284	9 629	10 839	10 992	11 143	11 298
Résidences secondaires	2 455	2 523	2 838	2 932	2 940	2 948	2 956
individuel	1 592	1 621	1 746	1 806	1 824	1 843	1 861
collectif	863	902	1 092	1 126	1 116	1 106	1 095
Logements vacants	1 915	1 921	1 942	2 011	1 984	1 956	1 927
individuel	1 000	1 003	1 005	918	918	917	916
collectif	915	918	937	1 093	1 066	1 039	1 011
<b>Ensemble</b>	<b>24 911</b>	<b>25 243</b>	<b>26 909</b>	<b>29 721</b>	<b>30 021</b>	<b>30 323</b>	<b>30 630</b>
individuel	13 917	14 139	15 251	16 663	16 847	17 035	17 226
collectif	10 994	11 104	11 658	13 058	13 174	13 287	13 404

Source : Compte du logement – Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer



## Climate change: a double challenge for the building trade

Faced with the perspective of climate change, the building trade is faced with a double challenge:

- > develop means that will enable buildings and the urban environment to better resist the consequences of climate change;
- > drastically reduce its contribution to greenhouse-gas emissions.

### Adapting buildings to climate change

Questioning the impact of climate change on the built-up environment leads to

investigating the technical and geographic dimensions. Concerning the latter dimension, it becomes immediately obvious that present-day "regional" predictions of climatic evolution are insufficiently accurate. In view of this context, a realistic position in this beginning of the 21<sup>st</sup> century is to explore the possibilities of adapting the built-up environment to modifications in the values of climatic parameters and to the occurrence of phenomena related to such modifications.

### Towards "positive-energy" buildings

The 2004 Climate Plan states the need of halving greenhouse-gas emissions by 2050, which means that the emissions of industrialized countries, including France, have to be reduced by a factor of 4 to 5. The challenge for the building sector thus is to reduce its emissions by a factor of 4. Satisfying this requirement asks for a judicious choice of ambitious and realistic objectives concerning existing and future constructions, as well as a Research and Development effort aiming at a break between the past and the present. Under these conditions and to obtain this reduction by a factor of 4, it will be necessary to aim for a true revolution in the long term (2030-2050) with the development and general adoption of "positive-energy" buildings, i.e. buildings that are decentralized energy-production sites that can reconstitute their energy surpluses to the power grid.

### Photo 4 : Inondations et urbanisation : quel compromis ?

Photo 4: What could be the compromise between flooding and urbanization?

© CSTB



Une seconde mutation est intervenue depuis les dernières décennies : alors que les consommations pour le chauffage représentaient de très loin le premier poste de consommation, les efforts réalisés depuis le premier choc pétrolier ont entraîné une décroissance significative des consommations unitaires pour le chauffage, une quasi-stabilité des consommations unitaires pour l'eau chaude sanitaire (malgré une augmentation sensible du confort). Dans le même temps, on a assisté à une hausse des consommations pour les usages spécifiques de l'électricité. Cette mutation conduit à porter une attention accrue à ces consommations considérées souvent comme annexes dans le secteur résidentiel. Il s'agira à la fois de l'éclairage avec une combinaison d'une architecture favorisant l'éclairage naturel et des équipements très performants (à terme utilisation des LED), des accessoires des systèmes de chauffage, d'eau chaude sanitaire et de ventilation (pompes, ventilateurs, etc).

Enfin, si jusqu'à présent le rapport entre l'énergie consommée par l'usage d'un bâtiment et l'énergie qui y est « incorporée »<sup>(7)</sup> permettait de considérer dans le bilan énergétique au long du cycle de vie du bâtiment l'énergie incorporée comme de second ordre, une réduction drastique des consommations pour l'usage du bâtiment va nécessairement conduire à des choix de partis constructifs prenant en compte la quantité d'énergie incorporée, ce qui pourra favoriser l'émergence de nouvelles formes architecturales et de nouveaux partis constructifs. Ces perspectives s'inscrivent en pleine cohérence avec un renouveau de la dynamique de recherche et développement dans le domaine de la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment, renouveau attesté en particulier par la création le 14 mars 2005 de la Fondation Bâtiment-énergie<sup>(8)</sup> et le lancement par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) du PREBAT, programme de recherche sur l'énergie dans le bâtiment, dans la droite ligne des

recommandations du rapport sur les nouvelles technologies de l'énergie, rédigé en juin 2004 pour le ministère de la Recherche.<sup>[2]</sup>

## Atténuation et adaptation : un équilibre à préserver

Les actions évoquées précédemment touchent les unes à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, les autres à l'adaptation aux conséquences possibles du réchauffement climatique.

Le développement de ces projets devra être conduit de manière à ce que leurs effets ne s'opposent pas (par exemple, achat massif de climatiseurs lors de la canicule de 2003).

De même est-il légitime de se poser actuellement la question de l'impact d'un développement significatif de constructions légères, économes en énergie tant pour les construire que pour les exploiter, sur leur capacité de résistance en cas de tempête importante.

D'autres situations apparaîtront au fur et à mesure des réflexions qui mettront en évidence des incohérences mais également des synergies entre les projets visant l'atténuation ou l'adaptation. Il s'agira de préserver l'équilibre dans le cadre d'une perspective de développement durable. ■

(7) C'est-à-dire l'énergie utilisée pour l'extraction des matières premières, la fabrication des matériaux et des composants ainsi que pour leur mise en œuvre lors de la construction et des travaux d'entretien, de modernisation et de réhabilitation.

(8) La fondation a été créée par quatre acteurs majeurs du secteur bâtiment et énergie - Arcelor, EDF, Gaz de France et Lafarge - à l'initiative de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) et du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). Elle est dotée d'une enveloppe de 8 millions d'euros, apportés à parts égales par les quatre fondateurs, d'une part, et l'État, d'autre part.

FRANÇOIS MOISAN

## Lutter contre le changement climatique : un défi de société

**L**e changement climatique est certainement l'un des défis majeurs auxquels nos sociétés ont à faire face si ce n'est le principal. C'est un enjeu environnemental considérable puisque les conditions de la vie sur terre sont menacées. Faute d'inflexion volontariste, les tendances actuelles d'émissions de gaz à effet de serre nous projettent vers la partie haute de la fourchette de l'accroissement de température pronostiquée par les scientifiques à l'horizon de la fin de ce siècle -1,4 à 5,8 °C. Les deux tiers de l'incertitude que traduit cette fourchette dépendent des trajectoires d'émission que nous emprunterons dans les décennies à venir, c'est-à-dire de notre capacité à faire évoluer nos sociétés vers des modes de production et de consommation moins générateurs de gaz à effet de serre.

Ce défi s'adresse plus particulièrement à "nos sociétés" dans le sens même où c'est notre organisation sociale et nos modes de vie qui engendrent les bouleversements climatiques. Le déséquilibre de l'excès de teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère provient essentiellement d'un bien, l'énergie, sous sa forme la plus disponible, les combustibles fossiles, et qui a fondé notre développement économique, forgé nos modes de vie.

La sortie "par le haut" de cette impasse planétaire passe bien sûr par le progrès technique : aujourd'hui l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'énergie, la mise en œuvre de nouvelles sources d'énergie sans carbone, demain les ruptures technologiques telles que, peut être, la production d'hydrogène sans CO<sub>2</sub> ou la production d'électricité solaire photovoltaïque. Mais ces transformations de notre univers technique ne s'opéreront qu'avec une profonde mutation de nos modes de consommation. Plus de 50 % du

CO<sub>2</sub> émis dans un pays comme la France l'est directement par les individus, en se chauffant, en se déplaçant, en s'éclairant... La transformation technologique est donc considérable et les échéances auxquelles nous devons parvenir à réduire significativement les émissions ne nous permettent pas de parier exclusivement sur une solution énergétique sans carbone qui remplacerait les combustibles fossiles : il faudrait pouvoir diviser par deux les émissions de gaz à effet de serre (et par quatre dans les pays développés) d'ici 2050 pour prévenir une situation irréparable nous disent les climatologues.

Les options du côté de l'offre d'énergie existent mais sont limitées : la raréfaction des ressources conventionnelles d'hydrocarbures conduira à réduire la part du pétrole et du gaz dans les bilans énergétiques mais le charbon constituera sans doute l'option la plus accessible d'un point de vue économique,

notamment pour les pays émergents et les pays développés qui disposent de la ressource. La capture et le stockage du CO<sub>2</sub> pourront sans doute contribuer à limiter les émissions des centrales à charbon mais il s'agit d'une option partielle puisque seules les sources concentrées d'émission seront capturées. Par ailleurs cette option n'est pas encore acquise et serait en tout état de cause transitoire. Les ressources en uranium sont également limitées et les filières nucléaires de quatrième génération demanderont encore plusieurs décennies de développement.

© ADEME, Bertrand Dubois

**François Moisan**

DIRECTEUR SCIENTIFIQUE  
ADEME  
francois.moisan@ademe.fr

© Jacques Legoff



**Campagne de mobilisation nationale sur la maîtrise de l'énergie et le changement climatique.**

*A national campaign to promote public awareness on the issues of energy conservation and climate change.*

© ADEME



Actuellement l'énergie nucléaire satisfait de l'ordre de 7 % des besoins d'énergie de la planète et les scénarios les plus ambitieux tablant sur une multiplication par 3 à 4 à l'horizon 2050 du parc installé accroissent sa contribution à 13 % seulement du total des besoins si l'on reste sur une croissance tendancielle de la demande d'énergie.

La biomasse est certainement une ressource très largement mobilisable, notamment pour la production de biocarburants et devrait contribuer de manière significative au bouquet énergétique "sans carbone" mais elle devra faire face aux compétitions des usages des sols.

La voie d'une croissance économique plus sobre en énergie apparaît alors comme l'option incontournable. Elle introduit des marges de flexibilité par rapport à chacune des options d'offre énergétique, elle repose sur des solutions qui sont, pour une large mesure, moins coûteuses, elle permet d'envisager un développement plus durable de l'ensemble de la planète avec une moindre pression sur les ressources. L'écart existant entre les meilleures technologies d'utilisation de l'énergie commercialement disponibles et celles communément utilisées est déjà considérable sans attendre les progrès techniques attendus. Ainsi 30 % des consommations d'électricité du secteur résidentiel dans les pays de l'OCDE pourraient être économisés si les équipements électroménagers les plus performants sur le marché étaient utilisés. Construire des bâtiments avec une performance thermique double des seuils réglementaires actuels est d'ores et déjà une réalité commerciale là où les incitations existent. D'ici 2030 nous saurons réaliser des bâtiments à "énergie positive", produisant plus d'énergie qu'ils n'en consomment grâce aux énergies renouvelables incorporées dans le bâti. Réduire de 30 % les émissions des véhicules neufs est réaliste à l'horizon 2010. Mais la transformation des parcs de véhicules et, plus encore de logements, demande plusieurs



© ADEME, Bertrand Dubois



décennies. Il est donc urgent de donner les signaux économiques aux consommateurs afin d'accélérer la pénétration de ces technologies. La difficulté d'agir sur la demande d'énergie est liée au fait qu'elle ne concerne pas qu'un secteur professionnel mais l'ensemble des secteurs économiques et l'ensemble des politiques publiques, logement, transport, industrie, épargne... Il s'agit donc de généraliser les enjeux du changement climatique

dans l'ensemble des décisions des acteurs publics et privés, y compris les ménages qui restent très souvent les "prescripteurs". Les choix que font les particuliers en matière d'équipements techniques mais aussi dans leurs modes de vie devront intégrer l'impact sur le changement du climat. C'est une vaste sensibilisation qui est nécessaire, un effort d'explication pour que les changements nécessaires soient compris et acceptés.

ALEXANDRE THROO

# Action des pouvoirs publics dans le domaine du captage et du stockage du gaz carbonique (CSC) : quelques éclairages...

**Alexandre Throo**

CHARGÉ DE MISSION  
BUREAU DE L'INDUSTRIE PÉTROLIÈRE  
ET PARAPÉTROLIÈRE  
MINEFI/ DGEMP/DIREM  
alexandre.throo@industrie.gouv.fr

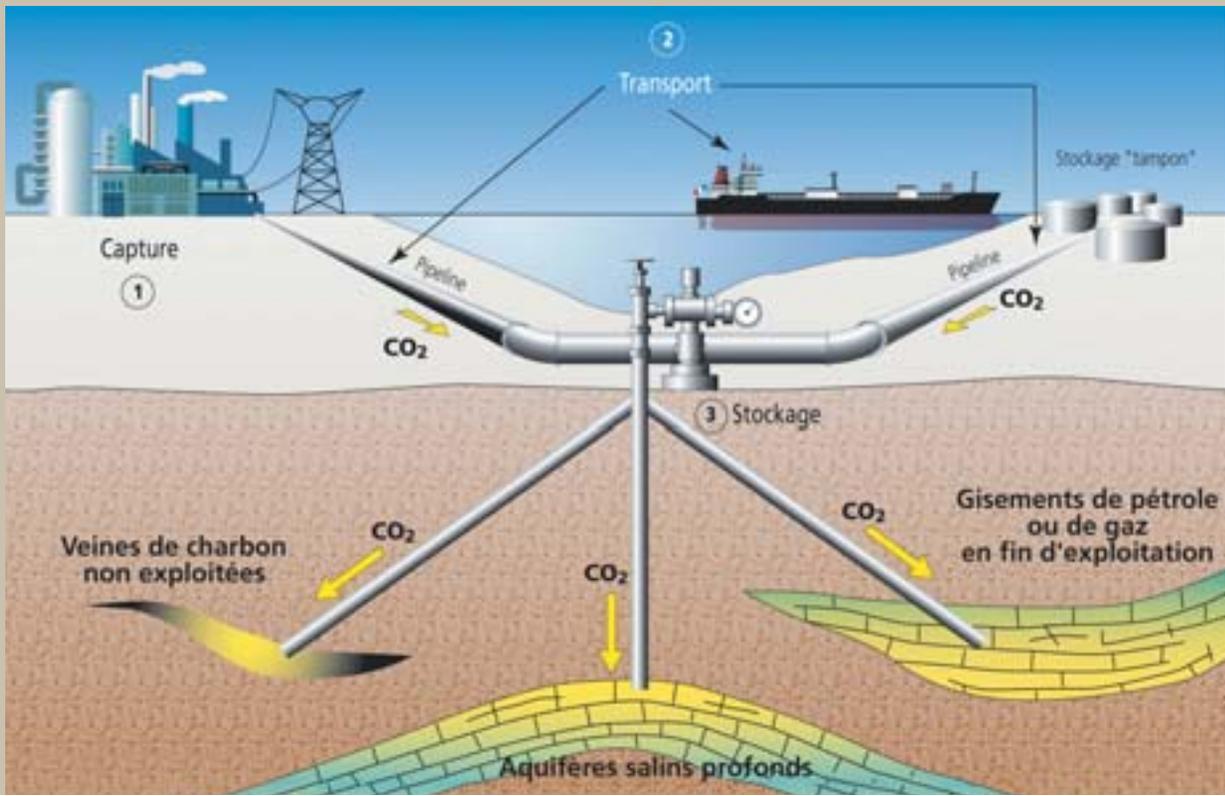


Le 13 juillet 2005 la France a adopté la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique afin d'assurer la sécurité de notre approvisionnement, garantir à tous l'accès à l'énergie à un prix compétitif et protéger la santé et l'environnement. Sur ce dernier point, la France s'est notamment fixée pour objectif de réduire d'un facteur 4 ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050.

**Principales options pour la capture, le transport et le stockage géologique du CO<sub>2</sub>.**

*Main options for the capture, transport and geological storage of CO<sub>2</sub>.*

Source : BRGM



**P**our ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la consommation d'énergie, trois types d'actions complémentaires peuvent être mis en œuvre :

- > limiter la consommation d'énergie fossile en améliorant les rendements des équipements et en agissant sur le comportement des utilisateurs (efficacité énergétique, maîtrise de l'énergie...);
- > remplacer les énergies fossiles par d'autres énergies qui n'émettent pas ou très peu de CO<sub>2</sub> (énergies renouvelables, énergie nucléaire...);
- > éviter le rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère en captant ce gaz dès sa source de production et en le stockant là où il ne pourra plus contribuer au changement climatique planétaire, notamment dans le sous-sol.

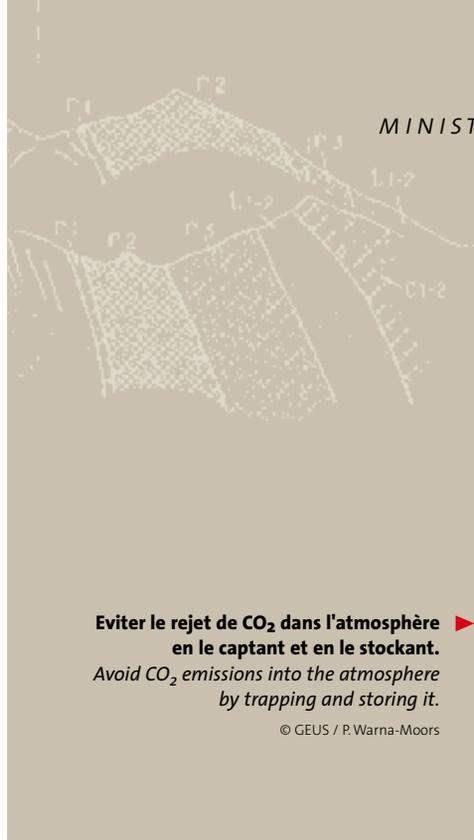
Compte tenu de l'ampleur des enjeux du changement climatique, aucune de ces voies ne doit être négligée.

La France est déjà engagée dans différentes initiatives visant à développer le captage et le stockage de CO<sub>2</sub>. Les actions qui sont menées s'appuient sur les grands centres de recherche appliquée que sont l'Institut Français du Pétrole et le BRGM, ainsi que le CNRS pour les recherches de base, mais aussi l'ensemble des industriels intéressés, notamment GDF, EDF, Total, Air Liquide, Lafarge, etc.

Elle s'est appuyée depuis plusieurs années sur le Réseau de recherche sur les Technologies Pétrolières et Gazières (RTPG) et sur l'ADEME pour financer ces recherches en matière de CSC.

Pour renforcer ses moyens, elle s'est dotée, en 2005, d'outils nationaux pour soutenir la recherche. La lutte contre les gaz à effet de serre fait partie des priorités des thèmes soutenus par l'Agence Nationale de la Recherche, les pôles de compétitivité et l'Agence de l'Innovation Industrielle.

Ces recherches viseront notamment à définir les conditions de réalisation d'une installation de démonstration de captage et de stockage de CO<sub>2</sub> dans l'hexagone. Une telle démonstration permettra de tester la faisabilité des technologies envisagées, d'évaluer et de minimiser le risque pour l'environnement mais aussi de disposer d'une vitrine du savoir-faire national.



**Eviter le rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère en le captant et en le stockant.**  
*Avoid CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere by trapping and storing it.*

© GEUS / P. Warna-Moors

L'Etat devra également contrôler la sécurité des futurs sites d'injection et de stockage de CO<sub>2</sub>. Le Ministre délégué à l'Industrie, Monsieur Loos, a saisi le Conseil Général des Mines qui doit se prononcer sur les dispositions juridiques applicables et sur les modifications nécessaires ou opportunes, le cas échéant.

Les technologies de CSC étant largement méconnues du grand public, une large concertation sur ce thème sera nécessaire en France. Elle a déjà débuté par la tenue en septembre 2005, à Paris, du colloque « Réduction des émissions et stockage géologique du CO<sub>2</sub> », organisé conjointement par le BRGM, l'IFP et l'ADEME et réunissant plus de 400 personnes.

La concertation ne doit pas s'arrêter à nos frontières. Ainsi, les pouvoirs publics participent - au CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum), forum international, à l'initiative des USA, visant notamment à coordonner la recherche mondiale - à la plateforme technologique européenne « Zero Emission Fossil Fuel Power Plants », destinée à fédérer les actions de recherche sur les centrales à combustibles fossiles, au charbon particulièrement, n'émettant pas de gaz à effet de serre - et suivent de près les travaux menés dans le cadre du GIEC (IPCC) ainsi que le programme GHG<sup>(1)</sup> de l'AIE.

<sup>(1)</sup> GreenHouse Gas





# POINTS DE VUE

## Comment mieux comprendre et limiter les effets du changement climatique ?

**D**epuis quelques années les spécialistes du climat font un constat alarmant sur l'augmentation des températures. Cette observation est imputée aux activités humaines et en particulier à l'utilisation des combustibles fossiles. Les scientifiques ont identifié les effets catastrophiques qui en découlent (épisodes cycloniques, inondations, sécheresse, fissuration des maisons, remontée du niveau marin...). Les enjeux sont donc très importants et les aspects économiques sont aussi de premier ordre. Le développement durable passe donc par le contrôle et la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre, la prise en compte de mesures d'adaptation à ces changements. Ceci implique l'acquisition de meilleures connaissances scientifiques et des développements technologiques.





**DOMINIQUE DRON**

*Ingénieur en chef des Mines*



Dominique DRON Ingénieur en chef des Mines Professeur à l'École des Mines de Paris Responsable scientifique, Centre Énergétique et Procédés.

## “Le climat, c'est tout de suite”

*“Sans faire la une des journaux, le baril de pétrole flirte avec les 60 \$, alors qu'en 2002 les perspectives officielles s'établissaient à moins de 30 \$. Nos sociétés se sont-elles donc adaptées à la nouvelle donne, et ce prix suffit-il à faire face au défi climatique ?*

*Pas encore. Même à consommation constante, le désormais fameux pic pétrolier se situerait entre 2005 et 2025, suivi à 10 ans par le pic gazier. Certes, bitumes, asphaltes et charbon*

*pourraient fournir pour des décennies des énergies liquides et gazeuses et stabiliser les prix sous leur niveau actuel. Du moins une fois écoulé le temps nécessaire pour les investissements correspondants, et sous l'hypothèse que les financeurs des entreprises du secteur, nationales ou privées, considèrent de leur intérêt d'éviter à-coups et tensions sur les prix.*

*Mais l'usage immodéré des combustibles non conventionnels alourdirait la note carbonique. Or physique, chimie et biologie sont têtues : la poursuite des tendances serait d'une violence telle qu'un scénario d'extinction massive rapide deviendrait possible. Echapper aux désordres les plus importants, et ne pas dépasser le maximum thermique vécu par l'humanité voici 6 000 ans, suppose de réduire de moitié les GES mondiaux dans ce demi-siècle, donc de commencer maintenant.*

*Ni les stockages artificiels (hors océan, pour maintenir la pompe à carbone du plancton à test calcaire) ni les substitutions, tous deux nécessaires, ne suffiront pour retrouver l'équilibre. Il faudra accroître notre efficacité d'un facteur 2 à 3 selon la population du globe, nous adapter à un nouveau climat, et répartir équitablement les risques de cette transition. En toute logique, ceci devrait écarter dès aujourd'hui de nos investissements prioritaires créations routières, bâtiments et systèmes énergivores, au profit des innovations et diffusions efficaces, sans fragiliser encore plus les écosystèmes. N'oublions pas non plus, en ces temps d'appel aux grands travaux, que dans les énergies renouvelables, nous pourrions passer de 72 000 emplois en 2004 pour l'UE à 1 million en 2010 et 2 en 2020.*

*Sortir du piège climatique est donc affaire de démarche multidisciplinaire, et c'est notre orientation..”*

## “Quels engagements du Réseau Action Climat France (RAC-F) dans la lutte contre le changement climatique ?”

*“Le RAC-F a été créé en 1996 peu avant la conférence de Kyoto. Il regroupe les principales ONG de protection de l'environnement, de promotion des énergies renouvelables et des transports soutenables (FNE, WWF, Greenpeace, Amis de la Terre, CLER, LPO, FNAUT, 4D, etc.) Son action se structure autour de quatre grands axes :*

*- Analyse : grâce à la diversité de la composition du réseau et à l'appui de ses experts (ingénieurs, économistes, juristes, etc.), le RAC-F réalise des rapports et prend des positions sur les principales questions que soulève le dérèglement climatique.*

*- Participation : le RAC-F est le représentant français du Climate Action Network International, réseau mondial de plus de 340 ONG, du Nord et du Sud. Reconnu comme observateur à la Convention Cadre des Nations Unies, il participe aux négociations internationales pour y dénoncer les décisions allant à l'encontre d'un climat stable pour tous et afin d'y revendiquer ses positions.*

*- Proposition : le RAC-F effectue un suivi des politiques menées au niveau international, européen, national et local. Si nécessaire, il réagit pour les sanctionner en rendant son avis publiquement. Mais le réseau participe aussi à divers groupes de travail institutionnels pour y faire des propositions. Ces recommandations tirent leur légitimité de l'expertise sur laquelle elles s'appuient.*

*- Information : enfin, le RAC-F a pour objet d'informer et de vulgariser le plus largement possible (souci d'éducation populaire) les connaissances sur le climat et ses enjeux. Tous les publics sont visés : citoyens, enseignants, décideurs, journalistes, etc. Il s'appuie pour cela sur de nombreux outils et supports : site Internet, publications, articles de presse, interventions, etc.”*

**Philippe Quirion** Président du RAC-F, Docteur en économie, chargé de recherches au CNRS.



**PHILIPPE QUIRION**

*Président du RAC-F*



# Colloque «Réduction des émissions et stockage géologique du CO<sub>2</sub>»

Paris, 15 et 16 septembre 2005

**François Loos, Ministre délégué à l'Industrie lors de son allocution d'introduction.**  
*François Loos, the Minister of State for Industry, in his short speech.*

© BRGM im@gé - P. Desbordes

**D**u 15 au 16 septembre 2005, s'est tenu à Paris un colloque international sur la réduction des émissions et le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. La manifestation, organisée par l'IFP, l'ADEME et le BRGM, a rassemblé plus de 400 personnes venues de plus de 25 pays. Elle a été l'occasion de faire le point sur les enjeux internationaux du réchauffement climatique, mais surtout de débattre de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, à travers des exemples pris dans le secteur de l'énergie et des transports. La dernière journée a été consacrée aux avancées technologiques dans la capture et le stockage géologique du CO<sub>2</sub> et à leurs implications réglementaires et économiques.



**Martine Castello**  
JOURNALISTE SCIENTIFIQUE

C'est en saluant les "NTE" - entendez les "nouvelles technologies de l'énergie" - que François Loos, Ministre délégué à l'Industrie, a ouvert la rencontre. Parmi ces technologies nouvelles concourant à la production d'énergies renouvelables ou aux économies d'énergie, figurent aujourd'hui la capture et le stockage du gaz carbonique. Le ministre a rappelé que deux agences avaient été récemment créées, l'Agence Nationale de la Recherche et l'Agence nationale de l'Innovation Industrielle, afin d'amplifier l'effort public et privé dans le domaine. *"La capture et le stockage pourraient contribuer à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans de nombreux secteurs industriels, et en particulier dans la production d'électricité, surtout si le recours au charbon doit se développer dans le monde au XXI<sup>ème</sup> siècle"*, a conclu le ministre.

Une prévision confirmée par Jacek Podkanski, de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) : la demande en énergie étant en augmentation constante sur la planète - le pic de production du charbon se situe autour de 2050 et les réserves en pétrole et gaz commenceront à baisser aux alentours de 2020-2030 - il ne faut pas compter à moyen terme sur la réduction de la consommation des combustibles fossiles pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Présenté par Jacek Podkanski, le dernier scénario énergétique élaboré par l'AIE table sur une augmentation de la production d'énergie allant, entre 2002 et 2030, de 3 % pour les pays de l'OCDE, à 12 % pour les pays en transition économique (Europe de l'Est, Amérique latine) et 85 % pour les pays en développement, essentiellement la Chine et l'Inde - dont la production est encore minime. Les énergies fossiles devant satisfaire encore plus de 80 % des besoins, les émissions de CO<sub>2</sub> dépasseront 38 milliards de tonnes par an à l'horizon 2030. Elles sont aujourd'hui de 30 milliards, soit deux fois ce que les puits naturels de carbone (biosphère et océans) peuvent résorber, le reste s'accumulant année après année dans l'atmosphère. Jacek Podkanski explique que des efforts à l'échelle planétaire (augmentation de l'efficacité énergétique, du parc nucléaire, des énergies renouvelables...) permettraient un scénario alternatif, qui réduirait les émissions de 6,5 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> par an. Le recours à la capture du gaz carbonique à la source d'émission sur 5 % seulement des installations industrielles mondiales supprimerait encore 1,75 milliards de tonnes.

Ce scénario alternatif est-il suffisant pour éviter une catastrophe climatique de grande ampleur ? Dominique Dron, professeure à l'École des Mines, en doute : *"Nous devons arriver à diviser par quatre nos émissions de gaz carbonique pour limiter la hausse des températures à 2° C et éviter les pires catastrophes"*, prévient-elle. Pour appuyer ses craintes, elle dresse rapidement le tableau de la situation climatique mondiale. Depuis le début de l'ère industrielle, la température de la planète est montée de 0,6° en moyenne et le niveau des mers s'est élevé de 10 à 20 cm. Six dixièmes de degré semblent peu, mais nous en constatons déjà les effets négatifs : climat désordonné, canicule, inondation, feux de forêts, sécheresse, fonte des glaciers, augmentation de l'intensité des cyclones, perturbation des courants marins, modification de la flore et de la faune. *"C'est un problème écologique mais aussi économique"*, explique-t-elle. Entre les années 1950 et

les années 1990, par exemple, les pertes financières mondiales résultant de catastrophes liées au climat ont été multipliées par dix (après ajustement pour inflation), une hausse qui s'explique par l'augmentation constante des catastrophes naturelles : treize phénomènes extrêmes recensés entre 1950 et 1960, soixante-douze entre 1990 et 1998. Aux Etats-Unis, les pertes économiques provoquées par les catastrophes météorologiques sont passées de 5 à 11 milliards de dollars entre 1980 et 1990. A lui seul, le cyclone Katrina qui a ravagé la Louisiane en septembre 2005 devrait coûter plus de 125 milliards de dollars. Invitant tous les états à prendre en compte le facteur écologique dans leurs plans de croissance, Dominique Dron ajoute : *"Les dommages causés par le réchauffement coûtent toujours plus cher à l'économie d'un pays que la prévention"*.

David Reiner, de l'université de Cambridge, en est pleinement conscient. Ce chercheur, qui travaille en étroite liaison avec le MIT (Massachusetts Institute of Technology) rappelle qu'un Français émet en moyenne 6,5 tonnes de CO<sub>2</sub> par an, un Américain 19,9 - la Louisiane battant le record mondial avec 45 t/an/habitant. Mais il y a de l'espoir ! Des initiatives pour lutter contre l'effet de serre commencent à voir le jour outre-Atlantique sous la pression des états (40 vont faire l'inventaire



© BRGM im@gé - P. Desbordes

*“ Les dommages causés par le réchauffement coûtent toujours plus cher à l'économie d'un pays que la prévention. ”*

de leurs émissions, 25 ont adopté un plan climat), des maires (plus de 135 maires répartis dans 35 états ont décidé de mettre leur ville en conformité avec le protocole de Kyoto) et des industriels (fortement engagés dans la capture et le stockage du CO<sub>2</sub>). De leur côté, les Européens bénéficient d'une stratégie globale de lutte contre l'effet de serre et vont augmenter les aides dans ce domaine, annonce Philippe Dechamps, de la Direction de la recherche de la Commission européenne : *"Le septième PCRD (Programme-Cadre de Recherche et Développement) mettra 2,9 milliards d'euros sur des projets liés à l'énergie, deux fois plus*

**Philippe Vesseron, Président du BRGM.**  
Philippe Vesseron, Chairman and Chief  
Executive Officer of BRGM.

**Isabelle Czernichowski-Lauriol (BRGM)  
et Pierre Le Thiez (IFP).**

© BRGM im@gé - P. Desbordes

“*La planète est en danger et nous avons besoin de solutions immédiates*”



que dans le sixième PCRD". Les principales sources d'émission sont connues : 39 % sont dues aux activités de production d'énergie, 22 % à l'industrie, ces sources concentrées pourraient faire l'objet de capture. Les émissions dues au chauffage des bâtiments, au tertiaire et à l'agriculture (16 %) peuvent être réduites par des économies d'énergie et l'usage d'énergies renouvelables.

Restent les transports. A ce propos, Michèle Pappalardo, Présidente de l'ADEME, rappelle que tous les efforts de maîtrise de l'énergie doivent être poursuivis. L'option de la capture et du stockage du CO<sub>2</sub> représente, certes, un enjeu important mais les technologies ne sont pas encore disponibles au plan économique et industriel et les installations de stockage doivent être expérimentées. Par ailleurs, il s'agit d'une solution transitoire et qui ne concerne que les grandes installations de combustion et non les émissions des secteurs comme celui des transports. Or la part de ces derniers (23 %) ne cesse d'augmenter, comme le confirme Alain Morcheoine, Directeur du service Air, Bruit et Efficacité énergétique à l'ADEME : "Le transport aérien devrait tripler d'ici 2030 et le parc des véhicules à moteur doubler. La conséquence en sera une augmentation des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, et la part de responsabilité des transports passera de 23 à 25 %". Les outils pour réduire les émissions dans le secteur sont multiples : amélioration technologique des moteurs, réduction des cylindrées, véhicules électriques, carburants propres. "Les solutions proposées sont pléthoriques, estime-t-il, mais elles ont des limites". Pour lui, le véritable problème se trouve dans le modèle de développement des pays développés, qui "devraient modifier leur comportement en matière de transport et inciter les pays émergents à en faire autant avant qu'il ne soit trop tard", conclut-il. Le conférencier suivant, Peter Wiederkehr, de la société autrichienne Est International, abonde dans ce sens en donnant un exemple de changement d'attitude face à l'automobile : une expérience de partage de voitures (car-sharing) qui mobilise 60 000 personnes et 1 800 véhicules en Suisse. Grâce à cette organisation, les usagers roulent 20 % moins en voiture et émettent 60 % de CO<sub>2</sub> en moins dans leurs déplacements. Plus réaliste, Ian Drescher, de Volkswagen, pense que la solution pour les transports viendra de l'utilisation d'une palet-

te de matières premières différentes dans la production du carburant, sans changement des stations services ni des véhicules. Il cite l'expérience du Sunfuel, un carburant de synthèse produit à partir de la gazéification de la biomasse et largement commercialisé en Allemagne. "La planète est en danger et nous avons besoin de solutions immédiates", défend-il.

En matière de capture et stockage du CO<sub>2</sub>, les options techniques sont également multiples, et aucune pour l'heure ne détient la panacée. En ouvrant la session consacrée à cette filière, le Président du BRGM, Philippe Vesseron, rappelle que nous devons aujourd'hui explorer toutes les voies. Aussi bien dans le choix des procédés de capture (capture postcombustion, oxycombustion, précombustion) que dans le choix des sites de stockage. Ainsi Lars Stromberg, de la compagnie d'énergie suédoise Vattenfall, explique que sa société a investi dans un projet pilote qui sera opérationnel en 2008 : une centrale au charbon à Schwarze, dans le bassin de la Ruhr, équipée d'un système de capture par oxycombustion. "L'entreprise Siemens s'intéresse quant à elle à la précombustion", annonce Gunther Haupt, son représentant. Elle a développé un nouveau système de brûleur pour les turbines à gaz, permettant la récupération d'hydrogène, "la voie la plus prometteuse, selon lui, mais aussi la plus ambitieuse technologiquement". Enfin, la capture postcombustion est défendue par Paul Feron de TNO (un organisme de recherche néerlandais). "Cette technologie, dit-il, est la plus facile à implanter dans les centrales existantes et la plus économique, surtout si l'on intègre la régénération des solvants aux processus". Dès 2006, une centrale pilote de ce type devrait voir le jour au Danemark.

Après la capture, le stockage géologique pose ses propres problèmes. Niels Christensen, du GEUS (équivalent danois du BRGM), lance le débat consacré au sujet en dressant un rapide tableau des capacités d'enfouissement dans le sous-sol planétaire. Le CO<sub>2</sub> peut être stocké dans les gisements de pétrole et de gaz épuisés. Ceux-ci ont l'avantage d'être bien connus et leurs

## ► UNE LENTE PRISE DE CONSCIENCE

A l'échelle internationale, la prise en compte du réchauffement planétaire a commencé en 1988, avec la création d'un groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), à l'instigation de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et du Programme des Nations-Unies pour l'Environnement (PNUE). Ces 2 500 experts dûment mandatés par les Nations-Unies ont pour mission de rassembler les données scientifiques sur le sujet, d'en faire la synthèse et de formuler des stratégies de prévention. Leur dernier rapport (septembre 2005) intègre à la panoplie des mesures de réduction des gaz à effet de serre (économies d'énergie, énergies alternatives), la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> à la source d'émission. Selon les experts, 20 à 40 % des émissions de gaz carbonique pourrait ainsi être enfouies. Pour permettre le développement de la filière, la capture et le stockage devraient maintenant logiquement intégrer le dispositif de permis d'émission mis en place par le protocole de Kyoto, qui prévoit pour les pays développés une réduction de 5,2 % des émissions de gaz à effet de serre sur la période 2008-2012 par rapport au niveau de 1990. Signataire du protocole, la France espère diviser ses émissions par 4 d'ici 2050, par le recours au nucléaire, aux économies d'énergie, aux énergies renouvelables, mais aussi à la capture et au stockage du CO<sub>2</sub>.

capacités sont estimées (5 920 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>). Dans les veines de charbon inexploitées, l'injection peut s'accompagner d'une récupération de méthane, mais leur potentiel, encore mal connu, semble faible (une quarantaine de milliards de tonnes). Les aquifères salins profonds offrent l'avantage d'un potentiel immense (plus de 10 000 milliards de tonnes) et d'une présence dans tous les bassins sédimentaires de la planète. Pour Tore Torp, de Statoil, les expériences sur le terrain actuellement réalisées dans le cadre de programmes européens ou nationaux (CASTOR, GESTCO, SACS, CO<sub>2</sub>Store...), sont autant de cas uniques, "mais chaque retour d'expérience est riche d'information pour tous les scientifiques qui s'intéressent au stockage du CO<sub>2</sub>", explique-t-il. Ainsi en est-il, par exemple, des expériences réalisées par Gaz de France et Statoil dans la mer du Nord (K-12B, Sleipner), et décrites par Jean Hartman, de GDF, qui estime qu'elles "ont augmenté nos connaissances et mis en relief les bénéfices et les inconvénients de la technique".

Mais le temps importe ici tout autant que l'espace, comme le montrent Pierre Le Thiez, de l'IFP, et Isabelle Czernichowski, du BRGM, en présentant les principales voies de recherche. "Dans ce domaine, la difficulté est dans la durée", expliquent-ils, car la sécurité du stockage doit être garantie pour des durées pouvant atteindre un ou deux millénaires. La maîtrise des impacts à long terme représente donc un verrou technique à faire sauter pour assurer le développement de la filière. Ce n'est pas son seul handicap, avertit John Roberts, du Ministère britannique de l'Environnement, en pointant que "la législation spécifique au stockage à long terme du CO<sub>2</sub> n'existe pas". Ainsi, le stockage en mer du Nord est régi par deux textes traitant de la protection de l'environnement marin (la convention de Londres et la convention OSPAR), et le stockage souterrain dépend des lois en vigueur dans chaque pays. Un débat à l'échelle des conventions internationales de l'environnement est aujourd'hui en cours pour clarifier la situation, annonce cependant John Roberts.

*“ Les principales sources d'émission sont connues : 39 % sont dues aux activités de production d'énergie, 22 % à l'industrie, ces sources concentrées pourraient faire l'objet de capture. ”*

Le problème principal serait-il financier ? Quelle que soit la filière privilégiée de capture ou de stockage, tous les conférenciers sont d'accord sur la nécessité de diminuer son prix. Il est grevé aujourd'hui par la capture, qui représente 70 % du coût total estimé, soit 50 à 70 dollars la tonne de CO<sub>2</sub> évité. Et Guy Allinson, de l'université de New South Wales (Australie), fait remarquer qu'il ne s'agit que d'une estimation. "Le prix peut varier sensiblement en fonction du choix du procédé de capture, de la distance à parcourir pour stocker le CO<sub>2</sub> et du site de stockage", explique-t-il. De plus, la mise en oeuvre des permis d'émission prévue par le protocole de Kyoto devrait encore changer la donne économique, soutient Jean-Michel Gires, de Total.

Aujourd'hui, "tous les projets de Total sont analysés à l'aune de la quantité de gaz carbonique émise et de la pénalité actuelle de 20 euros la tonne de CO<sub>2</sub> émis", annonce-t-il, "et nous n'échappons pas à la capture et au stockage du gaz carbonique". Un dernier point reste à débattre : son acceptabilité sociale. Après avoir rappelé que l'option capture et stockage n'est pas l'unique solution à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, Gabriela von Goerne, de la section allemande de Greenpeace, insiste sur la nécessité d'informer les citoyens et de garantir la sécurité du stockage pour les générations futures. Et c'est sur une note d'espoir qu'Olivier Appert, Président de l'IFP, clôt le colloque, en affirmant : "La prévention des risques d'un changement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre constitue un enjeu auquel la recherche doit pouvoir apporter des réponses". Un pari sur l'avenir ? ■

### Pour en savoir plus...

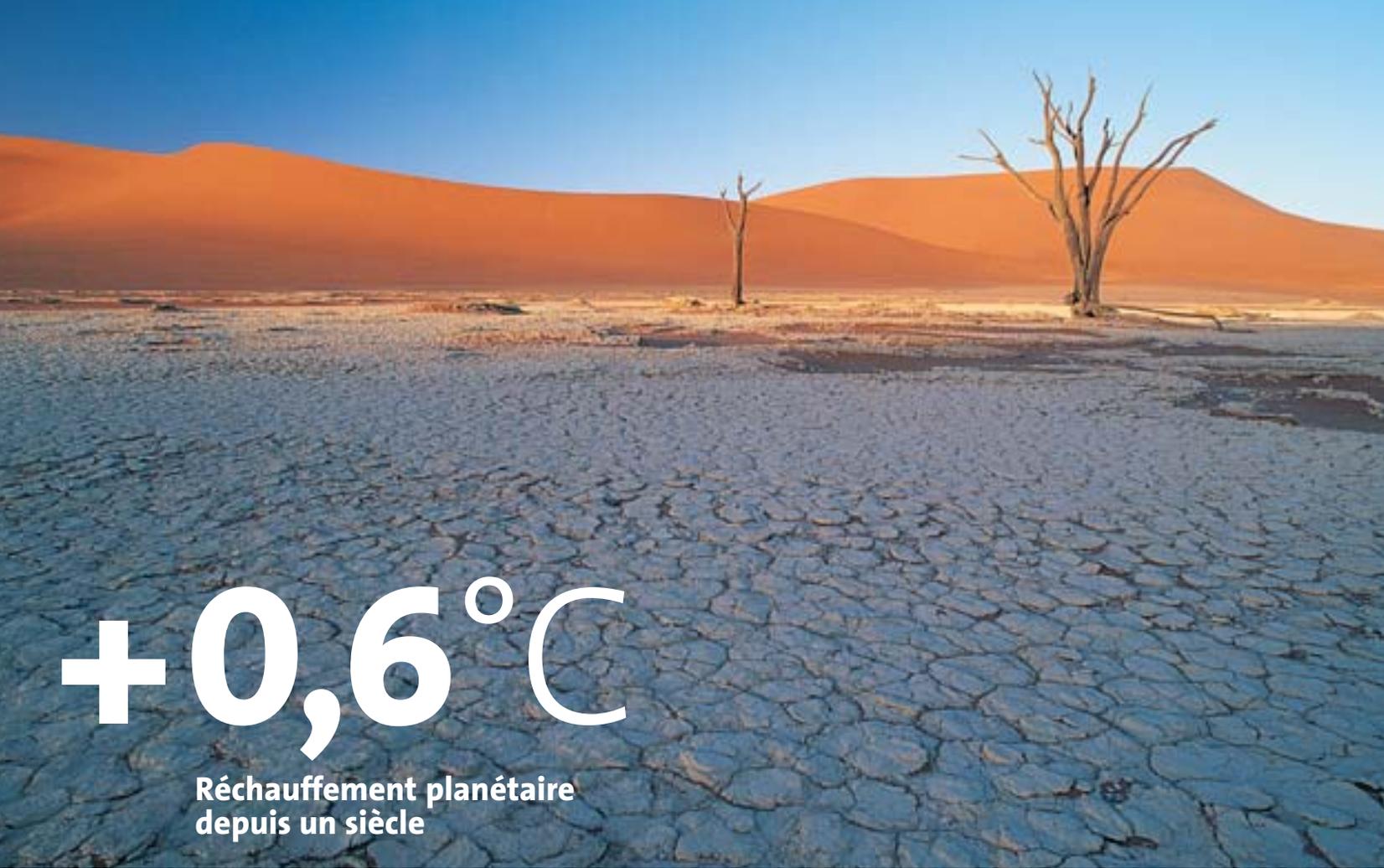
Le BRGM, en collaboration avec l'IFP et l'ADEME, vient de publier, dans la collection Les Enjeux des Géosciences, une brochure consacrée à la capture et au stockage géologique du CO<sub>2</sub>.  
Site du colloque : <http://www.colloqueco2.com/IFP/fr/minisiteCO2/index.html>



### International symposium: Reduction of emissions and geological storage of CO<sub>2</sub>

An international meeting on the reduction of greenhouse gas emissions and the geological storage of CO<sub>2</sub> was held in Paris on 15 and 16 September 2005. More than 400 persons from over 25 countries attended this meeting, organized by the IFP, ADEME and BRGM. The first day was spent discussing the international stakes involved in Global Warming. As fossil-energy sources will still have to cover over 80 % of the short-term needs, annual CO<sub>2</sub> emissions could exceed 38 billion tonnes by 2030. Efforts at a planetary scale, such as increasing energy efficiency, more nuclear-power installations and the further development of renewable energy sources, will help reduce this figure by 6.5 billion tonnes, and capturing CO<sub>2</sub> at the emission source – for only 5% of the industrial installations world-wide – will remove a further 1.75 billion tonnes. But much more will have to be done to avoid a global warming of 2 °C by the end of the century. Efforts toward a further reduction of our use of fossil fuels thus have to continue, particularly in the transport sector. A multitude of solutions is proposed for reducing our reliance upon fossil fuels, but they all have their limitations. The second day was devoted to a review of technological progress in the capture and geological storage of CO<sub>2</sub>, and to its regulatory and economic implications. This transitional option, which only concerns the major combustion plants, represents an important stake, but the technology is not yet fully available in an economic and industrial sense, and such storage facilities are still in the experimental stage.

# chiffres clés



# +0,6°C

Réchauffement planétaire  
depuis un siècle

## Quelques dates

**1896** *Svante ARRHENIUS* annonce qu'en brûlant le charbon, les hommes vont réchauffer la planète par un effet de serre renforcé.

**1990** Premier rapport du *GIEC*.

**1992** *Sommet de Rio*

131 chefs d'Etat réunis pour le sommet de la terre : élaboration de la convention des Nations Unies sur le climat (UNFCCC).

**1997** *Protocole de Kyoto* : en application de la convention, **170 pays** s'engagent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre.

**2002** *15 états de l'UE* dont la France ratifient le protocole.

**2005** *Entrée en vigueur* du protocole de Kyoto après la signature de la Russie :

Nombre *d'adhérents* au 24/11/2005 : **157** pays (dont 30 industriels) - Principaux non-adhérents : Etats-Unis, Australie.

*Engagement* : réduire leurs émissions en GES de **5,2 %** en moyenne par rapport à 1990, entre 2008 et 2012.

Emissions concernées : *CO<sub>2</sub>*, *CH<sub>4</sub>*, *NO<sub>2</sub>* et trois gaz fluorés *HFC*, *PFC* et *SF<sub>6</sub>*.

## Principaux gaz à effet de serre

Source : GIEC

	Temps de résidence	Origine naturelle	Origine anthropique
<b>Dioxyde de Carbone (CO<sub>2</sub>)</b>	120 ans	Océans, décomposition végétale, respiration animale	Transports, agriculture, déchets...
<b>Méthane (CH<sub>4</sub>)</b>	10 ans	Décomposition végétale ou animale à l'abri de l'air	Décharges, élevage
<b>Protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O)</b>	150 ans	Décomposition d'azote dans le sol	Fabrication d'engrais

## Emissions des gaz à effet de serre par secteur en France en 2003

Source : CITEPA

Secteur	%
Transports	<b>26,7</b>
Résidentiel, tertiaire, institutionnel et commercial	<b>18,4</b>
Industrie manufacturière	<b>19,9</b>
Industrie de l'énergie	<b>13</b>
Agriculture et sylviculture	<b>19,4</b>
Traitement des déchets	<b>2,6</b>

**Total hors UTCF\*** ..... **557** Mt eg CO<sub>2</sub>\*\*

\* Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie  
 \*\* Millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub>

## Emissions de CO<sub>2</sub>

**2 600 milliards de tonnes** rejetées en 2003 dans l'atmosphère

Source : Société Française de Chimie

Emissions de CO<sub>2</sub> liées aux énergies fossiles

Source : OCDE

**15 662 Mt** rejetées en 1973

**24 983 Mt** rejetées en 2003

Emissions de CO<sub>2</sub> par habitant

Source : OCDE - données 2003

États-Unis	<b>19,7 tonnes</b>
Russie	<b>10,6</b>
Japon	<b>9,8</b>
Union Européenne	<b>7,5</b>
Chine	<b>2,9</b>
Brésil	<b>1,6</b>
Inde	<b>0,9</b>

Emissions de CO<sub>2</sub> pour un trajet Paris - Marseille

Range Rover	<b>318 kg par personne</b>
Avion	<b>112</b>
Clio	<b>90</b>
Vélo	<b>16</b>
Train	<b>3</b>



◀ **Plate-forme de forage de Sleipner pour la production de gaz naturel avec séparation du CO<sub>2</sub> qui est réinjecté dans un aquifère salin.**  
 The Sleipner platform producing natural gas and separating out CO<sub>2</sub> which is re-injected into a saline aquifer.

© Statoil.

## Coût du stockage du CO<sub>2</sub>

Source : IFP

Capture	Compression	Transport	Stockage
30 - 50 \$/t CO <sub>2</sub>	8 - 10 \$/t CO <sub>2</sub>	1 - 4 \$/t CO <sub>2</sub>	2 - 8 \$/t CO <sub>2</sub>

soit une valeur comprise entre 41 \$ et 72 \$ la tonne de CO<sub>2</sub>

## Cours de la tonne de CO<sub>2</sub>

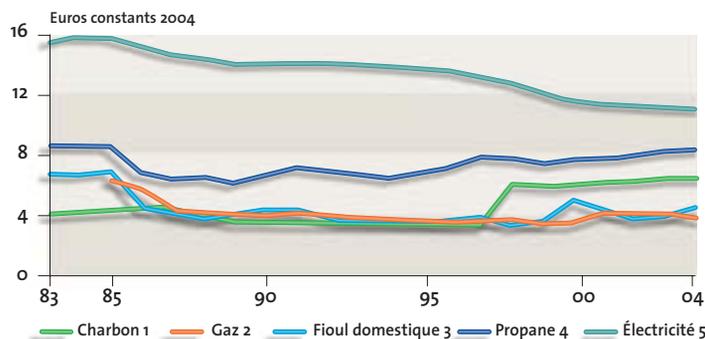
Source : Point Carbon

01/01/2005	15/07/2005	23/01/2006
8 euros	30 euros	26,23 euros

## Prix des énergies à usage domestique

(TVA incluse) pour 100 kWh PCI\*

Source : Observatoire de l'Énergie d'après CDF, COCIC, GDF, EDF et DIREM.



1 : Houille de Lorraine = Charbon grain 6/10 livraison ≤ 2t jusqu'en 1997. Charbon Anthracite noir 30/50 livraison ≤ 2t à partir de 1998 (houille importée)  
 2 : Gaz tarif B 21, consommation annuelle 34 890 kWh PCS, 3 usages.  
 3 : Fioul domestique livraison 2 000 à 5 000 litres.  
 4 : Propane citerne louée, consommation annuelle 34 890 kWh PCS, 3 usages.  
 5 : Électricité double tarif, consommation annuelle 13 000 kWh.

\* PCI : pouvoir calorifique inférieur

# brèves

## À nos lecteurs...

Vous avez été nombreux à répondre au questionnaire publié dans le numéro 2 de Géosciences. Le Comité de rédaction, au nom de tous les auteurs également, vous en remercie. Vos avis, vos idées nous permettront d'améliorer la forme et le contenu de la revue, d'élargir ses champs thématiques et d'accroître son audience. Vos suggestions, vos propositions d'articles ou de thèmes, vos critiques parfois, sont toutes étudiées et seront prises en compte dans la ligne que la revue s'est fixée. Alors n'hésitez pas à nous écrire et bonne année de lecture !

### Dear readers...

*The Editorial Board, and on behalf of all the authors, would like to thank the many readers that replied to the questionnaire enclosed with the Géosciences No. 2 issue. Your opinions and ideas will help improve both the format and the content of the journal, expand its thematic scope and widen its audience. Your suggestions, your proposals for articles or themes, even your criticisms, have all been considered and will be taken into account when fixing the journal's direction. So do feel free to write and tell us what you think, and we wish you all very happy reading for 2006!*

### Internet

#### A la découverte des géosciences

Le BRGM a mis en ligne une animation expliquant de manière pédagogique les enjeux de la capture et du stockage géologique du CO<sub>2</sub>.



[http://www.brgm.fr/CO2\\_animation/index.htm](http://www.brgm.fr/CO2_animation/index.htm)

De l'effet des gaz à effet de serre aux économies d'énergie, venez mettre vos idées au clair sur la lutte contre le réchauffement climatique, sur [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

### RESPONSE

#### L'avancement des recherches sur l'impact du changement climatique sur le littoral

Le projet LIFE / Environnement RESPONSE, coordonné par l'IWCC (Isle of Wight Center for Coastal Environment) a pour objectif de développer des stratégies durables pour gérer les risques côtiers, en intégrant la notion de changement climatique. Depuis 2003, le BRGM a évalué sur l'Aquitaine et le Languedoc-Roussillon les possibles modifications du trait de côte d'ici à 2100, face à deux hypothèses de hausse du niveau de la mer (la plus probable et la plus pessimiste), calculées d'après les scénarii du GIEC.

Au terme de l'étude (septembre 2006), des outils de décision et un guide de bonnes pratiques seront proposés aux instances décisionnelles françaises et européennes.

[http://www.coastalwight.gov.uk/lfr\\_response.htm](http://www.coastalwight.gov.uk/lfr_response.htm)



Un littoral à surveiller.

### Inventaires géothermiques régionaux

#### Mieux connaître le potentiel des ressources

Une étude pilote, COPGEN (Compilation du Potentiel Géothermique National), s'est achevée sous la conduite du BRGM et de l'ADEME. Elle s'est focalisée sur la Limagne d'Allier et a débouché sur une méthodologie d'inventaire déclinable sur d'autres régions géologiquement favorables.

En Région Centre, le BRGM est chargé par la Région, l'ADEME et EDF, de l'inventaire des ressources «très basse énergie» et de réaliser un atlas numérique grand public. Par ailleurs, une convention a été signée entre le BRGM, associé à ICE - bureau d'études spécialisé dans les missions de conseil et d'études stratégiques dans le domaine de l'énergie - et le Conseil régional pour l'élaboration d'un plan de développement des ressources.



Opération de géothermie en habitat collectif - Châteauroux.

En Lorraine, le BRGM a signé une convention avec l'AREL (Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine) pour la mise à disposition des instances décisionnelles de cartes de productivité, réalisées sur financement AREL, ADEME et EDF, des aquifères locaux.

En Ile-de-France, le BRGM a terminé l'inventaire des ressources géothermiques «très basse énergie», dans le cadre d'un partenariat entre l'ARENE, l'ADEME et EDF. Un SIG et une carte d'exploitabilité animée permettent de connaître les ressources géothermales commune par commune. Le BRGM a également piloté l'élaboration d'un plan de relance de la géothermie «basse énergie» à destination des réseaux de chaleur en partenariat avec l'ADEME et l'ARENE.

### Site Internet géothermie

L'ADEME et le BRGM ont mis en ligne le site [www.geothermie-perspectives.fr](http://www.geothermie-perspectives.fr).



Ce site, dont les objectifs principaux sont de fournir des informations et des données homogènes, validées et actualisées ainsi que de fédérer des organismes et des entreprises représentatifs de la géothermie en France, a été conçu pour répondre aux préoccupations de publics très variés : particuliers, enseignants, étudiants, industriels, organismes, producteurs d'énergie, collectivités locales...

### A paraître

A paraître aux éditions EDP Sciences (printemps 2006) : «Les eaux continentales», Académie des Sciences, Coordonnateur : G. de Marsily (rapport RST).

Un chapitre de cet ouvrage rédigé par Hervé Douville<sup>(1)</sup>, Katia Laval<sup>(2)</sup>, Daniel Cariolle<sup>(3)</sup>, Serge Planton<sup>(1)</sup> et Jean-Claude André<sup>(3)</sup>, portera sur le thème «Eau et climat».

(1) Météo-France, Centre National de Recherches Météorologiques  
(2) Laboratoire de Météorologie Dynamique, ENS Physique  
(3) CERFACS

# Vient de paraître



La collection « **les enjeux des Géosciences** » propose une série d'ouvrages sur la contribution des géosciences dans le développement durable.

Trois titres sont déjà disponibles : Pour une Terre durable, La géothermie, La capture et le stockage de CO<sub>2</sub>. Un nouveau titre est en préparation sur l'Après Mine.

Véritable **synthèse des connaissances** à ce jour **sur les eaux souterraines en France métropolitaine et DOM-TOM**, cet ouvrage a été rédigé par **80 spécialistes** de l'hydrogéologie de la France issus d'organismes publics, de collectivités locales ou du privé. Il décrit en douze grands chapitres les aquifères et leurs eaux souterraines **dans les bassins sédimentaires, les chaînes alpines et pyrénéennes et les massifs anciens.**

Cinq autres chapitres traitent **des principaux types d'aquifères** et de leur gestion, de **l'exploitation des eaux souterraines, des eaux minérales et thermales, des ressources géothermiques, et du stockage de gaz en aquifère.**



<http://editions.brgm.fr>

 **brgm**éditions



prochain numéro ► Été 2006

# Les risques telluriques



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

#### Siège

Tour Mirabeau 39-43 quai André Citroën  
75739 Paris Cedex 15 - France  
Tél. : (33) 1 40 58 89 00 - Fax : (33) 1 40 58 89 33

#### Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin - BP 36009  
45060 Orléans Cedex 2 - France  
Tél. : (33) 2 38 64 34 34 - Fax : (33) 2 38 64 35 18

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)