

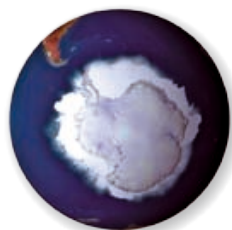
# Les variations climatiques du passé et de l'avenir

Edouard Bard

**Q**u'est-ce que le climat ? Il faut tout d'abord s'entendre sur l'étendue de la zone géographique étudiée car on peut parler de climat mondial, régional ou local. Le climat se définit d'abord par la succession des conditions atmosphériques que l'on caractérise par la mesure de nombreux paramètres comme la température, les précipitations, la direction et la vitesse des vents, la nébulosité, la pression atmosphérique, l'humidité de l'air, la chimie de l'air et des poussières... Par opposition aux turbulences rapides, d'un jour à l'autre, qui sont du ressort de la météorologie, la climatologie vise à étudier les conditions atmosphériques sur des périodes plus longues de quelques mois à plusieurs millions d'années.

La séparation entre ces deux domaines correspond à une différence dans la possibilité de prévision des phénomènes. La météorologie s'occupe notamment de prévoir l'état de l'atmosphère de façon déterministe. Néanmoins, cette prévision "exacte" est limitée à quelques jours ce qui est dû non seulement à nos lacunes scientifiques et techniques, mais aussi au comportement chaotique de la circulation atmosphérique. La climatologie rend compte de l'état moyen de l'atmosphère, permettant aussi de prévoir le temps qu'il fera, mais sans avoir de certitude sur une situation précise pour un jour donné. Par exemple, la climatologie permet de dire que le 14 juillet à Nancy il fera chaud et que le ciel sera limpide et bleu. Cette prévision se réalisera statistiquement en considérant les situations atmosphériques sur une trentaine d'années. Savoir si l'on peut vraiment compter sur le beau temps pour le 14 juillet prochain n'est plus du ressort de la climatologie. Nous ne le saurons que quelques jours avant cette date grâce à l'analyse des données des jours précédents et à la modélisation mathématique de la circulation atmosphérique.

Même si l'état de l'atmosphère est une composante fondamentale du climat, il est clair que le système climatique ne se réduit pas à cette enveloppe gazeuse. Il comprend aussi tous les compartiments qui interagissent les uns avec les autres comme l'océan, la banquise, les glaces continentales, la végétation, les sols... Les échelles de temps des échanges d'énergie et de matière entre compartiments sont généralement plus longues que l'horizon à quelques jours des prévisions météorologiques. Les météorologues peuvent donc se contenter de ne prendre en considération que les mouvements atmosphériques, en supposant que les compartiments "lents" ne varient pas. On rejoint donc l'étymologie du mot météorologie, la science des météores, c'est-à-dire les phénomènes observés dans le ciel. Le climat vient quant à lui du grec klima qui désigne une pente, celle de l'angle que font les rayons du Soleil avec la surface terrestre. En d'autres termes, le climat fait référence aux différentes zones de latitude, de l'équateur jusqu'aux pôles, régions caractérisées par des régimes de temps très contrastés.



*Les quantités de gaz à effet de serre, dont la teneur en dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, a augmenté de 36% depuis le début de l'ère industrielle selon les dernières mesures publiées par la NOAA, l'agence fédérale américaine océanographique et atmosphérique.*

### Comprendre l'évolution du climat

Cela nécessite de considérer le système climatique dans sa globalité. Ce système comprend 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. 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. Comme nous l'avons dit, les turbulences rapides et incessantes de la basse atmosphère sont l'objet d'étude du météorologue. Elles 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 (voir encart plus bas). 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.

### Reconstituer les variations du climat

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 fondés 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.

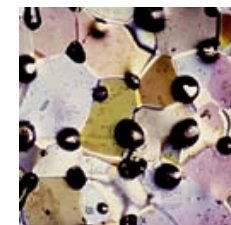
Pour remonter plus loin que les deux derniers siècles de mesures modernes (dites instrumentales), les spécialistes du climat ont recherché d'autres sources documentaires, ou archives climatiques, dans lesquelles ils peuvent lire les fluctuations de paramètres

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. La paléoclimatologie permet d'obtenir des données sur les variations des compartiments du système climatique 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.

Pour les sédiments marins, on peut faire une liste des principaux outils du paléoclimatologue, fondés sur les fossiles, des rapports isotopiques ou certaines molécules et atomes disséminés à l'état de traces dans les roches sédimentaires. On peut faire de

même pour les glaces polaires avec une mention particulière pour les bulles d'air qu'elles contiennent et qui permettent de remonter aux teneurs passées des gaz à effet de serre. Les récifs coralliens et les sédiments des marges continentales 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 dans les grottes et même les documents historiques pour les périodes les plus récentes (des informations archivées comme le début des vendanges, les rendements agricoles ou bien encore l'englacement des fleuves).

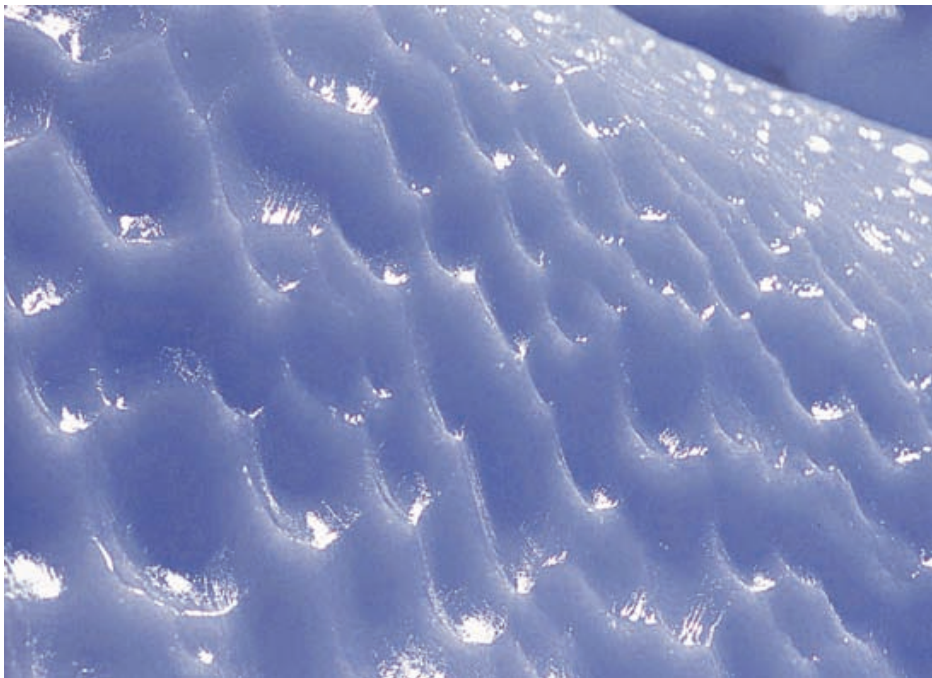
Le paléoclimatologue se situe à l'interface de la climatologie, de l'océanographie et de la géologie, utilisant la rigueur du climatologue "actualiste" tout en gardant l'œil du naturaliste. Un aspect fondamental du domaine est de réussir à dater précisément les événements observés. Ceci est évidemment crucial pour tenter de comprendre l'enchaî-



*Carotte de glace en lumière polarisée, bulles d'air fossile.*

*Pour les glaces polaires, les principaux outils du paléoclimatologue sont des mesures isotopiques et chimiques, ainsi que les bulles d'air contenues par la glace qui permettent de remonter aux teneurs passées des gaz à effet de serre.*





La fonte des glaces des calottes glaciaires ou des glaciers de montagne crée des figures semblables à celles de la dissolution par l'eau des roches calcaires.

Le réchauffement mondial influencerait déjà plusieurs espèces de mammifères vivant dans les régions nordiques, environnements particulièrement sensibles aux variations climatiques. Des changements ont été observés pour certaines populations animales adaptées à ces conditions extrêmes, notamment pour l'ours polaire, le caribou et le renard arctique.



nement des causes et les effets rétroactifs nombreux dans le système climatique. Les méthodes géochronologiques les plus fiables se fondent sur des comptages des couches annuelles, comme les cernes d'arbres, ou encore sur la décroissance régulière d'isotopes radioactifs.

Malheureusement, plus on recule dans le temps moins les archives géologiques sont nombreuses et bien préservées. Ceci limite fortement la fiabilité des informations sur les périodes les plus anciennes dont les datations sont aussi les moins précises. Ces difficultés sont inhérentes au domaine de la paléoclimatologie qui a néanmoins permis de mettre en évidence des variations climatiques majeures pendant l'histoire de notre planète.

**Exemples de variations climatiques**

Le climat fluctue depuis les premiers âges de la Terre et les géologues ont pu reconstituer certains paramètres climatiques qui

prévalaient au cours du Précambrien, des ères Primaire et Secondaire (i.e. périodes de l'Archéen, du Paléozoïque et du Mésozoïque). Le climat de la Terre a évolué entre des régimes très contrastés, allant du froid extrême lors de glaciations généralisées jusqu'à l'équateur à une atmosphère surchauffée par l'effet de serre au temps des dinosaures. Il faudrait plusieurs chapitres pour décrire, même brièvement, l'état des recherches sur ces variations climatiques anciennes étudiées dans les rares roches peu perturbées que la nature a bien voulu laisser à l'affleurement. Il est en effet fort difficile d'obtenir des données paléoclimatiques bien datées et donnant une couverture spatiale suffisante pour étudier les causes de ces fluctuations très anciennes.

Néanmoins, les paléoclimatologues ont une vue assez précise du climat depuis 60 millions d'années grâce aux forages océaniques. Pendant cette période, le climat a subi un lent refroidissement à toutes les latitudes, aussi bien à terre que dans les

océans. Des mesures géochimiques réalisées sur les sédiments marins permettent aux scientifiques de reconstituer des paléotempératures. En une cinquantaine de millions d'années, les océans se sont globalement refroidis d'environ une quinzaine de degrés et les premières calottes de glace se sont installées vers 30 à 40 millions d'années avant nos jours.

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer cette longue transition entre une Terre globalement chaude et une situation proche de l'actuelle. Une augmentation importante du relief (en particulier l'Himalaya) a eu comme conséquence d'augmenter l'érosion mécanique et l'altération des roches. Ces processus sont accompagnés par des réactions chimiques qui dégradent les minéraux, en particulier sous l'effet de l'acide carbonique issu de la dissolution du gaz carbonique atmosphérique. Un relief accru aurait donc progressivement fait chuter l'effet de serre de la Terre. Une diminution du volcanisme et un ralentissement de l'expansion des océans et de la dérive des continents aurait aussi contribué à la chute progressive de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère. Sur les mêmes échelles de temps, on doit aussi tenir compte de la disposition des continents qui a modifié la circulation océanique en surface et en profondeur.

À l'échelle des quelques derniers millions d'années, l'évolution du climat se caractérise par des cycles glaciaires-interglaciaires. La cause principale en est la cyclité 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.

En étudiant en parallèle des forages réalisés dans les sédiments océaniques profonds, les récifs coralliens et les glaces de l'Antarctique, les paléoclimatologues ont pu reconstituer les variations de paramètres comme le niveau marin mondial, la température des océans en surface et en profondeur, la température de l'air en Antarctique, et la teneur atmosphérique en gaz carbonique et en méthane. Toutes ces évolutions sont globalement en phase et indiquent que la répartition de l'insolation exerce un contrôle majeur sur la cryosphère, le cycle du car-



bone, l'atmosphère et l'océan. Les changements astronomiques induisent en fait de petites perturbations, qui sont amplifiées et génèrent ensuite des variations du cycle de carbone. Le CO<sub>2</sub> est à la fois une réponse du système climatique et un élément amplificateur des fluctuations.

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. En particulier, la dernière déglaciation, entre 20 000 ans et 6 000 ans avant nos jours, a entraîné une formidable remontée du niveau marin mondial 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 atmosphériques 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



Dissolutions des carbonates Lapiatz, Le Belvédère d'Aujon (Flaine Haute-Savoie).

Squelette calcaire d'une algue unicellulaire (coccolithophorid) "Emiliania huxleyi".





La calotte Laurentide qui couvrait le Canada pendant les périodes de glaciation 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.

nos jours et a été marqué par une hausse rapide du niveau mondial des océans à un taux supérieur au mètre par siècle.

Les géologues ont aussi découvert que le climat était particulièrement instable pendant les périodes de glaciation. Les événements les plus spectaculaires étaient des périodes d'intense débâcle des énormes calottes de glace installées sur les continents de l'hémisphère nord. 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. Les séries paléoclimatiques montrent que les refroidissements correspondent précisément aux injections de sédiments détritiques transportés par les icebergs.

Ces fréquentes débâcles d'icebergs se sont conjuguées à d'autres modifications du cycle de l'eau, pour générer des fluctuations climatiques extrêmement brusques et de grande ampleur. Lors des transitions, la température de l'air au niveau du Groenland changeait 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 atteignaient plus de 5 °C sur la même échelle de temps. Sur le continent européen, les variations thermiques étaient très importantes, jusqu'à environ

une dizaine de degrés, s'accompagnant de grandes fluctuations de la pluviosité.

L'injection d'énormes quantités de glace continentale pendant les débâcles a diminué la densité de l'eau de mer, freinant ainsi considérablement le renouvellement des eaux profondes. La conséquence directe de ces variations de la circulation océanique a été un refroidissement généralisé en Atlantique Nord et sur les continents limitrophes. A l'aide de marqueurs chimiques, 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.

Pour les dix derniers millénaires (l'Holocène), la variabilité climatique est relativement faible avec des changements thermiques limités en amplitude et en vitesse. La gamme de variation est d'environ un à deux degrés ce qui pose même quelques problèmes de détection du signal. Il n'y a pas vraiment de cyclicité évidente et générale à tous les enregistrements. Certains scientifiques pensent qu'un cycle de 1 000 à 2 000 ans serait présent, mais la démonstration ne fait pas l'unanimité chez les statisticiens du climat. Par ailleurs, ce cycle millénaire n'a été détecté que dans quelques séries paléoclimatiques mesurées dans des sédiments de l'Atlantique Nord.

Les spécialistes travaillant sur les paléoclimats tropicaux ont aussi mis en évidence des fluctuations du cycle de l'eau au cours de l'Holocène. A partir de mesures effec-

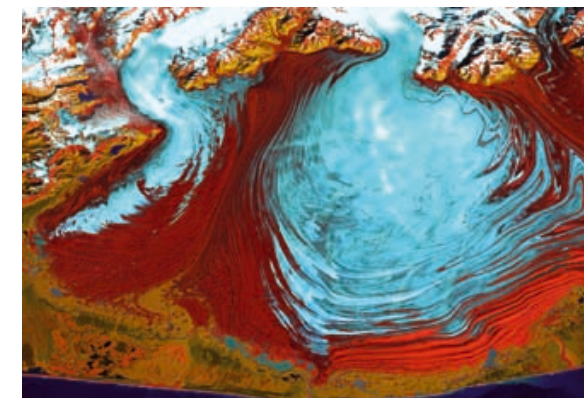
tuées sur des stalagmites, il est par exemple possible de reconstituer les variations de l'intensité de la mousson asiatique. L'analyse des séries temporelles montre une lente décroissance de l'intensité de la mousson depuis 9 000 ans (liée à l'orbite terrestre), mais aussi des brèves périodes d'affaiblissement marqué de la mousson. Ces événements qui durent quelques siècles semblent synchrones avec d'autres variations climatiques observées pour les hautes latitudes (ex. phases d'expansion des glaciers).

### Les variations des températures

Pour le dernier millénaire, les paléoclimatologues ont estimé les variations de la température moyenne. L'incertitude est assez grande, tandis que l'amplitude totale de variation est d'environ 1°C. Il semble que la période la plus froide du millénaire a eu lieu à partir de 1450 pour se poursuivre jusqu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Cette phase froide, communément appelée le Petit Age Glaciaire, a été particulièrement intense en Europe et a succédé à une période médiévale généralement plus clémente.

Pour le dernier siècle, les climatologues disposent d'une foule de mesures directes des températures grâce aux nombreuses stations météorologiques réparties à toutes les latitudes. Il a donc été possible de compiler ces données instrumentales sous la forme d'une courbe moyenne représentative de l'atmosphère au niveau du sol. Cette courbe mondiale présente des variations significatives depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Le fait majeur est que l'atmosphère s'est globalement réchauffée d'environ huit dixièmes de degré depuis 1860. En y regardant de plus près, on remarque que ce réchauffement mondial n'a pas été régulier et l'on distingue clairement deux périodes: la première ayant duré deux décennies de 1920 à 1940 et la seconde commençant vers 1975. Celle-ci perdure encore car les quinze années les plus chaudes enregistrées par les stations météorologiques ont toutes eu lieu après 1985.

Il ne faut cependant pas oublier que ces estimations de la moyenne de la température mondiale masquent une réalité géographiquement contrastée. En cartographiant les anomalies de température pour le dernier demi-siècle, on constate que le



Vue thermographique du recul d'un glacier



réchauffement est assez variable suivant la zone considérée et que certaines régions se sont même un peu refroidies. Le bilan mondial est cependant clairement au réchauffement, en particulier sur les continents des hautes latitudes de l'hémisphère nord. La France n'échappe évidemment pas à cette tendance climatique. Environ 70 séries de températures réparties sur le territoire ont permis de calculer une augmentation d'environ un degré pour le dernier siècle. Encore une fois, il ne s'agit que d'une moyenne, le réchauffement français ayant été un peu supérieur à un degré dans le Bassin Aquitain et un peu inférieur en Alsace Lorraine.

Les climatologues suivent également d'autres paramètres comme la pluviosité, les tempêtes et les cyclones qui varient aussi

Recul du glacier MacCarthy, Kennicott en Alaska.

*Quelles seront les conséquences écologiques, économiques voire géostratégiques du recul de la banquise arctique et de la fusion du pergélisol, sol gelé présent dans les immensités canadiennes et sibériennes ?*



A partir de mesures effectuées sur des stalagmites, il est par exemple possible de reconstituer les variations de l'intensité de la mousson asiatique. L'analyse des séries temporelles montre une lente décroissance de l'intensité de la mousson depuis 9 000 ans (liée à l'orbite terrestre).

Stalagmites de l'Aven Armand.



à l'échelle du dernier siècle. Le réchauffement mondial actuel s'accompagne encore de phénomènes qui en sont les conséquences probables. Par exemple, la plupart des glaciers de montagne ont régressé d'environ un kilomètre au cours du dernier siècle. Ceci est vrai dans les Alpes mais aussi dans les autres chaînes de montagnes du Globe. De nombreuses observations de terrain et de mesures par les satellites, indiquent une accélération récente de la fonte de la calotte de glace du Groenland. Une autre conséquence directe du réchauffement est une dilatation des couches superficielles de l'océan. Ces fluctuations ont pu être suivies pendant la dernière décennie à l'aide de satellites qui permettent de mesurer la hauteur de la mer à quelques centimètres près. Les estimations récentes indiquent un taux actuel de remontée du niveau marin d'environ 3 mm par an. L'expansion thermique de l'océan est responsable d'environ la moitié de cette augmentation, le reste étant lié à d'autres phénomènes comme la fonte des glaciers (environ 0,3 mm/an pour

le Groenland alors que la calotte Antarctique est encore globalement stable).

#### Causes de la variabilité climatique

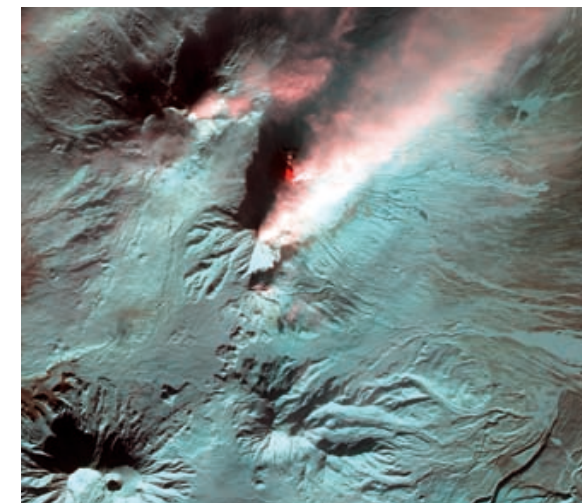
Ce qui caractérise notre climat, c'est d'abord sa surprenante stabilité. Celle-ci est liée à la présence de nombreux mécanismes stabilisateurs qui ont tendance à ramener toute perturbation (cyclique ou irrégulière) vers un état d'équilibre. Il est donc nécessaire d'introduire la notion de rétroaction (feedback) climatique. Les différents compartiments du système climatique étant couplés les uns aux autres, l'action du compartiment A sur B va être aussi suivie d'une réaction de B sur A. Dans certains cas, cette rétroaction de B sur A, amplifiera l'action de A sur B. On parlera de rétroaction positive. Au contraire, celle-ci sera qualifiée de négative si la rétroaction atténue l'action de A sur B. Pour clarifier cette notion fondamentale, mais un peu abstraite, il est utile de mentionner quelques exemples :

A l'échelle des millions d'années, l'effet de serre est régulé par un équilibre entre le flux volcanique et le pompage du  $\text{CO}_2$  atmosphérique par l'altération chimique des roches silicatées. Si la concentration atmosphérique en gaz carbonique s'élève à la suite, par exemple d'une augmentation de l'activité volcanique, l'effet de serre qui s'ensuit va accroître la température et les précipitations. Ces deux conséquences accentuent l'altération chimique des roches par l'acide carbonique ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ). Cette érosion chimique induit une consommation et donc une diminution du gaz carbonique atmosphérique. Il s'agit en fait du mécanisme principal de rétroaction négative, qui a permis de contenir les variations de l'effet de serre à très long terme.

Il existe aussi des rétroactions climatiques positives qui induisent donc une aggravation du phénomène perturbateur. Un exemple typique est celui du recul de la banquise sur l'océan ou de la couverture neigeuse sur le continent. Plus les températures augmentent, plus la neige et la glace reculent ; moins le rayonnement solaire est réfléchi vers l'espace et plus les températures augmentent.

Agissant sur des échelles de temps très courtes, l'eau de l'atmosphère est aussi à l'origine de rétroactions multiples. Si l'océan de surface se réchauffe, la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère augmente rapidement ce qui induit une augmentation de l'effet de serre. Il s'agit d'une rétroaction positive qui a tendance à réchauffer encore plus l'océan de surface. Néanmoins, le système climatique ainsi perturbé réagit aussi avec d'autres mécanismes, en particulier une augmentation de la couverture nuageuse. Les nuages bas augmentent fortement la réflexion de la lumière solaire ce qui a tendance à refroidir l'océan sous-jacent (rétroaction négative).

Un dernier exemple de rétroaction positive et d'amplification est associé au bilan hydrique des régions continentales aux basses latitudes. Dans les climats humides, les précipitations régionales sont captées par les racines, absorbées par les plantes, pour être ensuite réinjectées vers l'atmosphère. On observe donc une augmentation significative des précipitations. Au contraire, pour les climats secs,



les précipitations alimentent directement les nappes phréatiques, les rivières et les océans, réduisant encore ces faibles précipitations.

Ces exemples ne décrivent pas de façon exhaustive tous les changements qui auraient lieu si de telles variations se produisaient. Néanmoins, ils illustrent déjà la complexité du problème car, par un effet de domino, chaque variation climatique va se propager dans le système et générer une cascade d'événements qui auront tendance à amplifier ou à diminuer la perturbation de départ. En fait, l'analogie avec les dominos est simpliste et inappropriée car il faudrait imaginer un système avec des dominos qui pourraient se relever ! En plus de ces mécanismes de rétroactions internes au système climatique, celui-ci peut être perturbé par des facteurs externes de natures astronomiques ou géologiques. Ceci est vrai à toutes les échelles de temps et en particulier pour les derniers millénaires.

On sait maintenant que le flux énergétique du Soleil n'est pas constant dans le temps. Grâce aux mesures réalisées par les sondes spatiales depuis les années 80, il apparaît que l'éclairement du Soleil fluctue à court terme. Par exemple, le cycle solaire de 11 ans est accompagné par une variation d'éclairement total d'environ

Le Klyuchevskaya Sopka, aussi appelé Klyuchevskoi (ou Klyuchevskoi) est le plus haut sommet, mais aussi le volcan le plus actif de la péninsule du Kamchatka, en Russie. C'est un strato-volcan de 4 835 m d'altitude apparu il y a environ 6 000 ans. Il fait partie de la Ceinture de feu du Pacifique.

A l'échelle des millions d'années, l'effet de serre est régulé par un équilibre entre le flux volcanique et le pompage du  $\text{CO}_2$  atmosphérique par l'altération chimique des roches silicatées. Si la concentration atmosphérique en gaz carbonique s'élève à la suite, par exemple d'une augmentation de l'activité volcanique, l'effet de serre qui s'ensuit va accroître la température et les précipitations.

L'Augustine, est un stratovolcan et une île située en Alaska, au nord-est de la péninsule d'Alaska, dans la baie de Cook, à 290 kilomètres au Sud-Ouest d'Anchorage.



*Le volcanisme fait aussi partie des causes externes ayant pesé sur la variabilité climatique de l'Holocène. Une éruption majeure peut propulser dans la haute atmosphère des gaz soufrés qui se transforment rapidement en aérosols sulfatés.*

*L'éruption majeure la mieux étudiée, celle du Mont Pinatubo en juin 1991 sur l'île de Luzon, aux Philippines.*

ron 0,1 %. Plusieurs équipes d'astrophysiciens ont développé des modèles pour convertir les observations de l'activité solaire en termes d'éclairement pour les quelques derniers siècles. Ces enregistrements montrent que l'éclairement solaire varie aussi à long terme avec des périodes de faible valeur correspondant aux baisses d'activité du Soleil. La plus connue de ces phases de calme solaire a eu lieu entre 1645 et 1715, période pendant laquelle les taches solaires étaient pratiquement absentes. A plus long terme, il est possible d'utiliser des marqueurs isotopiques afin d'estimer approximativement les variations de l'éclairement solaire. Un résultat majeur de ces études est que le minimum du XVII<sup>ème</sup> siècle n'est qu'un minimum parmi de nombreux autres et que le Soleil a passé une partie importante des derniers millénaires en phase calme avec un éclairement généralement un peu plus faible que la valeur actuelle. L'impact climatique de ces fluctuations solaires est encore l'objet de beaucoup d'incertitude. Néanmoins, de nombreux chercheurs pensent que

ces variations irrégulières sont en partie responsables des variations climatiques à l'échelle des derniers millénaires.

Le volcanisme fait aussi partie des causes externes ayant pesé sur la variabilité climatique de l'Holocène. Une éruption majeure peut propulser dans la haute atmosphère des gaz soufrés qui se transforment rapidement en aérosols sulfatés. Ces particules ont tendance à refroidir le climat en réfléchissant les rayons solaires. Un impact à l'échelle mondiale, d'environ demi-degré au niveau du sol, a été particulièrement bien étudié à la suite de l'éruption du volcan Pinatubo dans les Philippines (Juin 1991). Néanmoins, l'influence climatique d'une unique éruption ne dure pas plus de deux ou trois ans car les aérosols retombent assez rapidement et ne changent donc pas durablement le climat. Cependant, des fluctuations de la fréquence et de l'intensité des grandes éruptions volcaniques ont effectivement eu lieu au cours du dernier millénaire ce qui a donc pu contribuer aux faibles variations climatiques observées.



*L'éruption du Boquerón en 1952 (Mexique).*



### Les hommes face au climat

Les variations climatiques sont probablement à l'origine de l'apparition du genre humain. Cette affirmation pourrait sembler simpliste compte tenu de la complexité de l'évolution des primates depuis plusieurs dizaines de millions d'années et de l'existence de nombreux facteurs biologiques qui régissent l'évolution des espèces. En effet, des débats animent encore les paléontologues pour comprendre l'apparition de la bipédie, la libération de la main, la conversion au régime alimentaire omnivore, le développement du cerveau et des capacités intellectuelles... et bien d'autres spécificités qui caractérisent le rameau humain.

Depuis les travaux de Darwin, nous savons que le moteur de l'évolution est la sélection naturelle des populations sous l'influence des conditions environnementales. Le climat change le milieu écologique, ce qui crée une pression d'adaptation parmi les espèces animales. La sélection génétique fait le reste en optimisant les espèces à leur environnement. Les grands changements climatiques à long terme sont donc susceptibles de faire varier les espèces. De façon un peu plus subtile, le caractère stable ou variable du milieu peut favoriser une espèce plutôt qu'une autre et même être à l'origine d'une nouvelle espèce. Il reste encore beaucoup à comprendre sur les mécanismes de cette influence environnementale sur l'évolution de l'homme. Les enregistrements paléoclimatiques montrent bien les conséquences mondiales de l'installation des grandes calottes glaciaires de l'hémisphère nord pendant les dix derniers millions d'années.

Au cours de cette longue période, le continent africain a subi des variations de température mais aussi et surtout des variations du cycle de l'eau. En refroidissant le Globe, les glaciations ont progressivement asséché ce continent en faisant apparaître de grandes savanes. L'aridifica-



Totalement adapté à son environnement, l'Homme de Néandertal a régné sur le continent Européen pendant l'essentiel du dernier cycle glaciaire. Cette population a d'abord vécu lors de la longue phase chaude qui a précédé la dernière glaciation et a duré environ vingt millénaires. En développant une anatomie particulièrement robuste, les néandertaliens ont ensuite pu coloniser un continent partiellement englacé et affronter une faune sauvage impressionnante dont le mammoth et l'ours.

Une silhouette trapue et musclée, un visage caractérisé par un front fuyant, une absence de menton et des arcades sourcilières énormes, l'ont souvent fait prendre pour une brute sans intelligence. Tout au contraire, les préhistoriens ont trouvé de nombreuses preuves du développement de ses facultés mentales. D'ailleurs son cerveau était au moins aussi volumineux que le nôtre. Même les outils confectionnés par les néandertaliens témoignent d'un indéniable sens artistique.

Vers 40 000 ans avant nos jours, les néandertaliens ont dû faire face à l'arrivée d'hommes modernes dont l'origine peut être retracée au Proche-orient. Au point de vue anatomique cet homme de Cro-Magnon nous ressemble complètement. Deux populations distinctes ont donc occupé l'Europe vers la fin de la dernière période glaciaire. Les préhistoriens ne savent pas encore pourquoi l'homme de Neandertal a disparu. Certains penchent pour une assimilation génétique, c'est-à-dire une fusion avec les populations modernes. D'autres pensent que les deux populations n'étaient pas interfécondes et que les néandertaliens ont disparu de façon dramatique. Le climat a-t-il eu un rôle dans ce remplacement ? Certains le pensent en effet, mais la preuve est difficile à apporter.

Crâne de l'Homme de Rhodésie "Mine de Broken Hill en Zambie". Âgé probablement de 125 000 à 300 000 ans, il serait l'ancêtre de "l'Homo sapiens", et descendant de "l'Homo antecessor".



tion du milieu s'est accélérée en différentes étapes dont la chronologie commence à devenir précise. De plus, les variations de la géométrie de l'orbite terrestre à l'origine des glaciations ont aussi créé des conditions hydrologiques beaucoup plus variables. En particulier, l'intensité du phénomène de mousson africaine est intimement liée à la saisonnalité de l'insolation et donc très sensible aux cycles astronomiques.

Comme les paléontologues l'ont constaté, ces variations climatiques ont eu un impact indéniable sur la faune africaine, des éléphants aux ongulés herbivores, en passant, bien sûr, par les singes et les premiers hominidés. Ce n'est donc pas un hasard si les premiers représentants du genre Homo sont apparus pratiquement en même temps que les ruminants adaptés à la savane comme les gazelles et les antilopes.

### L'homme fait face à des changements radicaux

Pendant les glaciations, l'homme a fait face à des changements de premier ordre de son environnement. L'exemple de la colonisation des Amériques permet d'illustrer l'influence d'une variation climatique de grande ampleur. La voie d'accès depuis le continent Eurasiatique est un passage au niveau du détroit de Béring, bras de mer peu profond qui sépare la Sibérie de l'Alaska. Pendant les glaciations, les calottes de glace continentales étaient suffisamment volumineuses pour faire baisser le niveau marin global d'environ 130 mètres. La région de Béringie, actuellement immergée, s'étendait sur une largeur d'environ deux mille kilomètres joignant la Sibérie à l'Alaska. Même s'il était possible de traverser la Béringie à pied sec, le passage vers l'Amérique plus méridionale était obstrué par l'énorme calotte Canadienne qui s'étendait d'est en ouest, des montagnes Rocheuses au Québec. Il a fallu attendre qu'une partie de la calotte fonde lors de la dernière phase de déglaciation, ouvrant ainsi un corridor entre deux calottes résiduelles: la Laurentide à l'Est et la calotte de la Cordillère des Rocheuses à l'Ouest. Cette période de transition, avec une Béringie émergée et un corridor sans glace, a eu lieu entre 18 000 et 15 000 ans avant nos jours.

L'amélioration climatique de la dernière déglaciation a aussi profondément modifié

la faune et la végétation aux moyennes et hautes latitudes. Tout autour de la Mer Méditerranée, le climat est devenu de plus en plus humide, un phénomène qui a culminé vers 9000 ans avant nos jours en liaison directe avec les cycles d'insolation causés par les variations de l'orbite terrestre. Au Proche-Orient, les céréales sauvages sont devenues abondantes vers le milieu de la déglaciation, époque à laquelle certaines populations ont commencé à se sédentariser et à construire les premiers hameaux. Ce n'est donc pas un hasard si les premières civilisations sont nées au début de l'Holocène.

### Des premiers hameaux aux premiers états-royaumes

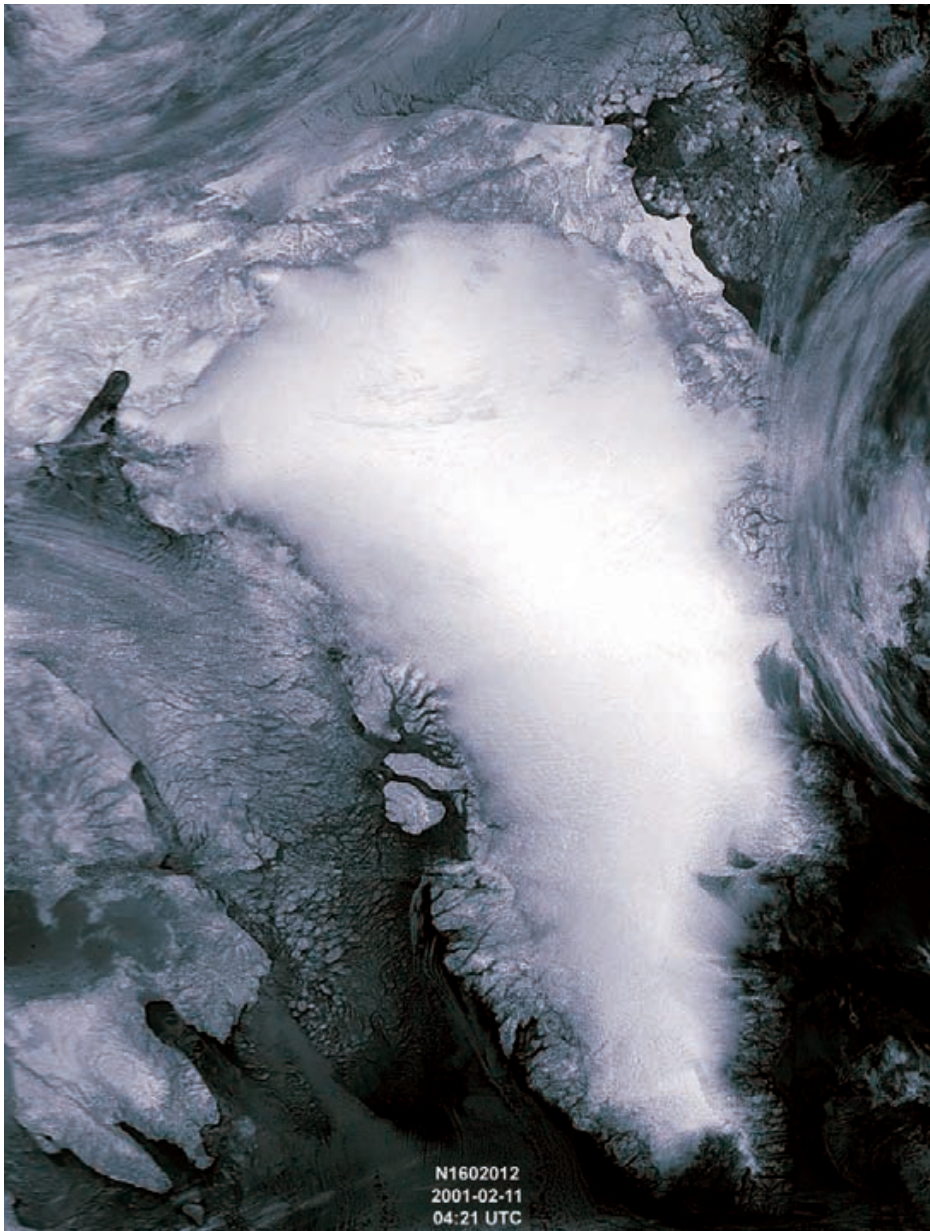
Les dernières périodes de la préhistoire se caractérisent par une complexification progressive des sociétés humaines. La région qui a vu naître le néolithique connaît une lente dégradation de l'environnement causé par une diminution régulière des précipitations. Ce changement climatique qui a débuté vers 7000 ans avant nos jours est encore une conséquence des cycles astronomiques qui contrôlent l'insolation sur Terre. Des conditions de plus en plus arides ont forcé les sociétés agro-pastorales à mieux s'organiser pour optimiser l'utilisation des ressources naturelles, en particulier l'eau douce. Une pression démographique accrue dans un environnement redevenant hostile a aussi poussé les communautés à se regrouper afin de se défendre contre les agressions venant des sociétés voisines. Ces transformations complexes sont à l'origine des premières grandes civilisations qui ont fleuri en Mésopotamie et dans les vallées de l'Indus et du Nil. La civilisation de l'Égypte pharaonique était extrêmement complexe et raffinée. Elle restait néanmoins totalement tributaire du fleuve Nil et de ses fluctuations de débit.

Sur un autre continent et pour un passé plus récent, il semble que des périodes d'assèchement ont eu raison de certaines civilisations d'Amérique Centrale. L'histoire maya est particulièrement complexe, rythmée par le déclin des différentes capitales qui, à la suite de conflits armés, se remplaçaient successivement pour contrôler les richesses du pays. Pour certains spécialistes, les variations du climat ont été à



La civilisation de l'Égypte pharaonique était extrêmement complexe et raffinée. Elle était néanmoins totalement tributaire du Nil et de ses fluctuations de débit que les égyptiens mesuraient soigneusement grâce aux "nilomètres". Nilomètres de l'île d'Elephantine.





l'origine de certaines de ces périodes troublées. Les mayas n'ont pas laissé d'information écrite à ce sujet, mais il est possible de retracer les périodes de sécheresse en étudiant par exemple les sédiments des lacs de la région. Les grandes ruptures historiques, et en particulier l'effondrement vers l'an 800, semblent correspondre à des périodes de sécheresse intense et prolongée.

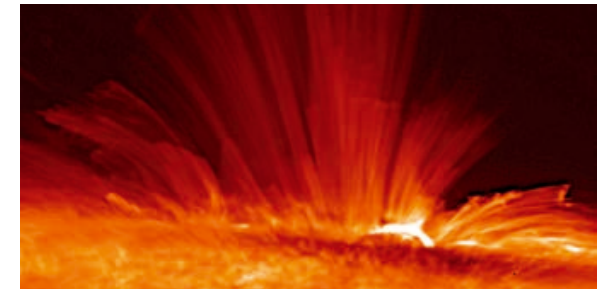
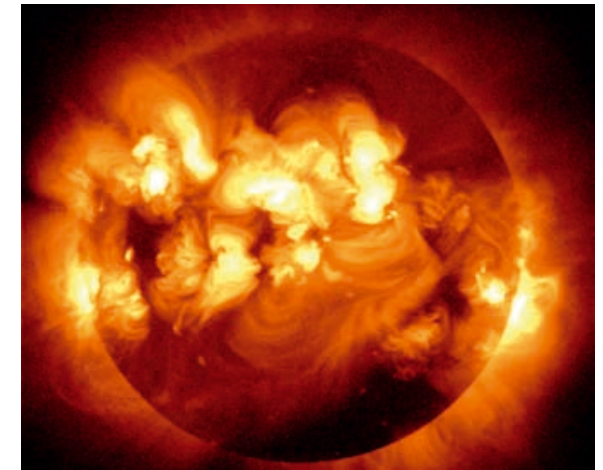
Au début de l'«Optimum Médiéval», le développement des sociétés scandinaves a poussé certains petits groupes à vouloir conquérir d'autres terres. C'est dans ce contexte de réchauffement climatique et de désir de conquérir de nouvelles terres, qu'a eu lieu la colonisation du Groenland (étymologiquement «pays vert» ou «pays terre» selon d'autres). Quatre siècles après, le climat de cette région est redevenu plus rude marquant les débuts du «Petit Age Glaciaire». Les conditions de vie des vikings devenues plus difficiles ont conduit à l'abandon total des colonies du Groenland.

Séparer les causes environnementales des causes démographiques et culturelles devient encore plus délicat pour les derniers siècles. L'histoire de l'Europe se résume souvent à l'énumération de règnes, de guerres et de conquêtes, ces événements politiques venant se superposer à l'histoire du progrès des arts et des techniques. Ceci pourrait laisser croire que nos sociétés se sont affranchies de leur lien avec l'environnement. C'est une impression fautive, mais le problème est que les événements historiques récents sont souvent complexes. Il est donc souvent illusoire de vouloir en isoler une composante purement climatique.

#### Ce qui a changé depuis un siècle

Les activités humaines ont clairement perturbé l'équilibre naturel qui prévalait avant l'ère industrielle. L'augmentation des gaz à effet de serre est équivalente à environ 1% du flux solaire ce qui est tout à fait significatif. Pour l'essentiel, cette augmentation est liée à la combustion de carbones fossiles et à leur transformation en gaz carbonique. L'amplitude, et surtout, la rapidité de l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre sont tout à fait inédites sur le plan géologique.

Néanmoins, il faut noter que les courbes d'augmentation des gaz à effet de serre due



aux activités humaines, sont de forme exponentielle et ne semblent pas être responsables de la première partie du réchauffement observée avant 1950. Des causes naturelles comme l'augmentation de l'éclairement solaire ou la diminution de la fréquence des éruptions volcaniques ont contribué à cette phase initiale du réchauffement mondial.

Pendant les trente dernières années, l'accélération du réchauffement observée semble dépasser la variabilité naturelle. Cette augmentation ne semble visiblement pas pouvoir être reliée quantitativement aux changements naturels du Soleil et des volcans. En outre, de nombreux travaux de modélisation numérique du climat indiquent que l'augmentation récente de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre est probablement la cause principale du réchauffement des dernières décennies.

*Pendant les trente dernières années, l'accélération du réchauffement observée semble dépasser la variabilité naturelle. Cette augmentation ne semble visiblement pas pouvoir être reliée quantitativement aux changements naturels du Soleil et des volcans : elle s'explique par l'accroissement d'origine anthropique de l'effet de serre.*

*Page de gauche. C'est dans un contexte de réchauffement climatique de l'optimum médiéval qu'a eu lieu l'établissement de colonies Vikings au Groenland. Quatre siècles plus tard le petit âge glaciaire conduisit à l'abandon total de ces colonies.*





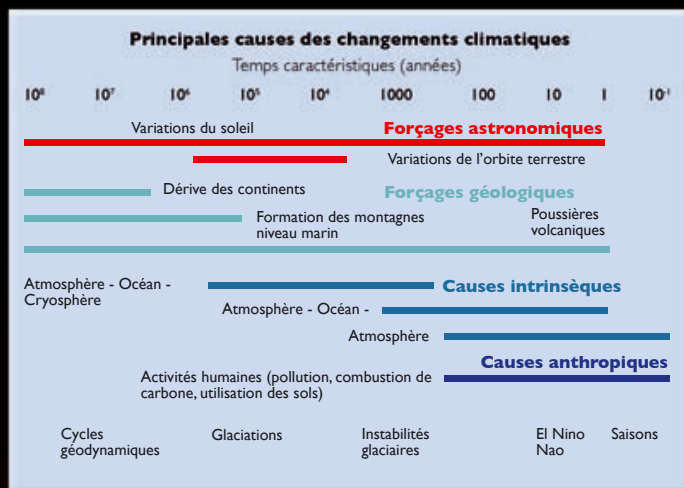
**Le climat du futur**

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. Les échanges entre les paléoclimatologues et les modélisateurs de l'atmosphère 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. Après les avoir testés à l'aide des variations du passé, ces modèles couplés peuvent être utilisés pour prévoir le climat futur.

*Dans l'œil du cyclone Katrina*

*La fréquence des ouragans intenses en Atlantique pourrait être liée aux conditions météorologiques spécifiques à long terme du bassin Atlantique, d'après des scientifiques américains.*

*Ceux-ci ont fait cette corrélation en analysant les sédiments d'une île des Caraïbes très vulnérable aux ouragans. Ils ont pu déterminer ainsi la chronologie des ouragans dans la région sur une période de 5 000 ans.*



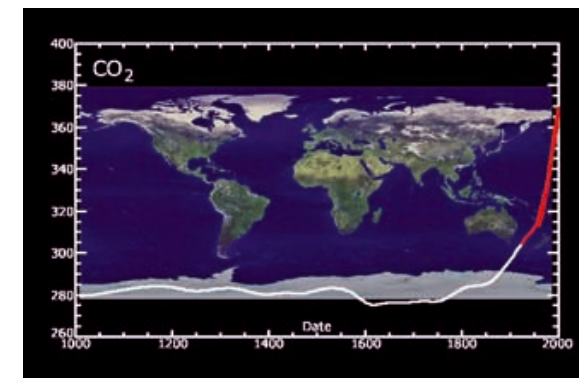
L'approche numérique peut sembler mystérieuse, mais il est impossible de faire autrement car il n'est pas possible de construire une Terre miniature, avec toutes ses interactions climatiques, sur laquelle on puisse tester les hypothèses. Les modèles mathématiques simplifient obligatoirement le fonctionnement de la machine climatique. C'est vrai en particulier pour tous les processus de petite échelle dont la dynamique ne peut pas être représentée de façon explicite. Par ailleurs, les phénomènes biologiques sont simulés par des lois empiriques et statistiques car il n'est évidemment pas possible de représenter chaque organisme individuellement. Néanmoins, ces différentes approximations ont fait l'objet d'améliorations récentes en comparant les calculs avec les observations de l'environnement actuel.

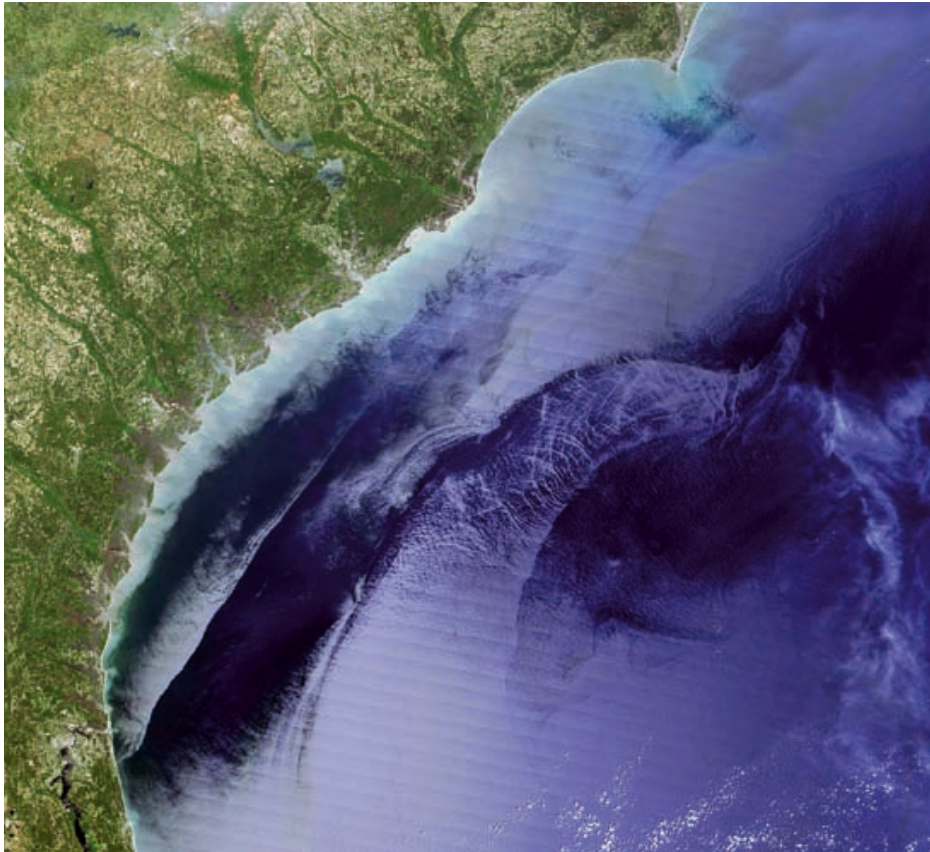
Prévoir le climat du prochain siècle est une tâche extrêmement ardue car, en plus de ces incertitudes scientifiques et techniques, il est nécessaire de tenir compte de l'évolution de la population mondiale et de sa consommation d'énergie. Ces facteurs sociologiques et économiques ne relèvent

pas du domaine de la climatologie et compliquent notablement les prévisions. Pour simplifier les choses et pouvoir comparer les prévisions climatiques, les scientifiques ont donc bâti quelques scénarios différents, du plus pessimiste au plus favorable en ce qui concerne la gouvernance climatique mondiale. Ces scénarios reposent sur des hypothèses plausibles quant au développe-

*Mis en service en octobre 1990, le navire de recherche pluridisciplinaire L'Atalante est destiné à la géoscience marine, à l'océanographie physique et à la biologie marine. (Ifremer)*

*Evolution du taux de CO<sub>2</sub> en 1 000 ans.*





Le Gulf Stream au large de la Géorgie. (Nasa-Mobis).

Les changements climatiques ont deux grands types de conséquences sur les océans : d'une part, des changements de la circulation océanique et donc des transports de chaleur à l'échelle de la planète, d'autre part, une acidification de l'eau de mer ce qui a tendance à diminuer la solubilisation du  $\text{CO}_2$  anthropique et à freiner la formation des squelettes calcaires ( $\text{CaCO}_3$ ) de certains organismes marins comme les coraux.

ment technologique, à l'évolution démographique, à la croissance économique et à la mondialisation. A titre d'illustration, la concentration en  $\text{CO}_2$  pour l'année 2100 atteindrait 550 ppm pour le scénario vertueux et 950 ppm dans le cas d'une croissance économique débridée fondée sur l'utilisation des carbones fossiles comme principale source d'énergie. Cette concentration est aujourd'hui de 385 ppm.

Suite à sa mise en place par l'ONU à la fin des années 80, le comité appelé le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) établit régulièrement un rapport de synthèse des résultats scientifiques acquis sur les changements

climatiques récents et les prévisions pour le climat futur. Dans son dernier rapport daté de 2007, les projections futures sont fondées sur une vingtaine de modèles climatiques construits par de nombreux laboratoires dans le monde. Il en ressort que la température moyenne mondiale augmenterait de 1,1 à 6,4°C vers 2100. Cette large fourchette indique que des progrès doivent être réalisés pour mieux modéliser l'influence anthropique sur le système climatique. Il faut souligner que la première source d'incertitude ne réside pas dans la science du climat, mais dans les scénarios d'émission de gaz à effet de serre, dépendant des hypothèses démo-

### Les gaz à effet de serre

Ils ont la particularité d'être transparents à la lumière visible mais opaques pour la majeure partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre. La conséquence est un réchauffement de la surface terrestre, de l'atmosphère et des océans. Le taux d'absorption dépend de la structure électronique des molécules du gaz considéré. Les infrarouges induisent des vibrations ou des rotations des liaisons chimiques, phénomènes variant avec la nature des liaisons, la géométrie des molécules et les masses relatives de leurs atomes.

Les principaux gaz à effet de serre naturel de l'atmosphère sont dans l'ordre d'importance, la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), le gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), l'ozone ( $\text{O}_3$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Les concentrations atmosphériques naturelles (préindustrielles) de ces gaz sont faibles: 0,3% en moyenne pour la vapeur d'eau, 0,03% pour le  $\text{CO}_2$  et plus faibles que le ppm pour les autres gaz. Par contre, les principaux constituants de l'atmosphère comme l'azote ( $\text{N}_2$ ) et l'oxygène ( $\text{O}_2$ ) ne contribuent pas à l'effet de serre.

Les prochaines années et même les prochaines décennies vont être l'objet d'un très grand effort scientifique à l'échelle mondiale consacré à la question du changement climatique, et à ses principaux remèdes potentiels comme la séquestration du gaz carbonique.

graphiques, économiques et technologiques. Lorsque les simulations climatiques perpétuent l'usage intensif des combustibles fossiles, la fourchette des prévisions est plus haute et resserrée: entre 2,4°C et 6,4°C de plus à l'horizon 2100. C'est en tenant compte du scénario où l'usage des énergies fossiles est modéré que le réchauffement, de 1,1 à 2,9 °C, reste dans des limites moins inquiétantes.

Ces estimations d'un réchauffement mondial moyen masquent le fait que les changements climatiques seront certainement très différents suivant les régions. En fait, l'augmentation de la température serait particulièrement marquée sur les continents et aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Les précipitations augmenteraient aux moyennes et hautes latitudes et dans la zone équatoriale et diminueraient au niveau des zones subtropicales, déjà assez sèches. Les événements extrêmes comme les cyclones tropicaux et les épisodes très pluvieux pourraient augmenter en intensité et en fréquence. Le réchauffement mondial continuera de se propager aux couches superficielles de l'océan qui se dilateront en conséquence. L'élévation du niveau moyen mondial des mers se situerait entre 50 et 120 cm d'ici à l'année 2100. L'inquiétude vient aussi de nombreuses conséquences sur l'océan, la banquise, les calottes polai-

res, la végétation et les sols. Les interactions entre ces autres compartiments du système climatique se caractérisent par des phénomènes non-linéaires, pouvant aller jusqu'à des seuils irréversibles. Ces processus complexes pourraient donc venir amplifier les perturbations futures. Une autre source d'inquiétude vient de l'effet d'inertie du système climatique : certaines composantes de ce système répondent à très court terme quand d'autres le font à plus long terme. Le changement climatique ne s'arrêtera donc pas, malheureusement, avec la fin des émissions de gaz carbonique et pourrait aller bien au-delà du XXI<sup>ème</sup> siècle.

Les satellites permettent de suivre en permanence la surface des océans, ci dessous un vision thermographique du Gulf Stream.

