

**La physique
pour mieux
comprendre
le monde**

Année mondiale de la physique 2005

La Terre et son environnement



ministère
Éducation
nationale
enseignement
supérieur
recherche

É ministère délégué
à l'enseignement supérieur
et à la recherche



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

Étudier la Terre, pourquoi ?

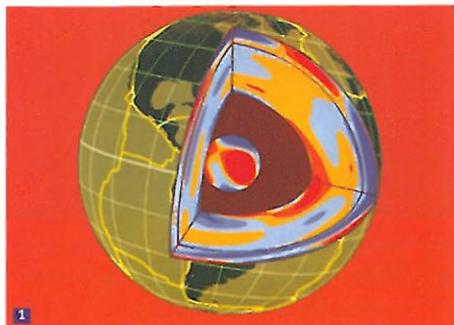
En ce début du xxi^e siècle, la prise de conscience de l'impact des activités et des besoins énergétiques d'une population mondiale sans cesse croissante, nous met face à une question critique et impérieuse : comment mieux gérer, exploiter et conserver ce patrimoine collectif qu'est notre planète et les ressources qu'elle nous offre ? Quiconque souhaite répondre à cette question doit accompagner les scientifiques dans leurs odyssées : observer avec eux la Terre depuis les satellites, en explorer l'intérieur grâce aux sismographes, sillonner les mers à bords des navires océanographiques, simuler à l'aide de puissants ordinateurs les climats du passé pour prévoir ceux du futur. Ce faisant, il découvrira que les différents compartiments de cette immense machine thermique qu'est la Terre, qu'autrefois on croyait indépendants, sont au contraire en interaction profonde et constante : la Terre est un tout. Un tout que seule une connaissance globale nous aidera à préserver.

Parce que nous y vivons !

VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE

Énigme en 1889 à Postdam, en Allemagne : l'un des tous premiers sismographes enregistre des vibrations du sol alors que la région n'est secouée d'aucun tremblement de terre ! L'explication n'arrivera qu'après : quelques dizaines de minutes avant que le sismographe s'agite, un séisme dévastateur avait frappé le Japon ! Pour la première fois, on avait donc enregistré le mouvement du sol provoqué par un séisme lointain. La sismologie globale était née et avec elle l'étude de l'intérieur de la Terre. Car les ondes sismiques permettent d'obtenir une véritable échographie géante de notre planète. Le principe est simple : il s'agit de reconstruire les structures souterraines en comparant les durées de trajets des ondes sismiques allant du foyer d'un séisme jusqu'aux stations sismiques qui l'ont enregistré, ainsi que les variations d'amplitude des mêmes ondes. Au rythme des séismes ravageant notre globe, les découvertes se succédèrent : l'existence du noyau de la Terre par Oldham en 1906, puis Gutenberg en 1914, la démonstration du caractère liquide de ce noyau par Jeffreys (1926), puis la découverte de la graine





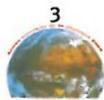
solide enfouie au cœur du noyau, par Lehmann (1936).

La sismologie globale permet bientôt de dessiner une image complète de l'intérieur de la Terre (image 1). Le noyau, constitué principalement de fer métallique, occupe le centre de la Terre jusqu'à 2900 km de profondeur. Au-dessus, le manteau, constitué de silicates de fer et de magnésium, s'étend jusqu'à la base de la croûte, une couche superficielle de roches de 4 à 70 kilomètres d'épaisseur plus riche en silicium. Trois compositions chimiques, trois étages : noyau – manteau – croûte. Des étages qui sont compartimentés à leur tour sous l'effet des variations de température et de pression. Ainsi le fer est-il liquide aux très fortes températures qui règnent dans le noyau externe. Mais sous l'effet antagoniste de la pression, il devient solide au cœur du noyau, c'est la graine,

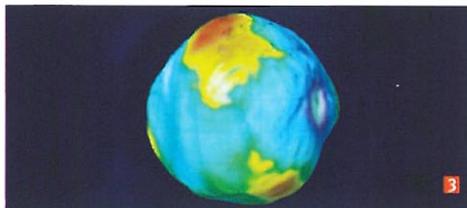
boule de 1220 km de rayon. De même observe-t-on plusieurs « changements de phase » dans le manteau, à 410 et 660 km de profondeur. Il s'agit cette fois de réarrangements minéralogiques à l'état solide, comme l'ont montré les expérimentateurs dans les années 1970, grâce au développement des presses à enclumes de diamant permettant de reproduire les pressions et températures régnant dans le manteau.

Après la deuxième guerre mondiale, une autre grande exploration s'intensifiait : celle des fonds océaniques. On découvrait les dorsales océaniques, ces immenses chaînes de montagnes sous-marines qui traversent les océans en leur milieu (image 2). Elles résultent de l'écartement des plaques et de la remontée de matériau chaud du manteau qui fond partiellement à quelques kilomètres de profondeur, produisant un gigantesque volcanisme sous-marin. Plus tard, des expéditions vers les dorsales à bord de mini sous-marins révélèrent qu'elles abritent, malgré la profondeur – plusieurs kilomètres – et l'obscurité totale qui y règne, des oasis de vie peuplées d'étranges créatures rencontrées en nul autre endroit du Globe. Grâce à ces travaux de pionniers, nous avons une connaissance de plus en plus précise des fonds océaniques.

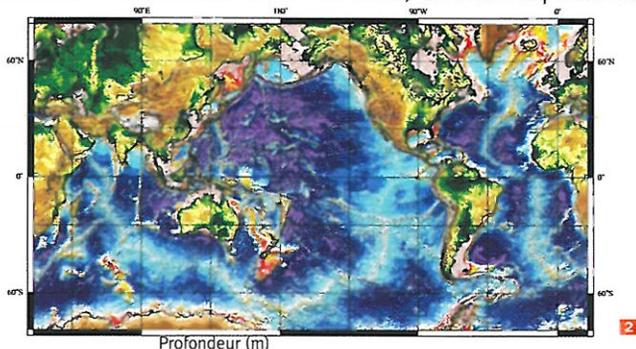
1/ Représentation de la structure interne de la Terre obtenue par l'étude des séismes.



Dans les années 1960, avec l'avènement de l'ère spatiale, c'est un nouveau champ d'investigation qui s'ouvre aux sciences de la Terre. L'analyse de la trajectoire exacte des premiers satellites artificiels permet de dresser la première carte précise du champ de gravité terrestre. Conclusion : à l'échelle du globe, le champ de gravité ressemble à une poire dotée de creux et de bosses ! (image 3). La nouvelle carte ainsi dressée enrichit considérablement la connaissance de l'intérieur de la Terre car la gravité en un point dépend de la nature du sous-sol. Ainsi déduit-on des variations à très grande échelle du champ de gravité, des hétérogénéités de densité très



profondes dans le manteau, tandis que de petites irrégularités du champ révèlent notamment les boursouflures de la croûte (monts sous-marins, fractures). L'observation spatiale de la Terre poursuit aujourd'hui sa progression et nous apporte une vision globale et précise de nombreux phénomènes qui se produisent dans toutes les couches de la Terre, de l'atmosphère au noyau.



2/ La topographie des fonds sous-marins obtenue par l'altimétrie spatiale révèle les fosses et les dorsales et à plus petite échelle des montagnes sous-marines ; crédit CNES.

3/ Représentation du géoïde terrestre obtenue par exploration du champ de gravité de la Terre et de ses variations. Le géoïde coïncide avec le niveau moyen des océans supposés au repos (c'est-à-dire en faisant abstraction des marées, des vents, des courants, etc.) et, en zone continentale, avec son prolongement défini mathématiquement. Le géoïde est une surface très irrégulière, parsemée de « creux » et de « bosses » qui reflètent les variations locales de gravité. Il constitue l'équipotentielle de référence (l'altitude zéro) pour la mesure des altitudes en géodésie ; crédit CNES/GRGS.



LA TERRE, UNE MACHINE THERMIQUE EN MOUVEMENT !

Les éruptions volcaniques et les tremblements de terre nous le rappellent périodiquement et tragiquement (image 4) : la Terre est une planète active et le tableau que nous venons de dresser est en perpétuel mouvement. En sciences de la Terre, l'une des grandes révolutions du xx^e siècle aura été la démonstration puis l'acceptation que les continents eux-mêmes se déplacent les uns par rapport

aux autres. Alfred Wegener est le père de cette « dérive des continents ». S'il a émis ses idées dès 1912, il n'assistera pas lui-même à leur triomphe. Car aussi nombreux soient les indices en faveur d'un passé commun à l'Afrique et à l'Amérique du Sud, l'idée de continents « baladeurs » réclamait un mécanisme, une force, que Wegener ne parvint pas à identifier.

C'est lors de l'avènement de la théorie de la « tectonique des plaques » dans les



4/ L'éruption de la Montagne Pelée (Martinique) en 1902, qui a causé la mort de plus de 28 000 personnes, a frappé les esprits et marque le début des observations suivies des volcans. Grâce à ces observations, des signes avant-coureurs des éruptions volcaniques ont pu être obtenus, et de nombreuses catastrophes évitées à la fin du XX^e siècle. L'éruption, prévue, du St Helens (USA) en 1980, a ouvert la voie à une modélisation plus physique de la dynamique des éruptions volcaniques.



années 1960, probablement la période la plus excitante de l'histoire des sciences de la Terre, que ce moteur a été trouvé : il s'agit de la chaleur interne de la planète. Mais la tectonique des plaques est allée plus loin que répondre au problème posé par Wegener. Elle a fourni un cadre cohérent, unificateur et quantitatif, dans lequel presque toutes les observations sur notre planète se sont révélées n'être que des manifestations d'un unique mécanisme.

L'un des acteurs principaux de la tectonique des plaques est l'enveloppe rocheuse qui réunit la croûte terrestre et la partie supérieure du manteau. Constitués tous deux de roches rigides par rapport au manteau sous-jacent, croûte et manteau supérieur se déplacent de pair. Sur toute la surface de la Terre, cette enveloppe est découpée en plusieurs grandes plaques qui se déplacent les unes par rapport aux autres à des vitesses de quelques centimètres par an. Des vitesses certes faibles, mais que le développement de la géodésie spatiale, en particulier avec le système de positionnement GPS précis au millimètre sur l'année, permet aujourd'hui de mesurer en temps réel. L'affrontement des plaques à leur frontière est responsable des chaînes de montagnes – les continents portés par les plaques entrent en collision, se compriment et forment des reliefs –, ainsi que des principales

manifestations violentes de la Terre – de puissants séismes et des volcans explosifs menacent là où les plaques océaniques plongent sous les plaques continentales. Mais le ballet des plaques n'est que la partie émergée du phénomène. L'origine des mouvements est à chercher plus profond, à l'intérieur du manteau. Comme l'atmosphère ou l'océan, la Terre solide est avant tout une gigantesque machine thermique. La chaleur accumulée en son sein, résultant pour l'essentiel de la désintégration des éléments radioactifs (uranium, thorium et potassium) emmagasinés lors de la formation de la planète, brasse le manteau : telles de l'air chaud, les roches du manteau chauffées par la radioactivité ont tendance à monter. Il s'ensuit de gigantesques déplacements de matière qui animent tout le manteau.

Radioactivité et convection sont les deux clefs des processus thermiques dans la Terre : deux découvertes de la physique du tout début du xx^e siècle qui avaient manqué à Lord Kelvin lorsqu'en 1867, il calculait que si la Terre se refroidissait depuis sa formation, elle ne pouvait être âgée que d'une centaine de millions d'années. Grâce aux travaux des géochimistes, on sait maintenant que la formation de la Terre remonte en fait à plus de 4,55 milliards d'années.



La convection est aussi à l'œuvre encore plus profondément, dans le noyau. Et les conséquences sont encore plus fascinantes : le fer en fusion, entraîné à des vitesses qui atteignent le millimètre par seconde, est le siège de courants électriques qui produisent le champ magnétique de notre planète. La validation du mécanisme – dit de « dynamo auto-entretenu » – a été un réel défi pour les scientifiques. Si le principe général avait été proposé par Sir Larmor en 1919, il a fallu attendre 2000 pour que deux expériences puissent reproduire le phénomène !

L'AIR ET L'EAU :

DES OASIS DE VIE BIEN CHANGEANTES

Les travaux d'Agassiz, en 1837, puis ceux d'Adhemar et Croll avaient montré que des changements importants du climat avaient eu lieu dans le passé, avec des alternances entre périodes glaciaires et interglaciaires. On sait aujourd'hui, par exemple, que le dernier maximum glaciaire est survenu il y a 20 000 ans. Les glaciers recouvraient alors une très grande partie de l'Amérique du Nord et s'étendaient en Europe sur toute la Scandinavie (image 5).

Mais ce n'est qu'en 1924 que parût la théorie de Milutin Milankovitch proposant de lier ces alternances aux variations des paramètres astronomiques de la Terre sur son orbite, théorie dont le bien fondé fût établi par des nombreuses études basées sur les sédiments marins (image 6).

S'il devient indubitable, après le travail de Milankovitch, que les changements orbitaux jouent un rôle de métronome, la théorie du géophysicien yougoslave n'explique pas comment les très faibles changements d'énergie dus aux mouvements astronomiques de la Terre bouleversent le climat de notre planète. Manifestement, un mécanisme d'amplification de ces changements restait à identifier.

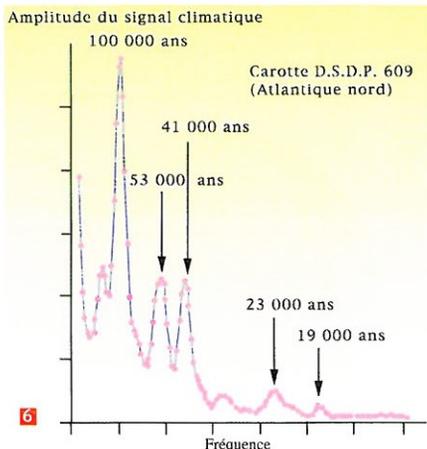


5/ La Terre pendant le dernier maximum glaciaire il y a 20 000 ans : des immenses glaciers recouvraient le Nord de l'Amérique et la Scandinavie ; crédit Pour la Science.



Mais le plus surprenant était encore à venir : les archives climatiques que constituent les carottes de glace du Groenland, révélèrent que sur les 10000 dernières années, des fluctuations de température d'une ampleur insoupçonnée (voisines de 15 °C) se sont produites sur des intervalles de temps très courts ! De plus, certains passages d'une période froide à une période chaude se seraient effectués en seulement quelques dizaines d'années ! L'étude de carottes marines, qui ont enregistré la température de surface de la mer à travers leur composition, corrobora les résultats. Avec stupéfaction,

les climatologues découvraient que lors du dernier cycle glaciaire le climat a changé de façon brutale et rapide plusieurs fois à l'échelle d'une vie humaine, soit bien plus rapidement que ne le prévoyait la théorie astronomique ! L'océan aussi a un rôle dans le déroulement de ces événements rapides. Dès la fin des années 80, Wallace Broecker, océanographe au Lamont-Doherty Earth Observatory, avait proposé un schéma de circulation océanique, le célèbre « tapis roulant ». Un colossal courant voyage à travers les océans à la façon d'un tapis roulant : il parcourt une partie de son voyage en profondeur puis revient sur ses pas en surface (image 7). Le tapis roulant est bien sûr un schéma, mais la réalité est bien là : cette circulation, dite thermohaline, charrie environ 30 fois plus d'eau que l'ensemble de toutes les rivières du monde et transporte une quantité d'énergie équivalente à environ 30 % de celle reçue du Soleil par l'Atlantique Nord tout entier. Or, toutes les reconstructions montrent que la circulation thermohaline s'est très fortement ralentie, voire arrêtée, lors des événements climatiques rapides enregistrés au-dessus du Groenland !



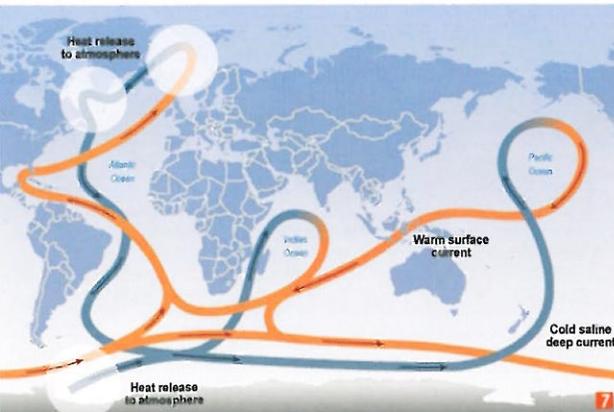
6/ Un succès pour la théorie astronomique du climat : au cours du dernier million d'années, en Atlantique Nord, l'amplitude du signal climatique est maximale pour les fréquences correspondant à celles de l'insolation (calculée par l'astronome belge André Berger). D'après Duplessy et Morel, Gros Temps sur la Planète, Éditions O. Jacob.



Aucun doute ne subsiste donc : la circulation thermohaline est l'un des principaux acteurs des variations climatiques rapides. Peut-elle s'arrêter à nouveau aussi soudainement, plongeant l'Europe dans un climat glaciaire comme en a connu notre ancêtre de Lascaux ?

L'identification d'autres acteurs dans l'amplification des variations climatiques est venue de l'action conjuguée de l'observation du climat et des simulations numériques. Le relevé systématique de données climatiques a débuté en Europe au cours du XVIII^e siècle, mais la standardisation des mesures et la mise en réseau des observations météorologiques n'ont réellement démarré qu'au milieu du XIX^e siècle. Ce réseau s'est fortement développé dans les années 1950,

principalement sur les continents de l'hémisphère Nord et sur les routes maritimes. Aujourd'hui de vastes régions tel l'Océan Austral, demeurent néanmoins très peu instrumentées. À partir des années 1970, l'utilisation de satellites a révolutionné l'observation de la Terre, en raison de la globalité de la surface observée. Les principales mesures portent aujourd'hui sur les flux radiatifs reçus et dégagés par l'atmosphère, la vitesse des vents, le taux d'humidité. Parallèlement à la multiplication des observations, la modélisation du climat s'est fortement développée ces 40 dernières années. Dans les années 1970, la puissance (somme toute très relative) des ordinateurs a permis les premières simulations numériques du climat. Les modèles ne comprenaient alors



7 Le grand tapis roulant schématisant la circulation océanique mondiale. Les eaux de surface chaudes et salées du Gulf Stream remontent le long de la côte Est de l'Amérique du Nord puis traversent l'Atlantique vers la Mer de Norvège, où elles se refroidissent libérant dans l'atmosphère une quantité d'énergie considérable, équivalente à environ 30 % de celle reçue du Soleil par l'Atlantique Nord tout entier ! Leur densité augmentant du fait du refroidissement et de leur salinité élevée, ces eaux plongent en profondeur, s'écoulent vers l'Atlantique Sud, contournent l'Afrique, traversent l'Océan Indien Sud pour réapparaître en surface dans le Pacifique. Ici elles sont reprises par les courants de surface et progressivement ramenées en Mer de Norvège ; crédit ONU.

**RÉALISATION DE CAROTTAGES
EN ATLANTIQUE NORD AU COURS
DE LA CAMPAGNE ND-132
DU NAVIRE OcéANOGRAPHIQUE
MARION DUFRESNE DE L'INSTITUT POLAIRE
PAUL EMILE VICTOR (IPEV)**

A / Préparation du carottier Calypso sur le navire océanographique Marion Dufresne de l'Institut Polaire Paul Emile Victor ; crédit Xavier Boes.

B / Le carottier carré géant de l'Institut Polaire Paul Emile Victor ; crédit Xavier Boes.

C / Le carottier Calypso commence sa descente vers le fond de l'océan ; crédit Xavier Boes.

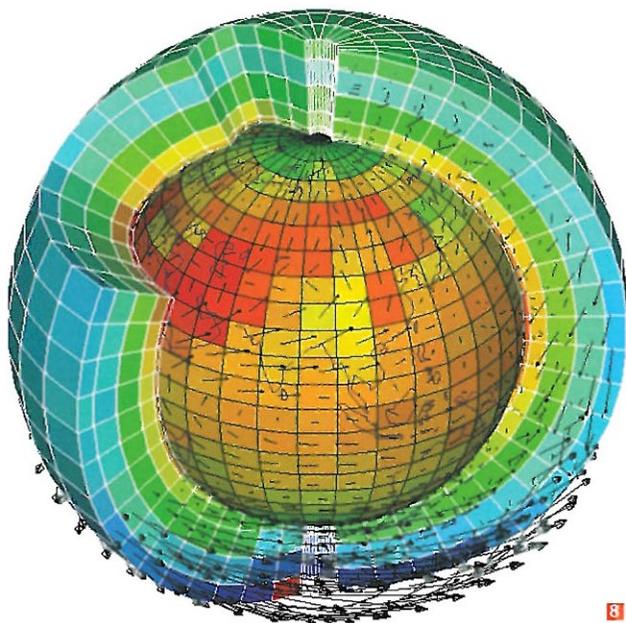
D / Le changement de couleur à une profondeur de 5 mètres (indiqué par les doigts du chef de mission) dans le sédiment récupéré par le carottier témoigne d'un changement environnemental important à cette époque (dernière glaciation) ; crédit Xavier Boes.





que l'atmosphère et les surfaces continentales. À partir des années 1990, ces modèles atmosphériques furent couplés à des modèles océaniques pour donner naissance à de véritables modèles climatiques (image 8). Ceux-ci simulent une variabilité climatique qui peut être comparée aux observations

pour différentes échelles de temps : quelques jours, quelques années (variabilité inter-annuelle, dont la plus connue est El Niño) à quelques dizaines d'années, ou à plus longue échelle sur des données paléoclimatologiques (image 9).



8/ Un modèle climatique récent. Vu la complexité et le grand nombre de processus en jeux, la modélisation du climat repose tout d'abord sur une analyse physique qui permet de ne conserver que les phénomènes essentiels pour bien reproduire les caractéristiques climatiques. L'atmosphère et l'océan sont ensuite découpés en un grand nombre de mailles (de l'ordre d'un million) à l'intérieur desquelles les propriétés physiques sont supposées homogènes. Ce maillage est utilisé pour résoudre numériquement les phénomènes physiques et ainsi permet de calculer heure par heure, pendant plusieurs années à plusieurs siècles, l'évolution du climat ; crédit L. Fairhead, CNRS/IPSL/LMD.

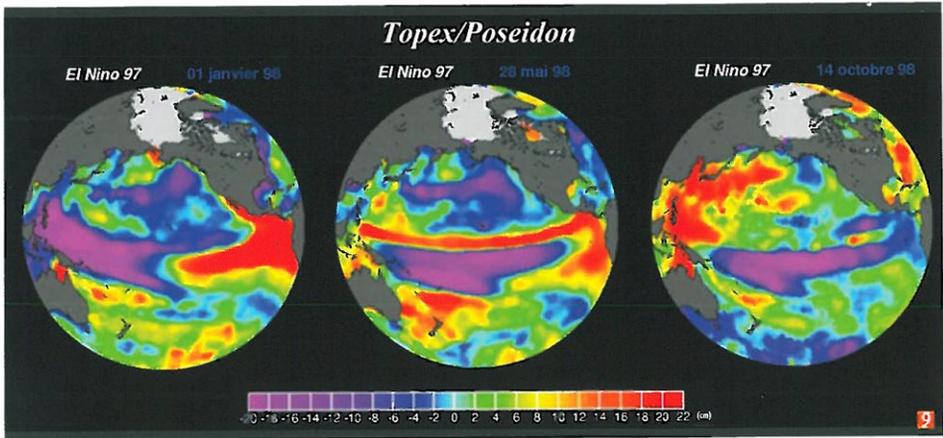


DU CO₂ DANS L'AIR

Dans les années 1970 toujours, les observations révélèrent que la concentration en CO₂ de l'atmosphère augmentait fortement : alors qu'en 1958 cette concentration était de 315 ppm (parties par million, c'est-à-dire 315 molécules de CO₂ pour un million d'autres molécules), elle avait grimpé à 365 ppm en 2000. Cet accroissement de 50 ppm en 40 ans est plus de cent fois plus rapide que les variations passées

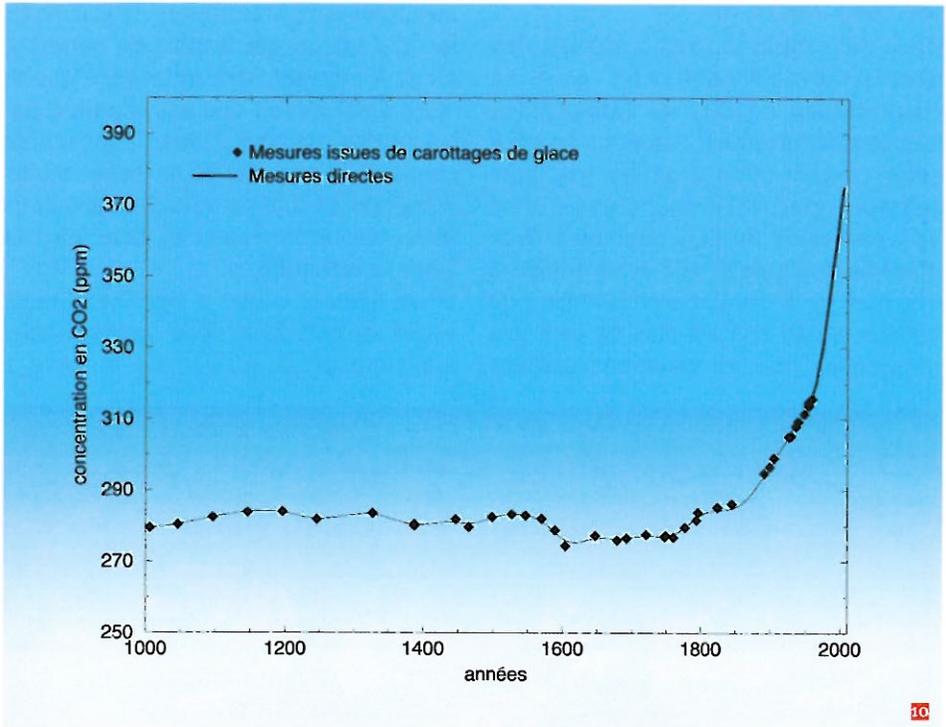
mesurées dans les carottes de glaces. Or le CO₂ est un gaz à effet de serre : il piège le rayonnement infrarouge que la Terre émet quand elle est chauffée par les rayons solaires ; plus l'atmosphère contient de gaz à effet de serre, moins d'énergie s'échappe vers l'espace sous forme de rayonnement et donc plus la Terre se réchauffe.

Et en effet, le climat a significativement évolué au cours du xx^e siècle : la température moyenne de la surface de la Terre a



9/ Anomalie de la hauteur du niveau de la mer mesuré par le satellite Topex-Poseidon lors d'un événement El Niño. Depuis son lancement en 1992, Topex-Poseidon surveille de près les océans et enregistre les moindres variations du niveau de la mer. En mars 1997, les alizés du pacifique équatorial s'affaiblissent notablement. Les eaux chaudes accumulées à l'ouest se mettent alors en mouvement vers l'est. En l'espace de deux mois, ce réservoir chaud, couvrant une superficie égale à celle du continent nord-américain, atteint les côtes d'Amérique du Sud. Il provoque des précipitations conséquentes sur les pays riverains. Il modifie l'écosystème et le climat à l'échelle régionale puis mondiale. Le phénomène, appelé El Niño, connaît son paroxysme en octobre 1997. Le gonflement des eaux chaudes mesuré par le satellite Topex-Poseidon atteint alors plus de trente centimètres ; crédit CNES.





augmenté de 0,6 °C en 100 ans et de nombreux glaciers de montagne ont reculé. À partir de la répartition du carbone du CO₂ en ses différents isotopes, on a pu montrer que ce sont les activités

humaines qui ont provoqué ce changement de vitesse et notamment la combustion du pétrole, charbon et gaz. C'est cette constatation qui a conduit Paul Crutzen, prix Nobel de Chimie en 1995 pour ses

10/ Évolution de l'an 1000 à l'an 2000 de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Avant 1950, la concentration de CO₂ est mesurée dans les bulles d'air emprisonnées dans les glaces. De 1950 à 2000, elle est directement mesurée dans l'atmosphère. Manifestement, la concentration en CO₂ dans l'atmosphère augmente de façon très rapide depuis le début de l'ère industrielle.



travaux en chimie atmosphérique, à introduire le terme « Anthropocène » pour caractériser la période actuelle où les activités humaines président à l'évolution du climat.

Lier rigoureusement l'augmentation de la concentration de CO_2 à la variation climatique n'est toutefois pas chose aisée. Si l'on sait calculer exactement les perturbations du bilan énergétique de la Terre dû à un accroissement de la concentration des gaz à effet de serre, « toutes choses étant égales par ailleurs », établir les conséquences de ces perturbations sur le climat est ardu. Car le principal gaz à effet de serre n'est pas le CO_2 mais la vapeur d'eau. Or l'humidité de l'atmosphère dépend elle-même du climat (vents, pluies...). On est ainsi face à ce que l'on appelle un phénomène de couplage, de rétroaction. La question est donc de savoir si la perturbation humaine sur le bilan énergétique de la Terre sera dans les prochaines décennies atténuée ou au contraire amplifiée par la réponse du climat.

Les modèles climatiques ont jusqu'à présent toujours montré que la réponse du climat tend à amplifier la perturbation initiale. Cette amplification est plus ou moins forte, mais toujours présente. De nombreux travaux de recherches se poursuivent pour mieux asseoir ces

résultats, notamment en utilisant aux mieux les observations des climats actuels et passés. D'autres travaux portent sur la possibilité de changements brutaux ou dramatiques du climat. L'accroissement de la concentration atmosphérique en CO_2 est la principale perturbation du climat récent, mais ce n'est pas la seule. Signalons la hausse de la concentration des autres gaz à effet de serre (CH_4 , CFC, N_2O ...), l'augmentation de la concentration des aérosols (dispersions dans l'air de particules, tels les aérosols sulfatés, les suies...), la modification de l'utilisation des sols (déforestation, irrigations...).

Prévoir le climat futur nécessite de savoir comment le climat répond à diverses perturbations mais aussi de savoir quelles seront ces perturbations dans le futur. Pour les prochains siècles, on prévoit que l'homme continuera d'être responsable des perturbations climatiques les plus importantes. Celles-ci dépendront notamment de la production d'énergie, de l'évolution de la population, de la croissance économique dans les différentes régions du monde, des évolutions technologiques... Plusieurs scénarii ont été élaborés, couvrant un large éventail de possibilités. Pour chacun de ces scénarii, les modèles climatiques permettent de calculer l'évolution du climat qui en résulte.



QUELLE ÉNERGIE POUR QUEL AVENIR ?

L'énergie est indispensable à la vie et au développement économique. Nous avons besoin de nourriture, d'électricité, de chaleur, de moyens de transport. Tous les biens de consommation que nous utilisons ont nécessité de l'énergie pour les fabriquer. Depuis le début de la révolution industrielle, le monde est dominé par les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) qui représentent environ 85 % de l'énergie primaire utilisée, le reste étant fourni par la biomasse, le nucléaire et l'hydraulique.

Tout laisse à penser que la demande d'énergie ne va cesser de croître au XXI^e siècle. Entre 1900 et 2000, la consommation énergétique mondiale a été multipliée par 10. Si elle progresse sur la même lancée, elle sera multipliée par plus de 7 d'ici la fin du siècle. Soit un excès de 60 Gtep/an (1 Gtep = un milliard de tonnes équivalent pétrole, soit l'énergie équivalente à la combustion d'un milliard de tonnes de pétrole) par rapport à aujourd'hui. Des prévisions plus optimistes divisent ce chiffre par deux grâce à une meilleure utilisation de l'énergie primaire et à un fléchissement de la démographie. Mais quelle que soit l'hypothèse de croissance, de tels besoins ne pourront être satisfaits par les

ressources fossiles de la planète (les réserves actuelles de pétrole conventionnel sont estimées à environ 140 Gtep).

À ceci s'ajoute l'accroissement de l'effet de serre dû, pour une large part, à l'utilisation des combustibles fossiles. Ces combustibles pourraient avoir un puissant impact négatif sur le climat terrestre bien avant que le charbon, dont les réserves se chiffrent en centaines d'années, soit épuisé. La recherche d'autres ressources énergétiques, l'utilisation de sources n'émettant pas de gaz à effet de serre et une meilleure utilisation de l'énergie, sont donc indispensables pour l'avenir de l'Humanité. L'énergie nucléaire et les énergies renouvelables vont dans ce sens et sont, pour le moment, les seules sources susceptibles de compenser le manque de pétrole qui nous guette à court terme.

Le nucléaire est une énergie concentrée, bien adaptée à une fourniture stable de grandes quantités d'électricité à un coût faible et stable dans le temps. Les recherches portent actuellement sur les réacteurs à neutrons rapides qui permettent une meilleure utilisation de l'uranium naturel en faisant passer les réserves énergétiques d'une centaine à quelques dizaines de milliers d'années. Les énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, solaire, éolien, géothermie...)



sont, elles, inépuisables mais, pour la plupart, intermittentes et peu concentrées. Les recherches actuelles tentent là principalement de diminuer les coûts et de développer des moyens de stockage pour pallier à l'intermittence de ces sources d'énergie. Il faut aussi mieux utiliser l'énergie. Actuellement, une fraction d'environ 40 % se perd en passant de l'énergie primaire à l'énergie finale disponible pour le consommateur. Économiser l'énergie, c'est aussi valoriser celle qui est de faible valeur, comme la chaleur de basse température contenue dans les fluides (rivières, mers, effluents industriels, etc.). Ainsi, en France, une exploitation de ces « calories à basse température » par le biais de pompes à chaleur (dispositif qui permet, moyennant un peu d'électricité, d'extraire de la chaleur de sources froides comme le sol, l'air ou l'eau), jointe à celle de la biomasse, permettrait d'économiser une quantité d'énergie du même ordre de grandeur que celle utilisée pour les transports, soit environ 1 million de barils de pétrole par jour. Nous franchirions alors un pas important dans la voie de la préservation de notre « capital Terre ».



S O M M A I R E

Étudier la Terre, pourquoi ?	2
Voyage au centre de la Terre	2
La Terre, une machine thermique en mouvement !.....	5
L'air et l'eau : des oasis de vie bien changeantes	7
Du CO ₂ dans l'air	13
Quelle énergie pour quel avenir ?.....	16

Au service de l'éducation

»»» Le SCÉRÉN s'engage dans

l'année mondiale de la physique

»»» La révolution Einstein, 1905-2005

100 ans plus tard, retour sur les textes fondateurs qui ont bouleversé notre perception de l'univers.
Revue *Textes et documents pour la classe*,
n° 886 décembre 2004, 4 €
Abonnement : 03 44 03 32 37

»»» 1905, les trois percées d'Albert Einstein

Une approche historique des travaux fondateurs d'Einstein, donnant à l'activité scientifique toute sa dimension humaine.
Dossier en ligne sur www.sceren.fr, rubrique Thém@doc

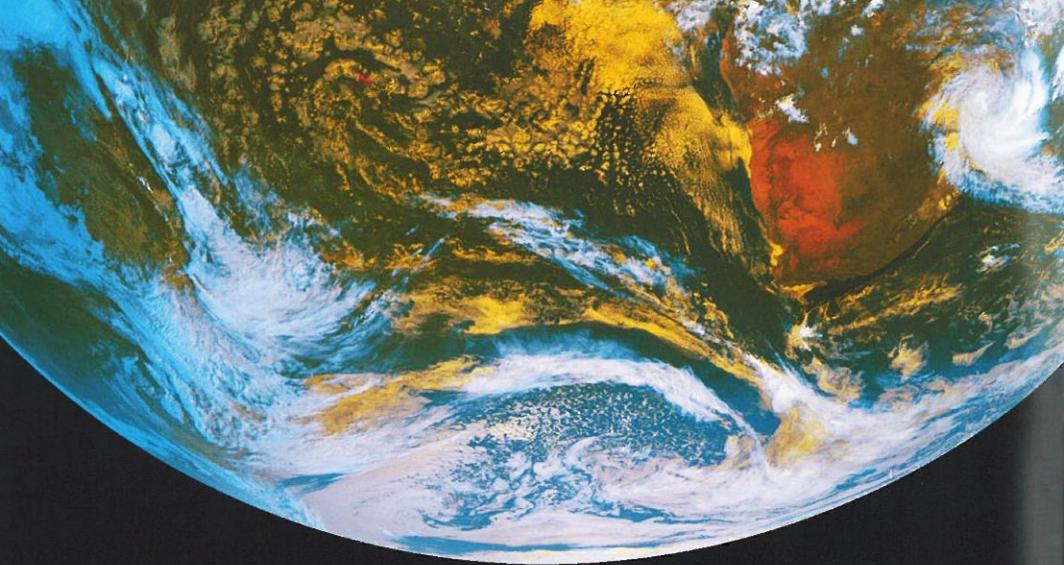
»»» Physique-chimie : programmes, accompagnement et autres ressources

Compilation de textes officiels, documents, vidéos et animations, ce cédérom facilite le travail des enseignants et futurs enseignants.
49 € licence établissement, 15 € licence monoposte

Consultez, commandez sur www.sceren.fr
dans les librairies des CRDP et CDDP
à la librairie de l'éducation, 13 rue du Four 75006 Paris

SCÉRÉN

SERVICES CULTURE ÉDITIONS
RESSOURCES POUR
L'ÉDUCATION NATIONALE
[CNDP - CRDP]



La physique pour mieux comprendre le monde

L'année 2005 a été déclarée « Année mondiale de la physique » par l'UNESCO pour célébrer les sciences physiques dans le monde entier, exactement cent ans après la parution des travaux révolutionnaires d'Albert Einstein qui ont ouvert la voie à de nombreux développements de la physique du vingtième siècle. Les transistors, les ordinateurs, les lasers ou l'imagerie médicale sont de purs produits des dernières décennies de recherche fondamentale dans les laboratoires de physique, là où s'élaborent aujourd'hui les matériaux et les technologies de demain.

Au-delà de la commémoration d'un grand personnage de la physique du vingtième siècle, l'objectif de cette action est aussi de faire connaître à un public le plus large possible les progrès, l'importance et les enjeux de ce grand domaine de la science qu'est la physique. Aux physiciens de montrer qu'il est possible de s'instruire et de se faire plaisir en apprenant de la physique.

Pour l'occasion, la Société Française de Physique a décidé de publier quatre brochures dont les thèmes sont l'Univers, la Terre et son environnement, la physique et le vivant, la lumière. Vous tenez l'une d'entre elle entre vos mains. Bonne lecture !

Cette brochure a été conçue sous la responsabilité de Carlo Laj, géophysicien au CEA-CNRS à Gif-sur-Yvette. Elle a été réalisée et éditée par EDP Sciences avec le soutien de la Société Française de Physique, du ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et du Centre National de Documentation Pédagogique. Elle est aussi disponible au format PDF sur le site de la SFP <http://sfp.inzp3.fr>