

Le changement climatique : du big bang au grand bug ?

Conférence présentée par

Charles François Boudouresque

Professeur de Biologie marine au Centre d'Océanologie de Marseille (Université de la Méditerranée), UMR CNRS 6540 Dimar, Campus universitaire de Luminy, 13288 Marseille cedex 9, France

Le 27 Mars 2006 à La Ciotat

Dans le cadre des conférences "Escalaes Marines" proposées par le CPIE (Centre Permanent d'Initiation à l'Environnement) Côte Provençale de La Ciotat

Document édité par le Centre d'Océanologie de Marseille



CÔTE PROVENÇALE
Atelier Bleu du Cap de l'Aigle



Quelques repères chronologiques

Le Big Bang, la naissance de notre Univers, s'est produit entre 20 et 10 Ga (milliards d'années) avant le présent. L'âge admis actuellement se situe autour de **13.6 Ga** (Lachièze-Rey, 2004). Notre galaxie, la Voie Lactée, aurait 10 Ga. Le système solaire et la Terre sont âgés de **4.56 Ga** (Zimmer, 2001). La Terre primordiale était toutefois plus petite qu'aujourd'hui ; vers 4.54-4.50 Ga, elle a été percutée par **Théia**, une planète de la taille de Mars, avec laquelle elle a fusionné en même temps qu'était éjectée la matière qui a donné naissance à la **Lune** (Kerr, 2000a ; Jacobsen, 2003 ; Palme, 2004).

Dès **4.4 Ga**, la surface de la Terre est suffisamment refroidie pour que l'océan soit présent. C'est déjà grâce à l'effet de serre que cet océan n'est pas transformé en glace (Valley, 2005). Nous ne saurons sans doute jamais si la vie y est apparue. En effet, le système solaire est encore encombré de corps célestes de toutes tailles ; quand un choc se produit avec un objet de plus de 500 km de diamètre, l'océan est volatilisé et met un millénaire pour se reconstituer (Bada et Lazcano, 2002).



Fig. 1. Les grands cratères de la Lune datent de 3.9 Ga, un épisode de bombardement par des corps célestes nommé le *Lunar cataclysm*. Photo Lambert.

Les derniers chocs avec des corps célestes de cette taille se sont produits il y a **3.9 Ga**. C'est

le **Lunar cataclysm** ou *Late Heavy Bombardment* (LHB : dernier grand bombardement). C'est cet épisode qui a façonné l'image de la Lune qui nous est familière (**Fig. 1**) : la plupart des grands cratères datent de cette époque. Bien que les traces se soient effacées sur la Terre, il ne fait guère de doute que notre planète a été soumise au même bombardement (Cohen *et al.*, 2000 ; Kerr, 2002).

La **vie** semble être apparue entre 3.85 et **3.50 Ga**, bien que les toutes premières traces qu'elle a laissées (directes ou indirectes) fassent encore l'objet de discussions. Il s'agissait de Procaryotes, organismes dépourvus de noyau, c'est-à-dire de Bactéries et/ou d'Archées (Kerr, 2004a ; Moorbath, 2005).

Vers **2.6-2.4 Ga** s'est produit un événement majeur : l'apparition des **Cyanobactéries** et de la photosynthèse complète, celle qui produit de l'**oxygène** moléculaire (Broecks *et al.*, 1999 ; Cavalier-Smith, 2002). Cet oxygène a d'abord été capté par l'oxydation des minéraux, puis s'est accumulé dans l'eau et l'atmosphère. Il est détectable dans l'atmosphère à partir de 2.0 Ga (**Fig. 2** ; Beardall et Raven, 2004). C'est à partir de 1.8 Ga, peut-être même plus récemment, qu'il y a eu de l'oxygène dans l'océan profond (Anbar et Knoll, 2002).

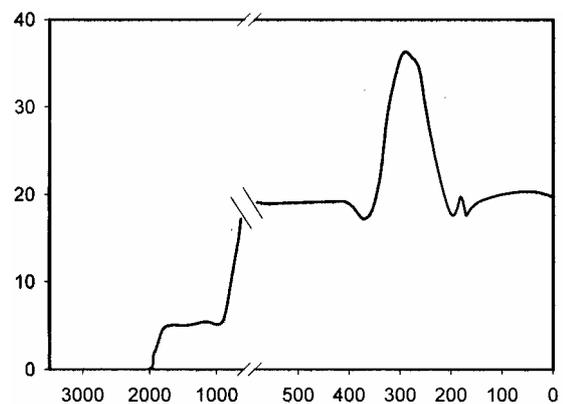


Fig. 2. Evolution de la teneur de l'atmosphère en oxygène (en kPa), depuis 3 000 Ma. D'après Beardall et Raven (2004).

L'apparition des Cyanobactéries, puis l'accumulation d'oxygène moléculaire dans l'eau et l'atmosphère, marquent un tournant dans l'histoire de la Terre : la Vie prend en partie le contrôle des processus chimiques et géologiques qui se déroulent à sa surface.

Il faudra attendre **0.6-0.4 Ga** avant le présent (un peu avant et un peu après le début de l'Ere Primaire) pour que se produise "l'explosion" des métazoaires (les animaux), puis la **conquête des continents**, jusqu'alors probablement dépourvus de vie, à l'exception peut-être de bactéries (Wellman *et al.*, 2003 ; Condon *et al.*, 2005).

Les changements climatiques réels et apparents

A une époque donnée, le climat d'une région dépend de sa situation par rapport aux pôles et à l'équateur. Il dépend également, en partie, de la position des masses continentales et des océans. En effet, le tracé des courants marins, qui assurent le **brassage des eaux** et le transfert de la chaleur entre l'équateur et les pôles, est fonction de la géographie. Le mouvement des plaques, la dérive des continents qu'elles portent et l'ouverture ou la fermeture de communications entre océans sont donc responsables de changements climatiques.

Le climat dépend également de l'énergie reçue par la Terre. Les fluctuations de l'énergie reçue peuvent être dues au Soleil (le *light-show*, voir plus loin) ou à la Terre (la "danse de la Terre sur son orbite" : voir plus loin les cycles de Milankovitch). Enfin, il dépend de l'histoire de la Terre : composition de son atmosphère, événements géologiques (par exemple : éruptions volcaniques projetant des gaz et des cendres dans l'atmosphère) et astronomiques (choc avec des astéroïdes).

L'extinction massive (90-95%) d'espèces à la jonction Permien-Trias (P-T ; **251 Ma**), l'une des plus dramatiques qu'ait connu la Terre, pourrait être due à l'impact d'un **astéroïde** de plus de 10 km de diamètre au large de la côte Nord-Ouest de l'**Australie** (Kerr, 2001a, 2004b ; Becker *et al.*, 2004), couplée à des épanchements massifs de laves (traps) en Sibérie. La cause principale (astéroïde ou volcanisme) est l'objet de controverse scientifique. Quoi qu'il en soit, il s'est produit un fort réchauffement de l'air et de l'océan, provoquant à son tour le dégagement du méthane (un gaz à effet de serre) piégé dans les sédiments marins, avec pour conséquence une accentuation du réchauffement et une **crise climatique aiguë** : réchauffement d'environ 10°C, chute de l'oxy-

gène dans l'atmosphère, accroissement du CO₂, anoxie dans l'océan profond (**Fig. 3** ; Huey et Ward, 2005).

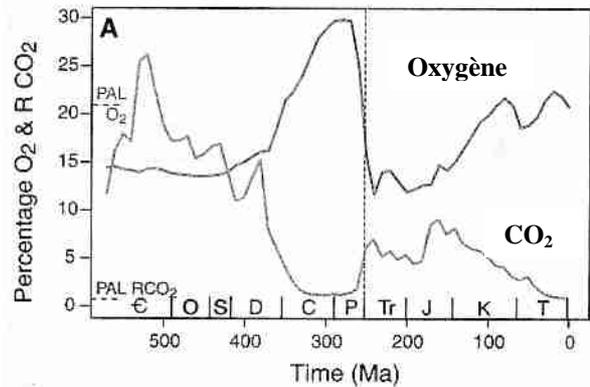


Fig. 3. L'effondrement de la teneur en oxygène dans l'atmosphère, et l'accroissement de la teneur en CO₂, à la fin du Permien, en pourcentage par rapport à la teneur actuelle (PAL). Ma = millions d'années avant le présent. P = Permien, Tr = Trias. D'après Huey et Ward (2005).

Au début du Trias, la pression d'oxygène au niveau de la mer était celle que l'on rencontre aujourd'hui à 5.3 km d'altitude, ce qui a dû constituer un facteur limitant pour la Vie dont l'intervalle altitudinal s'est considérablement réduit (Huey et Ward, 2005).

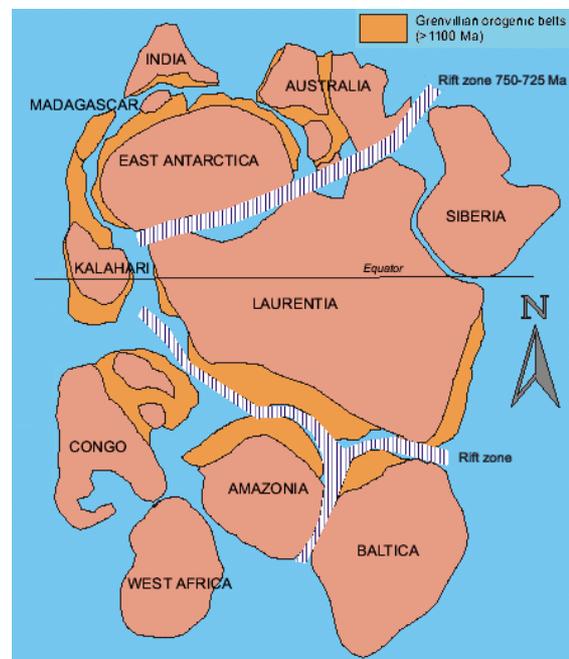


Fig. 4. Il y a 850 Ma, tous les continents, réunis en un super-continent unique (la Rodinia), commencent à se séparer (lignes de fracture en hachures). Noter que l'Inde est située vers le pôle Nord.

En un point donné de la planète, dans sa géographie actuelle, certains changements climatiques au cours des temps géologiques sont toutefois des artéfacts. Par exemple, l'Inde se trouvait au pôle Nord y a 850 Ma (Ma = million d'années), puis vers le pôle Sud il y a 300 Ma, avant de remonter vers sa position actuelle, dans l'hémisphère Nord (Fig. 4 et 5) : une partie des changements climatiques qui l'ont affectée s'explique donc simplement par les latitudes où elle s'est trouvée successivement.

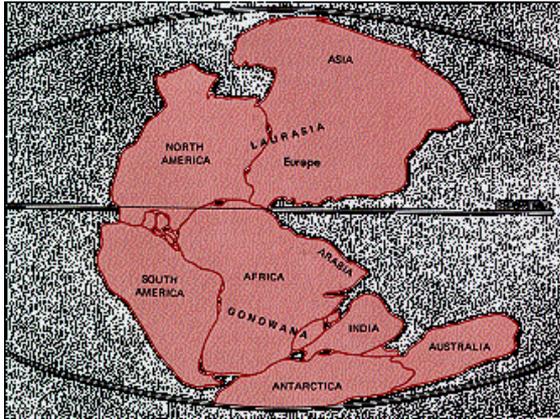


Fig. 5. Il y a plus de 300 Ma, les continents, à nouveau rassemblés en un super-continent unique (la Pangée), commencent à se séparer, d'abord en deux blocs : le Gondwana au Sud et la Laurasia au Nord.

Globalement, le climat de la Terre est resté **relativement stable** depuis 3.9 Ga, si l'on considère que des feedbacks stabilisateurs y ont maintenu sans interruption une couche d'eau et des températures favorables à la vie (Alley *et al.*, 2003).

Des **cycles glaciaires** ne se sont produits que quatre fois depuis 800 Ma. Le plus ancien est le cycle des glaciations cryogéniques, il y a **600-800 Ma**, dont l'une est connue sous le nom de "crise de la Terre boule-de-neige" (*snowball Earth crisis*), vers 600 Ma. Pendant 10 Ma, la Terre a été presque gelée de pôle à pôle, y compris la surface de l'océan, à l'exception sans doute des volcans et peut-être de la zone équatoriale. Ce fut une crise très dure pour la Vie, avec des extinctions massives, en particulier chez les Cyanobactéries (Costas et López-Rodas, 1994 ; Kerr, 2000b).

Il est intéressant de remarquer que l'explosion des Métazoaires (radiation d'Ediacara) est survenue juste après la dernière glaciation cryogénique (Zimmer, 2001). Y a-t-il un lien de

cause à effet ? En provoquant l'extinction d'une grande partie des formes de vie, ces gigantesques glaciations ont-elles "redistribué les cartes" de la Vie et accéléré l'évolution ultérieure ? (Cavalier-Smith, 2002). Après ces crises, la remontée du niveau de la mer a été brutale ; des vents et des courants d'une vitesse sans commune mesure avec ce qui a existé par la suite ont marqué la déglaciation (Allen et Hoffman, 2005).

Des épisodes glaciaires se sont à nouveau produits vers **430 Ma**, il y a **300 Ma** (Ere Primaire) et enfin depuis **2-3 Ma** (Ere Quaternaire). La période que nous vivons fait partie globalement de ces cycles glaciaires, bien que nous nous trouvions actuellement dans un interglaciaire, relativement moins froid que les maximums glaciaires. Si l'on excepte les épisodes glaciaires, qui ne couvrent que 5-10% de l'histoire de la Terre, notre planète a été dans l'ensemble beaucoup plus chaude qu'au Quaternaire. La glace n'était sans doute présente qu'au sommet des plus hautes montagnes et dans les régions polaires (Berger, 1996 ; Janvier, 2000).

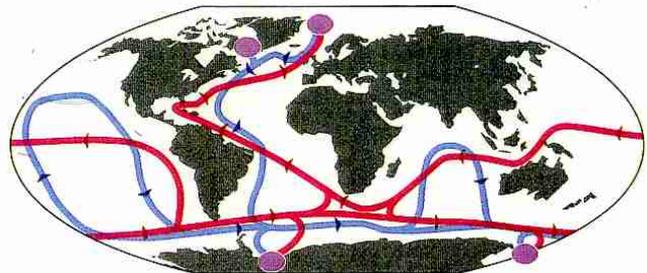


Fig. 6. Circulation générale des eaux de l'océan mondial. Les ovales représentent les *ventilation areas* (zones de plongée). En bleu, la circulation profonde. En rouge, circulation de surface. D'après Hansen *et al.* (2004).

Le tapis roulant planétaire

La circulation des eaux de l'océan mondial constitue un processus majeur de répartition de la chaleur, et donc de contrôle du climat. Actuellement, elle suit le modèle suivant (Fig. 6). Dans l'Atlantique, les eaux de surface remontent globalement vers le Nord (dérive nord-atlantique). Il s'agit d'eaux chaudes et salées ; la couche d'eau salée venue de la Méditerranée (par Gibraltar) y participe. En hiver, leur refroidissement en mer de Norvège (entre la Norvège et le Groenland, au Nord de l'Islande) et à l'Ouest du Groenland, ainsi que l'aug-

mentation de la salinité due à la formation de la glace, les fait couler. Ces eaux froides (3°C) se dirigent alors vers le Sud le long du continent américain, à environ 3 000 m de profondeur (Hansen *et al.*, 2004). Au niveau de l'Antarctique, ou des eaux très denses tapissent le fond, elle remonte en surface. Mais la formation de glace de mer pendant l'hiver austral augmente sa teneur en sel, de telle sorte qu'elle replonge, puis se répand dans le fond de l'océan Indien et de l'océan Pacifique. Au cours de son voyage, l'eau profonde se mélange progressivement avec de l'eau de surface, sa température augmente et sa densité diminue (Hansen *et al.*, 2004). Dans le Nord de ces deux océans, elle remonte en surface. Les courants de surface ramènent ces eaux vers l'Atlantique Sud. Au total, il faut près de **2 000 ans** pour que le cycle de ce gigantesque "tapis-roulant" (*Conveyor Belt* ou THC, *Thermohaline Circulation*) soit bouclé.

Si la **plongée des eaux** est gênée, par exemple parce que l'eau de surface est trop peu salée, le tapis roulant ralentit. L'échange thermique entre pôles et équateur diminue, et les pôles se refroidissent. Le brutal épisode froid du **Dryas récent**, il y a 11 000 ans, qui a fait chuter la température de 10°C en 100 ans, en Europe, et dura 1 000 ans, est expliqué ainsi par certains auteurs.



Fig. 7. Le mammoth *Mammuthus primigenius*. Dessin X.

La disparition du mammoth *Mammuthus primigenius* (Fig. 7), il y a environ 10 000 ans (une population s'est maintenue dans l'île sibérienne de Wrangel jusqu'à 4 000 BP¹) pourrait être due en partie à l'épisode climatique du Dryas récent.

¹ BP = Before Present (avant le présent).

Les cycles de Milankovitch : la danse de la Terre sur son orbite

Les cycles de Milankovitch (Fig. 8) décrivent les fluctuations de l'orbite de la Terre et de sa position sur son orbite, et donc de la radiation solaire reçue.

Milankovitch a mis en évidence 4 cycles. Le premier est celui de la **précession** aux équinoxes : inclinaison de l'axe des pôles par rapport au plan de l'orbite terrestre (Fig. 9). Sa période est de **23 000 ans** (Huybers et Wunsch, 2005 ; Muller, 2006).

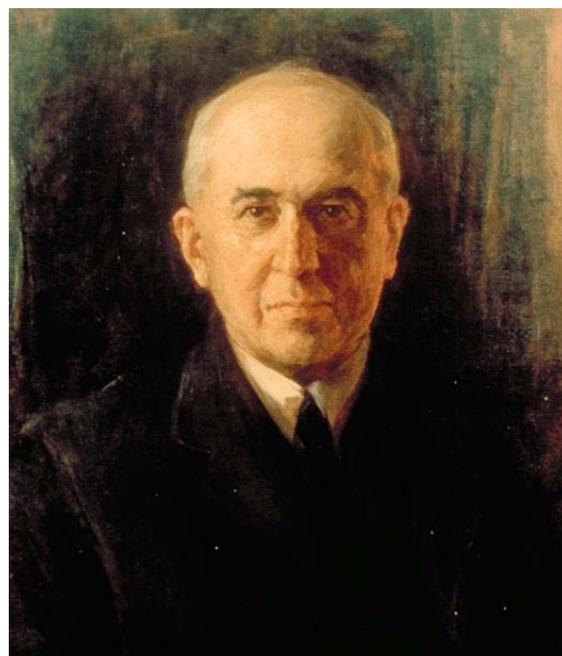


Fig. 8. Milutin Milankovitch. Ce mathématicien serbe du 20^e siècle a jeté les bases de la théorie astronomique des climats.

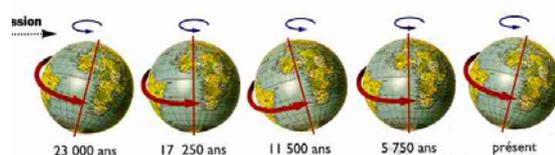


Fig. 9. La précession aux équinoxes. D'après Trompette (1997).

Le deuxième cycle est le changement de l'**obliquité** (= inclinaison) de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite (Fig. 10). Sa période est d'environ **41 000 ans** (Huybers et Wunsch, 2005).

Le troisième cycle de Milankovitch est la variation du **périhélie** (point de l'orbite le plus proche du soleil), dont la période est d'environ **100 000 ans**. Enfin, l'**excentricité** est la longueur de l'ellipse décrite par la Terre autour du Soleil. Sa période est d'environ **400 000 ans** (Fig. 10). Un cinquième cycle, de période 1 Ma, est aujourd'hui suspecté.

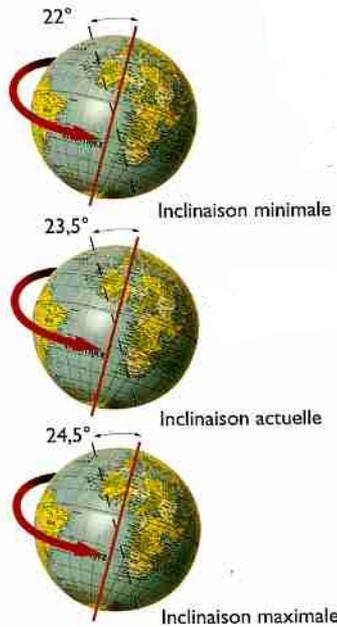


Fig. 9. L'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de son orbite. D'après Trompette (1997).

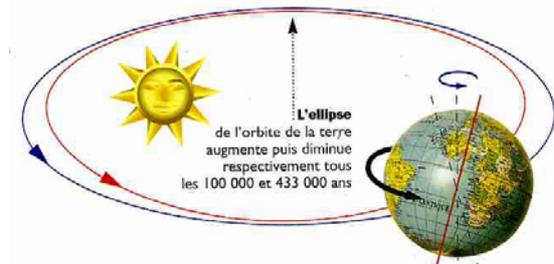


Fig. 10. La variation du périhélie et de l'excentricité de l'orbite de la Terre autour du soleil. D'après Trompette (1997).

La combinaison des différentes variations de l'orbite terrestre conduit à une courbe appelée ETP (Fig. 11), avec des cycles d'environ 100 000-120 000 ans, qui présente une assez bonne corrélation avec les variations de la température marine (Crowley, 2002 ; Muller, 2006). L'origine des cycles de Milankovitch se situe dans les interférences entre l'attraction du Soleil, de la Lune et des planètes sur la Terre.

Le *light-show* solaire

La danse de la Terre sur son orbite fait varier au cours du temps la radiation solaire qu'elle reçoit, et sa répartition. Mais de son côté, le Soleil ne lui envoie pas un rayonnement constant. Tout d'abord, le Soleil jeune était moins brillant (25-30%) qu'aujourd'hui ; ce n'est qu'il y a 3 Ga qu'il a atteint l'intensité moyenne de radiation que nous lui connaissons aujourd'hui (Hsu, 2001). Par ailleurs, le rayonnement envoyé par le soleil fluctue dans le temps.

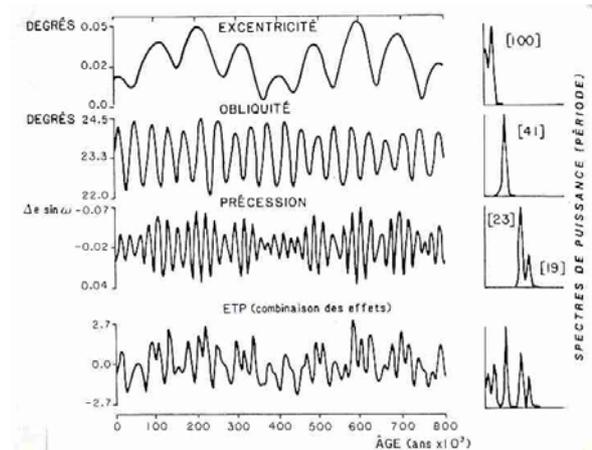


Fig. 11. La courbe ETP (en bas), qui synthétise les cycles de Milankovitch durant les 800 000 dernières années. À droite sont indiquées les spectres d'intensité de chaque courbe, avec les périodes en millénaires. D'après Imbrie et al. (1984) in Chamley (1989).

La radiation envoyée par le soleil fluctue selon un cycle de **11 ans** (cycle undécennal), de **22 ans** (cycle de Hale), de **87 ans** (Fig. 12 ; cycle de Gleissberg) et de **210 ans** (cycle de De Vries-Suess).

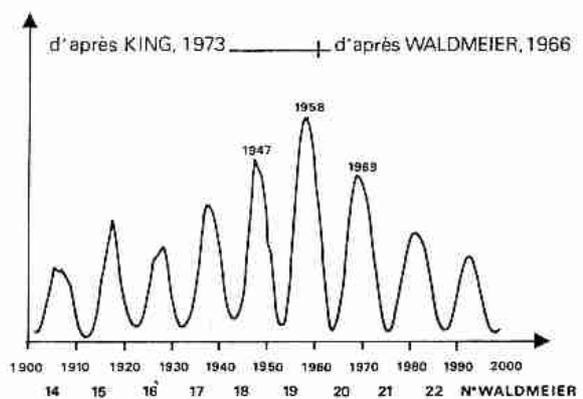


Fig. 12. Le cycle de 11 ans et le cycle de 87 ans des taches solaires, et donc de la radiation solaire. D'après Glémarc (1979).

Des changements sur de plus longues périodes ont également été mis en évidence. Les valeurs atteintes à la fin du 20^e siècle n'avaient pas de précédent depuis 8 500 ans (Fig. 13 et 14).

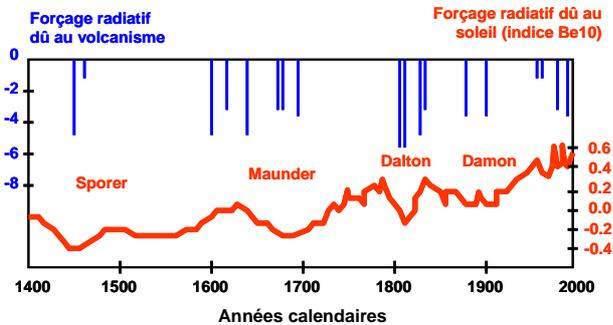


Fig. 13. Variation de la radiation solaire (en rouge) depuis l'an 1400, basée sur l'indice Be10. Les minimums dits de Sporer, Maunder, Dalton et Damon sont indiqués. En haut (en bleu), les indices de volcanisme. D'après D'Arrigo *et al.* (2005).

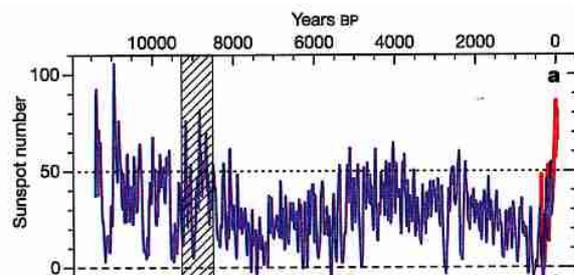


Fig. 14. Nombre de taches solaires depuis 12 000 ans. D'après Solanki *et al.* (2004).

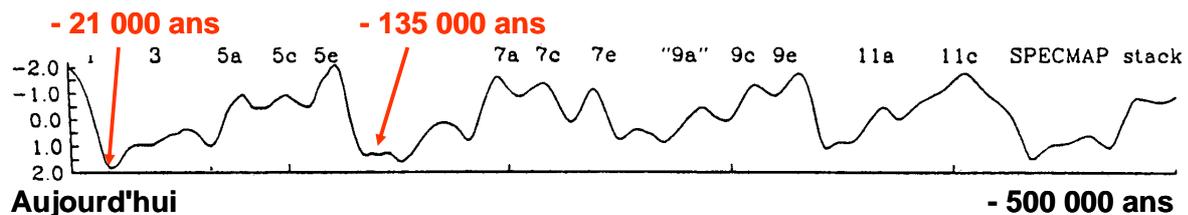


Fig. 16. Les 5 derniers cycles glaciaires du Quaternaire, depuis 500 000 ans, en fonction de la température de l'eau de mer, déduite du delta ¹⁸O. Les maximums glaciaires du Würm (21 000 ans) et du Riss (135 000 ans) sont indiqués. D'après Tzedakis *et al.* (1997).

Les glaciations quaternaires

Le début de l'Ere Tertiaire (il y a 65-50 Ma) a été une période particulièrement chaude. Depuis 50 Ma, le climat a eu tendance à se refroidir (Fig. 15), avec d'abord la glaciation de l'hémisphère Sud (vers 40 Ma), puis celle de l'Arctique (vers 2.7 Ma).

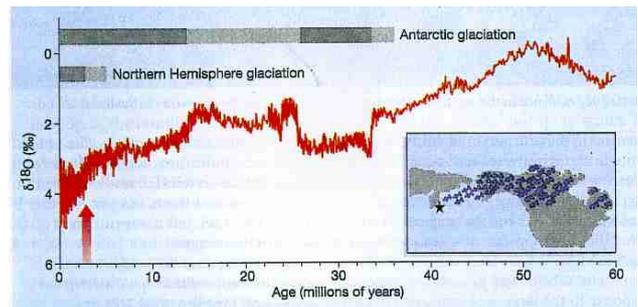


Fig. 15. Le refroidissement de la Terre, depuis 50 Ma, d'après le delta ¹⁸O des Foraminifères du Pacifique Nord. En gris foncé, le développement maximal des calottes glaciaires. En gris clair, un développement inférieur de plus de la moitié. Encart (en bas à droite) : le "canon à neige" du Pacifique vers l'Amérique du Nord, qui constitue le moteur des glaciations. D'après Billups (2005).

Depuis 2.7 Ma, la Terre est affectée par des cycles glaciaires. Ils ont d'abord duré 41 000 ans, puis sont passés à 100 000 ans il y a 850 000 ans (Garidel-Thoron *et al.*, 2005 ; Muller, 2006). Dans chaque cycle, le refroidissement est lent (bien que irrégulier) et est suivi d'un réchauffement brutal (Fig. 16 et 17). Par ailleurs, la durée de la période "chaude" (interglaciaire) est relativement brève par rapport à celle de la période froide (glaciaire) (Muller, 2006).

La diminution de la radiation solaire aux hautes latitudes, liée aux cycles de Milankovitch, serait le facteur **déclencheur** des glaciations, et

non le ralentissement du courant (*conveyor belt*), qui en serait la conséquence (Huybers et Wunsch, 2005 ; Kerr, 2005). Certains auteurs contestent toutefois le rôle des cycles de Milankovitch (*in* Muller, 2006).

Lors des maximums glaciaires, la température terrestre moyenne était de 4-5°C plus basse que lors des maximums interglaciaires, tels que celui dans lequel nous nous trouvons actuellement. Cette moyenne cache des écarts plus importants selon la latitude : 10°C en Antarctique, 10-16°C au Groenland, entre glaciaire et interglaciaire. La température de l'eau de mer de

surface était plus basse de 2-3°C sous les tropiques et de 7-9°C en Méditerranée (Cacho *et al.*, 2002 ; Burns *et al.*, 2003).

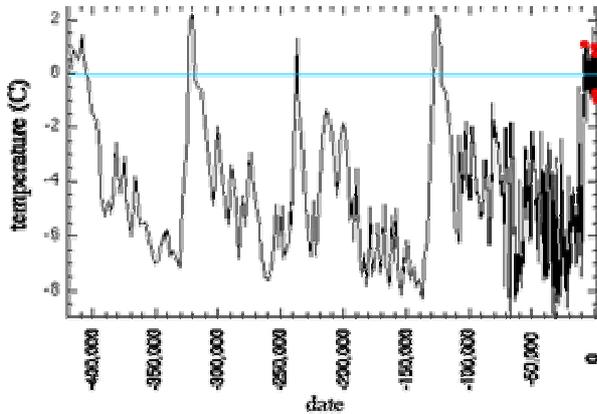


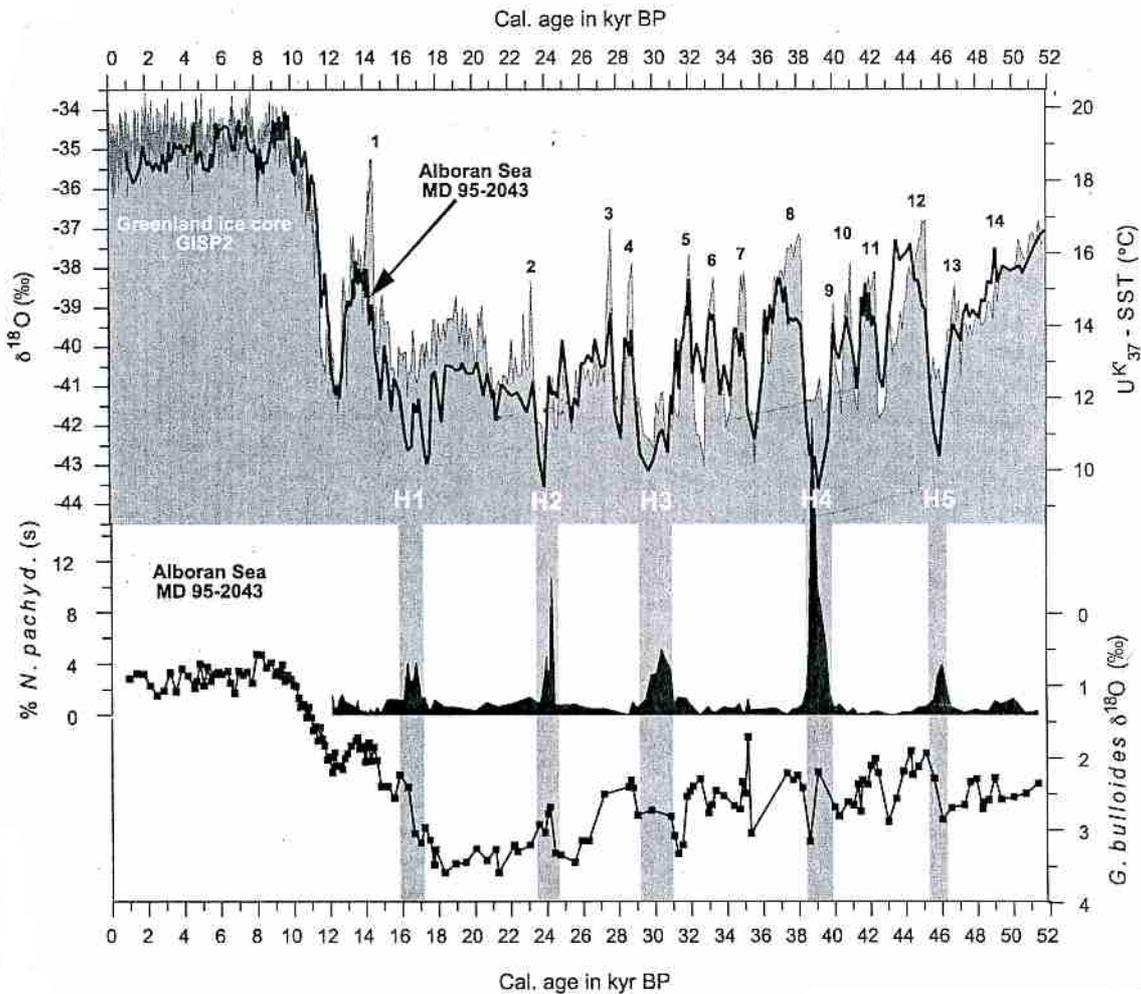
Fig. 17 (ci-dessus). Les variations de la température atmosphérique, au cours des derniers 420 000 ans, reconstituées d'après l'étude de carottes de glace. Les derniers 100 000 ans proviennent du Groenland, le reste de la station Vostok, en Antarctique. La ligne horizontale = la température de 1950. D'après Muller (2006).

a peut-être été plus importante qu'aujourd'hui (Fig. 17). La calotte glaciaire sur le Groenland semble en effet avoir fondu en grande partie.

Les évènements de Heinrich et de Dansgaard-Oeschger

Les cycles glaciaires se décomposent en évènements de Heinrich (Fig. 18), dont la périodicité est de 5 000-10 000 ans (en moyenne, 7 500 ans) (Sachs et Anderson, 2005).

Fig. 18 (ci-dessous). En haut : reconstruction des SST (températures des eaux de surface) en Mer d'Alboran, depuis 52 000 ans. Les chiffres au dessus des courbes correspondent aux évènements de Dansgaard-Oeschger. H1 à H5 correspond aux évènements de Heinrich dans l'Atlantique Nord. Au milieu : pourcentage du foraminifère planctonique polaire *Neobulboquadrina pachyderma*. En bas : teneur en oxygène 18 chez le foraminifère planctonique *Globigerina bulloides*. D'après Cacho *et al.* (2002).



Lors de l'interglaciaire qui précède l'interglaciaire actuel, il y a 120 000 ans, la température

La cause des évènements de Heinrich serait que la calotte glaciaire sur le Canada, devenue-trop épaisse, ne dissiperait plus la chaleur tellu-

rique (c'est-à-dire issue de la Terre). Elle fondrait donc par sa base et glisserait brutalement vers l'océan, y apportant des icebergs et de l'eau douce, ce qui gênerait la plongée de l'eau dans l'Atlantique Nord et ralentirait le tapis roulant (*conveyor belt*) (Grousset, 1998, 2003).

Les évènements de Heinrich se décomposent en cycles d'environ $1\,500 \pm 500$ ans (évènements de Dansgaard-Oeschger ; **Fig. 18**) (deMenocal *et al.*, 2000 ; Martrat *et al.*, 2004). Ces cycles, dont la durée moyenne est de 1 470 ans, seraient dus à la phase entre cycles solaires de Gleissberg (87 ans) et de De Vries-Suess (210 ans).

Les deux derniers maximums froids sont le **DACP** (3°-5^e siècle) et le **LIA** (Petit-âge glaciaire ; 18^e siècle), les derniers maximums chauds sont le RWP (6°-1^e siècle avant JC), le MWP (10-13^e siècles) et l'épisode actuel (20°-21^e siècles) (**Fig. 19**). Comme les cycles glaciaires, les cycles de 1 500 ans se caractérisent par un refroidissement lent et un **réchauffement très rapide** (**Fig. 20**).

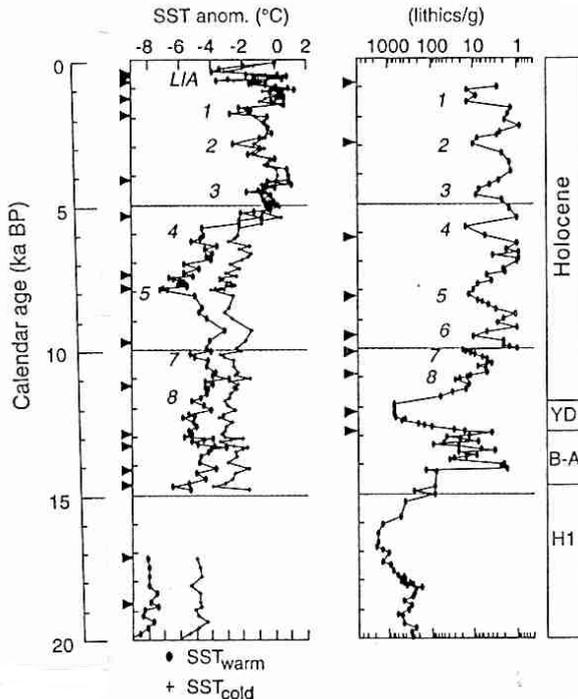


Fig. 19. Variations (au cours des derniers 20 000 ans) de la température de l'eau de mer superficielle (SST anom.), par rapport à la température moyenne actuelle, au large de la Mauritanie (à gauche). Apports de sédiments terrigènes (à droite). Les flèches pleines en marge indiquent les datations au radiocarbone. LIA = Petit âge glaciaire. 1 à 8 = Autres périodes froides. YD = Dryas récent. Cette série chronologique a été établie d'après une carotte de sédiments profonds. D'après deMenocal *et al.* (2000).

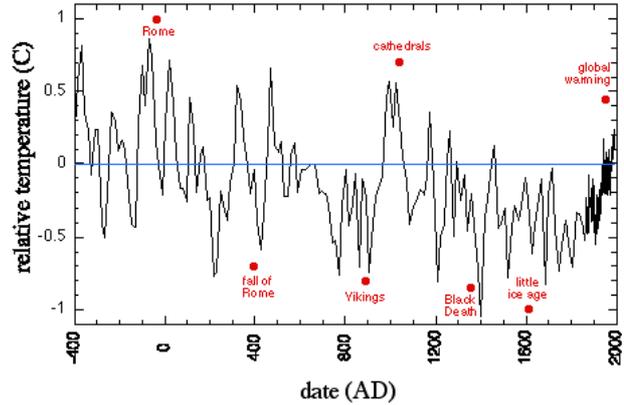


Fig. 20. Les variations de la température atmosphérique, au cours des 2 400 dernières années (en années calendaires). Données d'après une carotte de glace de la station GISP2 (Groenland). Le zéro des températures correspond à la température de l'année 1950. Les points rouges correspondent à des événements de l'histoire humaine qui pourraient être la conséquence du climat. D'après Muller, 2006).

Le Petit-âge glaciaire

L'énorme variabilité inter-annuelle du climat (canicules historiques en plein Petit-âge glaciaire, records de froid lors des maximums chauds) fait que les contemporains n'ont jamais perçu les cycles de 1 500 ans.

Même les scientifiques (biologistes, climatologues, etc.) se faisaient une idée relativement "fixiste" du climat. Certes, on connaissait depuis le milieu du 19^e siècle les épisodes glaciaires, dont le dernier a culminé il y a 21 000 ans. On connaissait également, depuis, des accidents climatiques comme le Dryas récent (froid, vers 11 000 BP) et la période dite "Atlantique" (chaude, vers 6000 BP). Toutefois, le fait que l'hémisphère Nord, et peut-être l'ensemble de la planète, ait sombré dans un mini-âge glaciaire, le **LIA** (en anglais, *Little Ice Age*), qui a culminé entre le 14^e et le 18^e siècle, et dont le 19^e-20^e siècle marque la sortie, n'était pas réellement perçu.

C'est un historien, Emmanuel Le Roy Ladurie (**Fig. 21**), qui, il y a un peu plus de 30 ans, en examinant les archives des dates de vendanges conservées dans des couvents, a perçu combien elles étaient en moyenne beaucoup plus tardives qu'aujourd'hui, entre le 14^e et le 18^e siècle, et qu'il y avait une corrélation très précise entre température et date des vendanges (**Fig. 22 et 23**).



Fig. 21. Emmanuel Le Roy Ladurie, lors d'une conférence, au début des années 2000s.

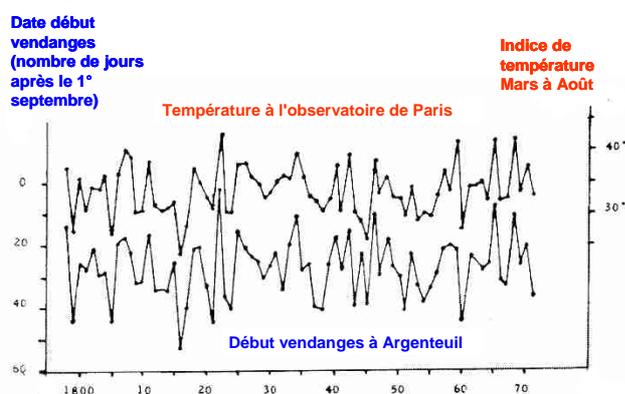


Fig. 22. Corrélation entre les dates des vendanges à Argenteuil, près de Paris, et la température mesurée à l'observatoire de Paris, au 19^e siècle. D'après Le Roy Ladurie (2005).

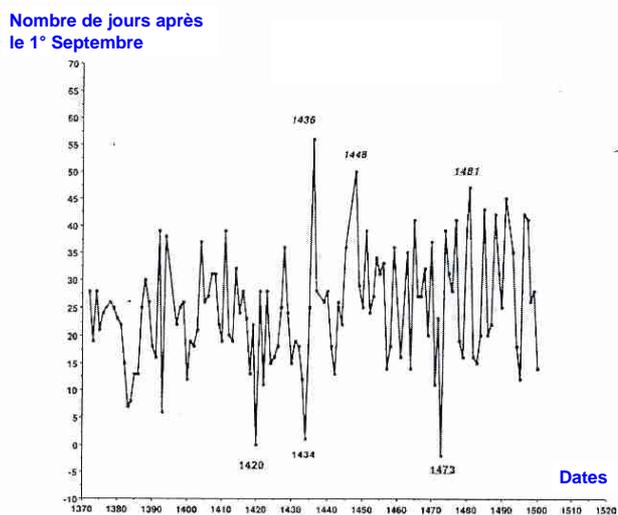


Fig. 23. Date des vendanges (en nombre de jours après le 1^{er} Septembre) entre 1372 et 1500. La proximité d'années record (chaude, 1424 et froide, 1426) illustre bien l'extraordinaire variabilité du climat et explique que la tendance générale n'ait pas été perçue par les contemporains. D'après Le Roy Ladurie (2005).

A trois reprises, les glaciers alpins ont avancé (1370-1380, 1590-1650 et 1815-1860). A Chamonix, le glacier des Bossons a submergé un hameau du village du même nom. Le Rhône, la Tamise, le Tage et l'Ebre étaient régulièrement pris par les glaces, en hiver. Avec le froid et les récoltes désastreuses, la famine et les épidémies ont décimé la population ; il faut bien sûr y ajouter les guerres ... ; entre 1328 et 1440, la population de ce qui est aujourd'hui la France est passée de 20 à 10 millions d'habitants. L'hiver 1693-1694 a fait un million de morts en France. L'hiver 1709 a été peut-être le plus terrible ; le Vieux Port de Marseille y a été pris par les glaces, et une mini-banquise couvrait les rochers du littoral provençal (Fig. 24 ; Tabeaud, 2002 ; Le Roy Ladurie, 2004 ; Francescutti, 2006).



Fig. 24. Serge Reggiani chante "Tu peux sourire, Charmante Elvire, Les loups sont entrés dans Paris". Il y a une base historique. C'était en Décembre 1439 ("Journal d'un bourgeois de Paris", in Tabeaud, 2002). Photo X.

Pour comprendre le fait que les contemporains n'aient pas perçu le changement climatique, il faut considérer la variabilité du climat. Au cœur du Petit-âge glaciaire, des années exceptionnellement froides et chaudes se suivent (Fig. 23). En 1420, une canicule estivale a été à l'origine d'une famine en France. La plus sévère canicule de l'histoire, en France, a été

celle de l'été 1719, qui a fait 450 000 morts². En Chine, la plus sévère canicule est celle de l'été 1743 (Gioda *et al.*, 2004 ; Le Roy Ladurie, 2004).

Bien sûr, l'Histoire n'est pas faite uniquement de rois et de reines, de guerres, d'intrigues de palais et de secrets d'alcôve. On comprend aujourd'hui que le climat y a eu sa part. La Révolution française doit-elle plus à Voltaire et à Rousseau ? Ou aux terribles famines qui marquent l'un des points culminants du Petit-âge glaciaire ? De même, l'hiver russe a imprimé sa marque dans l'Histoire napoléonienne.

"(...) *La mortalité des bestiaux, le dérangement des saisons, les grêles et les orages ont porté la désolation et la stérilité dans nos campagnes*"

Mandement de Monseigneur l'évêque de Mende

Décembre 1764

La période chaude médiévale

La période chaude médiévale (**MWP** : *Medieval Warm Period*) est également nommée "optimum des vikings". En effet, c'est grâce à un Atlantique Nord libre de glaces que les **vikings** ont pu atteindre l'Islande, le Groenland (en l'an 981) et même l'Amérique du Nord, des siècles avant Christophe Colomb. La vigne se répand en Grande Bretagne (jusqu'en Ecosse). C'est une période de prospérité économique, de renouveau culturel et d'expansion de la population. Comme aujourd'hui, l'agriculture européenne "croule" sous ses excédents. On y construit les cathédrales (Hersard de la Villemarqué, 1991 ; Tabeaud, 2002 ; Petit-Maire, 2003 ; Le Roy Ladurie, 2004 ; Muller, 2006).

La période chaude médiévale se situe entre le 6^e et le 13^e siècle³. Toutefois, c'est entre **1000**

² Ce chiffre est à mettre en relation avec la population de l'époque, beaucoup moins importante qu'aujourd'hui, et à comparer avec la canicule de 2003.

³ Si l'on considère la Fig. 20, il apparaît un décalage dans le temps ; il peut être dû au fait que cette figure traduit la température au Groenland et non en Europe de l'Ouest.

et **1100** que la température aurait été à son maximum (Moberg *et al.*, 2005), peut-être un peu plus tard (Le Roy Ladurie (2004).

La question qui se pose est : les températures ont-elles été moins élevées, **aussi élevées** ou plus élevées qu'aujourd'hui ? La réponse est difficile dans la mesure où nous ne disposons pas de mesures directes (thermomètres). Les mesures indirectes, comme celles concernant les dates de vendanges sont trop partielles. Quant aux mesures indirectes basées sur l'isotope 18 de l'oxygène, elle traduisent bien sûr l'existence d'une période chaude (**Fig. 19** et **20**), qui peut sembler plus chaude qu'aujourd'hui (**Fig. 20**), mais la résolution est insuffisante pour répondre à la question. Pour certains auteurs, les températures ont été inférieures aux températures atteintes à la fin du 20^e siècle (Bradley, 2000 ; Bradley *et al.*, 2003). Pour d'autres, elles ont été du même ordre de grandeur (deMenocal *et al.*, 2000 ; Briffa et Osborn, 2002 ; Tabeaud, 2002).

La période froide des âges sombres

La période froide des âges sombres (en anglais **DACP**, *Dark Ages Cold Period*) est généralement datée du 2^e au 6^e siècle après J.C. (McDermott *et al.*, 2001).

Elle est marquée par l'abandon des zones agricoles en Europe du Nord, les invasions des "barbares" qui fuient le froid, des épidémies qui déciment la population européenne (près de 50% de baisse, entre l'an 542 et l'an 565 après J.C.) (Tabeaud, 2002). L'an **540** est marqué, dans les cernes de tous les arbres d'Europe, comme une année (froide ?) sans équivalent depuis. L'hiver 763-764, le détroit des Dardanelles a été pris par les glaces (Tabeaud, 2002).

Comme pour le Petit-âge glaciaire, aucune source écrite n'indique que les contemporains aient eu conscience du fait que **l'Empire romain** s'enfonçait dans une mini-glaciation. Sa fin officielle est datée de l'an 476, quand le roi germain Odoacre a déposé le dernier empereur romain, Romulus Augustule (**Fig. 25**). Il est permis de penser que la mini-glaciation du DACP, qui entraîne des récoltes catastrophiques, l'effondrement des finances de l'Empire et, bien sûr, la descente des peuples nordiques fuyant le froid, constitue la cause primaire de

la fin de l'Empire romain (Fig. 20 ; Muller, 2006).



Fig. 25. Le roi germain Odoacre, qui a mis fin à l'Empire romain, en l'an 476. Photo X.

La période chaude romaine

La période chaude romaine (**RWP**, en anglais *Roman Warm Period*) correspond à l'apogée de la **civilisation gréco-romaine**. Elle culmine vers 2 400 BP (McDermott *et al.*, 2001) ou 2 400-2 100 BP (Muller, 2006). Les récoltes excédentaires ont favorisé l'expansion démographique.

D'autres périodes chaudes peuvent être datées de 3 500, 5 000, 6 600 et 8 700 BP (Broecker, 2001). Elles rythment l'histoire de l'Homme et des civilisations, en particulier en Egypte et en Mésopotamie, mais la réflexion des historiens est en cours, et cela sortirait du cadre du présent exposé.

Les cycles courts

Des cycles plus courts que ceux de 1 470 ans ont été également mis en évidence, en particulier l'**AMO** (*Atlantic Multidecadal Oscillation*), d'une durée de 50-70 ans (Fig. 26) et le **PDO** (*Pacific Decadal Oscillation*), d'une durée moyenne de 50 ans (Fig. 27 ; Schlesinger *et al.*, 2000 ; Chavez *et al.*, 2003).

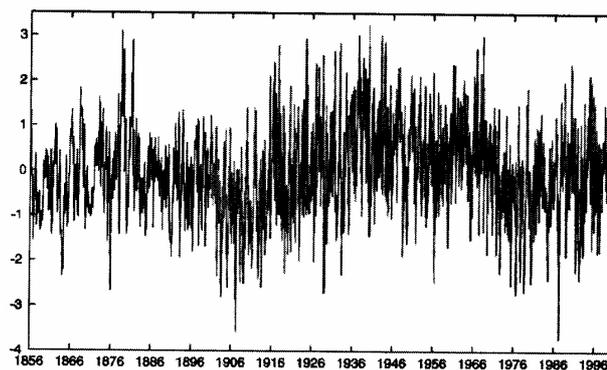


Fig. 26. Anomalies standardisées de la température des eaux de surface en Méditerranée, entre 1856 et 2000. Le cycle de 50-70 ans (AMO) apparaît. D'après Moron (2003).

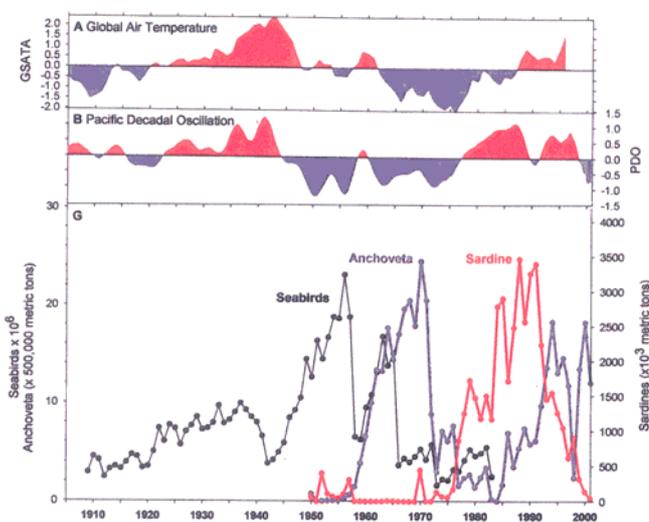


Fig. 27. Le cycle de 50 ans (PDO) dans le Pacifique. **A** : La température atmosphérique, après élimination de l'accroissement à long terme. **B** : L'Index PDO (*Pacific Decadal Oscillation*), en °C, calculé par analyse en composantes principales des SST (*Sea Surface Temperature*). **G** : Abondance des oiseaux, et des débarquements d'anchois et de sardines au Pérou. D'après Chavez *et al.* (2003).

El Niño (2-7 ans), qui concerne principalement l'Est du Pacifique Nord, a des répercussions sur l'Atlantique Nord et l'Europe de l'Ouest (Taylor, 1998). Le phénomène El Niño tire son origine dans l'Ouest du Pacifique, au large de **l'Indonésie**. Normalement, les alizés y confinent une masse d'eau chaude (environ 29°C), avec un niveau de l'eau de 10 à 20 (40) cm plus élevé que dans l'Est du Pacifique ; parallèlement, de l'eau froide, riche en sels nutritifs, remonte le long du continent américain (upwelling), et maintient l'eau chaude au large du continent américain. La chute, ou l'affaiblissement, des alizés permet à cette eau chaude

oligotrophe (= pauvre en sels nutritifs) de **traverser le Pacifique** et d'atteindre la côte américaine ; le réchauffement des eaux peut y atteindre 4-10°C et se maintenir pendant plusieurs semaines à plusieurs mois (Fedorov et Philander, 2000).

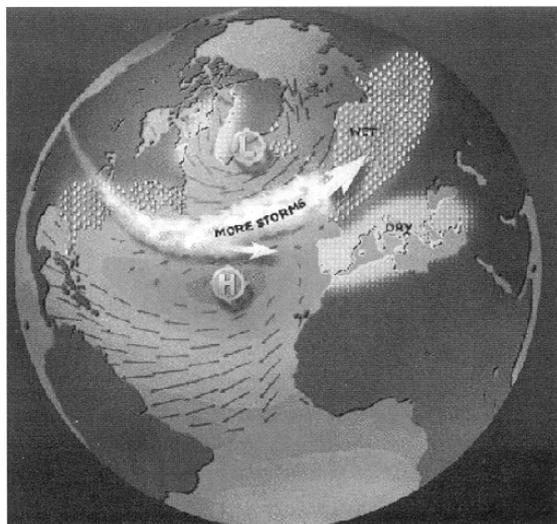


Fig. 28. Lorsque l'Indice NAO est positif, il y a un fort gradient de pression atmosphérique entre l'Islande et le Portugal. Le climat sur l'Europe du Sud et la Méditerranée est marqué par la sécheresse et des hivers doux, alors qu'il est pluvieux, avec des hivers froids, sur l'Europe du Nord. D'après Tourre (2002).

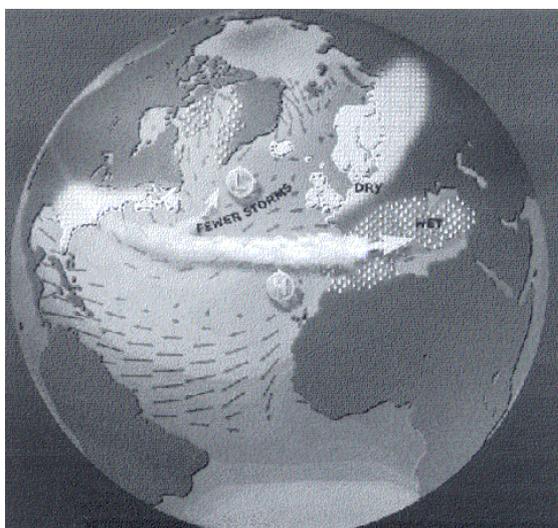


Fig. 29. Lorsque l'Indice NAO est négatif, le gradient de pression entre l'Islande et le Portugal s'estompe. Le climat est pluvieux sur l'Europe du Sud et la Méditerranée, alors qu'il est relativement sec sur l'Europe du Nord. D'après Tourre (2002).

Enfin, la **NAO** (*North Atlantic Oscillation*), sans être réellement cyclique, tout comme El Niño, contrôle le climat sur l'Atlantique Nord, l'Europe et la Méditerranée : celui-ci oscille

entre des épisodes pluri-annuels secs et à hivers doux, ou pluvieux (Fig. 28 et 29 ; Hurrell *et al.*, 2001 ; Visbeck *et al.*, 2001 ; Tourre, 2002).

Le réchauffement actuel

Le réchauffement du climat auquel nous assistons actuellement est d'abord un **phénomène naturel** (Muller, 2006). Il s'inscrit dans la sortie du Petit-âge glaciaire (Fig. 19, 20 et 30) et dans le cycle AMO (Fig. 26).

Au cours des 40 dernières années, la Méditerranée s'est réchauffée. Localement, ce réchauffement a été estimé à + 0.2°C à grande profondeur (Fig. 31), + 0.7°C à 80 m de profondeur (Fig. 32) et + 1.1°C en surface (Fig. 33).

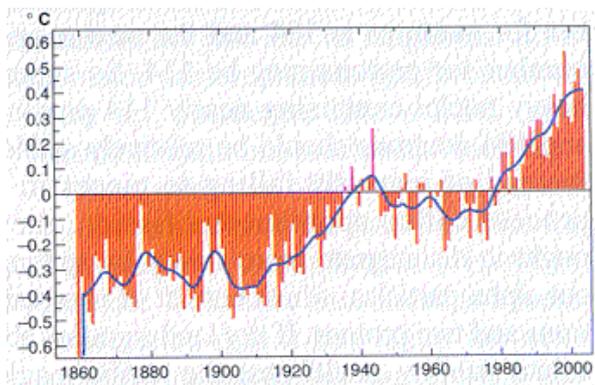


Fig. 30. Evolution de la température moyenne atmosphérique, en °C, depuis 1860, par rapport à la moyenne 1860-2002.

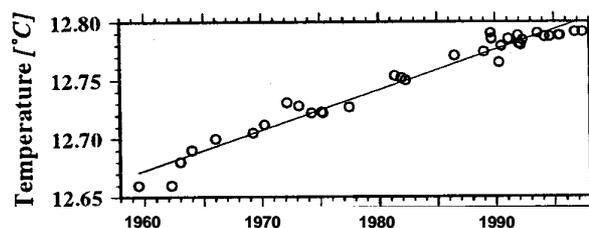


Fig. 31. Le réchauffement de l'eau profonde (2 000-2 700 m) en Méditerranée occidentale, depuis 1960. D'après Béthoux *et al.* (1990, 1998).

Depuis 1900, le réchauffement moyen en surface a été de 1°C en Méditerranée occidentale et de 0.2°C en Méditerranée orientale, avec d'énormes variations d'un point à l'autre, d'une année à l'autre, des cycles pluri-décadaux et même des tendances locales inverses (Moron, 2003). On reste donc très loin d'une Méditerranée

née "tropicale". En effet, par définition, une eau tropicale ne descend pas en dessous de 20°C en hiver, alors que le minimum hivernal en Méditerranée occidentale se situe entre 11 et 15°C.

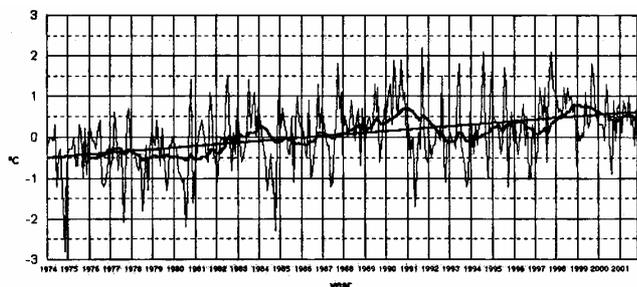


Fig. 32. Température des eaux de surface, entre 1974 et 2002, à L'Estartit (Catalogne). Température observée, moyenne sur 2 ans et tendance linéaire. D'après Salat et Pascual (2002).

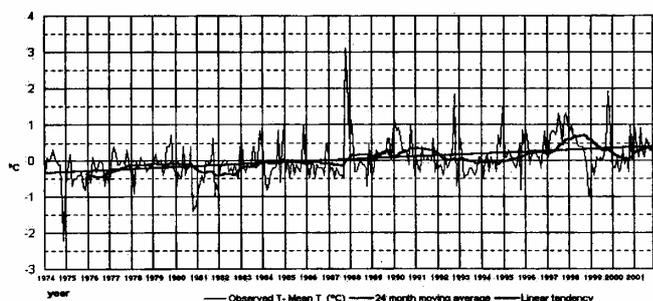


Fig. 33. Température des eaux à 80 m de profondeur, entre 1974 et 2002, à L'Estartit (Catalogne). Température observée, moyenne sur 2 ans et tendance linéaire. D'après Salat et Pascual (2002).

Globalement, le réchauffement du 20^e siècle s'inscrit donc dans les cycles climatiques naturels. Il se serait certainement produit en l'absence du rejet massif de dioxyde de carbone (= gaz carbonique) par l'homme, depuis le début de l'ère industrielle, qui est passé de 280 à plus de 380 ppmv⁴ (Fig. 34).

Toutefois, il y a **95%** de chances pour que la ou les dernières décennies aient été plus chaudes que ce qui est prévu par les modèles climatiques, et que **l'homme en soit responsable**, en particulier au travers des émissions de dioxyde de carbone (Fig. 35 ; Stott *et al.*, 2000 ; Barnett *et al.*, 2001). Neuf des dix années les plus chaudes, depuis 1860, sont postérieures à 1995. Les deux années record sont **1998** et **2005** (Henson, 2005).

⁴ ppmv = partie par million volume.

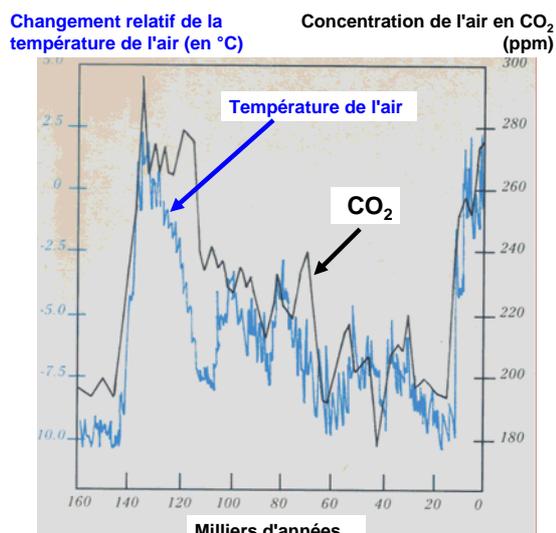


Fig. 34. Evolution de la température moyenne de l'air (en bleu) et de la teneur en CO₂ (en noir), depuis 160 000 ans, d'après l'analyse d'une carotte de glace dans l'Antarctique. A cette échelle, l'accroissement récent de la teneur en CO₂, qui atteint plus de 380 ppmv, n'est pas visible. D'après Claude Lorius.

Il y a de ce point de vue **consensus** à peu près total au sein de la communauté scientifique. Sur 928 articles scientifiques traitant du climat, parus entre 1993 et 2003, 75% concluent à la responsabilité de l'homme pour les dernières décennies, 25% parlent de problèmes méthodologiques et aucun n'exclut la responsabilité de l'homme (Oreskes, 2004).

Il y a également consensus sur le fait que, **si le climat dérape**, nous ne savons, et nous ne saurons pas dans un futur prévisible, le remettre sur ses rails. De ce point de vue, les prévisions des modèles (Fig. 35) sont effrayantes. Tous prévoient un réchauffement de **plusieurs degrés** au cours du 21^e siècle : entre 1.4 et 5.8°C, la valeur la plus probable se situant autour de **4°C** (Kerr, 2001b ; Sandalow et Bowles, 2001). Pour bien mesurer son ampleur, il convient de comparer cette valeur à celle du réchauffement vécu depuis 150 ans (Fig. 30), de l'ordre de **0.6°C** (seulement), ou au cours du 20^e siècle, de l'ordre de 0.8°C, et qui est pourtant perçu comme considérable (Henson, 2005).

Conclusions

Normalement, si l'on considère la durée (brève) des interstades glaciaires chauds (Fig. 17)

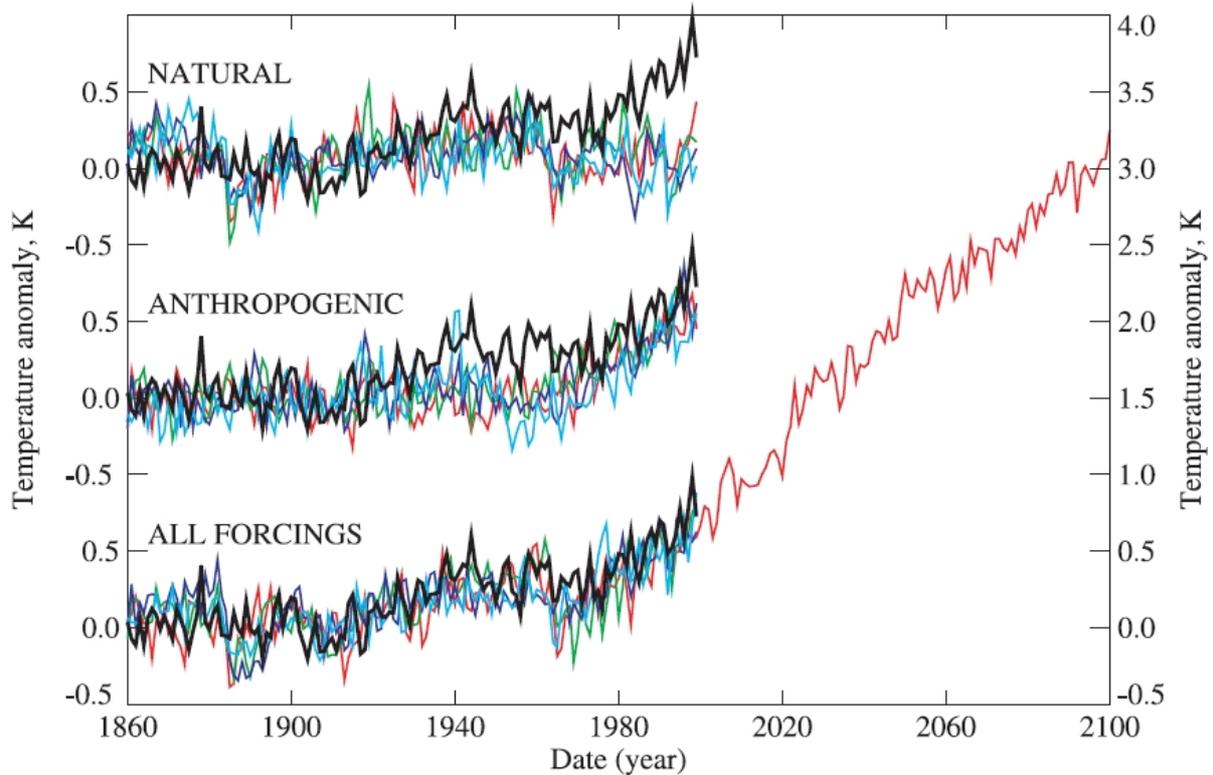


Fig. 35 (ci-dessus). Evolution de la température atmosphérique depuis 1860. En noir, les températures observées. En couleur, les températures déduites des modèles climatiques. En haut, en fonction des forçages naturels seuls. Au milieu, en fonction des forçages anthropiques seuls. En bas, en combinant les forçages naturels et anthropiques : l'ajustement est bon. Prédiction (en rouge) de l'évolution de la température au cours du 21^e siècle. D'après Stott et al. (2000).

et le temps écoulé depuis le dernier maximum glaciaire, la planète devrait être sur le point de s'enfoncer, lentement mais sûrement, dans un **nouveau stade glaciaire**. Dans un siècle ? Dans un millénaire ? Un peu plus ? (Muller, 2006). Le retour de glaciers gigantesques, l'avancée de la calotte glaciaire submergeant le Nord de l'Europe jusqu'aux Alpes, l'Amérique du Nord et New York⁵, constitue le thème de science-fiction dont la mode a précédé *Jurassic Park*, *Armageddon*⁶ et *Independence day* (Fig. 36 ; Muller, 2006). Il a été repris, sous une forme différente, dans *The day after tomorrow*.



Fig. 36. La couverture d'un magazine américain des années 1940s, montrant la glaciation à venir et le front glaciaire submergeant New York. D'après Muller (2006).

⁵ Long Island (la grande île située devant New York) est la moraine abandonnée par le glacier qui couvrait la région, il y a 20 000 ans (Muller, 2006).

⁶ Un astéroïde se dirige vers la Terre à la vitesse de 35 000 km/h.

Pourtant, c'est dans un épisode **chaud** que notre planète risque de basculer, du fait de l'action de l'homme. La Terre a déjà connu des

périodes chaudes à très chaudes ; elle y a même vécu la plus grande partie de sa longue existence. Mais c'était avant notre civilisation, **façonnée** par, et **programmée** pour, un climat relativement froid à tempéré. Il est difficile d'expliquer au grand public cette apparente contradiction.

Replacer les faits **dans leur contexte** constitue pourtant un exercice indispensable bien que difficile. La Presse grand-public s'y risque rarement. Cela se comprend. Le journaliste ne dispose pas d'une heure, ou d'une vingtaine de pages illustrées d'une quarantaine de figures, pour prendre de la hauteur. Du reste, s'il le faisait, qui le lirait ou l'écouterait ?

La Presse est donc contrainte à **simplifier**. Ce qui est d'ailleurs le cas du présent texte. Un scientifique, qu'il soit biologiste ou spécialiste du climat, y détectera des omissions "inexcusables" et des raccourcis hâtifs.

Simplifier plait, car l'homme de la rue n'a pas de mémoire, surtout s'il lui faut remonter aux temps "préhistoriques" d'avant sa naissance. Chaque orage dramatique, chaque inondation, chaque canicule, constituent un évènement exceptionnel. Nous sommes tous flattés si on nous fait croire que nous avons vécu un évènement réellement exceptionnel.

Pourtant, simplifier est **dangereux**. L'homme de la rue, ou l'homme politique, qui lit que le climat s'est réchauffé depuis 150 ans (ce qui est vrai) et qui croit que c'est dû à l'action de l'homme (ce qui, pour le moment, n'est que très partiellement vrai), finira par lire qu'il s'agit de la "sortie" naturelle d'un évènement climatique naturel, le Petit-âge glaciaire, ou que nous devrions "plonger" sous peu dans une nouvelle époque glaciaire. Il aura du mal à comprendre. Il pensera alors qu'il s'agit d'une **polémique scientifique**, qu'il est donc urgent d'attendre que les scientifiques se mettent d'accord entre eux. Les hommes politiques sont particulièrement gourmands de ce genre de situation, qui justifie l'inaction.

Certes, l'extraordinaire **variabilité du climat** ne facilite pas la prise de conscience (**Fig. 37**). Les contemporains n'ont jamais perçu les tendances climatiques, pas plus à la fin de l'empire romain qu'au "siècle des lumières". Une **canicule** comme celle de l'été 2003 sur l'Eu-

rope occidentale s'inscrit tout à fait dans la variabilité naturelle du climat ; du reste, des canicules similaires (pires ?) jalonnent l'histoire (Trigo *et al.*, 2005) ; mais leur probabilité d'occurrence a été doublée par l'action de l'homme (Schär et Jendritzky, 2004).



Fig. 37. L'extraordinaire variabilité du climat. Dessin X.

Mais il n'y a pas de polémique scientifique sur le climat. S'il est vrai que le réchauffement vécu depuis 150 ans est **presque** naturel, c'est dans l'adverbe "presque" que se situe le problème.

Le climat a réellement commencé à **dérailer**. C'est encore à peine perceptible. Un peu comme une voiture qui dérape sur une route mouillée. Dans les premiers instants, sa trajectoire diffère très peu de la trajectoire normale. Quelques centimètres ? Un bon pilote peut encore rétablir la situation. C'est (peut-être) à ce stade que nous nous situons. Quelques instants plus tard, même Fernando Alonso ne pourra plus rien faire.

Un exposé similaire à la présente conférence pourrait être consacré à la **remontée du niveau de la mer**. Il s'agit également d'un phénomène naturel : il n'a jamais cessé de remonter depuis 20 000 ans (Laborel *et al.*, 1983 ;

Morhange, 2003). Une légère accélération de la vitesse de remontée s'observe actuellement, qui devrait s'accroître : les modèles prévoient qu'elle pourrait atteindre **50 cm** au 21^e siècle. En considérant le doublement imprévu de la vitesse de descente vers la mer des glaciers du Groenland, certains auteurs se demandent toutefois si cette valeur n'est pas fortement sous-estimée (Kerr, 2006).

Bref, en matière de réchauffement climatique, comme de remontée du niveau marin (les deux sont d'ailleurs liés), ce qui s'est produit au 20^e siècle est insignifiant à côté de ce qui pourrait se passer au 21^e siècle : le pire est à venir.

"We are adventuring into the unknown with climate" (Karl et Trenberth, 2003)

Références

- ALLEN P.A., HOFFMAN P.F., 2005. Extreme winds and waves in the aftermath of a neoproterozoic glaciation. *Nature*, 433 : 123-127.
- ALLEY R.B., MAROTZKE J., NORDHAUS W.D., OVERPECK J.T., PETEET D.M., PIELKE Jr R.A., PIERREHUMBERT R.T., RHINES P.B., STOCKER P.F., TALLEY L.D., WALLACE J.M., 2003. Abrupt climate change. *Science*, 299 : 2005-2010.
- ANBAR A.D., KNOLL A.H., 2002. Proterozoic ocean chemistry and evolution : a bioinorganic bridge ? *Science*, 297 : 1137-1142.
- BADA J.L., LAZCANO A., 2002. Some like it hot, but not the first biomolecules. *Science*, 296 : 1982-1983.
- BARNETT T.P., PIERCE D.W., SCHNUR R., 2001. Detection of anthropogenic climate change in the world's ocean. *Science*, 292 : 270-274.
- BEARDALL J., RAVEN J.A., 2004. The potential effects of global climate change on microalgal photosynthesis, growth and ecology. *Phycologia*, 43 (1) : 26-40.
- BECKER L., POREDA R.J., BASU A.R., POPE K.O., HARRISON T.M., NICHOLSON C., IASKY R., 2004. Bedout : a possible end-permian impact crater offshore of northwestern Australia. *Science*, 304 : 1469-1476.
- BERGER A., 1996. Modeling the last and next glacial-interglacial cycles. *Tendances nouvelles pour l'environnement. Journées du Programme Environnement, Vie Sociétés*, Paris, 15-17 Janvier 1996 : 1-13.
- BETHOUX J.P., GENTILI B., RAUNET J., TAILLIEZ D., 1990. Warming trend in the western Mediterranean deep water. *Nature*, 347 (6294) : 660-662.
- BETHOUX J.P., GENTILI B., TAILLIEZ D., 1998. Warming and freshwater budget change in the Mediterranean since the 1940s, their possible relation to the greenhouse effect. *Geophysical Res. Letters*, 25 (7) : 1023-1026.
- BILLUPS K., 2005. Snow maker for the ice ages. *Nature*, 433 : 809-810.
- BRADLEY R., 2000. 1000 years of climate change. *Science*, 288 : 1353-1354.
- BRADLEY R.S., HUGHES M.K., DIAZ H.E., 2003. Climate in medieval time. *Science*, 302 : 404-405.
- BRIFFA K.R., OSBORN T.J., 2002. Blowing hot and cold. *Science*, 295 : 2227-2228.
- BROCKS J.J., LOGAN G.A., BUICK R., SUMMONS R.E., 1999. Archean molecular fossils and the early rise of Eukaryotes. *Science*, 285 : 1033-1036.
- BROECKER W.S., 2003. Does the trigger for abrupt climate change reside in the ocean or in the atmosphere ? *Science*, 300 : 1519-
- BURNS S.J., FLEITMAN D., MATTER A., KRAMERS J., AL-SUBBARY A.A., 2003. Indian Ocean climate and an absolute chronology over Dansgaard/Oeschger events 9 to 13. *Science*, 301 : 1365-1367.
- CACHO I., GRIMALT J.O., CANALS M., 2002. Response of the Western Mediterranean Sea to rapid climatic variability during the last 50,000 years : a molecular biomarker approach. *J. mar. Syst.*, 33-34 : 253-272.
- CAVALIER-SMITH T., 2002. The neomurian origin of archaeobacteria, the negibacterial root of the universal tree and the bacterial megaclassification. *Int. J. System. Evolutionary Microbiology*, 52 : 7-76.
- CHAMLEY H., 1989. Recherches récentes en sédimentologie marine. *Océanologie, actualité et*

prospective, DENIS M. édit., Centre d'Océanologie de Marseille publ. : 117-154.

CHAVEZ F.P., RYAN J., LLUCH-COTA S.E., NIQUEN M., 2003. From anchovies to sardines and back : multidecadal change in the pacific Ocean. *Science*, 299 : 217-221.

COHEN B.A., SWINDLE T.D., KRING D.A., 2000. Support for the Lunar cataclysm Hypothesis from Lunar meteorite impact melt age. *Science*, 290 : 1754-1756.

CONDON D., ZHU M., BOWRING S., WANG W., YANG A., JIN Y., 2005. U-Pb ages from the neoproterozoic Doushantuo formation, China. *Science*, 308 : 95-98.

COSTAS E., LOPEZ-RODAS V., 1994. Cianofíceas : entre la estasis, la diferenciación y la diezmación. *Algas*, 12 : 6-7.

D'ARRIGO R., COOK E.R., WILSON R.J., ALLAN R., MANN M.E., 2005. On the variability of ENSO over the past six centuries. *Geophysical Res. Letters*, 32 (L03711) : 1-4.

deMENOCAL P., ORTIS J., GUILDERTON T., SARNTHEIN M., 2000. Coherent high- and low-latitude climate variability during the Holocene warm periode. *Science*, 288 : 2198-1202.

CROWLEY T.J., 2002. Cycles, cycles everywhere. *Science*, 295 : 1473-1474.

FEDOROV A.V., PHILANDER S.G., 2000. Is El Niño changing ? *Science*, 288 : 1997-2001.

FRANCESCUTTI P., 2006. El cambio climático ya está aquí. *El País Semanal*, 1528 : 31-41.

GARIDEL-THORON T. de, ROSENTHAL Y., BASSINOT F., BEAUFORT L., 2005. Stable sea surface temperatures in the western Pacific warm pool over the past 1.75 million years. *Nature*, 433 : 294-298.

GIODA A., JOMELLI V., RABATEL A., 2004. Petit âge de glace, lichens et archives religieuses. *Pour la Science, Dossier*, 42 : 100-103.

GLEMAREC M., 1979. Les fluctuations temporelles des peuplements benthiques liées aux fluctuations climatiques. *Oceanologica Acta*, 2 (3) : 365-371.

GROUSSET F., 1998. Les évènements de Heinrich. *Océanis*, 24 (1) : 5-22.

GROUSSET F., 2003. Abrupt climatic changes. *Lettre pigb-pmrc France*, 15 : 4-8.

HANSEN B., ØSTERHUS S., QUADFASEL D., TURRELL W., 2004. Already the day after tomorrow ? *Science*, 305 : 953-954.

HENSON R., 2005. The heat was on in 2005. *Nature*, 438 : 1062.

HERSART DE LA VILLEMARQUÉ J., 1991. Les pêches françaises de la morue du XVI au XVIII^e siècle. Relations avec le climat. *Equinoxe*, 34 : 37-43.

HSU K.J., 2001. Gaia and the Mediterranean Sea. *Scientia marina*, 65 (suppl. 2) : 133-140.

HUEY R.B., WARD P.D., 2005. Hypoxia, global warming and terrestrial late Permian extinctions. *Science*, 308 : 398-401.

HURRELL J.W., KUSHNIR Y., VISBECK M., 2001. The North Atlantic Oscillation. *Science*, 291 : 603-604.

HUYBERS P., WUNSCH C., 2005. Obliquity pacing of the late Pleistocene glacial terminations. *Nature*, 434 : 491-494.

JACOBSEN S.B., 2003. How old is the planet Earth ? *Science*, 300 : 1513-1514.

JANVIER P., 2000. D'une extinction à l'autre. *La Recherche*, 333 : 52-56.

KARL T.R., TRENBERTH K.E., 2003. Modern global climate change. *Science*, 302 : 1719-1723.

KERR R.A., 2000a. Beating up a young Earth, and possibly Life. *Science*, 290 : 1677.

KERR R.A., 2000b. A refuge for life on snowball Earth. *Science*, 288 : 1316.

KERR R.A., 2001a. Whiff of gas points to impact mass extinction. *Science*, 291 : 1469-1470.

KERR R.A., 2001b. It's official : humans are behind most of global warming. *Science*, 291 : 566.

KERR R.A., 2002. Earliest signs of life just oddly shaped crud ? *Science*, 295 : 1812-1813.

KERR R.A., 2004a. New biomarker proposed for earliest life on Earth. *Science*, 304 : 503.

KERR R.A., 2004b. Evidence of huge, deadly impact found off Australian coast ? *Science*, 304 : 941.

- KERR R.A., 2005. Ocean flow amplified, not triggered, climate change. *Science*, 307 : 1854.
- KERR R.A., 2006. A worrying trend of less ice, higher seas. *Science*, 311 : 1698-1701.
- LABOREL J., DELIBRIAS G., BOUDOURESQUE C.F., 1983. Variations récentes du niveau marin à Port-Cros (Var, France), mises en évidence par l'étude de la corniche littorale à *Lithophyllum tortuosum*. *C.R. hebdomadaire des Séances Acad. Sci.*, Paris, 297 : 157-160.
- LACHIÈZE-REY M., 2004. L'âge de l'Univers. *Pour la Science, Dossier* 42 : 7-11.
- LE ROY LADURIE E., 2004. Histoire humaine et comparée du climat. Canicules et glaciers, XIII^e-XVIII^e siècles. Fayard publ. : 1-740.
- LE ROY LADURIE E., 2005. Canicules, fraîcheurs, vendanges (France, XV^e-XIX^e siècles). *C.R. Biologies*, 328 : 213-222.
- MARTRAT B., GRIMALT J.O., LOPEZ-MARTINEZ C., CACHO I., SIERRA F.J., FLORES J.A., ZAHN R., CANALS M., CURTIS J.H., HODELL D.A., 2004. Abrupt temperature changes in the western Mediterranean over the past 250,000 years. *Science*, 306 : 1762-1765.
- McDERMOTT F., MATTEY D.P., HAWKESWORTH C., 2001. Centennial-scale Holocene climate variability revealed by a high-resolution speleothem $\delta^{18}\text{O}$ record from SW Ireland. *Science*, 294 : 1328-1330.
- MOBERG A., SONECHKIN D.M., HOLMGREN K., DATSENKO N.M., KARLÉN W., 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high resolution proxy data. *Nature*, 433 : 613-617.
- MOORBATH S., 2005. Dating earliest life. *Nature*, 434 : 155.
- MORHANGE C., 2003. Archaeological and biological records of relative sea-level changes in the Mediterranean during the Late Holocene. Two case studies of gradual evolution to instantaneous events, Marseilles (France) and Pozzuoli (Italy). *Human records of recent geological evolution in the Mediterranean basin – historical and archaeological evidence*. CIESM Workshop monographs 24, CIESM publ., Monaco : 77-83.
- MORON V., 2003. L'évolution séculaire des températures de surface de la Mer Méditerranée (1856-2000). *C.R. Géoscience*, 335 : 721-727.
- MULLER, 2006. Ice age book.
<http://muller.lbl.gov/pages/IceAgeBook/>
- ORESQUES N., 2004. The scientific consensus on climate change. *Science*, 306 : 1686.
- PALME H., 2004. The giant impact formation of the moon. *Science*, 304 : 977-979.
- PETIT-MAIRE N., 2003. Climatic crises and man in the Mediterranean basin : the last 20,000 years. *Human records of recent geological evolution in the Mediterranean basin – historical and archaeological evidence*. CIESM Workshop monographs 24, CIESM publ., Monaco : 5-14.
- SACHS J.P., ANDERSON R.F., 2005. Increased productivity in the subantarctic ocean during Heinrich events. *Nature*, 434 : 1118-1121.
- SALAT J., PASCUAL J., 2002. The oceanographic and meteorological station at L'Estartit (NW Mediterranean). *Tracking long-term hydrological change in the Mediterranean Sea*, CIESM Workshop Series, 16 : 29-32.
- SANDALOW D.B., BOWLES I.A., 2001. Fundamentals of treaty-making on climate change. *Science*, 292 : 1839-1840.
- SCHÄR C., JENDRITZKY G., 2004. Hot news from summer 2003. *Nature*, 432 : 559-560.
- SCHLESINGER M.E., RAMAKUTTY N., ANDRONOVA N., 2000. Temperature oscillations in the North Atlantic. *Science*, 289 : 547.
- SOLANKI S.K., USOSKIN I.G., KROMER B., SCHÜSSLER M., BEER J., 2004. Unusual activity of the sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 431 : 1084-1087.
- STOTT P.A., TETT S.F.B., JONES G.S., ALLEN M.R., MITCHELL J.F.B., JENKINS G.J., 2000. External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science*, 290 : 2133-2137.
- TABEAUD M., 2002. Les variabilités historiques du climat en Europe. *Biogeographica*, 78 (4) : 149-157.
- TAYLOR *et al.*, 1998. Gulf Stream shifts following ENSO events. *Nature*, 393 : 638.
- TOURRE Y., 2002. The North Atlantic Oscillation and the Arctic Oscillation. *Medias Newsletter*, 13 : 8-10.

TRIGO R.C., GARCÍA-HERRERA R., DÍAZ J., TRICI I.F., VALENT M.A., 2005. How exceptional was the early August 2003 heatwave in France ? *Geophysical Res. Letters*, 32 (L10701) : 1-4.

TROMPETTE R., 1997. Ancêtre de la Méditerranée, la Téthys. Histoire d'une mer au milieu des terres. *Terres marines*, Fr., 13 : 22-25.

TZEDAKIS P.C., ANDRIEU V., BEAULIEU J.L. de, CROWHURST S., FOLLIERI M., HOOGHIEMSTRA H., MAGRI D., REILLE M., SADORI L., SHACKLETON N.J., WIJMSTRA T.A., 1997. Comparison of terrestrial and marine records of changing climate of the last 500,000 years. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 150 : 171-176.

VALLEY J., 2005. Une Terre jeune et froide. *Pour la Science*, 337 : 50-57.

VISBECK M.H., HURRELL J.W., POLVANI L., CULLEN H.M., 2001. The North Atlantic Oscillation : past, present and future. *Proc. nat. Acad. Sci.*, 98 (23) : 12876-12877.

WELLMAN C.H., OSTERLOFF P.L., MOHIDDIN U., 2003. Fragments of the earliest land plants. *Nature*, 425 : 282-285

ZIMMER C., 2001. Quel âge ont-ils ? *National Geographic*, 5.3 (24) : 96-117.