



Évolution des climats et gestion du risque

G.A. Auffret
Docteur ès Sciences

2, rue Ty Arvor, 29830 Saint-Pabu

Introduction

Le concept de climat (du grec *climax* signifiant inclinaison) est relatif à un domaine spatio-temporel défini de façon empirique. Le concept s'applique classiquement à de vastes bandes latitudinales à l'échelle de continents où les caractéristiques climatiques (températures, précipitations...) sont contrôlées par l'énergie solaire avec des modulations liées à la proximité des océans et à l'altitude. Par ailleurs, la notion de microclimat qui s'applique à des territoires de faible étendue montre la relativité du concept au regard de la dimension spatiale. L'échelle temporelle quant à elle est fixée arbitrairement à trente années. Cette période relativement longue par rapport à la vie d'un homme est courte vis-à-vis des constantes majeures du système telle la circulation océanique qui est de l'ordre de 500 ans, néanmoins elle est relativement longue par rapport au cycle les plus courts de l'activité solaire, tel le cycle de Schwabe d'une durée de 11 ans (Nesme-Ribes, Thuillier, 2000). De façon classique en paléoclimatologie on qualifie de variations rapides, tout changement climatique drastique se produisant au cours d'une durée de l'ordre de la décennie.

Ainsi pour un domaine spatial donné le climat est caractérisé par la moyenne établie sur trente années des divers paramètres météorologiques (températures, précipitations, vents...). Les climats concernent donc au premier chef l'ensemble des activités humaines (agriculture, pêches, transports, industries...) et sont déterminants pour la santé des populations et l'occurrence des catastrophes naturelles. L'ingénieur en génie civil et particulièrement en génie côtier dimensionne les ouvrages qu'il conçoit à partir de statistiques d'extrêmes portant sur des durées significatives vis-à-vis de la pérennité des ouvrages qu'il conçoit : crue décennale, centennale, probabilité de surcotes au littoral ou de hauteurs des vagues (Simon, 2000 ; Swail et al., 2000).

A l'échelle globale, il est également légitime de parler du climat de la planète et de son "réchauffement" dans la mesure où l'on peut calculer de façon fiable la moyenne de paramètres fondamentaux telle la température à la surface (3^e rapport de l'IPCC, 2001).

La terre est entrée, il y a 36 millions d'années dans un âge glaciaire avec l'instauration d'une calotte glaciaire en Antarctique. Il y a 3 millions d'années, avec l'apparition de glaciers en Islande (in Duplessy, 1996) l'ensemble de la planète s'est trouvé concerné. Au cours des derniers 600.000 ans elle a été affectée par six phases glaciaires et interglaciaires d'une durée moyenne de 100.000 ans ; la moyenne des températures globales de phases interglaciaires étant supérieure de 5°C par rapport à celle des phases glaciaires. La question qui se pose aujourd'hui porte sur la réalité d'un changement climatique en cours, sans analogue dans les archives climatiques du dernier million d'années. Sous jacente à cette question se pose celle de la pertinence des statistiques relatives à l'occurrence d'évènements extrêmes, fondées sur les enregistrements météorologiques du XX^e siècle.

Les composantes du système climatique

Les composantes majeures du climat sont l'irradiation reçue du soleil, la modulation de cette énergie par l'atmosphère (l'effet de serre) et la redistribution de la chaleur par les circulations atmosphériques et océaniques (Sadourny, 1994). L'énergie reçue du soleil est fonction de deux facteurs : d'une part les variations intrinsèques de la constante solaire, d'autre part les changements liés aux modifications de la position de la planète vis-à-vis du soleil au cours du parcours de son orbite. La constante solaire varie selon des cycles périodes d'une durée comprise entre 11 et 2.300 ans, L'amplitude de cette variation, peut atteindre 0.3 % (Nesme-Ribes, Thuillier, 2000). Les variations cycliques liées aux changements cinématiques affectant la rotation de la terre autour du soleil sont celles qui sont liées au changement d'orientation de l'axe de rotation (19000 et 23000 ans), à la variation son obliquité sur le plan de l'écliptique (40000 ans) et à l'excentricité de l'ellipse, (100000ans). Ces variations affectent l'énergie interceptée à 65°N le 21 juin dans des proportions respectives de l'ordre de 10 %, 5 % et 0.5 %.

On doit à Fourier (1828) l'identification de l'effet de serre et de la contribution du gaz carbonique à cet effet. Dès 1897, Arrhénius évaluait à 6°C l'élévation de la température moyenne du globe qui résulterait d'un doublement du taux de CO₂ par rapport au taux de 280 ppmv prévalant antérieurement à l'ère industrielle (c'est-à-dire vers 1800). Échéance qu'il envisageait dans

quelques millénaires alors que le doublement au rythme actuel de 15 ppmv/an devrait être atteint en 2130.

Par ailleurs il faut bien noter que l'effet de serre associant à la fois les gaz, tel le gaz carbonique (responsable de 20 %), le méthane, mais également la vapeur d'eau (responsable de 66 %) permet le retour vers la terre sous forme d'un rayonnement infrarouge d'une énergie de 245 Wm^{-2} équivalente à l'énergie solaire pénétrant effectivement dans le système. On conçoit donc l'importance des phénomènes de rétroaction liés notamment à la couverture nuageuse et à l'accroissement de l'effet de serre dans l'évolution des climats. Tout le fonctionnement de l'écosystème de la planète est donc par l'intermédiaire des mécanismes de rétroaction impliqués, tout particulièrement le taux de gaz carbonique dans l'atmosphère et l'évolution des couverts végétaux.

Un maximum d'énergie est reçu au niveau des basses latitudes, les circulations atmosphériques et océaniques transfèrent une part importante de cette énergie vers les moyennes et les hautes latitudes. Toutes altérations de ces circulations auront également pour conséquence une modification des climats depuis les échelles régionales jusqu'à l'échelle planétaire (Labeyrie et al., 1987).

À l'échelle des temps géologiques deux points de vue se sont longtemps opposés. D'une part une vision catastrophiste, selon laquelle l'évolution se serait faite essentiellement par une succession de crises majeures : épisodes de surrection et d'érosion mettant en jeu des processus d'intensité exceptionnelles dont la nature actuelle ne donne pas d'exemple. D'autre part, sous le nom d'actualisme, l'idée que l'histoire ancienne du globe est le produit du seul jeu des forces à l'œuvre de nos jours. Notons que les connaissances actuelles ont largement privilégié ce dernier point de vue. Certes au cours de cette histoire des catastrophes tels les impacts d'astéroïdes ou des inversions du champ magnétique ont pu se produire, mais la probabilité de tels événements est encore aujourd'hui a priori égale à ce qu'elle fut par le passé.

Bien qu'elles se situent à un autre niveau de l'évolution de la planète, on retrouve dans les discussions présentes des signes d'une telle opposition. S'oppose d'une part une conception optimiste pour laquelle le réchauffement actuel ne serait que l'expression d'une évolution essentiellement naturelle (Lenoir, 2001 ; Leroux, 2000). De l'autre l'opinion que l'impact climatique lié au doublement potentiel de la teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère au cours

de ce siècle s'apparente à une catastrophe, c'est-à-dire un état dans lequel toutes extrapolations des conditions du siècle précédent doivent être considérées comme obsolètes.

Évolution climatique passée

Il y a environ 36 millions d'années, avec l'instauration d'une calotte glaciaire sur l'Antarctique, la planète entrait dans un nouvel âge glaciaire (le précédent s'étant produit au Permien il y a environ 230 millions d'années). Cet âge glaciaire semble avoir culminé au cours des derniers 600.000 ans avec le développement et la disparition répétée selon des durées voisines de 100.000 ans de grandes calottes glaciaires dans l'hémisphère nord. Au cours des paroxysmes glaciaires le volume des glaces peut atteindre 80.10^6km^3 , lors des phases de décroissance telle la période actuelle, il atteint "seulement" 39.10^6km^3 . En effet si les derniers âges glaciaires ont été caractérisés par des variations de grande amplitude affectant l'hémisphère nord le volume de la calotte glaciaire antarctique serait, quant à lui, resté relativement stable (30.10^6km^3).

Jusqu'au début des années 1990 l'évolution du climat à l'échelle du Quaternaire était considérée comme la résultante des variations de l'énergie annuelle reçue par la terre au cours de ses révolutions autour du soleil (Duplessy et Morel, 1990). Proposée par Milankovitch dès 1924 cette théorie ne fut définitivement acceptée que dans les années 1980, quand il apparut que les dépôts océaniques présentaient des variations selon les périodicités prédites ((Berger et al., 1984). Ainsi des fluctuations liées aux variations de l'obliquité (41.000 ans) et de la précession (23.000 et 19.000 ans) furent bien établies. Une interrogation demeure néanmoins quant à la prépondérance de la périodicité de 100000 ans liée à l'excentricité dont le forçage énergétique global (0.2 %) est sans commune mesure avec l'intensité de la réponse climatique. L'idée que celle-ci pourrait être liée à une périodicité propre au développement des calottes glaciaires a été émise (in Duplessis, 1996).

Cette vision cyclique de l'évolution climatique (Duplessy et Morel, 1990) a été bouleversée par les données obtenues lors des forages des glaces du Groenland et des études à haute résolution temporelle des sédiments océaniques (Mayeswsky et al., 1994 ; Groote and Stuiver, 1997, Cortijo et al., 1995)

La reconstitution des températures de l'air au-dessus du Groenland pour les derniers 150000 ans montre une évolution (Figure 1) où l'on détecte difficilement les périodicités de Milankovitch. Des fluctuations de température d'une amplitude de 5°C se produisent, selon des intervalles d'une

durée moyenne de 1500 ans : les "cycles" de Dansgaard-Oeschger (Dansgaard, 1993), ces cycles sont eux-mêmes regroupés en ensemble culminant vers des paroxysmes de froid.

Simultanément l'étude des sédiments océaniques à haute résolution des sédiments marins réalisée dans le cadre du programme IMAGES permettait de mettre en évidence des fluctuations rapides de l'état de l'océan et tout particulièrement six niveaux azoïques, riches en débris glaciaires (niveaux d'Heinrich) dont le dépôt paraît correspondre au maximum de froids enregistrés dans les glaces du Groenland (Heinrich, 1988 ; Bond et al., 1992 ; Auffret et al., 1996 ; Auffret et al., sous presse).

Au cours des derniers 65000 ans six évènements d'Heinrich se sont succédé selon un intervalle d'une durée moyenne de l'ordre de 10000 ans. Lors de chacun d'entre eux, environ 10^6 km³ de glace issus des calottes glaciaires périatlantiques furent dispersés en une durée de l'ordre de la centaine d'années, un tel volume de glace représente une élévation potentielle de 3m du niveau marin.

Une catastrophe climatique d'un autre ordre, s'est également produite entre 12000 et 11000 ans, il s'agit de la période dite du Younger Dryas marqué par un refroidissement notable dans l'hémisphère nord. Ce refroidissement se produit après la phase de réchauffement qui suivit le maximum d'insolation à 65°N qui mit fin à la dernière phase glaciaire. L'hypothèse la plus vraisemblable est que ce refroidissement a pour cause une dessalure importante des eaux de surface de la mer de Norvège suite à une fonte importante de la banquise (dont la salinité est inférieure à celle de l'eau de mer) au niveau de l'océan Arctique et de la mer de Norvège. Cette dessalure produisit un arrêt de la formation des Eaux Profondes Nord Atlantique et par voie de conséquence une interruption du flux de chaleur vers les hautes latitudes, associé à la dérive nord-atlantique (Duplessy et al., 1992). Enfin notons que l'hémisphère nord a connu un optimum climatique, il y a 8.000 ans environ au début de l'Holocène, avec des températures estivales plus élevées de 2°C que les températures actuelles, malgré un taux de CO₂ inférieur (260 ppmv), il est donc effectivement clair que la température à l'échelle globale ne dépend pas du seul CO₂. On peut postuler que les teneurs élevées en vapeur d'eau qui ont prévalu à cette époque peuvent avoir contribué à ce réchauffement.

L'évolution historique des climats du dernier millénaire en Europe occidentale

La reconstitution des températures du dernier millénaire dans l'hémisphère nord (Figure 2) (Mann et al., 1999) montre que suivant un optimum médiéval, la température moyenne a commencé à décroître dès le XV^e siècle, un épisode froid particulièrement marqué intervient entre 1645 et 1715, cette période est connue sous le nom de Petit Age Glaciaire, des périodes de froid marquées interviennent également au XIX^e siècle. Notons que la température moyenne de l'hémisphère nord était lors du Petit Age Glaciaire, inférieure à la température actuelle de seulement 0,7° C. Cette faible différence montre bien comment les moyennes peuvent atténuer les effets des paroxysmes.

La température moyenne à l'échelle globale (Figure 3) a connu un réchauffement important à partir de cette période (3^e rapport du GIEC) en deux phases : de 1905 à 1945 puis de 1975 à 2001. De 1945 à 1970 l'évolution de la température est marquée par une décroissance de 0,1°C.

L'évolution des températures de l'hémisphère nord au cours du dernier millénaire est interprétée jusqu'au XX^e siècle par les variations de l'activité solaire et de l'activité volcanique Cette hypothèse est discutée (Sadourny, 1994). Effectivement les variations de l'activité solaire n'ont affecté l'intensité de l'énergie radiée que de 0.3 % pendant le Petit Age Glaciaire (Nesrube, Thuillier, 2000). Néanmoins des mécanismes de rétroaction mettant en jeu l'influence du rayonnement cosmique (plus intense lors des périodes de faible activité solaire) ont été proposés (Kawai, 1972) qui pourrait rendre compte des corrélations observées.

L'évolution de la température au cours du dernier siècle est quant à elle l'objet de discussions touchant à l'importance relative de l'influence des variations l'activité solaire et de l'impact potentiel des activités humaines. L'impact des activités humaines est lié tout à la fois à la croissance de la teneur en gaz carbonique, méthane et autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère mais aussi à celle des aérosols sulfatés (résultant en partie des activités industrielles) qui ont un effet négatif sur le bilan thermique de la planète. Parallèlement à l'effort réalisé pour la collecte des données et la modélisation, des indicateurs de l'évolution du climat ont été développés tel d'indice de l'oscillation nord-atlantique le calcul de cet indice est fondé sur la comparaison des pressions à Lisbonne et Reykjavik, positif il traduit un bon développement de l'anticyclone des Açores, négatif son affaiblissement. À l'échelle régionale, il existe des signes d'une évolution climatique allant dans le sens d'un réchauffement, ainsi dans l'écosystème du

golfe de Gascogne (Dupont et al., 2002) les espèces d'affinités tempérées froides, tels le merlu et la crevette grise sont en diminution depuis 1975 sans que l'on puisse exclure l'influence possible des pêches sur cette évolution. Swail et al. (2000) ont procédé à une reconstitution des états de la mer dans l'Atlantique nord entre . Les résultats de cette modélisation rétrospective (hindcasting) validés au moyen des observations "in situ" indiquent un renforcement des vents et de la hauteur des vagues dans l'Atlantique nord-est de 1958 à 1997, les auteurs indiquent que cette tendance est en bon accord avec l'évolution de l'indice de l'oscillation nord atlantique durant cette période vers les valeurs positives, auxquelles sont associées un régime dépressionnaire plus actif.

Modélisation et prospective

C'est à un progrès considérable des modèles climatiques que l'on doit l'identification de l'influence des activités humaines sur la température moyenne de la planète. Les modèles récemment développés prennent en compte, les processus atmosphériques, les propriétés des sols, les processus océaniques et les glaces, la production d'aérosols (dont les aérosols sulfatés) et le cycle biogéochimique du carbone.

Tout d'abord, il a fallu vérifier si les modèles pouvaient rendre compte de façon satisfaisante de l'évolution passée du climat de la planète. Ceci a été réalisé avec une relativement bonne approximation par Crowley (2000) pour le dernier millénaire. Pour la période comprise entre 1860 et 2000, pris séparément les facteurs naturels de l'évolution du climat (dont les variations de l'activité solaire) et les facteurs anthropiques ne rendent pas compte des observations. En revanche si on additionne leurs effets, les modèles rendent compte de façon relativement satisfaisante des variations observées (Stott et al., 2000).

Après la validation des modèles, la phase cruciale des travaux a consisté en la projection des conséquences de divers scénarios de développement des sociétés humaines pour l'évolution des taux de CO₂ et autres facteurs de l'évolution du climat sur l'évolution probable des températures. On conçoit bien que si la modélisation des processus climatiques est complexe, celles qui font intervenir les sociétés humaines le sont encore plus. Ainsi selon les hypothèses de développement les estimations pour l'augmentation de la température envisagée à la fin de ce siècle, au niveau global, sont comprises entre 1.5 et 6°C. Notons que corrélativement à ces changements de températures, les modèles mettent en évidence des changements importants dans la répartition des pluviosités et une élévation moyenne des niveaux marins comprises entre 14 et 80 cm, avec

une valeur probable située à 44cm (Paskoff, 2000). Dans ses conditions, les zones les plus affectées seront effectivement les zones littorales : deltas, estuaires, marais côtier. Selon Paskoff (2000), en Camargue, une élévation du niveau de la mer de 50 cm ferait passé la probabilité d'occurrence d'une surcote de 1m de 10 ans à 1 an.

Conclusion

Compte tenu de la perspective historique exposée ci-dessus, dans l'état des connaissances actuelles l'évolution et sans vouloir a priori abonder dans le sens d'un catastrophisme, on doit considérer que l'évolution en cours n'a dans le passé "récent" d'analogues que les réchauffements suivants les évènements d'Heinrich ou la fin du Younger Dryas qui sont néanmoins intervenus dans des conditions et pour des causes différentes.

Un tel réchauffement rapide peut avoir dans les conditions actuelles d'un âge glaciaire, des conséquences immédiates sur le climat de l'Europe occidentale par l'interruption de la dérive nord atlantique qui pourrait suivre une fonte partielle des glaces du Groenland. L'éventualité d'une fonte totale des glaces du Groenland ne peut être envisagée qu'à l'échelle pluriséculaire ; elle produirait à elle seule une élévation du niveau marin de l'ordre de 7 mètres. Dans une situation où les niveaux marins peuvent connaître une élévation sensible et où les régimes pluviométriques risquent d'être à la fois plus intense et plus contrasté la frange littorale devrait être affectée prioritairement par des surcotes difficilement évaluables aujourd'hui. Un souci d'économie, l'esprit d'innovation en même temps que la prudence ne devraient-ils pas alors nous conduire d'une part à penser le développement des activités portuaires vers le large et d'autre part à se préparer dès maintenant à l'éventualité d'un repli logistique dans des zones côtières particulièrement vulnérables ?

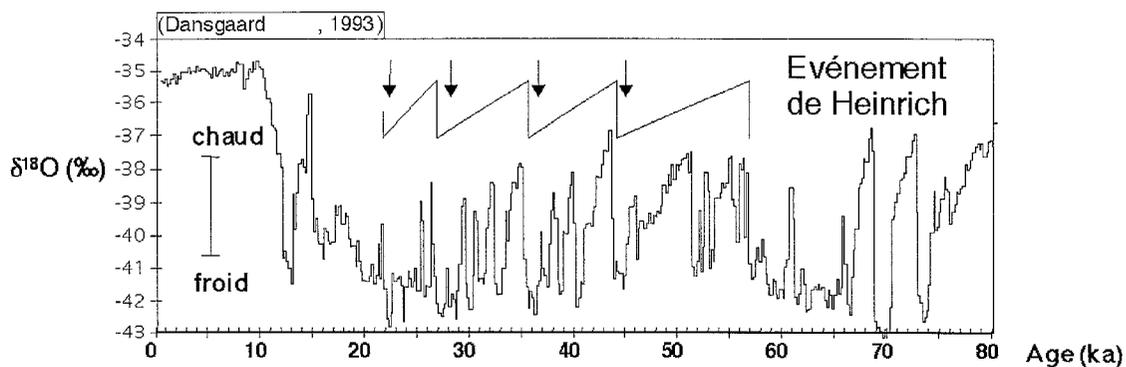
Bibliographie

- Auffret G.A., Boelaert A., Vergnaud-Grazzini C., Müller C. and Kerbrat R., 1996. Identification of Heinrich layers in core KS-01 North eastern Atlantic (46°N, 17°W), implications for their origin. *Mar. Geol.* 131 (1/2), 5-20.
- Auffret G. A., Zaragosi S., Dennielou B., Cortijo E., Van Rooij D., Grousset F., Pujol C., Eynaud F., M. Siebert (sous-presse) Terrigenous fluxes at the Celtic Margin during the last glacial cycle. *Marine Geology*

- Berger A., Imbrie J., Hays J., Kukla G. and B. Saltzman 1984 Milankovitch and climate. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht
- Boelaert An, 1998 Variabilité de la circulation de surface et intermédiaire aux moyennes latitudes de l'Atlantique Nord. Thèse de Doctorat de l'Université de Bretagne occidentale, 160 p.
- Bond G., Heinrich H., Broecker W., Labeyrie L., McManus J., Andrews J., Huon S., Jantschik R., Clasen S., Simet C., Tedesco K., Klas M., Bonani G. & Ivy S., 1992. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic during the last glacial period. *Nature* 360, 245-249.
- Cortijo E., Reynaud J-Y, Labeyrie L, Paillard D., Lehman B., Cremer M. et F. Grousset 1995 Etude de la variabilité climatique à haute résolution dans les sédiments de l'Atlantique Nord. *C.R. Acad; Sci. Paris t.321, série IIa*, 231-238
- Crowley 2000, *Science* 289, 270-277
- Dansgaard, W., 1993 Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364, 218-220
- Dickson R. R., Meincke J., Malmberg S.A., and Lee A.J., 1988 The great salinity anomaly in the northern North Atlantic. 1968-1982, *Progress in Oceanography*, 20, 103-151
- Dupont B., Elbé J., André R. 2002 Ecosystème et climat dans le golfe de Gascogne. D'après une étude de G. Hemery et Iker Castege, *Metmar*, 194, 3-5
- Duplessy J.-C. et Morel JP., 1990 *Gros temps sur la planète*. Ed. Odile Jacob, 297p.
- Duplessy J.-C. et al., 1992 Changes in surface salinity of the north Atlantic Ocean during the last deglaciation. *Nature*, 358, 485-488
- Duplessy J.-C., 1996 *Quand l'océan se fâche*. Ed. Odile Jacob, *Sciences*, 277p
- Elliot, M., Labeyrie, L., Bond, G., Cortijo, E., Turon, J. L., Tisnerat, N., and Duplessy, J.C., 1998. Grootes, P.M., and M. Stuiver. 1997. Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 10³ to 10⁵-year time resolution. *J. Geoph. Res.* 102, 26455-26470.
- Heinrich H., 1988 Origin and consequences of cyclic ice-rafting in the Northeast Atlantic ocean during the past 130,000 years. *Quat. Res.*, 29: 142-152.
- Kawai N., 1972 The magnetic control on the climate in the geologic time. *Proc. Japan Acad.*, 48, 687
- Labeyrie L.D., Duplessy J.-C., & Blanc P.L., 1987. Variations in mode of formation and temperature of oceanic deep waters over the past 125,000 years. *Nature* 327, 477-482.
- Leroux M., *La dynamique du temps et du climat*. Dunod, Masson sciences, 2^e édition, 367 p.

- Lenoir Y., 2001, Climat de panique. Favre, 217 p.
- Mann et al. , 1999 Geo. Res. Let. 26, 6, 759
- Martinson D.J., Pisias N.G., Hays J.D., Imbrie J., Moore T.C., Shackleton N.J., 1987. Age dating and the orbital theory of the ice ages. Development of a high resolution 0-300,000 years chronostratigraphy. Quaternary Research 27, 1-29.
- Mayeswsky P.A., Meeker L.D., Whitlow S., Twickler M.S., Morrison M.C., Bloomfield P., Bond G.C., Alley R.B., Gow A.J., Grootes P.M., Meese D.A., Ram M., Taylor K. and Wumkes W., 1994. Changes in atmospheric circulation and ocean ice-cover over the North Atlantic during the last 41,000 years. Science 263, 1747-1751.
- Nesme-Ribes E., Thuillier G., 2000 Histoire solaire et climatique. Ed. Belin, Pour la science. 237 p.
- Paskoff R., 2000 Le changement climatique, l'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers: synthèse et prospective. Actes du colloque changement climatique et évolution du littoral. Arles, Chap. 15, 82-88
- 3^e Rapport du GIEC 2001, Technical Summary of the Working Group I Report, 22-83
- Sadourny R., 1994 Le climat de la terre, Dominos Flammarion, 126 p.
- Simon, B. 2000 Les niveaux marins extrêmes le long des côtes de France et leur évolution. Actes du colloque changement climatique et évolution du littoral. Arles, Chap. 1, 5-9
- Stott et al., 2000 Science 290, 2133-2213
- Swail, V.R., Ceccacci E.A. and Cox A.T., 2000 The AES40 North atlantic wave reanalysis: validation and climate assessment, 6th international Workshop on wave hindcasting and forecasting, Monterey USA

GRIP, enregistrement des glaces, Variations rapides



Cycles glaciaire - interglaciaire, Variations lentes

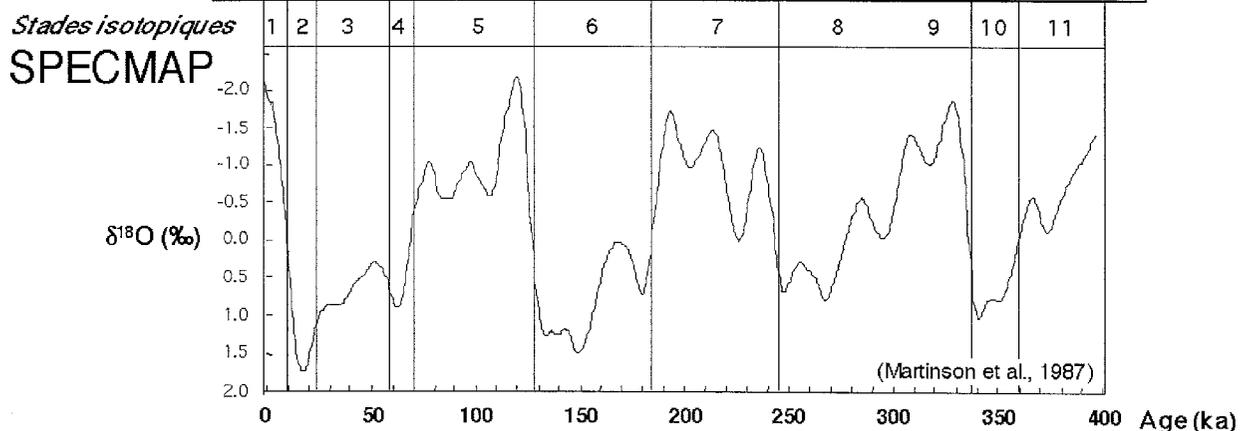


Figure 1

Évolution climatique au cours des derniers 400.000 ans : variations lentes et variations rapides de la température enregistrées dans les glaces du Groenland au cours des dernières 80.000 années (d'après Boelaert, 1998).

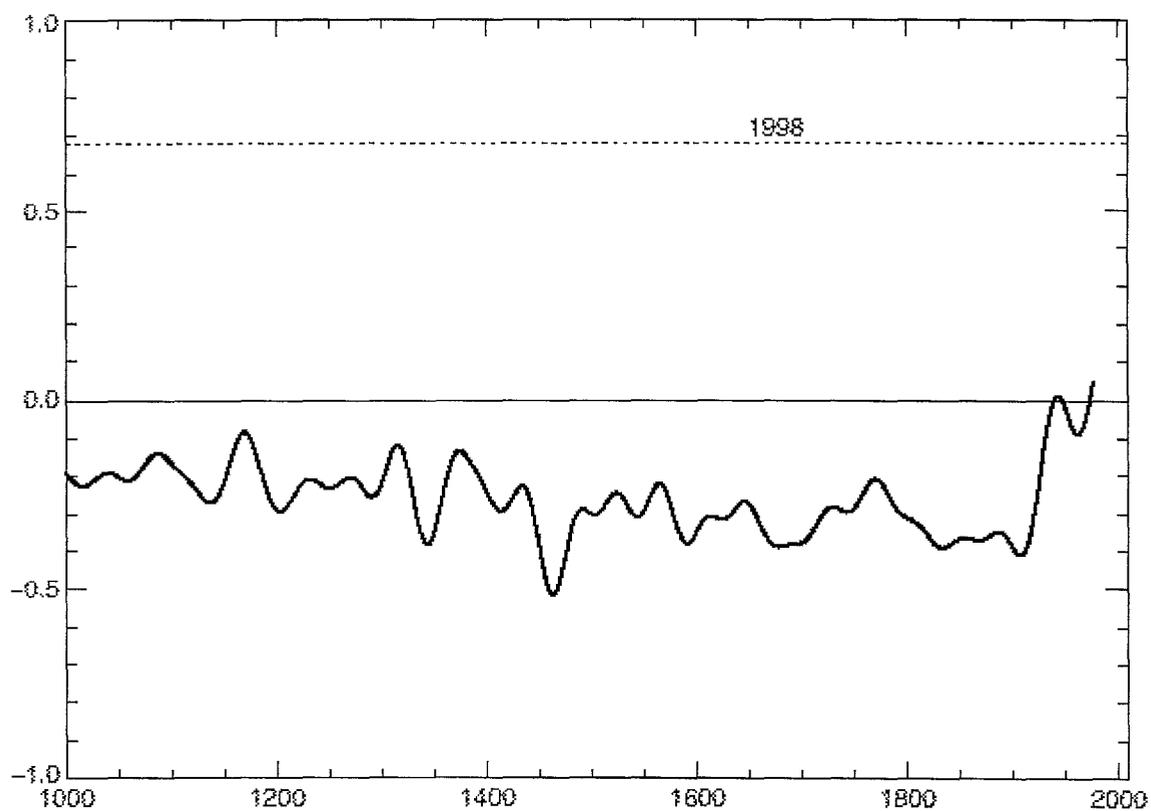


Figure 2

Ecart de la température moyenne de l'hémisphère nord au cours du dernier millénaire (moyenne glissante sur 40 ans) par rapport à la moyenne des températures entre 1902 et 1980 (avec indication de l'anomalie de 1998) d'après Mann et al. (1999)

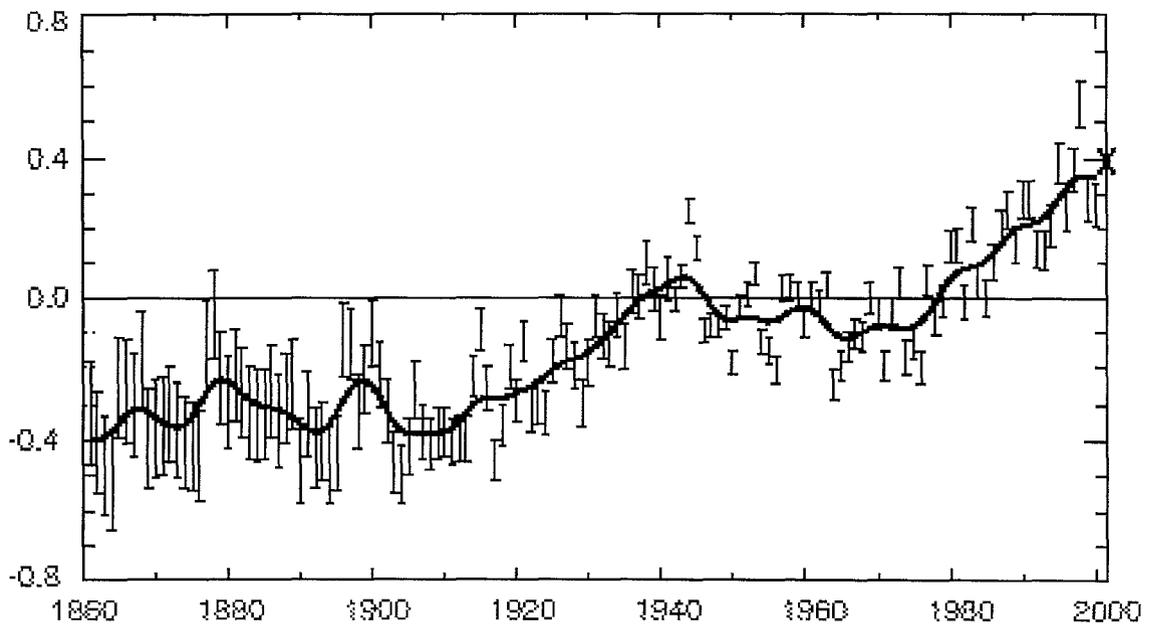


Figure 3

Évolution de la température moyenne globale de 1.860 à 2000 d'après le 3^e Rapport du GIEC la température moyenne pour 2.001 est indiquée par X.