Les apports de la **géochronologie** à la connaissance du **climat**

Pour reconstruire l'évolution du climat d'une période donnée et replacer les événements dans un cadre chronologique global, l'exploitation des archives climatiques impose de jongler entre des méthodes de datation très variées. La mesure de la radioactivité par différentes techniques y joue souvent un rôle central.

P. Stroppa/CEA

Vue générale du spectromètre de masse par accélérateur Artémis, installé sur le Centre de Saclay, qui permet la datation par le carbone 14 d'échantillons jusqu'à environ 50 000 ans. Grâce aux diverses techniques de datation, toutes les informations issues des archives climatiques vont s'assembler, telles les pièces d'un puzzle, et se conforter pour reconstruire l'évolution climatique d'une période donnée.

Le **climat** de la **Terre** varie naturellement avec des constantes de temps allant de plusieurs centaines de millions d'années à la saison. Dès le XIXe siècle, les géologues avaient apporté la preuve de l'existence de **périodes glaciaires** et **interglaciaires** dans le passé, en identifiant de vastes dépôts morainiques (1) au nord des continents américain et européen. Il restait cependant à connaître l'âge de ces changements climatiques qui caractérisent le **Pléistocène**, époque du **Quaternaire** couvrant environ 1,8 million d'années. Ceci devint possible avec la découverte et la mise au point de méthodes de mesures précises de la **radioactivité**, et le développement des techniques de carottages **sédimentaires** toujours plus profonds, que ce soit sur le continent, dans l'océan ou dans les glaces pour "remonter" le temps.

La géochronologie a pour objectif essentiel de replacer l'évolution de la Terre, et donc du climat, dans un cadre spatio-temporel unitaire. Elle est aussi une aide précieuse à la prévision de l'évolution du climat, car elle rend possible de confronter les différentes théories émises sur les causes et les mécanismes de la variation des climats passés. La réalisation de ce cadre chronologique global n'est pas simple, car elle repose sur un large éventail de méthodes de datation et sur leur croisement, ce qui permet de tester la validité des âges obtenus pour un même événement. Une difficulté supplémentaire réside également dans la diversité des matériaux *datables*, qui vont des **cristaux** inorganiques, quartz, feldspath, calcite ou aragonite (2), aux restes **biogéniques**, tels les coquillages, les tests (ou squelettes) de **foraminifères** ou bien les végétaux.

(1) Moraine : amas de débris minéraux transportés par un glacier ou par une nappe de glace et qui, au moment de la fonte, sont déposés, généralement à la même altitude, formant un empilement rocheux.

(2) Le **carbonate de calcium** ($CaCO_3$), constituant majeur du calcaire, de la craie, du marbre mais également des coquilles d'animaux marins et des escargots, cristallise naturellement sous deux formes principales : l'aragonite et la calcite.

Aurélie Van Toer-LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Le carottier Calypso à bord du navire de recherche "Le Marion Dufresne". La mise au point de techniques de carottages sédimentaires toujours plus profonds permet de remonter l'échelle des temps.

Les techniques de datation appropriées au Pléistocène

Les méthodes de datation appliquées au **paléoclimat** du Pléistocène sont généralement subdivisées en deux groupes : les *méthodes de datations absolues*, incluant les mesures de la radioactivité *sensu lato*, et les *méthodes relatives*. Ces dernières sont basées sur la corrélation de signaux physico-chimiques ou biologiques qui sont caractéristiques à l'échelle globale ou régionale dans les archives sédimentaires. Dans les faits, elles bénéficient des avancées de chacune d'entre elles. Les méthodes s'appuyant sur la radioactivité s'adressent à la datation d'événements ponctuels mis en place dans des temps géologiquement courts, identifiables ou non à l'échelle du globe. Ces datations servent de cadre chronologique à l'élaboration des échelles de temps relatives.

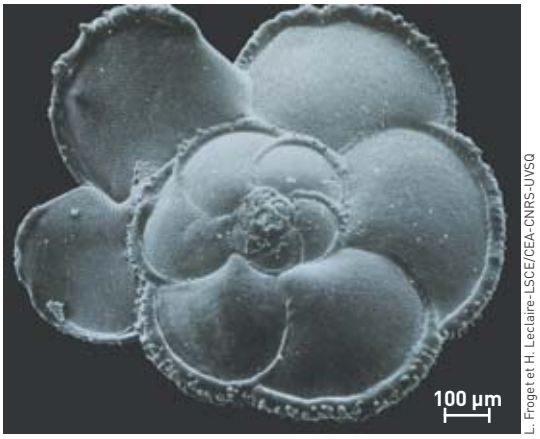
Compter avec la dendrochronologie

Les âges absolus ou *calendar ages* sont obtenus à partir du comptage direct de formations annuelles. Ce comptage est appliqué aux cernes de croissance annuelle des arbres par la *méthode de dendrochronologie*, aux dépôts annuels, bi-saisonniers, ou varves (3) dans les sédiments lacustres et marins, ou bien encore à ceux des couches de neige.

Mesurer la radioactivité naturelle

Avec le temps, les **atomes** radioactifs se **désintègrent** en formant des **nucléides** stables ou eux-mêmes radioactifs, lesquels se désintégreront à leur tour pour donner d'autres nucléides, et ainsi de suite. Les **périodes** de désintégration diffèrent selon les nucléides, ce qui permet d'appréhender la variabilité climatique sur plusieurs gammes de temps. Les nucléides radioactifs naturels sont présents sur la Terre depuis sa formation, tels l'**uranium 238** (^{238}**U**), l'**uranium 235** (^{235}**U**) et le **thorium 232** (^{232}**Th**), ou le potassium 40 (^{40}K), ou bien ils sont produits continuellement par l'action du **rayonnement cosmique** sur des **noyaux** dans la haute **atmosphère**, comme le **carbone 14** (^{14}**C**) et le béryllium 10 (^{10}Be), appelés pour cette raison *isotopes cosmogéniques*.

Les ***méthodes potassium-argon (K/Ar)*** et ***argon-argon (Ar/Ar)*** sont adaptées aux minéraux riches en potassium, notamment dans les roches volcaniques, et permettent de dater des événements avec des précisions de 0,5 % à 1 %. Les *techniques reposant sur les séries de l'uranium*, et ses descendants, impliquent un grand nombre de **radionucléides** de périodes différentes. Ces méthodes sont typiquement utilisées pour dater les matériaux du Pléistocène avec des précisions de l'ordre du pour cent. Elles sont appliquées aux coraux, qui enregistrent les varia-



L. Froget et H. Leclaire-LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Globorotalia menardii fimbriata, foraminifère planctonique évoluant dans les eaux superficielles des océans. Des foraminifères vivent et meurent dans les eaux océaniques. Leurs coquilles sont retrouvées dans les sédiments marins.

(3) Varve (du suédois *varvig* signifiant rayé) : sédiment lacustre fait de dépôts alternativement fins et grossiers, déposé en avant des glaciers.

LSCE

P. Stroppa/CEA

Le principe de la datation par le carbone 14 repose sur le fait que dans tout être vivant, le rapport de la concentration en ^{14}C à la concentration en ^{12}C est le même que dans le **dioxyde de carbone** atmosphérique. À sa mort, les échanges cessent. Le carbone 14 n'est plus renouvelé et sa radioactivité décroît avec une période de 5 730 ans. En mesurant l'**activité** en ^{14}C de l'échantillon, il est possible d'en déduire son âge. La méthode par spectrométrie de masse par accélérateur présente l'avantage de n'utiliser que quelques centaines de microgrammes de carbone pour une analyse. Les échantillons, par exemple des foraminifères, sont traités chimiquement pour en extraire le carbone qui sera purifié sous forme de CO_2. Le dioxyde de carbone sera ensuite réduit pour être transformé en graphite. Ici, mise en place des ampoules de CO_2 sur le banc de réduction de l'installation Artémis. En haut à gauche, cible de graphite (de diamètre 1 mm environ).

tions du niveau marin et les changements physico-chimiques des masses d'eau océanique, ainsi qu'aux stalagmites, qui archivent les conditions thermiques et pluviométriques. D'autres nucléides, comme le plomb 210 (^{210}Pb) ou le radium 226 (^{226}Ra), rendent possible de dater des événements plus récents, en raison de leur période respective de 22 ans et 1 600 ans. Ils sont adaptés aux minéraux inorganiques et biogènes ainsi qu'aux restes organiques. Ces techniques s'appuient sur la mesure des radionucléides initiaux et de leurs descendants, ce qui n'est pas envisageable pour la *méthode par le carbone 14*. En effet, ce nucléide se désintègre avec une période de 5 730 ans en azote 14 (^{14}N), et ce dernier ne peut être distingué de l'azote 14 de l'air ($^{14}N/N \sim 0{,}99$). De plus, la teneur en ^{14}C de l'atmosphère a varié au cours du temps, en raison des fluctuations de l'activité solaire, du champ magnétique terrestre, du temps de résidence et des échanges de carbone 14 entre les différents réservoirs de **carbone**. Les âges mesurés par datation par le carbone 14 présentent donc un écart avec les âges absolus. Le croisement des mesures ^{14}C avec les âges dendrochronologiques ou avec ceux obtenus à partir d'autres nucléides radioactifs, principalement le couple $^{230}Th/U$, donne accès à la quantification précise de cet écart, ou calibrage. Cette méthode, qui a valu le prix Nobel de Chimie à l'Américain Willard Frank Libby en 1960, permet de dater jusqu'à 50 000 ans environ, avec des précisions de l'ordre de 0,5 % à 2 % en fonction de l'âge, des échantillons provenant des milieux océaniques, tels les foraminifères, coraux, coquillages, et des milieux continentaux, avec les cristaux inorganiques et biogènes (aragonite, calcite) et les restes organiques (graines, bois, charbons, insectes).

Aux mesures d'âge basées sur la **radioactivité naturelle** se sont ajoutés des marqueurs temporels radioactifs. En effet, certains nucléides ont été injectés en grandes quantités dans l'atmosphère lors des essais nucléaires au début des années 1960, comme le ^{14}C, le césium 137 (^{137}Cs) – de période 30 ans –, ou le **tritium** – de période 12 ans –, ou bien encore lors de l'accident de Tchernobyl (Ukraine) en 1986 pour le ^{137}Cs.

Norbert Frank-LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Les coraux sont des archives climatiques précieuses car ils enregistrent les variations du niveau marin et les changements physico-chimiques des masses d'eau océanique. Ils peuvent être datés entre autres par les méthodes ^{14}C et $^{230}Th/U$.

Tirer profit de la désintégration de radionucléides

Les *méthodes radiogéniques* s'appuient sur les défauts physiques laissés dans les minéraux, comme les traces de **fission** engendrées par les noyaux de recul (4)

(4) La scission du noyau d'uranium 238 en deux fragments (fission) libère une énergie, qui s'exprime principalement sous forme d'énergie cinétique. Les fragments sont éjectés à travers le matériau en créant des zones de dommage intense, appelées traces.

lors de la désintégration de l'uranium 238. Cette technique renseigne essentiellement sur l'histoire thermique des roches, avec un domaine d'applicabilité sur les verres volcaniques qui constituent des marqueurs temporels régionaux uniques reliant les différentes archives sédimentaires. Elles concernent aussi les méthodes de **luminescence** stimulée optiquement (OSL) ou thermiquement (TL) qui consistent en une **dosimétrie** des radiations internes et externes subies naturellement par les cristaux en raison de la présence de nucléides radioactifs (^{238}U, ^{232}Th et ^{40}K) contenus dans un cristal et son environnement. Ces techniques de luminescence s'appliquent aux cristaux de quartz et feldspaths inclus dans les roches volcaniques, les sédiments marins, les formations dunaires et les formations glaciaires lœssiques (5). Elles sont théoriquement adaptées au Pléistocène avec des précisions de l'ordre de 5 % en moyenne.

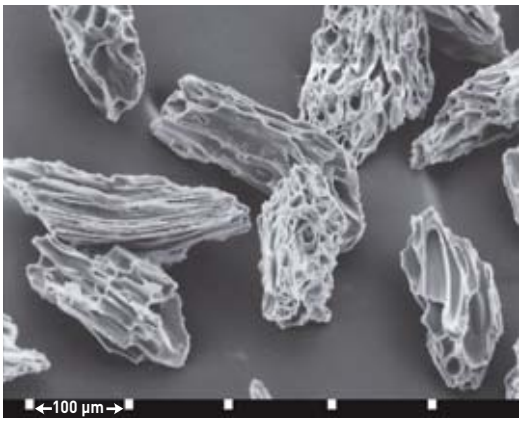
Corréler les signaux similaires

Les *méthodes de chronologie relative* sont basées sur la corrélation de séries sédimentaires qui présentent des caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques communes identifiables dans des contextes régionaux ou globaux. Ainsi, les variations de la composition isotopique de l'oxygène des carbonates d'origine marine et continentale ou celles du **CO_2** piégé dans les bulles d'air des glaces montrent à l'échelle du globe des oscillations quasi-périodiques, attribuées aux changements d'insolation de la Terre au cours du temps. Celle-ci est en effet modifiée en fonction des paramètres orbitaux de la Terre (6) dont l'orbite varie avec des cycles de 100 000 ans *(excentricité)*, ainsi que l'inclinaison de son axe de rotation avec l'*obliquité* (40 000 ans) et la *précession* (23 000 ans et 19 000 ans). Les variations d'insolation peuvent être calculées très précisément pour les temps passés, et les variations climatiques à long terme sont ainsi datées grâce à leur corrélation avec les cycles astronomiques de l'insolation. Cette méthode de corrélation ou *orbital tuning* a permis de dater les séries sédimentaires sur les derniers 25 millions d'années avec une précision de l'ordre de quelques pour cent.

De même, la polarité et l'intensité du champ magnétique terrestre ont varié au cours du temps. Leur étude à partir de roches volcaniques datées par les méthodes K/Ar et Ar/Ar a permis d'établir une chronologie de référence couvrant les derniers 100 millions d'années (*Geomagnetic Polarity Time Scale*, GPTS). Au cours du Pléistocène, se sont produites les inversions de polarité de Jaramillo (~ 1,8 million d'années) et Brunhes-Matuyama (760 000 ans) ainsi que les excursions – instabilités de plus courte durée – tels, par exemple, les événements du Blake (115 000 ans), Laschamp (41 000 ans) et Mono Lake (~ 30 000 ans). Les variations d'intensité du champ magnétique sont enregistrées en continu dans les sédiments marins, et la similitude de ces variations aux échelles globales ou régionales a permis d'établir des courbes **chronostratigraphiques** de référence s'étendant jusqu'à environ 800 000 ans, grâce à l'identification et à la datation des inversions et excursions du champ magnétique. De même, l'archéomagnétisme, qui mesure le magnétisme rémanent d'objets historiquement connus, propose une méthode de datation d'objets couvrant les derniers 2 000 ans. Les formations de sapropèles dans l'environnement méditerranéen, dépôts enrichis en matière organique, ainsi que les produits des éruptions volcaniques ou tephra constituent autant de marqueurs temporels visant à l'élaboration d'un cadre chronologique unifié.

P. Bazoge/CEA

Mesure de l'aimantation rémanente d'un échantillon de sédiments marins.
Les sédiments acquièrent une aimantation rémanente lorsque, au moment de leur dépôt, des microparticules dotées d'un moment magnétique s'orientent statistiquement dans le champ magnétique ambiant. Les sédiments peuvent donc renseigner sur la direction et l'intensité du champ magnétique terrestre passé.

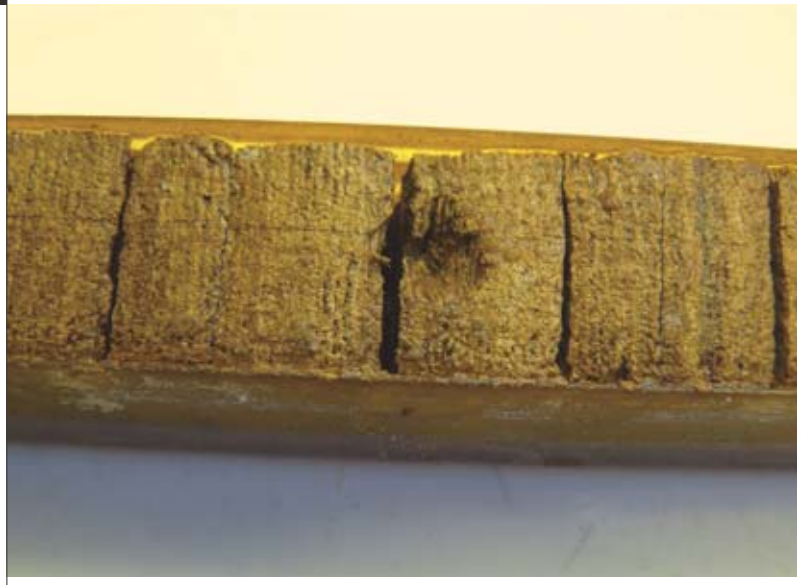


LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Image obtenue par microscopie électronique à balayage de verres volcaniques prélevés dans un tephra. Ces marqueurs temporels participent à l'élaboration d'un cadre chronologique global.

(5) Lœss : roche sédimentaire détritique meuble résultant, au cours du Pléistocène, de l'accumulation au sol, sous climat froid et sec, de limons transportés par le vent depuis des zones sources (alluvions, dépôts fluvio-glaciaires, sédiments côtiers et estuariens, zones arides) soumises à une érosion éolienne. Il est principalement formé de quartz détritique et de carbonate de calcium.

(6) Les paramètres orbitaux de la Terre définissent sa position dans l'espace par rapport au Soleil. La Terre est soumise à l'attraction du Soleil mais aussi des autres planètes du système solaire, ce qui a pour effet de perturber son mouvement. Trois types de modifications affectent la position de la Terre par rapport au Soleil : l'ellipse décrite par la Terre se déforme *(excentricité)* ; l'axe de rotation de la Terre observe une inclinaison par rapport à la normale au plan de l'écliptique (le plan qui contient l'orbite terrestre ainsi que le Soleil), selon un angle qui varie entre 22° et 25° *(obliquité)* ; cet axe de rotation subit de ce fait un lent mouvement de déplacement *(précession)*, décrivant un cône autour de la normale à l'écliptique, d'ouverture égale à l'obliquité (actuellement égale à 23° 27'), et dont le sommet est au centre de la Terre. Ce qui a pour conséquence que les positions des équinoxes et des solstices, sur l'orbite terrestre, se déplacent graduellement, par rapport au périhélie (qui est le point d'insolation maximale).



Michel Fontugne-LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Les dépôts varvés sont préservés dans les sédiments en raison de la quasi-absence d'oxygène, et donc d'organismes fouisseurs au fond des lacs ou bassins océaniques dans lesquels ils sont observés. Chaque varve est constituée de deux lamines : une claire déposée l'été et une noirâtre l'hiver, le rythme de ces dépôts étant annuel. Les lamines de couleur claire se forment pendant l'été lorsque la sédimentation est la plus active du fait que l'alimentation par les eaux de fonte des glaciers est élevée. Le comptage de ces lamines dans les lacs proglaciaires (lacs au front d'un glacier en récession) permet de dater les sédiments jusqu'à 13 000 ans environ. En associant ces comptages à la datation par le carbone 14 des pollens, graines ou restes d'insectes inclus dans ces sédiments, il devient ainsi possible d'estimer la différence entre les âges carbone 14 et les âges absolus. Ici, une carotte de sédiments varvés extraite du lac Perespilno en Pologne.

Des mécanismes climatiques mieux compris

La théorie astronomique des climats, émise pendant le XIXe siècle par le mathématicien français Joseph-Alphonse Adhémar et développée par la suite en particulier grâce aux calculs d'insolation effectués par le mathématicien et astronome serbe Milutin Milankovitch entre 1920 et 1940, a longtemps été rejetée par la communauté scientifique. Les premières preuves en faveur de cette théorie proviennent de datations ^{230}Th/U de coraux récifaux, prélevés dans les terrasses coralliaires de l'île Barbade (Petites Antilles). Dès 1968, le paléo-océanographe américain Wallace Smith Broecker et ses collègues avaient démontré que les âges de trois épisodes de haut niveau marin, résultant de la fonte des glaces à 80 000 ans, 100 000 ans et 120 000 ans, correspondaient à ceux d'une insolation maximale dans l'hémisphère Nord. Cette théorie fut définitivement acceptée après que James D. Hays, John Imbrie et Nicholas John Shackleton eurent démontré, en 1976, l'existence de cycles astronomiques à partir des variations isotopiques de l'oxygène des foraminifères prélevés dans des carottages du Pacifique Sud avec les périodicités de 106 000 ans, 43 000 ans, 24 000 ans et 19 000 ans. La chronologie de ces variations reposait sur des âges obtenus par les méthodes carbone 14, Th/U et K/Ar, l'âge K/Ar datant le renversement de polarité du champ magnétique Brunhes-Matuyama à environ 700 000 ans.

La géochronologie a aussi contribué à modifier notre compréhension du fonctionnement de la boucle de circulation océanique globale, qui décrit la formation des eaux profondes dans l'océan Nord Atlantique, puis leur trajet vers l'océan Pacifique et enfin leur retour en surface vers l'océan Atlantique. Des fluctuations rapides du climat ponctuent la dernière période glaciaire et la **déglaciation**, avec les **événements** froids du **Dryas récent** et **de Heinrich** ou bien les alternances climatiques chaudes et froides des **événements de Dansgaard/Oeschger**. Elles étaient expliquées par un mode "on" ou "off" de la formation des eaux profondes dans l'océan Nord Atlantique, le mode "off" ayant pour effet de limiter les transferts de chaleur dans l'océan et les échanges entre l'océan et l'atmosphère aux hautes latitudes. Ce scénario a été infirmé, notamment grâce aux mesures précises de la teneur en ^{14}C de l'atmosphère, obtenue au cours de la déglaciation par le croisement des âges ^{14}C et des âges absolus déduits du comptage des varves sédimentaires déposées annuellement dans le bassin de Cariaco, Venezuela (7). Le CO_2 de l'atmosphère est transféré vers les couches profondes de l'océan *via* la circulation océanique et, en raison de la très faible abondance du ^{14}C ($^{14}C/C \sim 10^{-14}$), la teneur en $^{14}CO_2$ de l'atmosphère est très sensible au taux de formation des eaux profondes. Au cours de l'événement climatique froid du Dryas récent, dont la durée est d'environ 1 200 ans calendaires, la teneur en ^{14}C de l'atmosphère a d'abord augmenté pendant les premiers 200 ans en accord avec un schéma de réduction de la formation des eaux profondes dans l'océan Nord Atlantique. Par contre, ce schéma ne pouvait expliquer la diminution du ^{14}C notée au cours des 1 000 ans suivants dans un contexte de climat froid. La synchronisation des compositions isotopiques de l'oxygène par la mesure du **méthane** dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique (8) montrait que les changements climatiques abrupts observés à la fois au Nord et au Sud étaient en opposition de phase. Lorsque l'Antarctique était plus chaud, le Groenland était froid, et inversement. Analysant ces deux résultats, Wallace Smith Broecker proposa en 1998 un schéma de bascule du transfert Nord-Sud de chaleur ou *thermal bipolar see-saw*: les périodes chaudes en Antarctique étaient l'expression de la formation d'eaux profondes dans l'océan Austral, permettant ainsi une diminution de la teneur en ^{14}C de l'atmosphère. Dans l'hémisphère Nord, un climat froid, modulé par l'arrêt de la formation des eaux profondes dans l'océan Nord Atlantique prédominait pendant le même intervalle de temps.

> Martine Paterne
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement/Institut Pierre-Simon Laplace
Unité mixte de recherche CEA-CNRS-UVSQ
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay (Gif-sur-Yvette)

(7) K. A. Hughen, M. G. L. Baillie, E. Bard, J. W. Beck, C. J. H. Bertrand, P. G. Blackwell, C. E. Buck, G. S. Burr, K. B. Cutler, P. E. Damon, R. L. Edwards, R. G. Fairbanks, M. Friedrich, T. P. Guilderson, B. Kromer, F. G. McCormac, S. W. Manning, C. Bronk Ramsey, P. J. Reimer, R. W. Reimer, S. Remmele, J. R. Southon, M. Stuiver, S. Talamo, F. W. Taylor, J. van der Plicht and C. E. Weyhenmeyer, "Marine04 Marine radiocarbon age calibration, 0 - 26 cal kyr BP", *Radiocarbon*, 46, p. 1059-1086, 2004.

(8) T. Blunier, J. Chappellaz, J. Schwander, A. Dällenbach, B. Stauffer, T. F. Stocker, D. Raynaud, J. Jouzel, H. B. Clausen, C. U. Hammer and S. J. Johnsen, "Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period", *Nature*, 394, p. 739-743, 1998.