

Paléontologie humaine et Préhistoire

Chronologie des variations climatiques rapides pendant la dernière période glaciaire

Édouard Bard^{*}, Frauke Rostek, Guillemette Ménot-Combes

Cerege, UMR 6635 et Collège de France, Europôle de l'Arbois BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France

Reçu le 20 décembre 2004 ; accepté après révision le 8 novembre 2005

Disponible sur internet le 07 décembre 2005

Rédigé à l'invitation du Comité éditorial

Résumé

L'histoire du climat glaciaire est ponctuée d'événements intervenant à l'échelle d'une vie humaine, caractérisés par des changements de température de grande ampleur et simultanés au Groenland et dans l'Atlantique nord. L'hydrologie de surface ainsi que la circulation profonde de ce bassin océanique ont été bouleversées. Une conséquence indirecte de la correspondance évidente entre la signature des événements de Dansgaard–Oeschger et de Heinrich dans les archives glaciologiques et sédimentaires est de permettre, par corrélation, la construction d'une chronologie calendaire pour les enregistrements marins. La pertinence de cette approche chronostratigraphique a été validée à l'aide de datations radiocarbone, obtenues dans des sédiments marins profonds prélevés sur la marge Ibérique. Notre étude contribue à l'effort international de calibration de l'échelle radiocarbone, en présentant des résultats significatifs pour l'intervalle entre 33000 et 41000 années calendaires BP. *Pour citer cet article : É. Bard et al., C. R. Palevol 5 (2006).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Chronology of fast climatic changes during the last glacial period. The history of the glacial climate is punctuated by events occurring at the scale of a human life. They are characterised by temperature changes of large amplitude, simultaneously in Greenland and the North Atlantic. These events affected not only the surface hydrology, but also the deep circulation of this oceanic basin. A by-product of the obvious correspondence between Dansgaard–Oeschger and Heinrich in the polar ice and marine sediments is to allow, by correlation, the construction of a calendar chronology for the marine records. This chronostratigraphic approach was validated by means of radiocarbon dating of deep-sea sediments raised on the Iberian Margin. Our study also contributes to the international effort of calibration of the radiocarbon time scale by providing significant results in the interval between 33000 and 41000 years calendar BP. *To cite this article : É. Bard et al., C. R. Palevol 5 (2006).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Événements de Dansgaard–Oeschger et de Heinrich ; Radiocarbone ; Courbe de calibration

Keywords: Dansgaard–Oeschger and Heinrich events; Radiocarbon chronology; Calibration curve

^{*} Auteur correspondant.

Adresse e-mail : bard@cerege.fr (É. Bard).

1. Introduction

L'étude des paléoclimats révèle que l'histoire du climat glaciaire est ponctuée d'événements brusques, dont les transitions surviennent en moins d'un siècle, c'est-à-dire à l'échelle d'une vie humaine. Les températures de l'atmosphère et de l'océan montrent des variations de grande ampleur et en phase dans la zone Atlantique nord. L'hydrologie est alors fortement perturbée par des débâcles glaciaires. Ces modifications affectent ainsi, non seulement les températures, mais également la circulation profonde de l'océan Atlantique. Connaître les réactions de ce système lors de changements abrupts est fondamental, la formation et la circulation d'eaux profondes dans cette zone étant en effet un moteur de la circulation thermohaline.

Une conséquence indirecte de l'identification, dans les carottes de glace polaire et de sédiment océanique, des mêmes événements climatiques brusques, est de permettre la construction d'une chronologie absolue ou calendaire des enregistrements marins. Cette approche chronostratigraphique, couplée à des datations ^{14}C , permet de participer à l'effort international de calibration de l'échelle radiocarbone et notamment à son extension pour des périodes plus anciennes que le dernier maximum glaciaire [9].

Le groupe de travail INTCAL a récemment publié de nouvelles courbes de calibration du ^{14}C , qui ont été ratifiées et adoptées officiellement lors de la 18th International Radiocarbon Conference, à Wellington [23,32,43]. L'objectif des travaux présentés dans cet article est de préparer les prochaines versions de ces courbes de calibration, dont l'utilisation est cruciale pour tous les utilisateurs du radiocarbone, en particulier les préhistoriens.

2. Variabilité climatique rapide

Le climat des 100 000 dernières années est affecté par des oscillations rapides et de grande ampleur (Fig. 1). Ainsi, les événements de Dansgaard-Oeschger sont caractérisés par des transitions climatiques extrêmement brusques, en particulier lors des réchauffements, d'une durée inférieure au siècle. Ces événements climatiques ont été mis en évidence par l'étude d'enregistrements glaciaires du Groenland [15,16,24,30]. Les variations de température de l'atmosphère et de l'océan qui les caractérisent ont été identifiées dans la zone Nord-Atlantique [6,11,12,27,28,31,33].

Les événements froids de Heinrich constituent un autre exemple d'oscillations climatiques abruptes qui

ont affecté l'Atlantique nord [21] et ce jusqu'à des latitudes relativement basses [6,28,47]. Leur signature sédimentaire est constituée de niveaux de débris détritiques glaciaires. La répartition spatiale de ces couches, dont l'épaisseur décroît avec la distance à la mer du Labrador, suggère des épisodes dramatiques de débâcles glaciaires, ayant pour origine principale la calotte Laurentide [17]. La fonte de ces calottes s'est accompagnée du transfert d'énormes quantités d'eau douce vers l'Atlantique nord, entraînant une forte perturbation de l'hydrologie de ce bassin, en particulier des températures de surface [6,27,28,31,33]. L'étude de la composition isotopique en carbone des foraminifères benthiques révèle que les perturbations de l'hydrologie touchent également la circulation profonde, avec une diminution nette de la ventilation de l'Atlantique pendant les événements de Heinrich [44,46].

La variabilité climatique rapide observée dans les sédiments marins a également une expression sur les continents. Elle a été identifiée en Europe dans des séquences lacustres [1,20,34,40,41] et des stalagmites [19,37]. Ces études géochimiques et polliniques ont mis en évidence des variations en phase de la température et des précipitations, ainsi que des changements importants de la végétation. La comparaison de séquences d'origines marine et continentale révèle ainsi la simultanéité des changements climatiques, depuis le Groenland jusqu'à la Méditerranée.

L'étude de ces événements climatiques abrupts, tels qu'ils sont observés dans les enregistrements glaciologiques et les séquences continentales, met en relation climat et circulation océanique de surface et profonde de l'Atlantique nord. Elle est particulièrement pertinente, car elle concerne une zone hydrologique-clé, siège de plongées et de formation des eaux profondes. L'étude de ces oscillations climatiques rapides nous apprend donc que la distribution temporelle des événements climatiques rapides est complexe, que chaque événement présente des transitions extrêmement brusques, en particulier les réchauffements.

3. Chronologie absolue des événements climatiques

Les événements climatiques abrupts, comme les événements de Dansgaard-Oeschger ou de Heinrich, observés au Groenland et dans les enregistrements marins permettent de construire une chronologie calendaire pour ces derniers [7–9,22,23]. Cette approche repose sur l'hypothèse raisonnable de la simultanéité, à l'échelle de quelques décennies, des oscillations de température au Groenland et dans l'Atlantique nord.

Nous avons utilisé cette technique pour obtenir une chronologie absolue de sédiments prélevés sur la marge Ibérique (MD952042, 37°45'N, 10°10'W, 3146 m de profondeur).

Plusieurs auteurs ont montré que la correction d'âge ^{14}C réservoir peut fluctuer avec les variations paléocéanographiques, ce qui complique, dans certains cas, les déterminations chronologiques [2–4,36,45]. Néanmoins, notre site d'étude est suffisamment éloigné des zones de hautes latitudes, comme l'Atlantique nord et l'océan Austral, pour permettre de s'affranchir des variations importantes de l'âge réservoir, tout en restant suffisamment proche pour obtenir des signaux pouvant être comparés avec les enregistrements glaciologiques. De plus, localement, cet enregistrement est éloigné de l'*upwelling* côtier, qui pourrait également induire des variations importantes de l'âge réservoir [13]. Le calage des deux enregistrements a été fait en utilisant deux indicateurs géochimiques de température, le $\delta^{18}\text{O}$ dans les glaces (Fig. 1a) et l'indice de température des alcénonnes dans les sédiments marins (Fig. 1b).

Lors de la comparaison des deux enregistrements, et plus particulièrement des interstades Dansgaard–Oeschger et des événements de Heinrich, les différences d'amplitude relative entre les signaux ont été prises en compte. Comme on peut l'observer dans de nombreux enregistrements, ainsi que dans les modélisations numé-

riques [18], le refroidissement maximal pendant un événement de Heinrich est localisé à une latitude plus basse que le maximum de réchauffement pendant les interstades de Dansgaard–Oeschger. Pour cette raison, l'expression des événements de Dansgaard–Oeschger est plus nette dans la glace du Groenland que dans les sédiments de l'Atlantique nord. Inversement, les événements de Heinrich sont évidents dans les sédiments de l'Atlantique nord, alors qu'ils ne sont pas toujours beaucoup plus froids dans les enregistrements glaciologiques.

Les incertitudes de l'approche stratigraphique sont liées à plusieurs problèmes. En plus des erreurs analytiques du ^{14}C et de l'incertitude sur l'âge réservoir, il faut aussi tenir compte des phénomènes de bioturbation, de dissolution et de resuspension du sédiment marin. Par ailleurs, la chronologie d'une carotte de glace n'est pas non plus parfaite, même s'il s'agit d'un comptage des couches annuelles. En effet, depuis les premières estimations obtenues dans les années 1970, les comptages de « cryovarves » n'ont cessé d'être rectifiés et actualisés. Ces différentes incertitudes sont évaluées et discutées plus en détail dans nos articles précédents [8,9].

Afin de valider notre approche chronostratigraphique, les résultats obtenus sur la marge Ibérique sont tout d'abord comparés (Fig. 2a) aux données disponibles dans l'intervalle de temps couvert par la calibration INTCAL98 [39]. Sur l'intervalle compris entre 15000 et 24000 années calendaires BP, la courbe de INTCAL98 est fondée sur des coraux de La Barbade et de Mururoa [5]. Les résultats obtenus à partir des varves lacustres de Suigetsu [25,26], des spéléothèmes des Bahamas [10] et des sédiments du bassin de Cariaco [22] sont également représentés sur cette figure. Les résultats de la marge Ibérique sont en accord général avec la courbe de INTCAL98, mais des différences, d'environ quelques siècles, sont apparentes. Ces différences peuvent résulter des limitations de l'approche stratigraphique ou de petites variations de l'âge réservoir ^{14}C .

Dans un deuxième temps, les résultats de la marge Ibérique sont utilisés au-delà de la courbe de calibration INTCAL98 (Fig. 2b). Des différences significatives existent entre les différents enregistrements, bien qu'ils semblent converger vers les deux coraux de la base de données INTCAL98, vers 26000 et 36000 années ^{14}C BP [5]. Deux intervalles peuvent être distingués : entre 25000 et 31000 années calendaires BP, un accord existe entre l'ensemble des enregistrements proposés. En revanche, les enregistrements précédents diffèrent de 5000 années calendaires entre 34000 et 40000 années

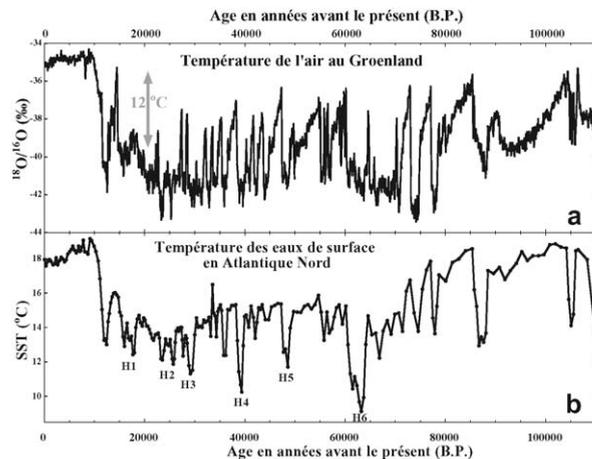


Fig. 1. Variabilité climatique rapide dans l'Atlantique nord au cours des 110 000 dernières années. La simultanéité des événements de Heinrich et de Dansgaard–Oeschger au Groenland et dans l'Atlantique nord est illustrée par les différents indicateurs suivants : (a) le $\delta^{18}\text{O}$ dans les glaces du Groenland [24], (b) les températures des eaux de surface, reconstituées en utilisant l'indice des alcénonnes [6,31].

Fig. 1. Climatic variability in the North-Atlantic during the last 110 000 years. The simultaneity of the Heinrich and Dansgaard–Oeschger events is illustrated by the correspondence between the following proxies: (a) the $\delta^{18}\text{O}$ in ice cores from Greenland [24], (b) the sea surface temperature reconstructed using the index of alkenones

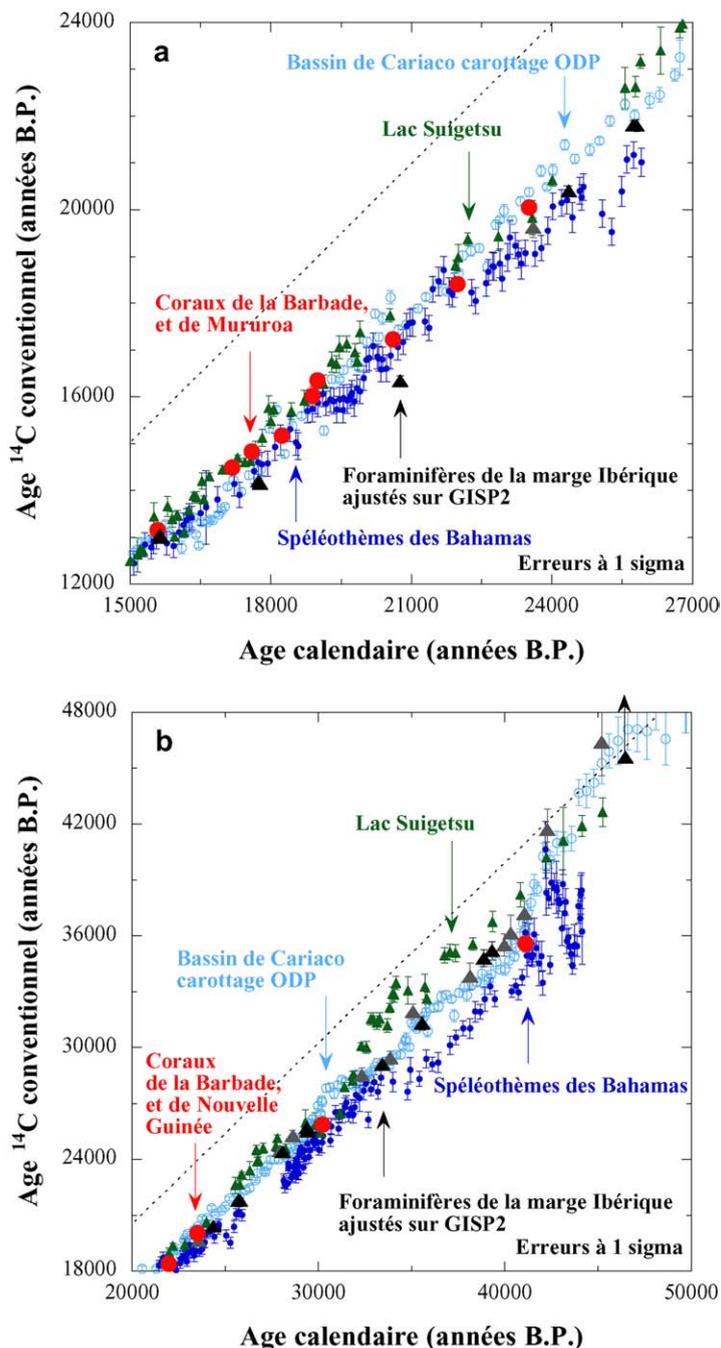


Fig. 2. (a) Âges ^{14}C représentés en fonction des âges calendaires dans la période de temps couvert par INTCAL98, entre 15000 et 24000 années calendaires BP. Les triangles noirs et gris illustrent les données basées sur le ^{14}C des sédiments de la marge Ibérique calés sur GISP2 [7,35]. Les points rouges représentent les données des coraux de La Barbade, de Mururoa et de Nouvelle Guinée [5], les triangles verts, les varves du lac Suigetsu [25,26]; les points bleus, les spéléothèmes des Bahamas [10], et les cercles bleus ouverts, la carotte ODP du bassin de Cariaco [22]. Les erreurs ^{14}C sont données à 1 σ . (b) Âges ^{14}C représentés en fonction des âges calendaires au-delà de la période couverte par INTCAL98 [39]. Fig. 2. (a) ^{14}C Ages plotted versus calendar ages, data within the range of INTCAL98 in the interval between 15000 and 24000 cal yr BP. Triangles show the data based on ^{14}C data of the Iberian Margin sediments tuned to GISP2 (black symbols are data from NOSAMS [7]; grey symbols the data from GifA and Kiel [35]). Red dots represent the INTCAL98 data from Barbados Mururoa and New Guinea corals [5], green triangles, Lake Suigetsu varves [25,26], blue dots, Bahamian speleothems [10], and open blue circles Cariaco Basin ODP Core [22]. All ^{14}C errors are quoted at the 1 σ level. (b) ^{14}C ages plotted versus calendar ages. Data beyond the range of INTCAL98 [39].

calendaires BP. Par ailleurs, l'enregistrement de la marge Ibérique se situe entre ceux du lac Suigetsu et des spéléothèmes des Bahamas, mais est en accord avec celui obtenu dans le bassin de Cariaco. La robustesse de ces conclusions a été testée en choisissant alternativement les deux chronologies de l'enregistrement de GISP2 et GRIP [14,24,29,38]. Ainsi, les âges calendaires ne diffèrent que d'un à deux siècles dans l'intervalle entre 30000 et 40000 ans BP. Au-delà, les divergences augmentent nettement, pour atteindre plusieurs millénaires.

Les implications archéologiques de ces résultats sont importantes et l'exemple de la datation des peintures préhistoriques de la grotte Chauvet l'illustre bien [7]. Les peintures préhistoriques de cette grotte du Sud-Est de la France ont été datées à plusieurs reprises, donnant un âge moyen d'environ 31000 ans ^{14}C BP [42]. D'après les résultats de la marge Ibérique, l'âge calibré est d'environ 36000 ans cal BP. Cette valeur se situe entre les âges corrigés à partir des enregistrements des spéléothèmes des Bahamas (38000 ans cal BP) et du lac Suigetsu (33000 ans cal BP), qui sont respectivement trop vieux et trop jeune de plusieurs millénaires.

4. Conclusions

L'histoire climatique de la dernière période glaciaire est marquée par l'occurrence d'événements climatiques de grande ampleur, les événements de Dansgaard-Oeschger et de Heinrich. Caractérisés par des transitions abruptes s'effectuant en moins d'un siècle, leur signature sédimentaire se retrouve dans l'ensemble de la zone Nord-Atlantique, mais également sur les continents adjacents.

L'étude de la carotte de sédiment profond MD952042, prélevée au large de la marge Ibérique, montre que la méthode stratigraphique peut être utilisée avec succès pour calibrer les âges ^{14}C . Cette méthode est fondée sur la corrélation d'événements paléoclimatiques bien décrits et datés au radiocarbone avec leurs équivalents dans une carotte de glace du Groenland, précisément datée par une méthode indépendante du ^{14}C .

Le résultat principal de cette étude est que, sur l'intervalle compris entre 33000 et 41000 années calendaires BP, pour lequel les enregistrements disponibles jusqu'alors étaient en profonde discordance, l'enregistrement de la marge Ibérique est en accord avec les quelques datations effectuées sur des coraux de INT-CAL98 et avec l'enregistrement du bassin de Cariaco. Ces données divergent par rapport à celles obtenues à

partir des sédiments du lac Suigetsu et des spéléothèmes des Bahamas.

Il faut cependant souligner que l'enregistrement de ^{14}C de la marge Ibérique constitue une étape préliminaire. En effet, des progrès significatifs sont attendus dans un futur proche, progrès liés tout d'abord à de nouvelles carottes de sédiments profonds, prélevées par le navire de recherche français *Marion Dufresne* sur la marge Ibérique. De plus, le forage glaciaire NorthGRIP réalisé récemment [20] devrait permettre d'accroître la précision de la chronologie calendaire, épine dorsale de notre méthode stratigraphique.

Références

- [1] J.R.M. Allen, U. Brandt, A. Brauer, H.W. Hubberten, B. Huntley, J. Keller, M. Kraml, A. Mackensen, J. Mingram, J.F. W. Negendank, N.R. Nowaczyk, H. Oberhansli, W.A. Watts, S. Wulf, B. Zolitschka, Rapid environmental changes in southern Europe during the last glacial period, *Nature* 400 (1999) 740–743.
- [2] W.E.N. Austin, E. Bard, J.B. Hunt, D. Kroon, J.D. Peacock, The ^{14}C age of the Icelandic Vedde Ash: implications for Younger Dryas marine reservoir age corrections, *Radiocarbon* 37 (1995) 53–62.
- [3] E. Bard, Correction of accelerator mass spectrometry ^{14}C ages measured in planktonic foraminifera: Paleocceanographic implications, *Paleoceanography* 3 (1988) 635–645.
- [4] E. Bard, M. Arnold, J. Mangerud, M. Paterné, L. Labeyrie, J. Duprat, M.A. Melieres, E. Sonstegaard, J.-C. Duplessy, The North-Atlantic atmosphere-sea surface ^{14}C gradient during the Younger Dryas climatic event, *Earth Planet. Sci. Lett.* 126 (1994) 275–287.
- [5] E. Bard, M. Arnold, B. Hamelin, N. Tisnerat-Laborde, G. Cabioch, Radiocarbon calibration by means of mass spectrometric $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ and ^{14}C ages of corals. An updated data base including samples from Barbados, Mururoa and Tahiti, *Radiocarbon* 40 (1998) 1085–1092.
- [6] E. Bard, F. Rostek, J.-L. Turon, S. Gendreau, Hydrological impact of Heinrich events in the subtropical Northeast Atlantic, *Science* 289 (2000) 1321–1324.
- [7] E. Bard, F. Rostek, G. Ménot-Combes, A better radiocarbon clock, *Science* 303 (2004) 178–179.
- [8] E. Bard, F. Rostek, G. Ménot-Combes, Radiocarbon calibration beyond 20000 ^{14}C yr BP, by means of planktonic foraminifera of the Iberian Margin, *Quat. Res.* 61 (2) (2004) 204–214.
- [9] E. Bard, G. Ménot-Combes, F. Rostek, Present status of radiocarbon calibration and comparison records based on polynesian corals and Iberian Margin sediments, *Radiocarbon* 46 (2004) 1–14.
- [10] J.W. Beck, D.A. Richards, R.L. Edwards, B.W. Silverman, P.L. Smart, D.J. Donahue, S. Hererra-Osterheld, G.S. Burr, L. Calsoyas, A.J.T. Jull, D. Biddulph, Extremely large variations of atmospheric ^{14}C concentration during the last glacial period, *Science* 292 (2001) 2453–2458.
- [11] G. Bond, H. Heinrich, W. Broecker, L. Labeyrie, J. McManus, J. Andrews, S. Huon, R. Jantschik, S. Clasen, C. Simet, K. Tedesco, M. Klas, G. Bonani, S. Ivy, Evidence for massive

- discharges of icebergs into the North-Atlantic Ocean during the last glacial period, *Nature* 360 (1992) 245–249.
- [12] G. Bond, W. Broecker, S. Johnsen, J. McManus, L. Labeyrie, J. Jouzel, G. Bonani, Correlations between climate records from North-Atlantic sediments and Greenland ice, *Nature* 365 (1993) 143–147.
- [13] B. Coste, A.F.G. Fiuza, H.J. Minas, Hydrological and Chemical Conditions Associated with the Portuguese Coastal Upwelling During Late Summer, *Oceanol. Acta* 9 (1986) 149–158.
- [14] M. Cross, (Compiler), Greenland summit ice cores, Boulder CO: National Snow and Ice Data Center in association with the World Data Center for Paleoclimatology at NOAA–NGDC and the Institute of Arctic and Alpine Research, 1997 (cédérom).
- [15] W. Dansgaard, J.W.C. White, S.J. Johnsen, The abrupt termination of the Younger Dryas climate event, *Nature* 339 (1989) 532–534.
- [16] W. Dansgaard, S.J. Johnsen, H.B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N. S. Gundestrup, C.U. Hammer, C.S. Hvidberg, J.P. Steffensen, A.E. Sveinbjörnsdóttir, J. Jouzel, G. Bond, Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record, *Nature* 364 (1993) 218–220.
- [17] J.A. Dowdeswell, M.A. Maslin, J.T. Andrews, I.N. McCave, Iceberg production, debris rafting, and the extent and thickness of Heinrich layers (H-1, H-2) in North-Atlantic sediments, *Geology* 23 (1995) 301–304.
- [18] A. Ganopolski, S. Rahmstorf, Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model, *Nature* 409 (2001) 153–158.
- [19] D. Genty, D. Blamart, R. Ouahdi, M. Gilmour, A. Baker, J. Jouzel, S. Van-Exter, Precise dating of Dansgaard–Oeschger climate oscillations in Western Europe from stalagmite data, *Nature* 421 (2003) 833–837.
- [20] T. Goslar, M. Arnold, E. Bard, T. Kuc, M.F. Pazdur, M. Ralskajaszewiczowa, K. Rozanski, N. Tisnerat, A. Walanus, B. Wicik, K. Wieckowski, High-concentration of atmospheric ^{14}C during the Younger Dryas cold episode, *Nature* 377 (1995) 414–417.
- [21] H. Heinrich, Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic ocean during the past 130 000 years, *Quat. Res.* 29 (1988) 143–152.
- [22] K.A. Hughen, M.G.L. Baillie, E. Bard, J.W. Beck, C. Bertrand, P.G. Blackwell, C.E. Buck, G. Burr, K.B. Cutler, P.E. Damon, R.L. Edwards, R.G. Fairbanks, M. Friedrich, T.P. Guilderson, B. Kromer, G. McCormac, S. 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, C.E. Weyhenmeyer, MARINE04 marine radiocarbon age calibration 26–0 ka BP, *Radiocarbon* 46 (2004) 1059–1086.
- [23] K. Hughen, S. Lehman, J. Southon, J. Overpeck, O. Marchal, C. Herring, J. Turnbull, ^{14}C activity and global carbon cycle changes over the past 50 000 years, *Science* 303 (2004) 202–207.
- [24] S.J. Johnsen, D. Dahl-Jensen, N. Gundestrup, J.P. Steffensen, H.B. Clausen, H. Miller, V. Masson-Delmotte, A. E. Sveinbjörnsdóttir, J. White, Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP, *J. Quat. Sci.* 16 (2001) 299–307.
- [25] H. Kitagawa, J. van der Plicht, Atmospheric radiocarbon calibration to 45000 yr BP: Late glacial fluctuations and cosmogenic isotope production, *Science* 279 (1998) 1187–1190.
- [26] H. Kitagawa, J. van der Plicht, Atmospheric radiocarbon calibration beyond 11900 cal BP, from Lake Suigetsu laminated sediments, *Radiocarbon* 42 (2000) 369–380.
- [27] S.J. Lehman, J.P. Sachs, A.M. Crotwell, L.D. Keigwin, E. A. Boyle, Relation of subtropical Atlantic temperature, high-latitude ice rafting, deep water formation, and European climate 130 000–60 000 years ago, *Quat. Sci. Rev.* 21 (2002) 1917–1924.
- [28] B. Martrat, J.O. Grimalt, C. Lopez-Martinez, I. Cacho, F. J. Sierro, J.A. Flores, R. Zahn, M. Canals, J.H. Curtis, D. A. Hodell, Abrupt temperature changes in the western Mediterranean over the past 250 000 years, *Science* 306 (2002) 1762–1765.
- [29] D.A. Meese, A.J. Gow, R.B. Alley, G.A. Zielinski, P. M. Grootes, M. Ram, K.C. Taylor, P.A. Mayewski, J. F. Bolzan, The Greenland Ice Sheet Project 2 depth-age scale: methods and results, *J. Geophys. Res.* 102 (C12) (1997) 26411–26423.
- [30] NorthGRIP Members, High-resolution record of the northern hemisphere climate extending into the last interglacial period, *Nature* 431 (2004) 147–151.
- [31] D. Pailler, E. Bard, High-frequency paleoceanographic changes during the past 140 000 years recorded by the organic matter in sediments off the Iberian Margin, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 181 (2002) 431–452.
- [32] P.J. Reimer, M.G.L. Baillie, E. Bard, A. Bayliss, J.W. Beck, C. 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, A.G. Hog, K.A. Hughen, B. Kromer, G. McCormac, S. Manning, C. Bronk Ramsey, R.W. Reimer, S. Remmele, J.R. Southon, M. Stuiver, S. Talamo, F.W. Taylor, J. van der Plicht, C.E. Weyhenmeyer, INTCAL04 terrestrial radiocarbon age calibration, *Radiocarbon* 46 (2004) 1029–1058.
- [33] A. Rosell-Mele, M.A. Maslin, J.R. Maxwell, P. Schaeffer, Biomarker evidence for Heinrich events, *Geochim. Cosmochim. Acta* 61 (1997) 1671–1678.
- [34] M.-F. Sanchez-Goni, J.-L. Turon, F. Eynaud, S. Gendreau, European climatic response to millennial-scale changes in the atmosphere-ocean system during the last glacial period, *Quat. Res.* 54 (2000) 394–403.
- [35] N.J. Shackleton, R.G. Fairbanks, T.-C. Chiu, F. Parrenin, Absolute calibration of the Greenland time scale: implications for Antarctic time scales and for $\delta^{14}\text{C}$, *Quat. Sci. Rev.* 23 (2004) 1513–1522.
- [36] G. Siani, M. Paterne, E. Michel, R. Sulpizio, A. Sbrana, M. Arnold, G. Haddad, Mediterranean Sea surface radiocarbon reservoir age changes since the last glacial maximum, *Science* 294 (2001) 1917–1920.
- [37] C. Spötl, A. Mangini, Stalagmite from the Austrian Alps reveals Dansgaard–Oeschger events during isotope stage 3: Implications for the absolute chronology of Greenland ice cores, *Earth Planet. Sci. Lett.* 203 (2002) 507–518.
- [38] M. Stuiver, P.M. Grootes, GISP2 oxygen isotope ratios, *Quat. Res.* 53 (2000) 277–284.
- [39] M. Stuiver, P.J. Reimer, E. Bard, W. Beck, G. Burr, K. Hughen, B. Kromer, G. McCormac, J. van der Plicht, M. Spurk, INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24000–0 cal BP, *Radiocarbon* 40 (1998) 1041–1083.
- [40] P.C. Tzedakis, I.T. Lawson, M.R. Frogley, G.M. Hewitt, R. C. Preece, Buffered tree population changes in a Quaternary

- refugium: Evolutionary implications, *Science* 297 (2002) 2044–2047.
- [41] P.C. Tzedakis, M.R. Frogley, I.T. Lawson, R.C. Preece, I. Cacho, L. de Abreu, Ecological thresholds and patterns of millennial-scale climate variability: The response of vegetation in Greece during the last glacial period, *Geology* 32 (2004) 109–112.
- [42] G. Valladas, J. Clottes, J.-M. Genese, M.A. Garcia, M. Arnold, H. Cachier, N. Tisnerat-Laborde, Evolution of prehistoric cave art, *Nature* 413 (2001) 479.
- [43] J. van der Plicht, J.W. Beck, E. Bard, M.G.L. Baillie, P. G. Blackwell, C.E. Buck, M. Friedrich, T.P. Guilderson, K. A. Hughen, B. Kromer, F.G. McCormac, C. Bronk Ramsey, P.J. Reimer, R.W. Reimer, S. Remmele, D.A. Richards, J. R. Southon, M. Stuiver, C.E. Weyhenmeyer, NOTCAL04 comparison–calibration ^{14}C records 26–50 cal kyr BP, *Radiocarbon* 46 (2004) 1225–1238.
- [44] L. Vidal, L. Labeyrie, E. Cortijo, M. Arnold, J.-C. Duplessy, E. Michel, S. Becque, T.C.E. van Weering, Evidence for changes in the North Atlantic Deep Water linked to meltwater surges during the Heinrich events, *Earth Planet. Sci. Lett.* 146 (1997) 13–27.
- [45] C. Waelbroeck, J.-C. Duplessy, E. Michel, L. Labeyrie, D. Pailard, J. Duprat, The timing of the last deglaciation in North-Atlantic climate records, *Nature* 412 (2001) 724–727.
- [46] R. Zahn, J. Schonfeld, H.R. Kudrass, M.H. Park, H. Erlenkeuser, P. Grootes, Thermohaline instability in the North Atlantic during meltwater events: Stable isotope and ice-rafted detritus records from core SO75-26KL, Portuguese margin, *Paleoceanography* 12 (1997) 696–710.
- [47] M. Zhao, N.A.S. Beveridge, N.J. Shackleton, M. Samthein, G. Eglinton, Molecular stratigraphy of cores off Northwest Africa – sea-surface temperature history over the last 80 ka, *Paleoceanography* 10 (1995) 661–675.