

Géosciences de surface (Paléoenvironnement)
Fluctuations climatiques enregistrées depuis 20 000 ans
dans le remplissage sédimentaire du loch Sunart
(Nord-Ouest de l'Écosse)

Zohra Mokeddem^{a,*}, Agnès Baltzer^a, Martine Clet-Pellerin^a,
Anne Véronique Walter-Simonnet^b, Richard Bates^c, Yvon Balut^d,
Chantal Bonnot-Courtois^e

^a *Laboratoire de morphodynamique continentale et côtière, CNRS-UMR 6143, université de Caen, 24, rue des Tilleuls, 14000 Caen, France*

^b *EA 2642, département de géosciences, université de Franche-Comté, 25000 Besançon, France*

^c *School of Geography and Geosciences, University of St Andrews, Scotland, UK*

^d *Institut Paul-Émile-Victor, Technopole de Brest, BP 75, 29280 Plouzané, France*

^e *Laboratoire de géomorphologie et environnement littoral, CNRS-UMR 8586, 15, boulevard de la Mer, 35800 Dinard, France*

Reçu le 26 juillet 2006 ; accepté après révision le 20 novembre 2006

Disponible sur Internet le 14 février 2007

Présenté par Georges Pédro

Résumé

Le loch Sunart constitue le réceptacle d'une sédimentation importante, propice à l'enregistrement des variations climatiques sur la marge nord-est de l'Atlantique. Les résultats d'une campagne de prospection sismique très haute résolution (Boomer Seistec) permettent de mettre en évidence cinq faciès acoustiques qui ont été corrélés à certaines caractéristiques des sédiments d'une carotte profonde (de grande section). Des analyses granulométriques, morphoscopiques et palynologiques, complétées par trois datations au ¹⁴C, permettent de retracer l'évolution de la sédimentation et des paléoenvironnements depuis le début de la déglaciation, mettant en évidence les refroidissements de 8200, 5500 et 3500 ans cal. BP, ainsi que le petit âge glaciaire. **Pour citer cet article :** *Z. Mokeddem et al., C. R. Geoscience 339 (2007).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Climatic fluctuations recorded in the sediment fillings of Loch Sunart (northwestern Scotland) since 20,000 BP. Over the last 20,000 yr, Loch Sunart has accumulated an important record of Late Pleistocene and Holocene sedimentation characteristic of sea lochs on the western coast of Scotland. A seismic survey conducted using a Seistec Boomer system has demonstrated five distinct sediment-acoustic facies in the loch. These facies have been correlated with sediment sequences identified in a long Calypso core (12 m) acquired from the RV *Marion Dufresne*. Grain-size and pollen analyses, accompanied with three ¹⁴C dates, have yielded information on the patterns of sedimentation since the Late Glacial Maximum. In addition, these data have identified three

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : zohra.mokeddem@unicaen.fr (Z. Mokeddem).

significant cooling events since the Younger Dryas: 8200, 5500 and 3500 cal. yr BP and the Little Ice Age. **To cite this article:** Z. Mokeddem et al., C. R. Geoscience 339 (2007).

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Sédimentation ; Pollen ; ^{14}C ; Boomer Seistec ; Faciès sismiques ; Événements de refroidissement ; Paléoenvironnements

Keywords: Sedimentation; Pollen; ^{14}C ; Seistec Boomer; Seismic facies; Cooling events; Palaeoenvironments

Abridged English version

Introduction

Loch Sunart is typical of fjord-style sea lochs of the North-Atlantic western coast of Britain. The loch maintains a permanent connection to the North Atlantic Ocean, but the bathymetry displays three major sills that divide the loch into three basins, with a maximum depth of 124 m. The loch is located on the Arndamuchan Peninsula, northwestern Scotland (Fig. 1). The basement geology consists of intrusive igneous Tertiary rocks in the eastern and western parts, and of Precambrian metamorphic rocks in the central part. In September 2002, a seismic survey conducted using the Seistec Boomer equipment [3] revealed the existence of five acoustic facies (Fig. 2). This survey was followed in 2004 by the acquisition of a 12-m-long Calypso core (MD04-2833) taken from the RV *Marion Dufresne*.

Based on sedimentological and palynological analyses, a correlation between the sedimentary sequences and the seismic facies gives an understanding of the evolution of the climate since the Late Glacial Maximum. Three ^{14}C dates confirm the chronological framework for these deposits.

Methodology

Thirty-four profiles were acquired using the Boomer based IKB-Seistec profiler, towed from the RV *Envoy*. The seismic lines were acquired using a survey speed of 3.5 knots and a ping rate of 2 s^{-1} . The Seistec profiler has been designed to collect very high-resolution data in shallow water environments, but can be used as well in water depths $>200\text{ m}$ [19,22]. The receiver uses a line-in-cone receiver located adjacent to the boomer plate (70 cm). The source emits useful frequencies in the range 1–10 kHz, giving a resolution of 25 cm [22].

Two hundred and twenty-eight samples were taken from the core at 5-cm intervals for grain-size analysis and palynology. A Beckman-Coulter LS230 laser was

used for grain-size measurements on fraction ranges from $0.04\text{ }\mu\text{m}$ to 2 mm. Grains coarser than 2 mm, when they were found, were noted in the final presentation (Fig. 3). From 255 to 771 cm in the core, the grain-size fraction that ranged from 125 to $250\text{ }\mu\text{m}$ was examined under the scanning microscope. Pollen analysis was conducted on the same samples sieved between 10 and $125\text{ }\mu\text{m}$, after decalcification with HCl (10%) and destruction of silicates by HF (40%).

Results

Seismic facies

Five seismic facies were identified, noted from 1 to 5 in Fig. 2. The facies range from a disorganised acoustic facies 1 and 2 to a laminated facies 3 divided into two phases, a transparent facies 4 and a thin laminated facies 5.

Sedimentology

The grain size shows a homogeneous distribution with predominance of clays and silts along the core (Fig. 3). Occasional intercalated beds of shells, wood fragments and gravels of different sizes are also present. Microscopic analyses (Fig. 3) underline the existence of two fractions, one mineral (feldspars, quartz and micas), and one biogenic (with foraminifers, ostracodes and debris of shells). The predominance of the biogenic fraction indicates a period of slow sedimentation allowing the concentration of the fossilized organisms.

^{14}C dating

Three mollusc samples were taken from the core (*Turitella communis*, *Pecten* sp., and *Pecten maximus*) for ^{14}C dating (Table 1). A standard reservoir correction, $R(t)$, of 400 yr, has been used as the regional average for western Britain [12]. The ^{14}C ages given in the text are reservoir corrected. Calibrated calendar ages have been obtained from the calibration tables in Stuiver et al. [23–25] by means of the CALIB. 5.1.0.b Software.

Pollen analyses

The different pollen assemblages, called and numbered from F2 (facies 2) to F5 (facies 5), indicate the evolution of the vegetation within the landscape in these sediments from the Older Dryas on (Fig. 4). From F2-1a to F2-1b, a tundra landscape is present, with marshes. According to ^{14}C dating, the appearance of vegetation should correspond to an improvement of the climatic conditions after $14,020 \pm 210$ ^{14}C BP. Trees, *Quercus* sp. (F2-2), are identified and the regression of marshes indicates a change toward more temperate periods. Zone F4–3 shows the development of the Preboreal forest with an expansion of conifers. Zones F4–4a to 4b should correspond to the Boreal period according to the ^{14}C dating at 8310 ± 50 BP, with a mixed forest identified by the expansion of *Pinus* and *Corylus*, and the decrease of *Betula* sp. Zones F4–5a to 5e show the decrease of *Pinus*, replaced by *Corylus* (F4–5f), probably related to the improvement of climatic conditions. Based on ^{14}C dating 6510 ± 40 BP, these favourable conditions enable us to correlate this zone to the Atlantic period, where a higher average temperature and moisture are observed [1]. Assemblages F4–6a to 6d and F5–7a to 7d show arboreal pollen, essentially composed of *Corylus*, *Quercus* and *Alnus*, which could be correlated to the Subboreal to Subatlantic period. From F5–7a to F5–7d, meadows and fern moors increased as a result of a more humid climate context.

Discussion

The correlation between the seismic facies and the sediment core MD04-2833 is presented in Fig. 2.

Facies 1 corresponds to a basal moraine deposited during the Late Glacial Maximum, in agreement with the ^{14}C age of $14,020 \pm 210$ BP. No pollen has been observed in the interval 1200–720 cm, corresponding to a ‘pollen desert’ typical of very cold temperatures. The second facies corresponds to a coarse grained deposit attributed to the Older Dryas period.

Facies 3 (semi-laminated) is composed of two phases: a darker facies corresponding to fine sandy beds, indicative of a proximal supply from the ice sheet, and a lighter facies, resulting from the distal position of the sediment supply source. This facies is correlated to the Younger Dryas cooling event, where no pollen is observed, because of the rarity of the vegetation and/or the highly energetic hydrodynamical conditions. Regionally, this facies 3 is correlated with the Muck formation, described by Boulton et al. [7], and the formation 1, described by Binns et al. [6].

Facies 4 (transparent in appearance) results from the absence of structure within the facies, due to rapid, massive discharge of sediment and water from the melting ice. In this facies, three cooler events have been identified:

- an abrupt disappearance of *Pecten* (370–330 cm) marks a sudden change in the environmental conditions within the loch catchment. From the pollen analyses, this cooler event began around 8200 and continues until 8000 cal. yr BP;
- from 230 to 200 cm, an important decrease of conifer and a rapid increase, then decrease, of *Corylus* signals a period of cooling (Fig. 4). This corresponds to the end of the Atlantic period (5500 to 5200 cal. yr BP);
- from 140 to 120 cm, the development of fern moors together with the decrease of trees and shrubs announce another change in climatic conditions, corresponding to the cooler period ranging from 3500 to 2700 cal. yr BP.

This facies 4 is correlated to formation 2, identified by Boulton et al. [7], and to formations 3 and 4, identified by Binns et al. [6], and corresponds to the first part of the Holocene period.

Facies 5 is characterised by thin laminated beds of silty clay. This deposit is similar to those observed in the Loch Ness [9] and corresponds to recent (Subatlantic) sedimentation patterns, with decreasing sediment supply.

Conclusion

The correlation between five seismic facies identified in Loch Sunart and a long sediment core allows a stratigraphic framework to be constructed, based on limited dating. The variations in core pollen and lithology can be interpreted in terms of regional climatic variations. Three cooling events have been recognised at 8200, 5500 and 3500 cal. yr BP. The combined approach of high-resolution seismic and continuous long coring should permit the construction of a ‘cartography’ of seismic facies. It is proposed that this can then be used in the future as a ‘tool’ to determinate the spatial extent and temporal evolution of different palaeoenvironments since the Last Glacial Maximum in other western coast’s lochs.

1. Introduction

Dans l’hémisphère nord, la dernière déglaciation, qui s’amorce vers 15 000 ans BP, au Dryas ancien, est soudainement interrompue au début du Dryas récent

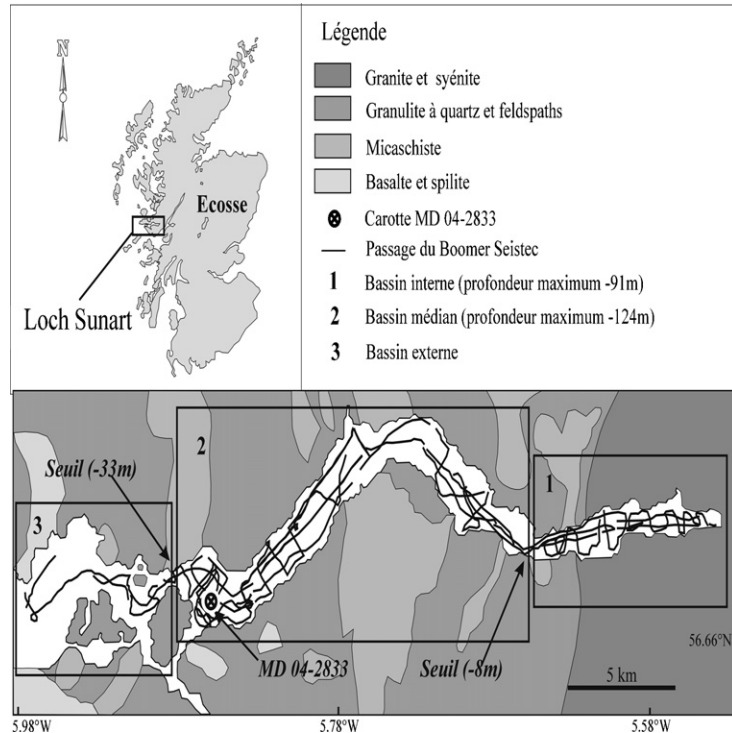


Fig. 1. Situation géographique et géologie du site d'étude. Positions des profils sismiques et du prélèvement de la carotte MD04-2833.

Fig. 1. Geographic situation and geology of the area studied. Seismic survey profiles and coring position of the MD04-2833 sampling.

(Younger Dryas) (11 000–10 000 ans cal. BP). Ce refroidissement est particulièrement bien enregistré dans le Nord-Ouest de l'Écosse [4] et correspond au dernier stade glaciaire reconnu sous le nom de *Loch Lomond Stadial*. Ultérieurement, si, en Europe continentale, des périodes d'alternance de refroidissement/réchauffement [16,17] sont souvent observées, de telles alternances n'ont pour l'instant pas été décrites en Écosse dans les lacs marins (les lochs) après 9600 ans cal. BP [10]. En effet, peu d'études climatologiques approfondies ont été menées jusqu'à présent sur le remplissage de ces lochs.

L'objectif de cet article est donc de réaliser une analyse pollinique détaillée des sédiments du loch Sunart. La signification de ces assemblages polliniques en termes de fluctuations climatiques sera alors comparée à l'existence d'événements reconnus dans la littérature et bien calés dans le temps. Parallèlement, les faciès sismiques enregistrés en 2002 dans le loch Sunart seront corrélés aux faciès sédimentaires de la carotte MD04-2833, prélevée en 2004 (Fig. 1).

Le loch Sunart, situé dans la péninsule d'Arndamurchan, au sud-ouest des Highlands, sur la côte ouest de l'Écosse, est une ancienne vallée glaciaire, creusée dans des roches ignées intrusives du Tertiaire, à l'est et à l'ouest, et dans des roches métamorphiques du

Précambrien, au centre. Connecté à l'océan Atlantique à l'ouest, le loch Sunart présente trois bassins principaux, séparés par deux seuils, qui les protègent de l'action des vagues et des houles, offrant ainsi des conditions idéales à la préservation des enregistrements sédimentaires [13]. D'est en ouest, les bassins interne et médian, d'une profondeur maximale de -91 et de -124 m, sont protégés par des seuils s'élevant respectivement à -8 et -33 m (Fig. 1) par rapport au zéro hydrographique [11]. Le carottier géant Calypso du *Marion Dufresne* a permis de prélever une carotte de 12 m, la carotte MD04-2833, à l'extrémité occidentale du bassin médian, sur une « cible » préalablement déterminée grâce aux profils sismiques Seistec. Des analyses sédimentologiques et palynologiques, complétées par trois datations au ^{14}C sur différentes coquilles, ont permis de retracer l'évolution de la sédimentation et des paléoenvironnements qui se sont succédé depuis le début de la dernière déglaciation.

2. Méthodologie

2.1. Sismique très haute résolution

Trente-quatre profils ont été acquis dans l'ensemble du loch Sunart (Fig. 1) grâce au Boomer Seistec, tracté à

une vitesse de 3,5 nœuds à partir de l'*Envoy* (N/O de l'université de St Andrews). Cet outil sismique possède une bande de fréquence de 1 à 10 kHz, avec une durée d'impulsion de 75 à 250 ms pour une puissance de 150 J. La résolution verticale est de l'ordre de 25 cm [19,22], avec une pénétration du signal variant de 20 à 100 m, en fonction de la nature des sédiments.

2.2. Analyses sédimentologiques

Deux séries de prélèvements, l'une pour l'analyse granulométrique, l'autre pour l'analyse pollinique, ont été effectuées avec un pas de 5 cm sur la carotte MD 04-2833, soit 228 échantillons. Un granulomètre laser LS230 de Beckman-Coulter a été utilisé pour la mesure de la fraction comprise entre 0,04 μm et 2 mm. La fraction supérieure à 2 mm, lorsqu'elle existe, a été identifiée et notée pour chaque niveau. Dans la partie supérieure de la carotte, entre 255 et 771 cm, la fraction comprise entre 125 et 250 μm a été examinée au microscope électronique à balayage (MEB JEOL 5600, avec une microanalyse X EDS FONDIS-99). L'analyse pollinique a été menée sur l'ensemble des échantillons tamisés entre 10 et 125 μm , après décalcification à HCl (10 %) et passage à HF (40 %) pour la destruction des silicates.

2.3. Datations ^{14}C

Une correction standard de l'effet réservoir $R(t) = 400$ ans est appliquée en accord avec la moyenne régionale de l'Ouest de la Grande-Bretagne [12]. Dans les lochs, la prédominance des eaux de ruissellement et les échanges continus avec les eaux côtières n'impliquent pas de changement significatif de $R(t)$ tout au long de l'Holocène. D'après Reimer et al. [21], la différence (ΔR) entre l'âge de la surface régionale de l'océan et celui de l'océan global semble insignifiant, au moins pour les 6000 dernières années ($-33 < \Delta R < +93$ ans).

Les âges ^{14}C BP donnés dans le texte sont corrigés de cet effet réservoir. Les âges calendaires calibrés ont été obtenus grâce aux tables de corrections de Stuiver et al. [23–25] et au logiciel CALIB. 5.1.0 b.

3. Résultats

3.1. Sismique

Les profils sismiques acquis par le système Boomer Seistec [3] ont révélé l'existence de cinq faciès acoustiques, en relation avec différents environnements de dépôt. Ces faciès, numérotés de 1 à 5 en commençant

par le plus profond, correspondent à cinq unités sédimentaires déposées depuis le dernier maximum glaciaire (Fig. 2).

Le faciès 1, dans lequel aucune structure interne n'est décelable, est dit « sourd ». Il correspond, soit à un soubassement rocheux, soit à un dépôt de moraines, qui daterait du dernier maximum glaciaire (avant 17 000 BP). Il constitue le socle acoustique des profils.

Le faciès 2 est du même type, mais n'apparaît que dans quelques poches isolées. Son épaisseur peut varier de 2,5 à 10 m. La limite supérieure, très irrégulière (surface chaotique), et la dispersion du signal sur l'ensemble du faciès permettent de l'attribuer à la présence d'une moraine de fond.

Le faciès 3, constitué de réflecteurs continus plus ou moins épais, est subdivisé en deux phases, dans lesquelles la texture sismique apparaît dense et sombre dans la partie inférieure, et claire et transparente dans la partie supérieure. C'est un dépôt régulier et rythmique, correspondant à la formation de Muck, décrite par Boulton et al. [7], et à la formation 1 de Binns et al. [6]. Il correspondrait, d'après ces auteurs, aux dépôts du Dryas récent.

Le faciès 4, dont l'épaisseur varie généralement entre 5 et 20 m, mais peut localement atteindre 80 m, est un faciès acoustique transparent. Il indique un état de sédiment non consolidé (gorgé d'eau ou de gaz), probablement associé à une sédimentation rapide [3]. Ce faciès ressemble à la formation identifiée par Boulton et al. [7], ainsi qu'aux formations 3 et 4 de Binns et al. [6], et correspondrait à des dépôts holocènes.

Le faciès 5 montre une succession de réflecteurs parallèles fins et continus sur une épaisseur de 1 m, qui traduisent des apports sédimentaires faibles dans un environnement calme.

Cette unité, présente tout le long du loch, drapait directement la moraine basale dans le bassin externe.

3.2. Sédimentologie

La distribution des différentes fractions granulométriques le long de la carotte MD04-2833 présente un ensemble homogène, dominé par les argiles et les silts (Fig. 3). On note la présence occasionnelle de niveaux de débris végétaux, de coquilles de bivalves et gastéropodes (souvent en parfait état), ainsi que de graviers de tailles variées. L'analyse au MEB (Fig. 3) des fractions sableuses (125 à 250 μm) des niveaux compris entre 255 et 771 cm révèle l'existence de deux phases: une phase minérale (feldspaths, quartz et micas) et une phase biogénique (foraminifères, ostracodes et débris de coquilles). La dominance de la fraction biogénique à

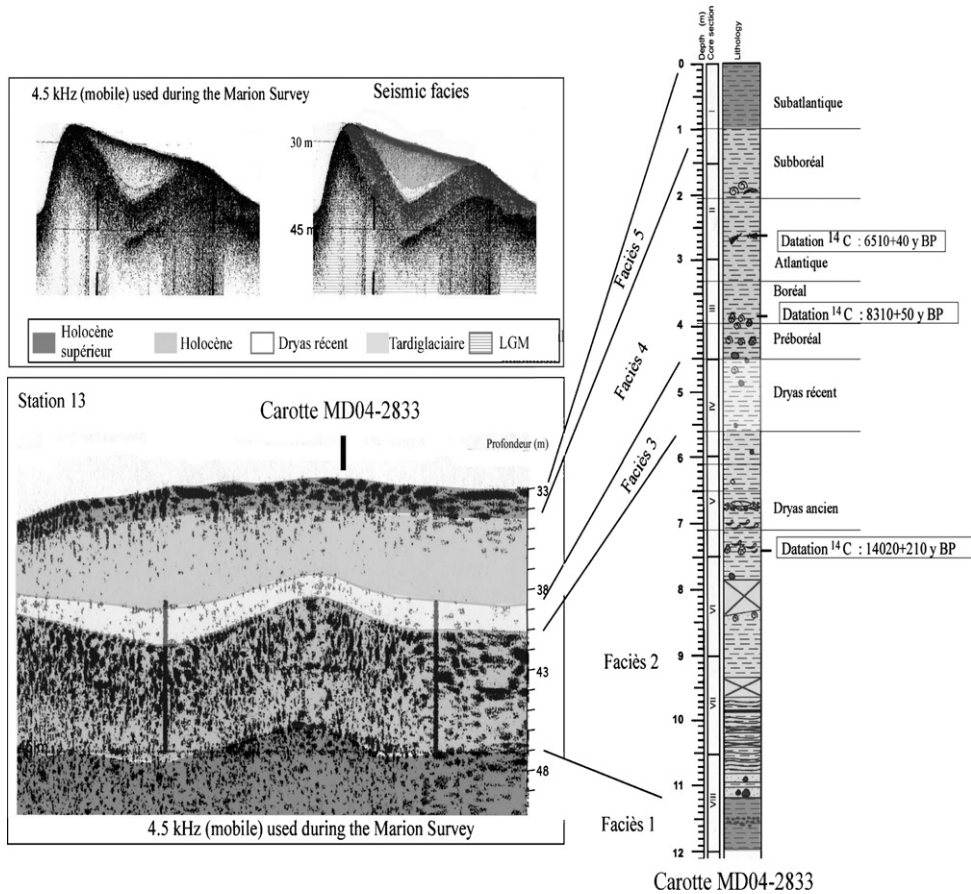


Fig. 2. Distribution chronologique des cinq faciès sismiques le long de la carotte MD04-2833.

Fig. 2. Chronological distribution of the five seismic facies along core MD04-2833.

certains niveaux de la carotte (255, 400, 730 cm) peut témoigner d’une période à faible sédimentation, favorisant la concentration des organismes fossilisés.

Enfin, trois datations au ¹⁴C ont pu être réalisées (Tableau 1) : l’une par le laboratoire de datation ¹⁴C de l’université de Laval (Canada) sur 25 g d’échantillon (coquille de *Pecten maximus* prélevée à 776 cm) et les deux autres par le laboratoire de Poznań (Pologne) sur des échantillons de moins de 20 g (*Pecten* sp. à 385 cm et *Turritella communis* à 265 cm).

3.3. L’analyse pollinique

L’analyse pollinique (Fig. 4) révèle l’absence totale de pollen à la base de la carotte (de 1200 à 710 cm) : il s’agit d’un « désert pollinique » relatif à l’absence totale de végétation.

À partir de 710 cm, un paysage de toundra, avec des zones humides et quelques tourbières à sphaignes, se développe (F2–1a et 1b). Quelques arbustes de toundra (*Juniperus*, *Populus*, *Betula*, *Pinus*), sans doute sous

Tableau 1
Datation au ¹⁴C de coquilles retrouvées dans la carotte MD04-2833

Table 1
¹⁴C Dating of shells found in core MD04-2833

Espèce	Profondeur de prélèvement	Laboratoire de datation	Date (¹⁴ C BP)	Âge cal. BP (2 sigma)
<i>Turritella communis</i>	265 cm	Poznań Radiocarbon Laboratory	6510 ± 40 (Poz-1054)	7322–7494
<i>Pecten</i> sp.	385 cm	Poznań Radiocarbon Laboratory	8310 ± 50 (Poz-13368)	9195–9457
<i>Pecten maximus</i>	776 cm	Laboratoire de datation au ¹⁴ C de l’université de Laval	14020 ± 210 (UL-2853)	16073–17463

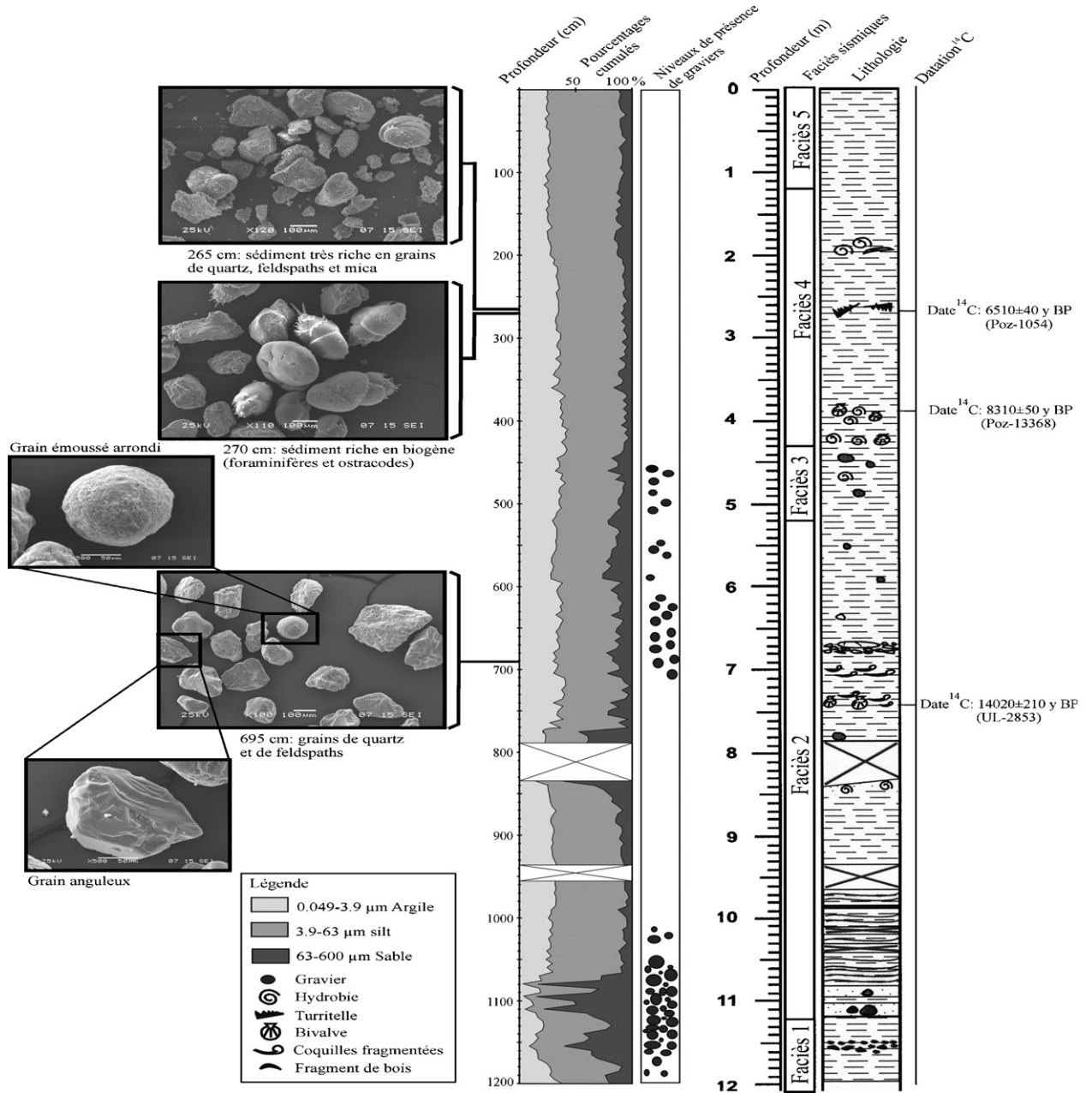


Fig. 3. Représentation des courbes granulométriques en pourcentages cumulés et de la lithologie des sédiments de la carotte MD04-2833. Niveaux de prélèvements des coquilles datées au ^{14}C et contenu sédimentaire observé sous microscope électronique au grossissement 100 et 500.

Fig. 3. Cumulated granulometric curves and lithology of sediments in the core MD04-2833 ^{14}C shells sampling levels and sedimentary content observed under scanning microscope ($\times 100$ and 500).

forme de *krumholtz*, se distinguent des herbacées environnantes. D'après la datation ^{14}C , cette apparition de la végétation devrait correspondre à une amélioration des conditions climatiques après $14\ 020 \pm 210$ ans ^{14}C BP.

De 660 à 610 cm, l'absence quasi totale de pollen montre que l'on retourne à des conditions climatiques plus froides.

De 610 à 565 cm, l'apparition d'arbres de la forêt décidue (*Quercus*), la croissance d'*Alnus* et la régression

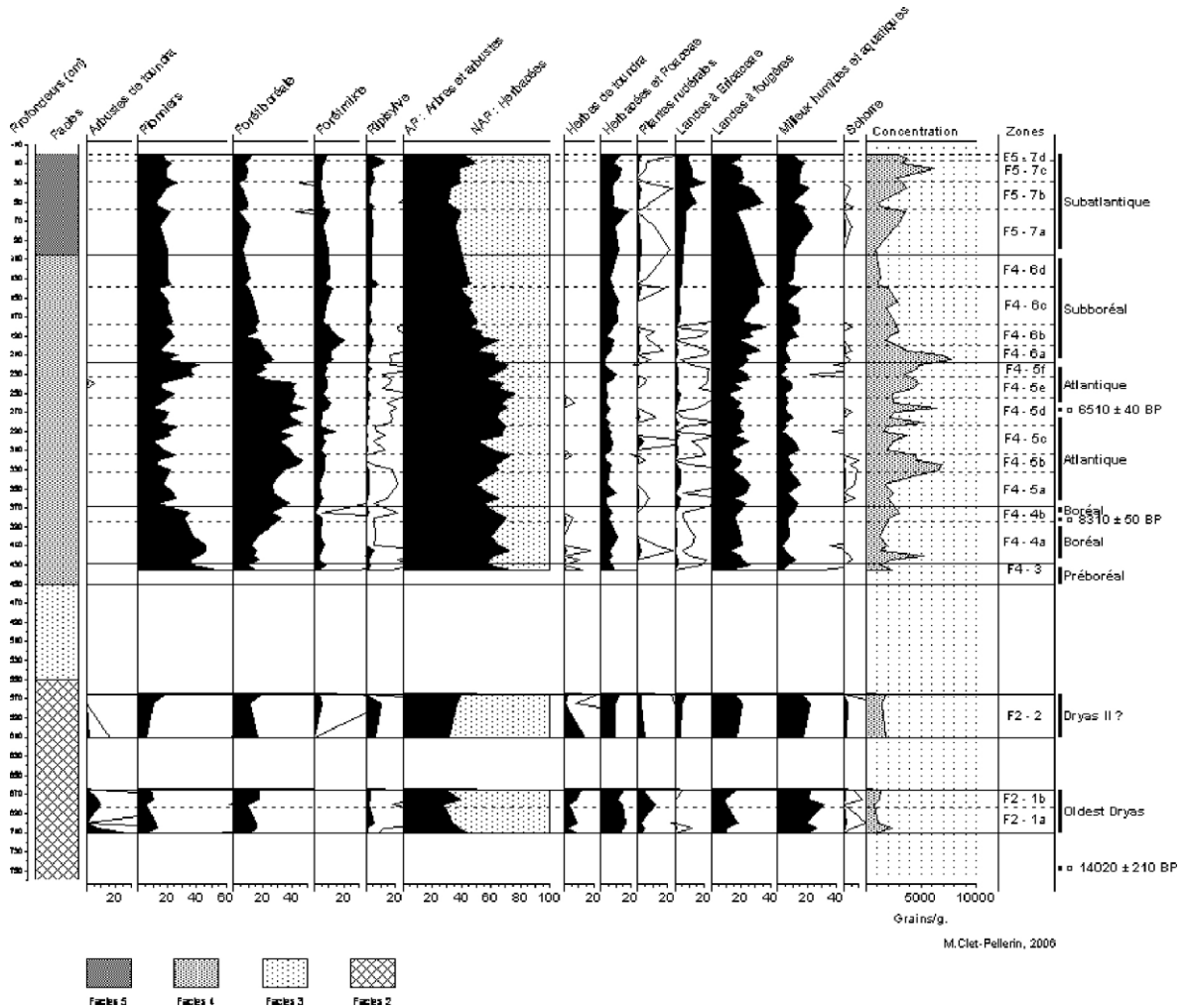


Fig. 4. Diagramme pollinique de la répartition de la végétation dans la carotte MD04-2833.

Fig. 4. Pollinic diagram of vegetation distribution in core MD04-2833.

des arbustes et herbacées de toundra, ainsi que la diminution des aires humides en fin de zone F2–2, montrent le passage à une période plus tempérée, qui pourrait correspondre au radoucissement de l’Allerød. Cela est en accord avec l’apparition de la forêt décidue dès 12 000 ans ¹⁴C BP au sud des Hébrides écossaises [5].

La zone sus-jacente (565–435 cm) est une « zone stérile » pratiquement dépourvue de pollen. Dans ce cas, l’absence de pollen peut être liée, soit à la quasi-absence de végétation, soit à la non-conservation des grains de pollen, en raison de conditions hydrodynamiques trop violentes : remaniement de la colonne d’eau et des sédiments superficiels. Ces conditions extrêmes ont pu être les conséquences directes du brusque refroidissement du Younger Dryas, suivi par une importante fonte des glaces.

Au-dessus (zones F4–3), les arbres et arbustes pionniers (*Corylus*, *Betula*) occupent l’ensemble du paysage, tandis que la forêt boréale à conifères, avec *Pinus silvestris*, est présente. Ce réchauffement, corrélé à la fin du Préboréal, a provoqué l’effondrement de l’inlandsis de Scandinavie vers 8500 ans BP [1]. Puis (zones F4–4a à 4b), la forêt mixte boréale, essentiellement dominée par *Pinus* et *Corylus*, se développe au détriment de l’espèce pionnière *Betula*. Cette extension massive de la forêt boréale correspond au début de la chronozone du Boréal, ce qui est confirmé par une datation ¹⁴C obtenue sur des pectens prélevés à 385 cm.

De 365 jusqu’à 220 cm, *Pinus* devient le composant principal de la forêt (zone F4 5a–5e), puis il est remplacé par *Corylus* à la fin de la zone F4–5f. La nette

augmentation des concentrations de grains de pollen traduit l'installation de conditions climatiques optimales pour le développement des arbres et arbustes. Ces conditions favorables, appuyées par la datation ^{14}C de 6510 ± 40 ans BP à 265 cm, nous permettent de corrélérer cette zone à l'Atlantique, où l'on observe une température annuelle moyenne plus élevée de 1 à 2 °C que l'actuelle, associée à une humidité plus importante [1].

De 220 à 110 cm, les espaces boisés composés de *Corylus* et d'essences de la forêt décidue (surtout *Quercus*) tendent à diminuer, alors que l'on observe l'apparition de la ripisylve représentée par *Alnus* (F4–6a à 6d). Parallèlement, le rapport AP (arbres et arbustes)/NAP (herbacées) s'inverse, ce qui correspond au développement des landes à fougères ainsi qu'à l'extension progressive des milieux humides et aquatiques (sphaignes, Cyperaceae). Cette augmentation tangible de l'humidité semble correspondre au climat subboréal [1].

À partir de la fin de la zone F4–6c, les milieux humides et aquatiques sont en nette expansion, alors que les autres composantes restent constantes : on rejoint les conditions climatiques actuelles.

Ainsi, les sédiments du loch Sunart ont enregistré l'évolution des paysages présents sur ses berges, depuis le Dryas ancien jusqu'à l'Actuel (Fig. 4), malgré la faible concentration pollinique (moins de 5000 grains par gramme de sédiment), caractéristique du milieu marin. Les datations ^{14}C effectuées sur des coquilles sont en accord avec l'âge relatif de ces assemblages polliniques.

4. Discussion

La corrélation entre les faciès sismiques et les sédiments prélevés dans la carotte MD04-2833 (Fig. 2) nous ont permis, d'une part, d'établir un cadre chronologique et, d'autre part, de déduire l'extension spatiale des environnements de dépôt.

Le faciès 1 sourd correspond, en son sommet, à un dépôt mixte d'argiles et de silts, associé à une passée de gros graviers et de débris de quartzites sur laquelle s'est arrêté le carottier. L'absence totale de grains de pollen à la base de la carotte correspond à un « désert pollinique ». Nous associons ce « désert pollinique » à un englacement total de la zone étudiée, et corrérons le faciès 1, soit à un dépôt morainique daté probablement du dernier maximum glaciaire (hypothèse cohérente avec la datation $14\ 020 \pm 210$ ^{14}C BP obtenue à 750 cm), soit directement à l'affleurement du socle rocheux au niveau des seuils.

Le faciès sourd 2 (entre 1120 et 550 cm) correspond à une succession de différents dépôts, présentant un granoclassement inverse : des passées de graviers (*dropstones*) à la base, sur lesquelles reposent plusieurs lits sableux (de 1080 à 970 cm) intercalés avec des niveaux plus silteux et surmontées, vers 950 cm, d'un faciès homogène d'argiles silteuses. À partir de 750 cm jusqu'à 650 cm, des coquilles de *Pecten* sp. sont présentes en position de vie (avec les deux valves en parfait état) dans les sédiments, et les assemblages polliniques montrent l'installation d'une toundra arbustive sur les terres récemment découvertes (F2–1a et 1b). Cette période correspond au début de la déglaciation effective, au Dryas ancien. Elle est interrompue par une phase de refroidissement, dans laquelle aucun pollen n'a été retrouvé.

De 610 à 570 cm, un dépôt fin pauvre en graviers – le glacier étant en position distale – marque le début du réchauffement de l'Alleröd, avec le premier développement des arbres de forêt tempérée et la diminution des herbacées de toundra (F2–2). Ce passage est suivi par une zone stérile en pollen, qui annonce le retour d'une phase froide.

Le faciès 3 (semi-lité), qui débute à 520 cm et finit à 430 cm, correspond à l'alternance de sédiments fins et de quelques niveaux de graviers. À sa base, le litage fin traduit la proximité du glacier, alors que le litage plus transparent sus-jacent correspond au recul progressif du glacier. Dans cette section, on n'observe pas, ou que peu, de pollen. Cette quasi-absence de pollen peut être liée, soit à la grande rareté de la végétation, soit à la non-conservation des grains de pollen par suite de conditions hydrodynamiques défavorables. Compte tenu de ces deux hypothèses et des points d'ancrage datés, ce faciès devrait correspondre à la période de refroidissement du Dryas récent.

Le faciès 4, transparent, dont l'épaisseur varie de quelques mètres à 20 m en général, peut atteindre une épaisseur de 80 m dans le bassin externe. Il est constitué de sédiments non consolidés, déposés dans des environnements calmes, associés aux profondeurs maximum dans les lochs [3]. Ce dépôt caractérise une décharge massive de sédiments gorgés d'eau qui pourrait correspondre à la fonte des glaces marquant ainsi le recul définitif du glacier au début de l'Holocène. Une sédimentation importante va se poursuivre du Préboréal au Subboréal, période au cours de laquelle plusieurs épisodes humides [15] vont favoriser le dépôt de matières détritiques fines. Moros et al. [18] ont ainsi mis en évidence, en mer, une succession d'oscillations climatiques, qu'il semblerait possible de relier aux variations de la végétation à terre. Ainsi, trois phases

froides, reconnues habituellement dans les paléoenvironnements de l'Europe du Nord-Ouest, sont décelées :

- de 370 à 330 cm (F4–5a), une disparition soudaine des coquilles de *Pecten* annonce des variations climatiques brutales. Elle correspond à une diminution brusque des conifères et de *Corylus*, au développement des landes à fougères et des milieux humides. Cette phase plus froide pourrait correspondre à l'événement froid de 8200 BP enregistré dans les glaces du Groenland et les sédiments lacustres [2,8,14,20] ;
- entre 230 et 200 cm (F4–5f et F4–6a), on observe aussi une forte diminution des conifères remplacés par *Corylus*, plante pionnière marquant un changement rapide et significatif des conditions environnementales, et le développement de la lande à fougères. Ce net rafraîchissement correspond à la fin de la période Atlantique (5500 et 5200 ans cal. BP) ;
- entre 140 et 120 cm (F4–6d), la diminution des arbres et arbustes et le développement de la lande à fougères traduisent une instabilité des conditions climatiques [18], qui correspondrait à la fin du Subboréal, entre 3500 et 2700 ans cal. BP.

Enfin, le faciès 5, finement lité et marqué par des silts argileux peu épais, est identifié sur les profils sismiques par une succession de réflecteurs fins. Dans le loch Ness, des dépôts similaires ont été interprétés comme résultant de fluctuations rythmiques saisonnières et annuelles de la sédimentation [9]. Il s'agirait donc de dépôts récents (du Subatlantique à l'Actuel), où la diminution des apports sédimentaires serait à l'origine d'une sédimentation fine de type hémipélagique. La période plus froide du petit âge glaciaire (F5–7c) est peu marquée dans le diagramme pollinique et favorise principalement le développement des landes à Ericaceae.

5. Conclusion

Les lochs marins écossais, protégés des houles et des tempêtes de par leur morphologie en bassins séparés par des seuils, représentent des réservoirs de stockage de sédiments très importants. Ces sédiments constituent ainsi des archives paléoenvironnementales particulièrement bien préservées, pouvant remonter jusqu'au dernier maximum glaciaire.

L'étude palynologique menée sur la carotte MD04-2833 (prélevée dans le loch Sunart, dans le Nord-Ouest de l'Écosse) a permis de déceler et de suivre l'évolution des paléoenvironnements depuis le dernier maximum

glaciaire jusqu'à l'Actuel. Grâce à trois datations ^{14}C effectuées sur des coquilles, nous avons pu associer ces variations paléoenvironnementales aux changements climatiques enregistrés dans l'hémisphère nord et rapportés dans la littérature. Nous avons pu ainsi mettre en évidence trois principales phases de refroidissement ayant débuté respectivement à 8200, 5500 et 3500 ans cal. BP. Nous avons ensuite tenté de corrélérer les sédiments de la carotte MD04-2833 aux cinq faciès acoustiques reconnus dans le loch Sunart. Ces faciès traduisent l'existence d'une architecture de dépôt propre à chaque période climatique, variant suivant la nature (qualité) des apports sédimentaires, de la proximité de la source (position distale ou proximale des glaciers par exemple) et de la quantité de ces apports. Cette corrélation nous permet de caler, d'un point de vue chronologique, les différents faciès sismiques reconnus dans ce loch. Cette approche très prometteuse pourrait nous permettre d'utiliser la cartographie de ces différents faciès sismiques comme « outil » pour déterminer l'extension géographique et l'évolution temporelle (à l'échelle du pluri-centennal) des différents paléoenvironnements dans les lochs voisins, et ce depuis le dernier maximum glaciaire.

Références

- [1] J.M. Adams, Global Land Environments Since The Last Interglacial, Oak Ridge National Laboratory, TN, USA, 1997.
- [2] R.B. Alley, P.A. Mayewski, T. Sowers, M. Stuiver, K.C. Taylor, P.U. Clark, Holocene climatic instability – a prominent event 8200 yr ago, *Geology* 25 (1997) 483–486.
- [3] A. Baltzer, B. Tessier, H. Nouzé, R. Bates, C. Moore, D. Menier, Seistec seismic profiles: a tool to differentiate gas signatures, in: *Subsurface imaging and sediment characterization in shallow water environment*, Mar. Geophys. Res. (MARI), Spec. Publ. 26 (2005) 235–245.
- [4] D.I. Benn, Glacier fluctuations in western Scotland, *Quat. Int.* 38/39 (1997) 137–147.
- [5] K.D. Bennett, R.W. Humphry, Analysis of late-glacial and Holocene rates of vegetational change at two sites in the British Isles, *Rev. Palaeobot. Palynol.* 85 (1995) 263–287.
- [6] P.E. Binns, R. Harland, M.J. Hughes, Glacial and post glacial sedimentation in the Sea of the Hebrides, *Nature* 248 (1974) 751–754.
- [7] G.S. Boulton, P.N. Chroston, J. Jarvis, A marine seismic study of Late Quaternary sedimentation and inferred glacier fluctuations along western Inverness-shire, Scotland, *Boreas* 10 (1981) 39–51.
- [8] G.K.C. Clarke, D.W. Leverington, J.T. Teller, A.S. Dyke, Paleohydraulics of the last outburst flood from glacial Lake Agassiz and the 8200 BP cold event, *Quat. Sci. Rev.* 23 (2004) 389–407.
- [9] M.C. Cooper, P.E. O'Sullivan, The laminated sediments of Loch Ness, Scotland: Preliminary report on the construction of a chronology of sedimentation and its potential use in assessing

- Holocene climatic variability, *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 140 (1998) 23–31.
- [10] J.K. Dix, R.W. Duck, A high-resolution seismic stratigraphy from a Scottish sea loch and its implications for Loch Lomond stadial deglaciation, *J. Quat. Sci.* 15 (6) (2000) 645–656.
- [11] P.A. Gillibrand, A.G. Cage, W.E.N. Austin, A preliminary investigation of basin water response to climate forcing in a Scottish fjord: evaluating the influence of the NAO, *Cont. Shelf Res.* 25 (2005) 571–587.
- [12] D.D. Harkness, The extent of the natural ^{14}C deficiency in the coastal environment of the United Kingdom, *J. Eur. Study Group Phys., Chem. Math. Tech. Appl. Archaeol. PACT* 8 (IV.9) (1983) 351–364.
- [13] J.A. Howe, T. Shimmield, W.E.N. Austin, O. Longva, Post-glacial depositional environments in a mid-high latitude glacially-overdeepened sea loch, inner Loch Etive, western Scotland, *Mar. Geol.* 185 (2002) 417–433.
- [14] J. Kurek, L.C. Cwynar, R.W. Spear, The 8200 cal yr BP cooling event in eastern North America and the utility of midge analysis for Holocene temperature reconstructions, *Quat. Sci. Rev.* 23 (2004) 627–639.
- [15] P.G. Langdon, K.E. Breger, P.D.M. Hughes, A 7500-years peat-based paleoclimatic reconstruction and evidence for an 1100-years cyclicity in bog surface wetness from Temple Hill Moss, Pentland Hills, Southeast Scotland, *Quat. Sci. Rev.* 22 (2003) 259–274.
- [16] M. Magny, Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements, *Quat. Int.* 113 (2004) 65–79.
- [17] P.A. Mayewski, E.E. Rohling, J.C. Stager, W. Karlén, K.A. Maasch, L.D. Meeker, E.A. Meyerson, F. Gasse, S. van Kreveld, K. Holmgren, J. Lee-Thorp, G. Rosqvist, F. Rack, M. Staubwasser, R.R. Schneider, E.J. Steig, Holocene climate variability, *Quat. Res.* 62 (2004) 243–255.
- [18] M. Moros, K. Emeis, B. Risebrobakken, I. Snowball, A. Kuijpers, J. McManus, E. Jansen, Sea surface temperatures and ice rafting in the Holocene North Atlantic: climate influences on northern Europe and Greenland, *Quat. Sci. Rev.* 23 (2004) 2113–2126.
- [19] D.C. Mosher, P. Simpkin, Status and trends of marine high-resolution seismic reflection profiling: data acquisition, *Geosci. Can.* 26 (1999) 22.
- [20] R. Muscheler, J. Beer, M. Vonmoos, Causes and timing of the 8200 yr BP event inferred from the comparison of the GRIP ^{10}Be and the tree ring $\Delta^{14}\text{C}$ record, *Quat. Sci. Rev.* 23 (2004) 2101–2111.
- [21] P.J. Reimer, F.G. McCormack, J. Moore, F. McCormick, E.V. Murray, Marine radiocarbon reservoir corrections for the mid- to late Holocene in the eastern subpolar North Atlantic, *Holocene* 12 (2) (2002) 129–135.
- [22] P. Simpkin, M. Davis, Gas bubbles and the acoustically impenetrable, or turbid, character of some estuarine sediments, in: I.R. Kaplan (Ed.), *Natural Gases in Marine Sediments*, Plenum Press, New York and London, 1993, pp. 275–298.
- [23] M. Stuiver, P.L. Reimer, Extended ^{14}C data base and revised Calib 3.0 ^{14}C age calibration program, *Radiocarbon* 35 (1) (1993) 215–230.
- [24] M. Stuiver, P.J. Reimer, E. Bard, J.W. Beck, G.S. Burr, K.A. Hughen, B. Kromer, G. McCormack, J. van der Plicht, M. Spurk, INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration, 24000–0 cal BP, *Radiocarbon* 40 (3) (1998) 1041–1083.
- [25] M. Stuiver, P.J. Reimer, T.F. Braziunas, High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples, *Radiocarbon* 40 (3) (1998) 1127–1151.