

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

INDICES MICROPALÉONTOLOGIQUES ET GÉOCHIMIQUES DE  
CHANGEMENTS RÉCENTS DE L'OXYGÉNATION ET LA TEMPÉRATURE  
DES EAUX PROFONDES DU GOLFE DU ST-LAURENT

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR  
LINDA GENOVESI

JUILLET 2009

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

RECENT CHANGES OF BOTTOM WATER OXYGENATION AND  
TEMPERATURE IN THE GULF OF ST. LAWRENCE:  
MICROPALAEONTOLOGICAL AND GEOCHEMICAL EVIDENCES.

THESIS  
PRESENTED  
AS PARTIAL REQUIREMENT FOR A  
MSc. IN EARTH AND ATMOSPHERIC SCIENCES

BY  
LINDA GENOVESI

JULY 2009

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## AVANT-PROPOS

Ce mémoire de maîtrise prend la forme d'un article scientifique, lequel sera soumis à la revue *Limnology and Oceanography*. Le texte répond aux exigences de cette revue, c'est pourquoi la langue anglaise a été utilisée et la forme diffère de celle recommandée par l'Université du Québec à Montréal. D'autres auteurs de l'Université du Québec à Montréal ont participé à la réalisation de cet article, soit Anne de Vernal et Benoît Thibodeau à la rédaction, Claude Hillaire-Marcel à l'interprétation des données géochimiques et Taoufik Radi à la production et interprétation des résultats de fonctions de transfert.

## REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier ma directrice de maîtrise, Mme Anne de Vernal, pour sa disponibilité, son orientation et ses conseils lors de la réalisation de mon projet de maîtrise. Je dois également la remercier sincèrement pour les nombreuses opportunités qu'elle m'a offertes lors de ces deux années, ce fût un réel plaisir de travailler avec une directrice aussi enthousiaste et généreuse.

Je remercie également Benoît Thibodeau, Claude Hillaire-Marcel et Taoufik Radi pour leur importante contribution à ce travail, ainsi que pour leur patience et le temps qu'ils ont investi pour m'aider à réaliser ce projet. Un très grand merci à Bassam Ghaleb et Christelle Not pour leur énorme aide avec la chronologie. Merci aussi à tout le personnel du Geotop pour leur aide et leur support, ils ont rendu cette expérience d'autant plus agréable. Merci à Audrey Limoges et Isabelle Delainey pour leur aide avec les comptages de dinokystes et de foraminifères.

De plus, je tiens à remercier le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour son soutien financier.

Et finalement, je veux remercier pour leur soutien, leurs encouragements et leur amour, ma famille et mes amis.

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES .....	vi	
RÉSUMÉ .....	viii	
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1	
CHAPITRE I		
RECENT CHANGES OF BOTTOM WATER OXYGENATION AND TEMPERATURE IN THE GULF OF ST. LAWRENCE: MICROPALEONTOLOGICAL AND GEOCHEMICAL EVIDENCES .....		4
Abstract .....	5	
1. Introduction .....	6	
2. Oceanographic context .....	7	
3. Material and methods .....	9	
4. Results .....	13	
4.1 Excess $^{210}\text{Pb}$ , $^{137}\text{Cs}$ and sedimentation rates .....	13	
4.2 Dinocyst assemblages .....	14	
4.3 Transfer functions .....	15	
4.4 Geochemistry of organic matter in sediments .....	15	
4.5 Benthic foraminifer assemblages .....	16	
4.6 Isotopic composition of benthic foraminifera shells .....	17	
5. Discussion .....	18	
6. Conclusion .....	21	
7. References .....	23	
Figures .....	28	

CONCLUSION GÉNÉRALE .....	35
BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE .....	36
APPENDICE A:	
Dénombrement et concentrations des dinokystes, grains de pollen, spores, autres palynomorphes et foraminifères benthiques dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	40
APPENDICE B :	
Reconstructions paléocéanographiques des paramètres de surface par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	49
APPENDICE C :	
Résultats d'analyses géochimiques et isotopiques dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	56
APPENDICE D :	
Chronologie de la carotte COR0503-CL05-37BC : modèles d'âges calculés à partir de l'excès de $^{210}\text{Pb}$ après soustraction des différentes valeurs de $^{210}\text{Pb}$ soutenu possibles .....	60
APPENDICE E :	
Planches photographiques de foraminifères benthiques prises au microscope électronique à balayage .....	67

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Map of the study area showing location of coring sites. The circle corresponds to core COR0503-CL05-37BC from the Gulf of St. Lawrence (48°20'N, 61°30'W; at 409 m water depth). The square and triangle respectively correspond to cores CR02-23 (48°42'N, 68°38'W; at 345 m water depth) and AH00-2220 (48°38'N, 68°37'W; at 324 m water depth) collected in the Lower St. Lawrence Estuary and analysed by Thibodeau et al. (2006). The bathymetric contour represents 200 m .....28

Figure 2. In core COR0503-CL05-37BC, A)  $^{210}\text{Pb}$  activity profile ( $\text{dpm g}^{-1}$ ) as a function of depth; B-C) excess  $^{210}\text{Pb}$  ( $\ln$ ) of maximal ( $2.34 \pm 0.36 \text{ dpm g}^{-1}$ ) and minimal ( $1.89 \pm 0.05 \text{ dpm g}^{-1}$ ) supported fraction as a function of depth, the dotted lines represent the linear regressions used to calculate sedimentation rates; D)  $^{137}\text{Cs}$  activity profile ( $\text{dpm g}^{-1}$ ) as a function of depth; E) chronology (years) as a function of depth, the dot represents the  $^{137}\text{Cs}$  peak which corresponds to approximately 1963. The upper 2 cm of the core (in grey) represent a layer of biological mixing. These upper samples were not taken into account in the calculation of sedimentation rates. Note that y-axis, although all representing depth (cm), have different scales .....29

Figure 3. In core COR0503-CL05-37BC, data as a function of depth A) dinocyst concentration ( $\text{cysts g}^{-1}$ ); B) relative abundance of the most abundant dinocyst taxa .....30

Figure 4. Reconstruction of primary production based on the best analogue method, using A) the CZCS reference productivity data (Antoine et al., 1996); and B) the MODIS reference productivity data (Berhenfeld and Falkowski, 1997). The bold lines represent 5-point running means.....31

Figure 5. In core COR0503-CL05-37BC, data as a function of depth A) organic carbon (%); B) organic carbon to nitrogen ratio; C)  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) of organic carbon; D)  $\delta^{15}\text{N}$  (‰). The bold curves represent 5-point running means .....32

Figure 6. In core COR0503-CL05-37BC, data as a function of depth A) concentration of benthic foraminifera ( $\text{tests g}^{-1}$ ), the bold curve represents calcareous taxa only, whereas the dotted curve corresponds to total concentrations including calcareous and agglutinated taxa. Agglutinated taxa were treated separately due to uncertainties linked to their preservation in sediments. In B), relative abundance of the main calcareous benthic foraminifer taxa (%) and the relative abundance of agglutinated taxa is shown in the last column to the right. The upper 8 cm of the core have been highlighted in grey as they show important changes in the benthic

foraminifera assemblages, according to our age models these changes started between the 1940s and the 1960s .....33

Figure 7. In core COR0503-CL05-37BC, isotopic analysis of shells of benthic foraminifera *Bulimina exilis* as a function of depth A)  $\delta^{18}\text{O}$  (‰); B)  $\delta^{13}\text{C}$  (‰). The bold curves represent 5-point running means. According to our age models, the important  $\delta^{18}\text{O}$  decrease occurring from 16 to 0 cm depth started between the 1880s and the 1910s .....34



## RÉSUMÉ

L'analyse du contenu micropaléontologique et géochimique d'une carotte sédimentaire (48°20'N, 61°30'W, à 409 m de profondeur) prélevée dans le Chenal Laurentien du Golfe du St-Laurent a été effectuée dans le but de reconstruire les variations de productivité pélagique et de conditions benthiques au cours des derniers siècles. L'objectif de cette étude est de vérifier l'extension régionale de la tendance récente vers l'eutrophisation et l'hypoxie benthique récemment signalée dans l'Estuaire Maritime du St-Laurent. Les assemblages de dinokystes révèlent des conditions pélagiques relativement uniformes. Les données géochimiques (C organique, C/N) et isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) suggèrent également des flux organiques uniformes durant les derniers siècles. Cependant, des changements significatifs sont enregistrés dans les assemblages de foraminifères benthiques. L'augmentation de l'abondance relative des espèces *Cassidulina laevigata* et *Brizalina subaenariensis* dans les 8 cm supérieurs de la carotte suggère que les eaux profondes ont subi une diminution des concentrations en oxygène dissous durant les ~65 à 45 dernières années. De plus, la diminution de l'abondance relative de *Nonionellina labradorica* simultanée à l'augmentation de *Oridorsalis umbonatus* suggère une diminution de l'influence des eaux du Courant du Labrador par rapport à celles des eaux de l'Atlantique Nord dans le Chenal Laurentien. Une diminution de ~0,4 ‰ de la composition isotopique ( $\delta^{18}\text{O}$ ) des tests carbonatés du foraminifère benthique *Bulimina exilis* indique un réchauffement des eaux profondes de près de 1,4°C depuis environ un siècle. Ces résultats démontrent que le développement de l'hypoxie des eaux profondes est un phénomène régional à l'échelle de l'Estuaire et du Golfe du St-Laurent. Ils indiquent également que la cause de la diminution récente en oxygène dissous dans le Golfe du St-Laurent n'est pas principalement liée à une augmentation de productivité primaire, tel qu'en avait été l'hypothèse dans des études réalisées dans l'Estuaire du St-Laurent, mais plutôt à une augmentation de la température de la couche d'eau profonde.

Mots clés : hypoxie, dinokystes, foraminifères benthiques, géochimie, Golfe du St-Laurent

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### *Objectifs de l'étude*

L'eutrophisation le long des marges continentales est souvent une source de préoccupation car il peut en résulter une hypoxie des eaux profondes (*e.g.* Cloern, 2001). Dans l'Estuaire du St-Laurent, sur la côte est du Canada, une diminution récente des concentrations en oxygène dissous a été démontrée par mesures directes (Gilbert *et al.*, 2005) ainsi que par l'analyse de séquences sédimentaires (Thibodeau *et al.*, 2006). Les mesures directes ont montré une réduction de 125 à 65  $\mu\text{mol L}^{-1}$  entre les années 1930 et le début du 21<sup>e</sup> siècle (Gilbert *et al.*, 2005), tandis que les données sédimentaires suggèrent une tendance ayant débuté dans les années 1960 (Thibodeau *et al.*, 2006). La teneur en oxygène dissous étant un paramètre essentiel pour les communautés aquatiques, cette tendance récente vers l'hypoxie aura un impact capital sur l'écologie de l'Estuaire et du Golfe du St-Laurent (Gilbert *et al.*, 2007).

L'une des hypothèses est que l'hypoxie dans l'Estuaire maritime du St-Laurent (EMSL) serait le résultat d'une augmentation des flux de carbone vers les fonds marins, conséquence d'une eutrophisation anthropique (Thibodeau *et al.*, 2006). Tel que démontré par Thibodeau *et al.* (2006) et Gilbert *et al.* (2005), l'utilisation croissante des fertilisants en agriculture est concomitante avec la réduction des teneurs en oxygène dissous dans l'EMSL. Cependant, une augmentation de la température des eaux profondes pourrait aussi partiellement expliquer la diminution récente des concentrations en oxygène dissous (Gilbert *et al.*, 2005).

Dans le but de vérifier l'étendue spatiale de la zone affectée par le développement de l'hypoxie ainsi que pour évaluer les changements de flux de carbone à une échelle de temps centenaire, nous avons analysé une carotte sédimentaire recueillie dans la partie centrale du Golfe du St-Laurent (48°20'N, 61°30'W, à 409 m de profondeur) (Fig.1). La carotte a été prélevée dans le chenal

Laurentien, à une profondeur de 409 m, où les eaux profondes proviennent de l'Atlantique nord. Bien que la position de la carotte soit éloignée de l'EMSL, les eaux profondes dans le chenal y ont la même origine et des caractéristiques similaires en ce qui a trait à la température et la salinité, ces dernières se situant autour de 4-6°C et ~34,6 respectivement (Dickie et Trites, 1983). Ainsi, en ce qui concerne les conditions benthiques, la carotte COR0503-CL05-37BC du Golfe du St-Laurent (GSL) permet une comparaison directe avec les carottes AH00-2220 et CR02-23 (Thibodeau *et al.*, 2006) prélevées dans l'EMSL.

Des approches micropaléontologiques et géochimiques ont été utilisées afin d'estimer les changements de productivité primaire et de conditions benthiques dans le GSL durant les derniers siècles. Les assemblages de dinokystes ont été utilisés pour reconstruire la productivité de surface, car leur distribution est liée à la production planctonique et à la disponibilité des nutriments (*e.g.*, Devillers et de Vernal, 2000; Pospelova *et al.*, 2002; Radi *et al.*, 2007). Les flux biogéniques ont été évalués à l'aide de mesures géochimiques (Corg, C/N) et isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) (*e.g.*, Bratton *et al.*, 2003; Meyers, 1997). Les foraminifères benthiques ont été utilisés comme traceurs de changements environnementaux dans les eaux profondes du GSL, car ils sont sensibles aux concentrations en oxygène dissous, aux flux de matière organique et aux propriétés physiques des masses d'eau (*e.g.*, Barmawidjaja *et al.*, 1995; Kaiho, 1994; Platon *et al.*, 2005). La composition isotopique ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) des tests de foraminifères benthiques, laquelle dépend de la salinité et de la température des eaux ambiantes, a été utilisée afin d'évaluer les changements de propriétés des eaux profondes du GSL (*e.g.*, Ravelo et Hillaire-Marcel, 2007).

### ***Contexte océanographique***

Le GSL est une mer semi-fermée de l'est du Canada, il possède un volume d'eau de 34500 km<sup>3</sup> et une profondeur moyenne de 152 m (Dickie et Trites, 1983). Le chenal Laurentien traverse le GSL sur une distance de 1240 km, du plateau

continental jusqu'à Tadoussac (Gilbert *et al.*, 2005), à des profondeurs pouvant atteindre 480 m dans la région de Cabot Strait (Dickie et Trites, 1983).

La productivité primaire annuelle intégrée dans le GSL était d'en moyenne  $210 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$  dans les années 1950-1960 (Steven, 1974). Les données satellitaires ont permis d'évaluer une productivité de l'ordre de  $186 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$  à  $293 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$  dans les années 1990-2000 (Radi et de Vernal, 2008). De telles valeurs de productivité sont élevées puisque la saison de production est réduite par un couvert de glace de mer s'étendant de Janvier à Avril (Dickie et Trites, 1983).

En été, la colonne d'eau est divisée en trois couches. La couche de surface est de 10 à 15 m d'épaisseur et est caractérisée par une eau relativement chaude et de salinité faible (27 à 32). Une couche intermédiaire froide ( $-0,5$  à  $1,0^\circ\text{C}$ ) et de salinité modérément faible (31,5 à 33) se forme durant l'hiver et s'étend sur une profondeur variant de 80 à 150 m. La couche profonde, remplissant le chenal Laurentien, est caractérisée par des eaux chaudes (4 à  $6^\circ\text{C}$ ) et salines ( $\sim 34,6$ ) (Dickie et Trites, 1983). Les eaux profondes sont le résultat d'un mélange, en proportions variées, d'eaux froides et riches en oxygène du Courant du Labrador avec des eaux chaudes et pauvres en oxygène de l'Atlantique Nord central (Gilbert *et al.*, 2005). Ces eaux pénètrent dans le GSL principalement par le Déroit de Cabot, et progressent vers la tête du chenal Laurentien en environ 3-4 ans (Gilbert, 2004). Une pycnocline permanente sépare les eaux profondes et intermédiaires des eaux de surface, et ainsi les isole de l'atmosphère. Cet isolement influence le contenu en oxygène dissous, lequel décroît graduellement au fur et à mesure que la masse d'eau se dirige vers le continent, à cause de l'oxydation et de la minéralisation de matière organique (Gilbert *et al.*, 2005). Les eaux profondes du Golfe et de l'Estuaire du St-Laurent sont donc particulièrement sensibles aux variations des teneurs en oxygène dissous, lesquelles sont influencées par les flux organiques et la température.

## CHAPITRE I

### RECENT CHANGES OF BOTTOM WATER OXYGENATION AND TEMPERATURE IN THE GULF OF ST. LAWRENCE: MICROPALAEONTOLOGICAL AND GEOCHEMICAL EVIDENCES.

Linda Genovesi<sup>1\*</sup>, Anne de Vernal<sup>1</sup>, Benoît Thibodeau<sup>1</sup>, Claude Hillaire-Marcel<sup>1</sup>,  
Taoufik Radi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOTOP UQÀM-McGill, Université du Québec à Montréal, Case Postale 8888,  
Succursale Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada, H3C 3P8  
Tel : +1-514-987-4080; Fax : +1-514-987-3635

\*Corresponding author: E-mail: [lindagenovesi@yahoo.ca](mailto:lindagenovesi@yahoo.ca)

## Abstract

The analysis of the micropaleontological and geochemical content of a sediment core collected in the Laurentian trough of the Gulf of St. Lawrence was conducted in order to reconstruct variations in pelagic productivity and benthic conditions during the last centuries and to verify the regional extent of the recent trend towards benthic hypoxia that was previously reported from the Lower St. Lawrence Estuary. Dinoflagellate cyst assemblages reveal relatively uniform pelagic conditions. Geochemical (organic C, C/N) and isotopic ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) data also suggest uniform organic fluxes during the last centuries. However, significant changes are recorded in the benthic foraminiferal assemblages. The increased percentage of *Cassidulina laevigata* and *Brizalina subaenariensis* in the upper core suggests that bottom waters experienced a lowering of dissolved oxygen concentration during the last ~65-45 years. Moreover, the decreased percentage of *Nonionellina labradorica* concomitant with the increased percentage of *Oridorsalis umbonatus* suggests a decrease in the influence of Labrador Current water relative to North Atlantic central water penetrating in the Laurentian Channel. The lowering of isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ) composition of *Bulimina exilis* by 0.4‰ indicates a warming of approximately 1.4°C in the bottom waters during the last century. These results demonstrate that the development of hypoxia in bottom waters is a regional phenomenon throughout the Estuary and Gulf of St. Lawrence. They also show that the cause of recent oxygen decrease in the Gulf of St. Lawrence is not primarily related to an increase in primary productivity, but rather to increased temperatures in the bottom water layer.

## 1.1 Introduction

Eutrophication along continental margins is often a source of concern, especially because it may result in bottom water hypoxia (e.g., Cloern, 2001). In the Lower St. Lawrence Estuary (LSLE), eastern Canada, a recent decrease of oxygen concentrations in bottom waters has been demonstrated both from direct measurements (Gilbert et al., 2005) and analyses of sedimentary sequences (Thibodeau et al., 2006). Direct measurements have shown a reduction from 125 to 65  $\mu\text{mol L}^{-1}$  from the 1930s to the beginning of the 21<sup>st</sup> century (Gilbert et al., 2005), whereas the sedimentary data suggests the trend started around the 1960s (Thibodeau et al., 2006).

It has been hypothesized that the hypoxia in the LSLLE originates from increased carbon fluxes to the sea floor due to eutrophication related to human activity (Thibodeau et al., 2006). As shown by Thibodeau et al. (2006) and Gilbert et al. (2007), the enhanced use of fertilizers for agricultural purposes is concomitant to the bottom water oxygen decrease in the LSLLE. However, an increase in bottom water temperatures can also partially explain the recent decrease of dissolved oxygen concentrations (Gilbert et al., 2005).

In order to verify the downstream extent of the trend towards hypoxia and changes in carbon fluxes at centennial scale, we analyzed a core collected in the central part of the Gulf of St. Lawrence (GSL) (Fig. 1). The core is from the deep Laurentian trough at 409 m depth, where bottom waters originate from the North Atlantic. Although the core location is distant from the LSLLE, bottom waters in the trough have the same origin and similar characteristics with respect to temperature and salinity, which establish at about 4-6°C and ~34.6 respectively (Dickie and Trites, 1983). Thus, core COR0503-CL05-37BC (48°20'N, 61°30'W; 409 m water depth) allows direct comparison with cores AH00-2220 (48°38'N, 68°37'W; 324 m water

depth) and CR02-23 (48°42'N, 68°38'W; 345 m water depth) collected in the LSLE (Thibodeau et al., 2006) as far as bottom water conditions are concerned.

Micropaleontological and geochemical proxies have been used to estimate changes in primary productivity and bottom water conditions of the GSL during the last centuries. The assemblages of dinoflagellate cysts were used to reconstruct the primary productivity of surface waters, as their distribution is related to planktonic production and nutrient availability (e.g., Devillers and de Vernal, 2000; Radi et al., 2007). Biogenic fluxes have also been evaluated using geochemical (organic carbon, C/N) and isotopic ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) measurements (e.g., Meyers, 1997; Bratton et al., 2003). Benthic foraminifer assemblages have been used as tracers of environmental changes in the bottom waters of the GSL, as they are very sensitive to oxygen concentration, organic matter fluxes and physical properties of the water masses (e.g., Kaiho, 1994; Barmawidjaja et al., 1995). The isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O}$ ) of benthic foraminifer shells, which is primarily dependant upon salinity and temperature, was used to evaluate changes in bottom water conditions (e.g., Ravelo and Hillaire-Marcel, 2007).

## 1.2 Oceanographic context

The Gulf of St. Lawrence is a semi-enclosed sea on the eastern coast of Canada, having a water volume of 34 500 km<sup>3</sup> and an average depth of 152 m (Dickie and Trites, 1983). The Laurentian Channel runs across the GSL on a distance of 1240 km, from the continental shelf to Tadoussac (Gilbert et al. 2005), with depths reaching 480 m in the region of Cabot Strait (Dickie and Trites, 1983).



Integrated annual primary production in the GSL was averaged at  $210 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  (Steven, 1974) in the 1950-1960s. The satellite data set led to evaluate productivity in the order of  $186 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  to  $293 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  in the 1990-2000s (Radi and de Vernal, 2008). Such productivity is high, especially taking into account the shortened production season because of sea-ice cover extending from January to April (Dickie and Trites, 1983).

In summer, the water column is divided into three layers. The upper layer is 10 to 15 m thick and is characterized by relatively warm water and low salinity (27 to 32). A cold intermediate layer ( $-0.5$  to  $1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) with moderately low salinity (31.5 to 33) forms during winter and extends to depths varying from 80 to 150 m. The deepest layer, which fills the Laurentian Channel, is characterized by warm temperatures (4 to  $6^{\circ}\text{C}$ ) and high salinities ( $\sim 34.6$ ) (Dickie and Trites, 1983). The bottom waters result from a mix in various proportions of cold and oxygen rich waters from the Labrador Current (LCW) with warm and oxygen poor North Atlantic central water (NACW) (Gilbert et al., 2005). They enter the Gulf at the edge of the continental shelf, in Cabot Strait principally, and progress landward to the head of the Laurentian Channel in about 3 to 4 years (Gilbert, 2004). A permanent pycnocline separates the bottom-intermediate waters from the surface layers, thus isolating them from the atmosphere and influencing the oxygen content which decreases gradually with respiration and organic matter mineralization as the water flows landward (Gilbert et al., 2005). The deep waters of the Gulf and Estuary of St. Lawrence are thus particularly sensitive with respect to dissolved oxygen concentration, which may be affected by any changes in organic fluxes or bottom temperature variations.

### 1.3 Material and methods

#### 1.3.1 Sampling

Undisturbed sediment core COR0503-CL05-37BC was recovered in 2005 at 409 m water depth in the Laurentian Channel, south of Anticosti Island (48°20'N, 61°30'W) on board the R/V Coriolis II. The sediment was collected using an Ocean Instrument Mark II box corer in which was inserted a push-core. The 38 cm long core was subsampled at 0.5 cm intervals in the upper 15 cm, and at 1 cm intervals for the lower part of the core. Subsampling was performed using a custom-made holding device, which enabled to push the sediment through the plastic liner at pre-determined intervals.

#### 1.3.2 Core chronology

Lead-210 activities of dried and crushed samples were obtained indirectly by measuring the decay rate of its daughter isotope  $^{210}\text{Po}$  ( $t_{1/2} = 138.4$  days;  $\alpha = 5.30$  MeV) by alpha spectrometry. A Polonium-209 spike was added to the samples to determine the extraction and counting efficiency. Polonium was extracted and purified by chemical treatments (reacted sequentially with HCl, HNO<sub>3</sub>, HF and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) and deposited on a silver disk (Flynn, 1968). The  $^{209-210}\text{Po}$  activities were measured in a silicon surface-barrier  $\alpha$ -spectrometer (EGG&ORTEC type 576A).

The  $^{210}\text{Pb}$  activity profile of core COR0503-CL05-37BC (fig. 2) was used to evaluate the values for the supported  $^{210}\text{Pb}$  fraction. Supported activity values ranging from  $2.34 \pm 0.36$  dpm g<sup>-1</sup> to  $2.04 \pm 0.12$  dpm g<sup>-1</sup> have been calculated from the asymptotic trend, as shown by Zhang (2000) and Jennane (1992) in the Gulf of St. Lawrence. The lowest  $^{210}\text{Pb}$  activity value of  $1.89 \pm 0.05$  dpm g<sup>-1</sup> has also been used as a supported fraction possibility (Zhang, 2000).

On these bases, range of excess  $^{210}\text{Pb}$  activities were obtained by subtracting the supported activity values from the  $^{210}\text{Pb}$  activity profile. Different sedimentation rates (considering constant rate supply) were thus calculated using the radioactive decay constant ( $\lambda$ ) of  $^{210}\text{Pb}$  and the linear regression slope of the logarithmic function of excess  $^{210}\text{Pb}$  below the mixed layer (Fig.2) (Zhang, 2000; Sorgente et al. 1999; Jennane, 1992).

Cesium-137 was measured by  $\gamma$ -ray spectrometry at 661.6 keV with a Canberra low-background high-purity Ge well-detector. The reproductibility of  $^{137}\text{Cs}$  activities was estimated to  $\sim \pm 1\%$  by replicate analyses ( $n=6$ ) of the standard reference material IAEA-300 (Baltic Sea sediment).

### *1.3.3 Micropaleontological analysis*

Sediment samples were treated according to the procedure described by de Vernal et al. (1999). A known volume of humid sediments was weighed, dried at room temperature, and weighed once more to determine the water content of the samples. Dried sediments were sieved through 106  $\mu\text{m}$  and 10  $\mu\text{m}$  mesh sieves. The fraction greater than 106  $\mu\text{m}$  was dried and weighed. It was used for the examination of the benthic foraminiferal tests with a binocular microscope (x40). Calcareous and agglutinated species were hand-picked, counted and identified using the nomenclature of Rodrigues (1980). In this paper we report the total concentration of benthic foraminifer shells, as well as the relative abundance of the most abundant taxa.

The 10  $\mu\text{m}$  to 106  $\mu\text{m}$  fraction was submitted to a series of treatments, with hydrochloric acid (HCl 10%) and hydrofluoric acid (HF 49%) to dissolve carbonate and silica particles (for details see de Vernal et al., 1999). The residue was then sieved through a 10  $\mu\text{m}$  mesh sieve, and finally mounted between a slide and a cover slide in glycerine gel. The slides were examined under an optical microscope at 400x

magnification, all palynomorphs were counted. Tablets of *Lycopodium* spores were previously added to the samples to calculate the palynomorph concentrations. Here we present the dinocyst concentration, as they provide indication on fluxes of organic matter from terrestrial source or related to pelagic production. Details concerning other palynomorphs (pollen grains, spores, organic linings of foraminifera) are reported in Annexe A. The nomenclature used for the identification of dinocysts is that of Rochon et al. (1999). Percentages of the main taxa are reported here, and we have applied the best analogue method for reconstructing primary paleoproductivity. The methodology for this approach is described by Radi and de Vernal (2008). The reference productivity data used are CZCS (Antoine et al., 1996) and MODIS (Berhenfeld and Falkowski, 1997). The validation exercises indicate that the accuracy of reconstruction is  $\pm 34.16 \text{ gC m}^{-2}$  using CZCS, and  $\pm 54.97 \text{ gC m}^{-2}$  using MODIS (Radi and de Vernal, 2008).

#### 1.3.4 Sediment Carbon and Nitrogen analyses ( $\%C_{org}$ , $\delta^{13}C$ , $C/N$ , $\delta^{15}N$ )

Total carbon (TC) and total nitrogen (TN) contents of the dried and crushed samples were determined with a Carlo Erba<sup>TM</sup> NC 2500 elemental analyzer. Inorganic carbon (IC) was analyzed independently using a UIC Coulometrics<sup>TM</sup> coulometer following acidification of the samples and  $\text{CO}_2$  extraction. The organic carbon (OC) content was obtained from difference between total carbon and inorganic carbon. Precision, as determined from replicate measurements of Organic Analytical Standard substances (Acetanilide, Atropine, Cyclohexanone-2.4-Dinitrophenyl-Hydrazone and Urea), is estimated at  $\pm 0.1\%$  for OC and  $\pm 0.3\%$  for N contents. The analytical reproducibility is  $\pm 5\%$ .

For the isotopic analyses, samples were acidified with liquid HCl (1N), dried and crushed. The isotopic composition of the OC was measured with a Carlo Erba<sup>TM</sup> elemental analyzer online with a Micromass Isoprime<sup>TM</sup> mass spectrometer. Data are

reported in  $\delta$  (‰) with reference to V-PDB (Coplen, 1995). The analytical uncertainty is  $\pm 0.1$  ‰ for the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $0.2$  ‰ for the  $\delta^{15}\text{N}$  values, as determined from replicate measurements of standard materials during analytical runs. The international standards IAEA-C6 sucrose and IAEA-N2 were measured several times during the isotopic analyses and yielded respectively an average value of  $\delta^{13}\text{C} = -10.73 \pm 0.02$  ‰ for  $n=4$  whereas the reported value is  $-10.8 \pm 0.1$  ‰ and  $\delta^{15}\text{N} = 20.20 \pm 0.24$  ‰ for  $n=4$  whereas the reported value is  $20.41 \pm 0.12$  ‰.

#### *1.3.5 Oxygen and carbon isotopes analyses in benthic foraminifera shells ( $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$ )*

In each sample, approximately a dozen benthic foraminifer shells of *Bulimina exilis* were hand picked from the 150-250  $\mu\text{m}$  fraction. The calcareous shells were roasted at  $\sim 200^\circ\text{C}$  under vacuum for about 2 hours, and then analyzed with a Micromass Isoprime<sup>TM</sup> isotope ratio mass spectrometer in dual inlet mode coupled to a MultiCarb<sup>TM</sup> preparation system.  $\text{CO}_2$  was extracted at  $90^\circ\text{C}$  by acidification with 100% concentration  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Measurements were made with internal reference carbonate material calibrated against the V-PDB scale. The analytical reproducibility determined by replicate measurements of the internal standard material is routinely better than 0.05 ‰.

## 1.4 Results

### 1.4.1 Excess $^{210}\text{Pb}$ , $^{137}\text{Cs}$ activity and sedimentation rate

The  $^{210}\text{Pb}$  profile depicts a fairly large departure from the theoretical negative exponential behaviour (Fig. 2a). The upper 2 cm could possibly respond to some benthic mixing, they were therefore excluded from the calculation of sedimentation rates. Changes in trends suggest variable  $^{210}\text{Pb}$  excess fluxes and/or sediment fluxes and supported  $^{210}\text{Pb}$  fraction, likely related to grain-size variability and mineralogical composition of sediments (i.e., reworked Paleozoic clays, eroded Paleozoic carbonates, Goldthwait Sea sediments, etc.).

A range of estimated sedimentation rates can however be obtained. As suggested by Zhang (2000) and Jennane (1992) for nearby sites, we have used the asymptotic trend of the  $^{210}\text{Pb}$  activity profile to calculate a range of supported  $^{210}\text{Pb}$  fractions. The average values of the sub-asymptotic part of the curve below 13 cm, 16 cm, 20 cm and 26 cm yielded supported fraction values of  $2.34 \pm 0.36 \text{ dpm g}^{-1}$ ,  $2.24 \pm 0.28 \text{ dpm g}^{-1}$ ,  $2.16 \pm 0.21 \text{ dpm g}^{-1}$  and  $2.04 \pm 0.12 \text{ dpm g}^{-1}$ , respectively. Zhang (2000) also suggests the use of the lowest most  $^{210}\text{Pb}$  activity value as a first order estimate for the supported fraction, in this case  $1.89 \pm 0.05 \text{ dpm g}^{-1}$ . Therefore, in order to establish age models for core COR0503-CL05-37BC and estimate minimal and maximal sedimentation rates, we have used a range of supported  $^{210}\text{Pb}$  values, from  $2.34 \pm 0.36$  to  $1.89 \pm 0.05 \text{ dpm g}^{-1}$ , respectively yielding minimal (Fig. 2b) and maximal (Fig.2c) age models (cf. Annexe D for details). In Figure 2b, the excess  $^{210}\text{Pb}$  values of the minimal age model expressed on a logarithmic scale are fit to a simple linear regression with a slope of  $-0.24$  ( $R^2=0.97$ ), and suggest a minimum sedimentation rate of  $0.13 \text{ cm yr}^{-1}$ . In Figure 2c, the linear regression from the maximal age model shows a slope of  $-0.17$  ( $R^2=0.97$ ), thus suggesting a maximum sedimentation rate of  $0.18 \text{ cm yr}^{-1}$ . Assuming reasonably constant  $^{210}\text{Pb}$  excess fluxes and supported fractions, we estimate sedimentation rates to range between 0.13 and

0.18 cm yr<sup>-1</sup>. Core COR0503-CL05-37BC would therefore represent between 290 and 210 years of sedimentation (Fig. 2e).

Measurement of <sup>137</sup>Cs activity shows a peak at ~4.25 cm (Fig. 2d), which corresponds to the maximum activity of artificial radionuclides originating from atmospheric nuclear testing during the period 1952-1972, the maximum intensity of which is estimated to be around 1963 (Jouanneau et al., 1999). The <sup>137</sup>Cs activity peak is consistent with the age models obtained by excess <sup>210</sup>Pb activity data, and tends to support the hypothesis of minimal sedimentation rate of 0.13 cm yr<sup>-1</sup>. Furthermore, the analysis of sedimentary sequences from nearby sites in the Gulf of St. Lawrence also suggest sedimentation rates closer to our minimal value of 0.13 cm yr<sup>-1</sup> (Silverberg et al., 1986; Jennane, 1992; Zhang, 2000). Taking into account such sedimentation rates, the micropaleontological and geochemical analyses which were performed at 1 cm interval, permit to achieve temporal resolution at a decadal scale.

#### 1.4.2 Dinocyst assemblages

The dinocyst concentrations (Fig. 3a) show high frequency oscillations but no clear trend. The values vary between 30 000 cysts g<sup>-1</sup> and 90 000 cysts g<sup>-1</sup> and average at 51 770 cysts g<sup>-1</sup>. The dinocyst assemblage (Fig. 3b) is dominated by two taxa, *Pentapharsodinium dalei* and *Islandinium minutum*, which respectively represent approximately ~34% and ~30% of the assemblage. Other important species include *Operculodinium centrocarpum* (~13%), *Nematosphaeropsis labyrinthus* (~12%) and *Brigantedinium* spp. (5%). The following taxa were also present but only represented 2% or less of the assemblage: *Spiniferites elongatus*, *Spiniferites ramosus*, *Islandinium ? cesare*, *Selenopemphix quanta*, *Spiniferites* spp., *Ataxiodinium choane*, *Alexandrium tamarense*. The relative abundances of each taxa show no significant trend, thus suggesting relatively uniform sea-surface conditions.

It also suggests that the pelagic productivity in the Gulf of St. Lawrence has remained stable for the past few centuries.

In the upper centimeter of the core, however, we note a decrease in the abundance of heterotrophic taxa, from ~30% to ~8% for *Islandinium minutum* and from ~5% to ~0.6% for *Brigantedinium* spp. This could result from a very recent change in trophic and/or hydrographic conditions (e.g., Radi and de Vernal, 2008).

#### 1.4.3 Transfer functions

Transfer functions based on the modern analogue technique and using the productivity databases of Antoine et al. (1996) and MODIS (Behrenfeld et al., 1997) were applied to reconstruct primary production. The results using the data from Antoine et al. (1996) average around  $182 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  (Fig. 4a). These values are approximately  $100 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  lower than results obtained by using the database of MODIS (Behrenfeld et al., 1997), which average around  $283 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  (Fig. 4b). Regional discrepancies between the two reference data sets are recorded in many areas of the northern hemisphere (Radi and de Vernal, 2008). These differences may be due to the use of different algorithms, different data acquisition processes or different productivity values between the 1980s and 2000s (Radi and de Vernal, 2008). In any case, the reconstructions made from both databases show relatively uniform values of annual primary production, with high frequency oscillations and no clear trend, suggesting a uniform primary productivity throughout the core.

#### 1.4.4 Geochemistry of organic matter in sediments

Geochemical content of the sediment remain constant throughout the core, with few variations and no significant trend (Fig. 5).  $C_{\text{org}}$  oscillates between 0.9 % and 1.2 %, C/N ratio between 5.68 and 6.66. The  $\delta^{13}\text{C}$  average is ~ 22.3 ‰, and the



$\delta^{15}\text{N}$  is  $\sim 6.1$  ‰. These values are typical of marine organic matter (Meyers, 1997) and lie in the lower most range of values reported for the Laurentian Channel (Muzuka and Hillaire-Marcel, 1999). Nevertheless, we note slight trends towards higher  $C_{\text{org}}$  contents, and lower C/N and  $\delta^{15}\text{N}$  values towards the core top. These changes could be attributed to a selective degradation of the carbon and/or nitrogen from the organic matter in the sediment during early diagenesis (Meyers, 1997; Muzuka and Hillaire-Marcel, 1999).

#### 1.4.5 Benthic foraminifer assemblages

The total benthic foraminifer concentrations (Fig. 6a) vary from 4 to 21 tests  $\text{g}^{-1}$ , and average at  $\sim 9.6$  tests  $\text{g}^{-1}$ . They oscillate but show no trend. Among calcareous taxa, the dominant species are *Bulimina exilis*, *Bulimina marginata*, *Elphidium excavatum*, *Nonionella labradorica* and *Oridorsalis umbonatus*. Secondary species include *Globobulimina auriculata*, *Quinqueloculina seminulum*, *Lagena* sp., *Brizalina subaenariensis*, *Cassidulina laevigata* and *Glandulina* sp.

The benthic foraminifer assemblages are dominated by calcareous taxa (Fig. 6b), except in the upper part of the core, where agglutinated species are more abundant. The presence of agglutinated taxa in the upper portion of the core is difficult to interpret. This is why they are treated separately from the calcareous species in the calculation of concentration and relative abundance. The agglutinated foraminifer tests are fragile because the particles forming the tests are cemented together by organic matter, and their resistance to diagenetic effects, although difficult to quantify, seems generally low (Murray, 1991). However, one cannot totally discard other processes leading to such a distribution. For example, the progression of hypoxia may also have contributed to a reduction of the oxidizing properties of the bottom waters of the GSL, thus increasing the preservation potential

of these fragile taxa (Barmawidjadja et al., 1995). However, their presence could also relate to the establishment of new species due to changing bottom water conditions.

Many changes occur in the calcareous foraminiferal assemblage of the upper 8 cm of the core. An important decrease can be observed in the relative abundance of *Bulimina marginata*, *Lagena* sp., *Quinqueloculina seminulum*, *Glandulina* sp. and *Elphidium excavatum*. The progressive increase in relative abundance of *Brizalina subaenariensis* and *Cassidulina laevigata* is consistent with the development of hypoxia in the GSL, as these taxa are generally associated with oxygen depleted environments (e.g., Mendes et al., 2004; Murray, 1991; Sen Gupta and Machain-Castillo, 1993). We also note a decrease from ~30 % to 0 % in the relative abundance of *Nonionellina labradorica*, a species occurring under the cold waters of the Labrador shelf (Bilodeau et al., 1994). This can simultaneously be observed with an increase from ~5 % to 30 % of *Oridorsalis umbonatus*, a species common in surface sediments bathed by warm waters of the North Atlantic (Bilodeau et al., 1994; Murray, 1991).

#### 1.4.6 Isotopic composition of benthic foraminifera shells

$\delta^{18}\text{O}$  isotopic analysis of the calcareous shells of *Bulimina exilis* (Fig. 7a) yielded values slightly decreasing from core bottom to core top, with two distinct trends. Between 37 and 16 cm,  $\delta^{18}\text{O}$  values decrease from ~3.23 ‰ to ~3.09 ‰ upward. From 16 cm to the top, a more important change is recorded with  $\delta^{18}\text{O}$  values decreasing from ~3.09 ‰ to ~2.72 ‰.

Entering these values in the following paleotemperature equation of Shackleton (1974), the  $\delta^{18}\text{O}$  shifts may correspond to a temperature increase of ~0.53°C (37-16 cm) and ~1.36°C (16-0 cm), and/or a change in the isotopic composition of the ambient seawater.

$$t = 16.9 - 4.38(\delta^{18}\text{O}_c - A) + 0.10(\delta^{18}\text{O}_c - A)^2, \text{ with } A = (\delta^{18}\text{O}_w - 0.27)$$

Where  $t$  represents the temperature (in °C) during the precipitation of calcite,  $\delta^{18}\text{O}_c$  is the isotopic composition of calcite (versus the V-PDB standard), and  $\delta^{18}\text{O}_w$  is the isotopic composition of the ambient water (versus the SMOW standard). The value used for the isotopic composition of ambient water ( $\delta^{18}\text{O}_w$ ) is 0.07 ‰, which represents an average of  $\delta^{18}\text{O}$  measurements made at depths between 350 and 450 m in the region of the Gulf of St. Lawrence (data from the *Global Seawater  $\delta^{18}\text{O}$  Database*; cf. Schmidt et al., 1999).

$\delta^{13}\text{C}$  isotopic analysis of *Bulimina exilis* (Fig.7b) shows a trend different from that of  $\delta^{18}\text{O}$ . The lower part of the core, from 37 to 10 cm, shows a progressive decrease from  $\sim -1.63$  ‰ to  $\sim -1.99$  ‰. In the upper part of the core,  $\delta^{13}\text{C}$  values decrease rapidly from  $\sim -1.99$  ‰ to  $\sim -2.37$  ‰ between 10 to 5 cm, and then increase from  $\sim -2.37$  ‰ to  $\sim -2.12$  ‰ between 5 cm and the core top. Because *Bulimina exilis* is an endobenthic species, the  $\delta^{13}\text{C}$  values are influenced by the  $\text{CO}_2$  produced by the decay of buried organic matter (Muzuka and Hillaire-Marcel, 1999). Therefore the  $\delta^{13}\text{C}$  cannot be used to support any of the above mentioned processes or combination of processes invoked for explaining the change in oxygen isotope composition (i.e., an increase in temperature or a change in isotopic composition of ambient water).

## 1.5 Discussion

The recent trend towards hypoxia in the bottom waters of the Gulf of St. Lawrence could be related to increased biogenic production and organic carbon fluxes. In order to verify this hypothesis, we have examined several proxies of productivity, including the organic carbon content, its isotopic composition, the C/N ratio, and organic walled microfossils. In the study sequence, organic carbon (Corg)

records a subtle  $\sim 0.2\%$  increase towards the surface, which may correspond to an early diagenetic profile (Meyers, 1997). It may also reflect better preservation of the organic matter brought on by the progression of hypoxia in the GSL, as the decrease of dissolved oxygen concentrations in the water results in a shorter penetration depth of  $O_2$  into sediments, and thus in a shorter exposition period of the organic matter to  $O_2$  (Meyers, 1997). The isotopic composition of organic carbon ( $\delta^{13}C$ ) and nitrogen ( $\delta^{15}N$ ) and the C/N ratio of organic matter indicate a steady source with fluxes predominantly from marine origin (e.g., Meyers, 1997). Complementary to these measurements, the palynological data also suggest relatively uniform pelagic fluxes. The dinoflagellate cyst assemblages and concentrations do not record important variations, and the reconstruction of primary productivity suggests relatively uniform production through time. Thus, none of the tracers indicate a major change in productivity and organic carbon fluxes at the scale of the last 2 or 3 centuries. This contrasts with the findings of Thibodeau et al. (2006) who provided evidence for a recent pelagic productivity increase in the LSLE based on the same proxies. Clearly, if pelagic fluxes and enhanced degradation of organic matter can be invoked to explain the trend towards hypoxia in the LSLE, such is not the case in the GSL. Therefore, the change in bottom water conditions, independent from surface parameters, necessarily plays a determinant role on the regional development of hypoxia.

Benthic foraminifera are indicators of benthic conditions including temperature, salinity, productivity, oxygenation, etc. (e.g., Barmawidjaja et al., 1995; Kaiho, 1994). They have also often been used as tracers of hypoxia (e.g., Osterman, 2003; Tsujimoto et al., 2006). Important changes occurred in the foraminiferal assemblage of the upper 8 cm of core COR0503-CL05-37BC. Certain species, such as *Bulimina marginata*, *Elphidium excavatum*, *Nonionellina labradorica*, *Lagena* sp., *Glandulina* sp., decrease strongly in abundance and disappear in some cases. The precise cause responsible for the change in the distribution of these foraminifera

cannot be assessed unequivocally since the tolerance limits of these species to the physical and chemical properties of water masses are poorly known (Sen Gupta and Machain-Castillo, 1993). Nevertheless, the general decrease in species diversity reflects an increased stress in the environment. This is consistent with the increased relative abundance of *Brizalina subaenariensis* and *Cassidulina laevigata* in the upper part of the core, as these two species are tolerant to low-oxygen concentrations (e.g., Mendes et al., 2004; Murray, 1991; Sen Gupta and Machain-Castillo, 1993). Therefore, the overall foraminifer assemblages suggest an increased environmental stress as a response to the decreasing dissolved oxygen content in bottom waters. According to our age models, these changes may have started between the 1940s and 1960s, which is in accordance with the development of hypoxia described by Gilbert et al. (2005).

Gilbert et al. (2005, 2007) interpret the oxygen depletion in the LSLE as being possibly caused by two factors: an increase in fluxes of organic matter from the surface to the seafloor, and a modification of the proportion of LCW and NACW entering the Laurentian Channel. Using temperature and salinity measurements of the LCW and NACW, they have calculated that in the 1930s the waters filling the Laurentian Channel were composed of approximately 72% LCW and 28% NACW, but since the 1980s these proportions have changed to 53% LCW and 47% NACW. These waters would therefore be 1.65°C warmer (Gilbert et al., 2005). Such a change in the relative proportion of cold and oxygen rich LCW to warm and oxygen poor NACW is recorded both by the benthic foraminifer assemblages and the stable isotope composition of benthic foraminifers. The relative abundance of *Nonionellina labradorica*, a species abundant in the Labrador Sea (Bilodeau et al., 1994), decreases by ~30% while *Oridorsalis umbonatus*, a species common under North Atlantic waters (Bilodeau et al., 1994; Murray, 1991), increases by ~25%. Furthermore, the  $\delta^{18}\text{O}$  of benthic foraminifer shells indicates a shift in bottom water temperature. An increase of temperature of about 0.5°C is recorded from ~1730/1810 to ~1880/1910,

followed by a warming of at least 1.4°C from the turning of the century (~1880/1910) to 2005. According to Gilbert et al. (2005, 2007), this increased bottom water temperature is accompanied by an increase in salinity, and since the isotopic composition of the ambient water is dependant upon salinity (Ravelo and Hillaire-Marcel, 2007), the temperature change we calculated from  $\delta^{18}\text{O}$  measurements may be underestimated. As suggested by Gilbert et al. (2005, 2007), this observed warming of bottom waters may be the consequence of changing proportions of LCW and NACW entering the LC. An increase of temperature in sub-surface waters of the North Atlantic and Labrador Sea during the last decades could also be invoked (Levitus et al., 2000).

## 1.6 Conclusion

Micropaleontological and geochemical analysis of sediment core COR0503-CL05-37BC collected in the Gulf of St. Lawrence shows no evidence of an increase in primary production to explain the recent hypoxia. They rather seem to demonstrate that the recent oxygen depletion in the GSL is due to changes of the proportions of LCW and NACW entering the Laurentian Channel, and thus of an increase of bottom water temperature. This is supported by the benthic foraminifer assemblages, particularly by the decrease of *Nonionellina labradorica* concomitant to the increase of *Oridorsalis umbonatus*, and by the isotopic composition of benthic foraminifera shells, which indicate ~1.9°C warming of the bottom waters in the Gulf of St. Lawrence.

Our study demonstrates that the bottom water conditions in the Laurentian channel are not only sensitive to eutrophication, but also to temperature which is a

parameter that depends on ocean circulation and global thermal balance. The recent trend toward increasing temperature in the LSLE and GSL can be a manifestation of the recent climate warming or can be part of natural variability. In order to determine the respective influence of the natural variability and anthropogenic forcing, the study of longer time series is needed.

## References

Antoine, D., André, J-M., Morel, A. 1996. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll. *Global Biochem. Cy.* **10**:57-69

Barmawidjaja, D.M., Van der Zwaan, G.J., Jorissen, F.J., Puskaric, S., 1995. 150 years of eutrophication in the northern Adriatic sea: Evidence from a benthic foraminiferal record. *Mar. Geol.* **122**: 367-384

Berhenfeld, M.J., Falkowski, P.G., 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* **42**: 1-20

Bilodeau, G., de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., 1994. Benthic foraminiferal assemblages in Labrador Sea sediments: relations with deep-water mass changes since deglaciation. *Can. J. Earth Sci.* **31**: 128-138.

Bratton, J.F., Colman, S.M., Seal, R.R., 2003. Eutrophication and carbon sources in Chesapeake Bay over the last 2700 yr: Human impacts in context. *Geochim. Cosmochim. Ac.* **67**: 3385-3402

Cloern, J.E., 2001. Our evolving conceptual model of the costal eutrophication problem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **210**: 223-253

Coplen, T.B., 1995. Discontinuance of SMOW and Pdb. *Nature* **375**: 285

de Vernal, A., Henry, M., Bilodeau, G., 1999. Thechniques de préparation et d'analyse en micropaléontologie. Les cahiers du GEOTOP.



Devillers, R., de Vernal, A., 2000. Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments of the northern North Atlantic in relation to nutrient content and productivity in surface waters. *Mar. Geol.* **166**: 103-124

Dickie, L.M., Trites, R.W., 1983. The Gulf of St. Lawrence. p. 403-425 *In* Ketchum, H. (Ed), *Estuaries and enclosed seas*. Elsevier Scientific Publishing company, Amsterdam-Oxford-New York

Flynn, W.W. 1968. The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials. *Anal. Chim. Acta* **43**: 221-227

Gilbert, D. 2004. Propagation of temperature signals from the northwest Atlantic continental shelf edge into the Laurentian Channel. ICES CM 2004/N:07

Gilbert, D., Sundby, B., Gobeil, C., Mucci, A., Tremblay, G-H., 2005. A seventy-two year record of diminishing deep-water oxygen in the St. Lawrence estuary: The northwest Atlantic connection. *Limnol. Oceanogr.* **50**: 1654-1666

Gilbert, D., Chabot, D., Archambault, P., Rondeau, B., Hébert, S. 2007. Appauvrissement en oxygène dans les eaux profondes du St-Laurent marin : causes possibles et impacts écologiques. *Le Naturaliste Canadien*, **131**: 67-75

Jennane, A. 1992. Application de la méthode du plomb-210 dans l'Estuaire maritime et le Golfe du St-Laurent. Taux de sédimentation, flux et modes d'ablation. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal.

Jouanneau, J.M., Castaing, P., Grousset, F., Buat-Menard, P., Pedemay, P., 1999. Recording and chronology of a cadmium contamination by Cs-137 in the Gironde estuary (SW France). *C.R. Acad. Sci. Sér. II, Sci. Terre Planètes* **329**: 265-270

- Kaiho, K., 1994. Benthic foraminiferal dissolved-oxygen index and dissolved-oxygen levels in the modern ocean. *Geology* **22**: 719-722
- Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T.P., Stephens, C. 2000. Warming of the world oceans. *Science* **287**: 2225-2229.
- Mendes, I., Gonzalez, R., Dias, J.M.A., Lobo F., Martins V., 2004. Factors influencing recent benthic foraminifera distribution on the Guadiana shelf (Southwestern Iberia). *Mar. Micropaleontol.* **51**:171–192
- Meyers, P.A., 1997. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Org. Geochem.* **27**: 213-250
- Murray, J.W., 1991. Ecology and palaeoecology of benthic foraminifera. Longman Scientific & Technical
- Muzuka, A.N.N., Hillaire-Marcel, C. 1999. Burial rates of organic matter along the eastern Canadian margin and stable isotope constraints on its origin and diagenetic evolution. *Mar. Geol.* **160**: 251-270
- Osterman, L.E., 2003. Benthic foraminifers from the continental shelf and slope of the Gulf of Mexico: an indicator of shelf hypoxia. *Estuar. Coast. Shelf S.* **58**: 17-35
- Radi, T., de Vernal, A., 2008. Dinocysts as proxy of primary productivity in mid-high latitudes of the Northern Hemisphere. *Mar. Micropaleontol.* **68**: 84-114
- Radi, T., Pospelova, V., de Vernal, A., Barrie, J.V., 2007. Dinoflagellate cysts as indicators of water quality and productivity in British Columbia estuarine environments. *Mar. Micropaleontol.* **62**: 269-297

Ravelo, A.C., Hillaire-Marcel, C. 2007. The use of oxygen and carbon isotopes of foraminifera in paleoceanography. p. 735-760. *In* C. Hillaire-Marcel and A. de Vernal [eds], Developments in marine geology Volume 1: Proxies in late Cenozoic paleoceanography.

Rochon, A., de Vernal, A., Turon, J-L., Matthiessen, J., Head, M.J., 1999. Distribution of recent dinoflagellate cysts in surface sediments from the North Atlantic ocean and adjacent seas in relation to sea-surface parameters. *Am. Assoc. Stratigr. Palynol. Found.* **35**

Rodrigues, C.G., 1980. Holocene microfauna and paleoceanography of the Gulf of St. Lawrence. Ph.D. Thesis. Carleton University

Schmidt, G.A., Bigg, G. R., Rohling, E. J. 1999. Global Seawater Oxygen-18 Database. <http://data.giss.nasa.gov/o18data/>

Sen Gupta B.K., Machain-Castillo, M.L. 1993. Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Mar. Micropaleontol.* **20**: 183-201

Shackleton, N.J., 1974. p.203-209. *In* J. Labeyrie [ed], Méthodes quantitatives d'études des variations du climat au cours du Pléistocène, Éditions du CNRS

Silverberg, N., Nguyen, H.V., Delibrias, G., Koide, M., Sundby, B., Yokoyama, Y., Chesselet, R., 1986. Radionuclide profiles, sedimentation rates, and bioturbation in modern sediments of the Laurentian through, Gulf of St. Lawrence. *Oceanol. Acta*, **9**: 285-290

Sorgente, D., Frignani, M., Langone, L., Ravaioli, M., 1999. Chronology of marine sediments : interpretation of activity-depth profiles of  $^{210}\text{Pb}$  and other radioactive

tracers, Part I. Technical Report n.54, Consiglio nazionale delle ricerche istituto per la geologia marina, Bologna.

Steven, D.M., 1974. Primary and secondary production in the Gulf of St. Lawrence. Mar. Sci. Centre, McGill Univ., Rep. **26**

Thibodeau, B., de Vernal, A., Mucci, A., 2006. Recent eutrophication and consequent hypoxia in the bottom waters of the Lower St. Lawrence Estuary: Micropaleontological and geochemical evidence. *Mar. Geol.* **231**: 37-50

Tsujimoto, A., Nomura, R., Yasuhara, M., Yamazaki, H., Yoshikawa, S. 2006. Impact of eutrophication on shallow marine benthic foraminifers over the last 150 years in Osaka Bay, Japan. *Mar. Micropaleontol.* **60**: 258-268

Zhang, D. 2000. Fluxes of short-lived radioisotopes in the marginal basins of eastern Canada. Ph.D. Thesis, Université du Québec à Montréal.

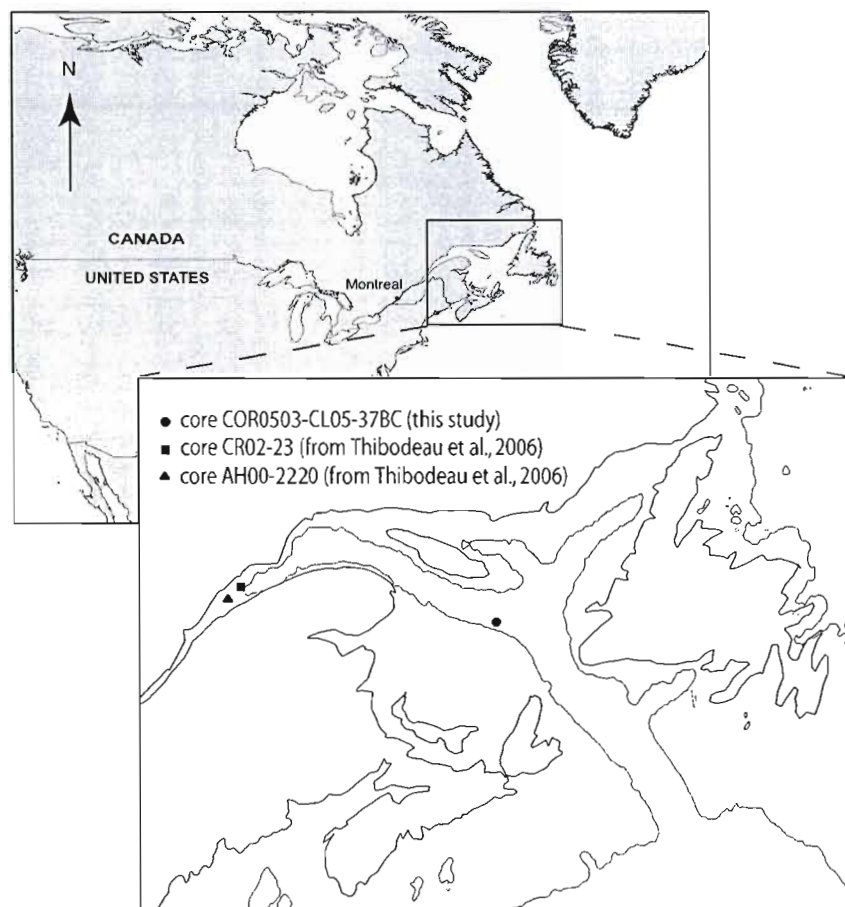


Figure 1. Map of the study area showing location of coring sites. The circle corresponds to core COR0503-CL05-37BC from the Gulf of St. Lawrence ( $48^{\circ}20'N$ ,  $61^{\circ}30'W$ ; at 409 m water depth). The square and triangle respectively correspond to cores CR02-23 ( $48^{\circ}42'N$ ,  $68^{\circ}38'W$ ; at 345 m water depth) and AH00-2220 ( $48^{\circ}38'N$ ,  $68^{\circ}37'W$ ; at 324 m water depth) collected in the Lower St. Lawrence Estuary and analysed by Thibodeau et al. (2006). The bathymetric contour represents 200 m.

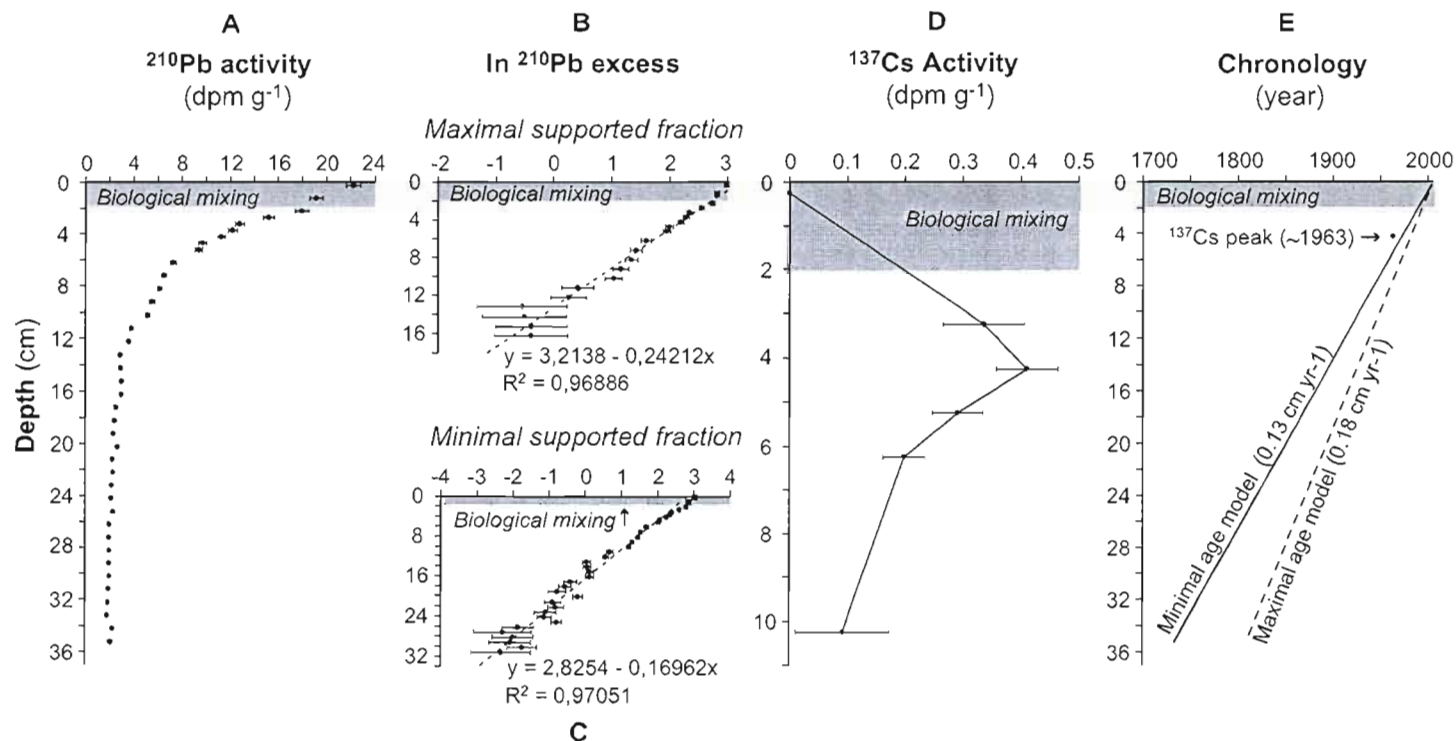


Figure 2. In core COR0503-CL05-37BC, A)  $^{210}\text{Pb}$  activity profile (dpm g<sup>-1</sup>) as a function of depth; B-C) excess  $^{210}\text{Pb}$  (ln) of maximal ( $2.34 \pm 0.36$  dpm g<sup>-1</sup>) and minimal ( $1.89 \pm 0.05$  dpm g<sup>-1</sup>) supported fraction as a function of depth, the dotted lines represent the linear regressions used to calculate sedimentation rates; D)  $^{137}\text{Cs}$  activity profile (dpm g<sup>-1</sup>) as a function of depth; E) chronology (years) as a function of depth, the dot represents the  $^{137}\text{Cs}$  peak which corresponds to approximately 1963. The upper 2 cm of the core (in grey) represent a layer of biological mixing. These upper samples were not taken into account in the calculation of sedimentation rates. Note that y-axis, although all representing depth (cm), have different scales.

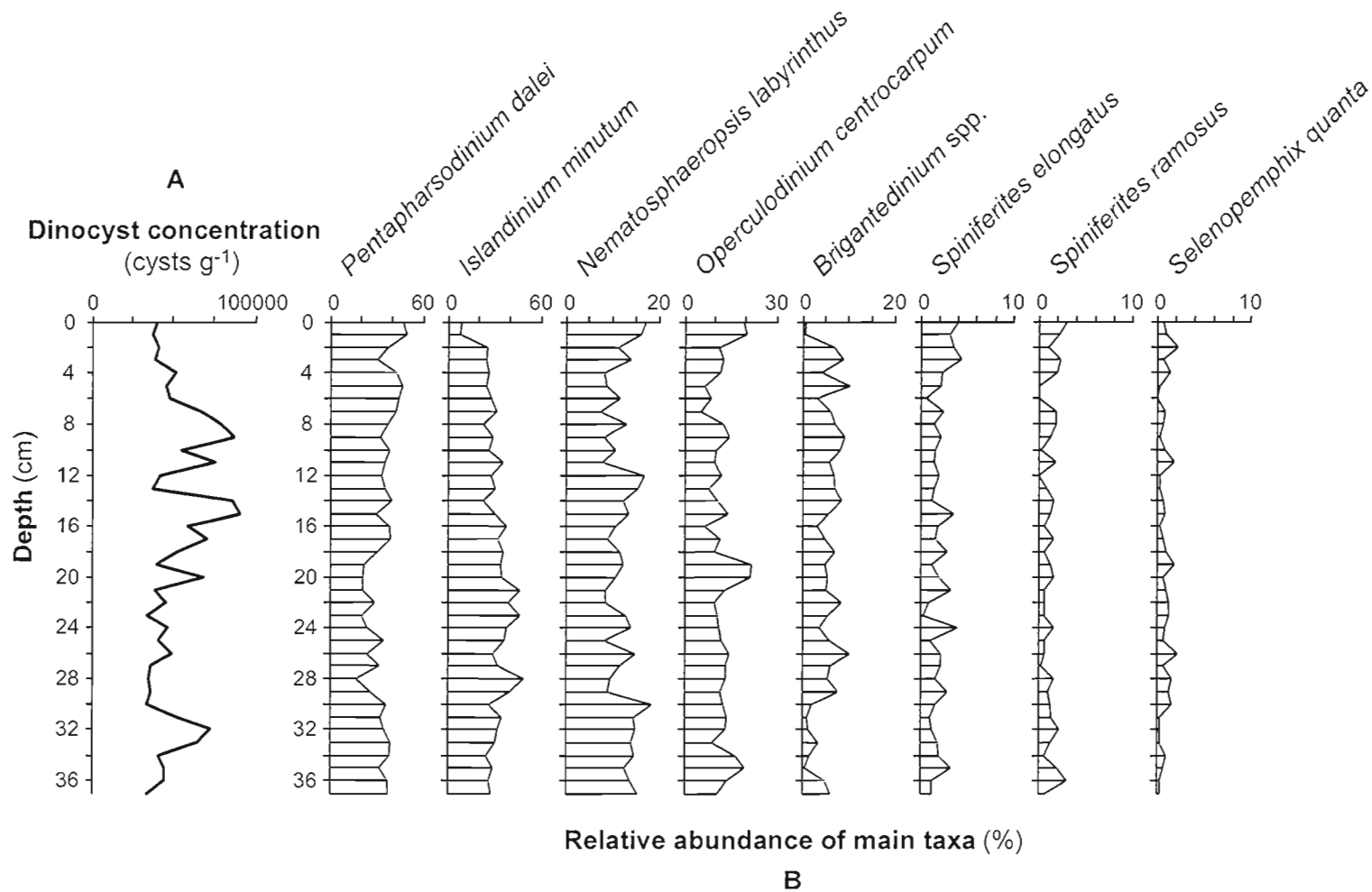


Figure 3. In core COR0503-CL05-37BC, data as a function of depth A) dinocyst concentration (cysts g<sup>-1</sup>); B) relative abundance of the most abundant dinocyst taxa.

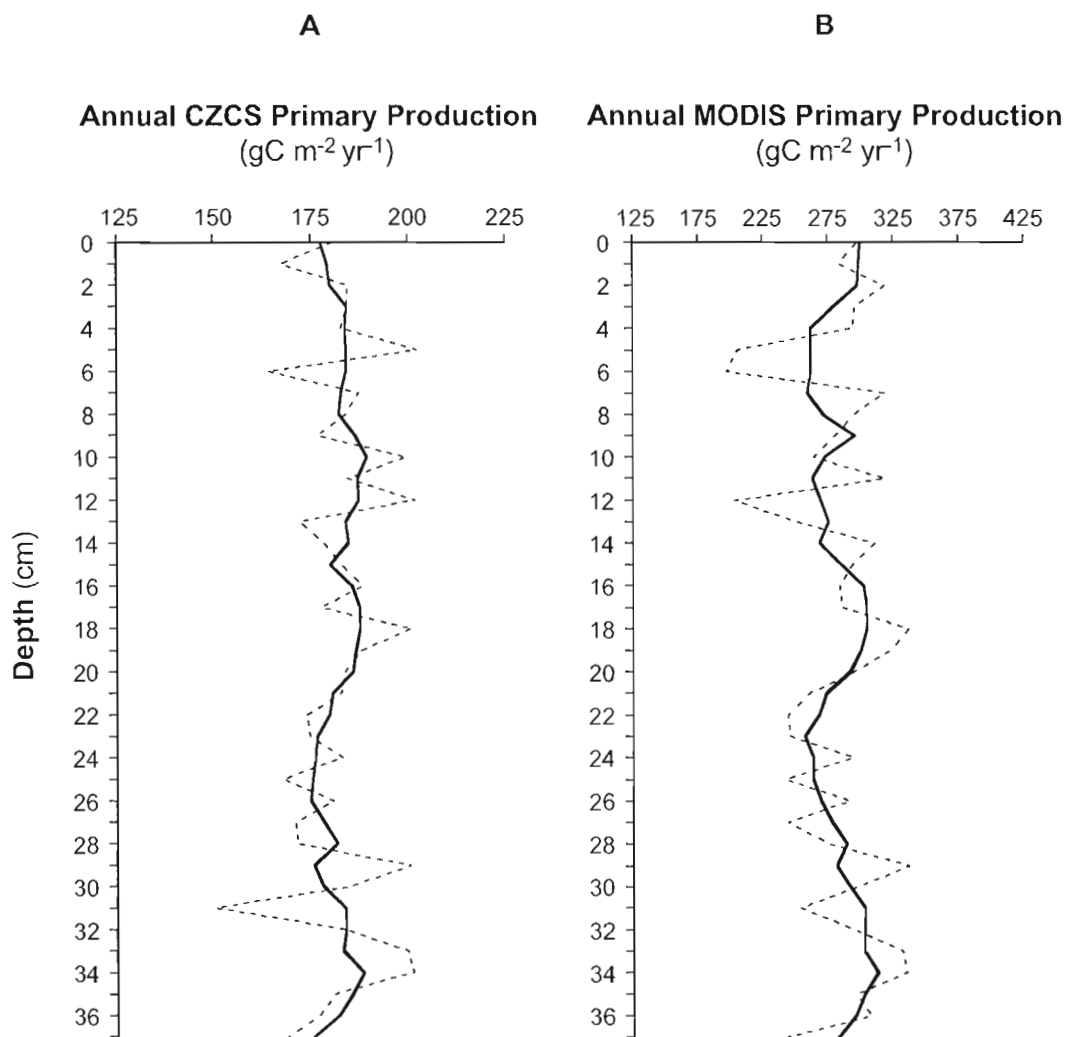


Figure 4. Reconstruction of primary production based on the best analogue method, using A) the CZCS reference productivity data (Antoine et al., 1996); and B) the MODIS reference productivity data (Berhenfeld and Falkowski, 1997). The bold lines represent 5-point running means.



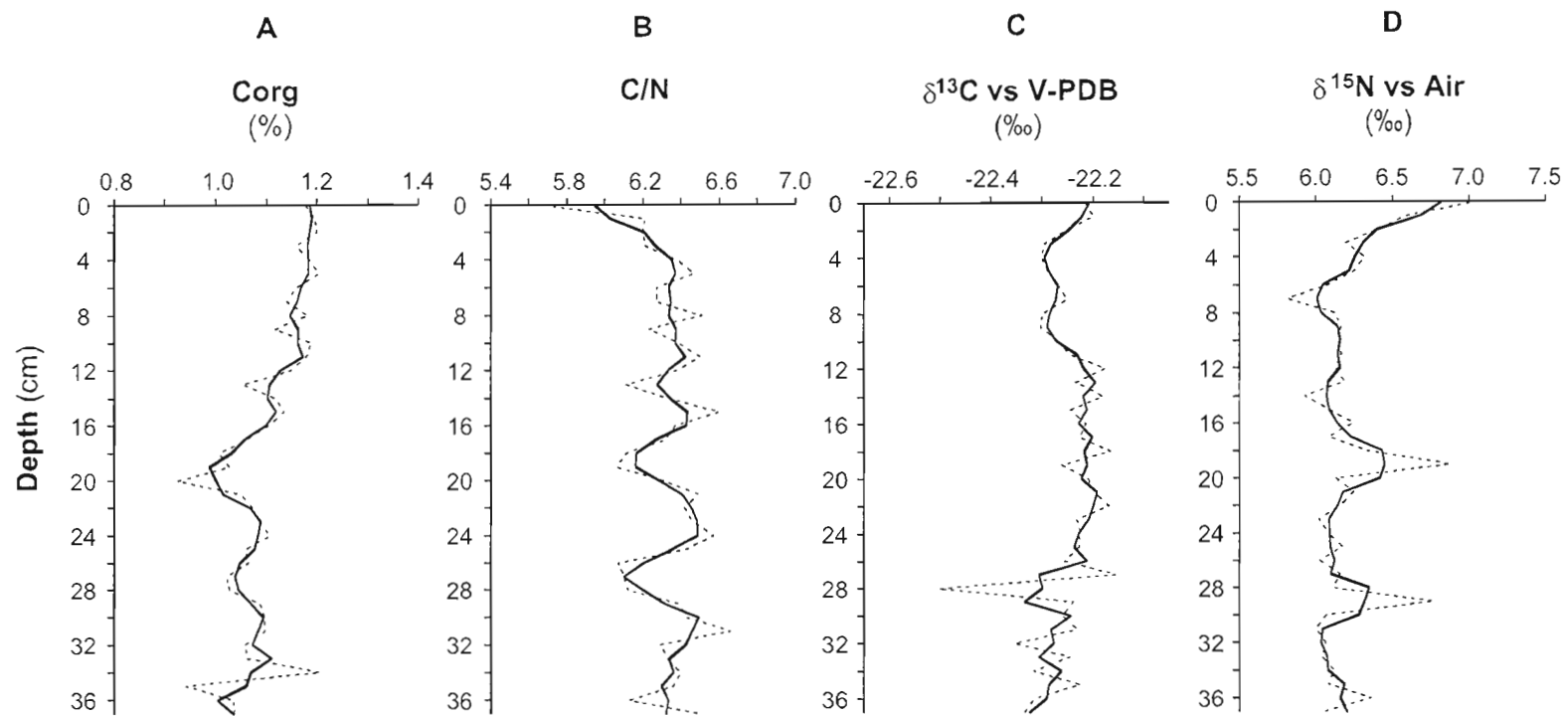


Figure 5. In core COR0503-CL05-37BC, data as a function of depth A) organic carbon (%); B) organic carbon to nitrogen ratio; C)  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) of organic carbon; D)  $\delta^{15}\text{N}$  (‰). The bold curves represent 5-point running means.

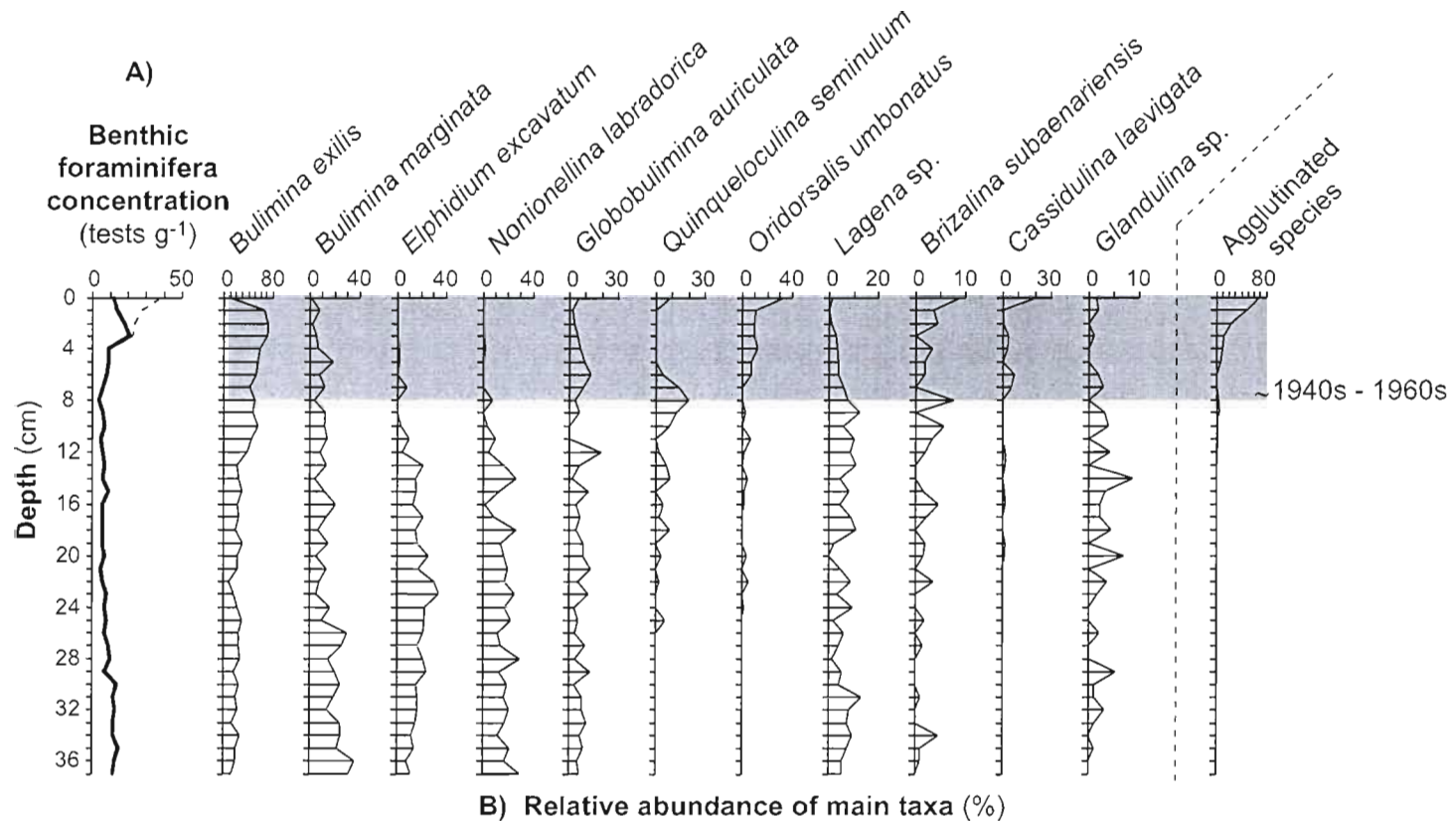


Figure 6. In core COR0503-CL05-37BC, data as a function of depth A) concentration of benthic foraminifera (tests g<sup>-1</sup>), the bold curve represents calcareous taxa only, whereas the dotted curve corresponds to total concentrations including calcareous and agglutinated taxa. Agglutinated taxa were treated separately due to uncertainties linked to their preservation in sediments. In B), relative abundance of the main calcareous benthic foraminifer taxa (%) and the relative abundance of agglutinated taxa is shown in the last column to the right. The upper 8 cm of the core have been highlighted in grey as they show important changes in the benthic foraminifera assemblages, according to our age models these changes started between the 1940s and the 1960s.

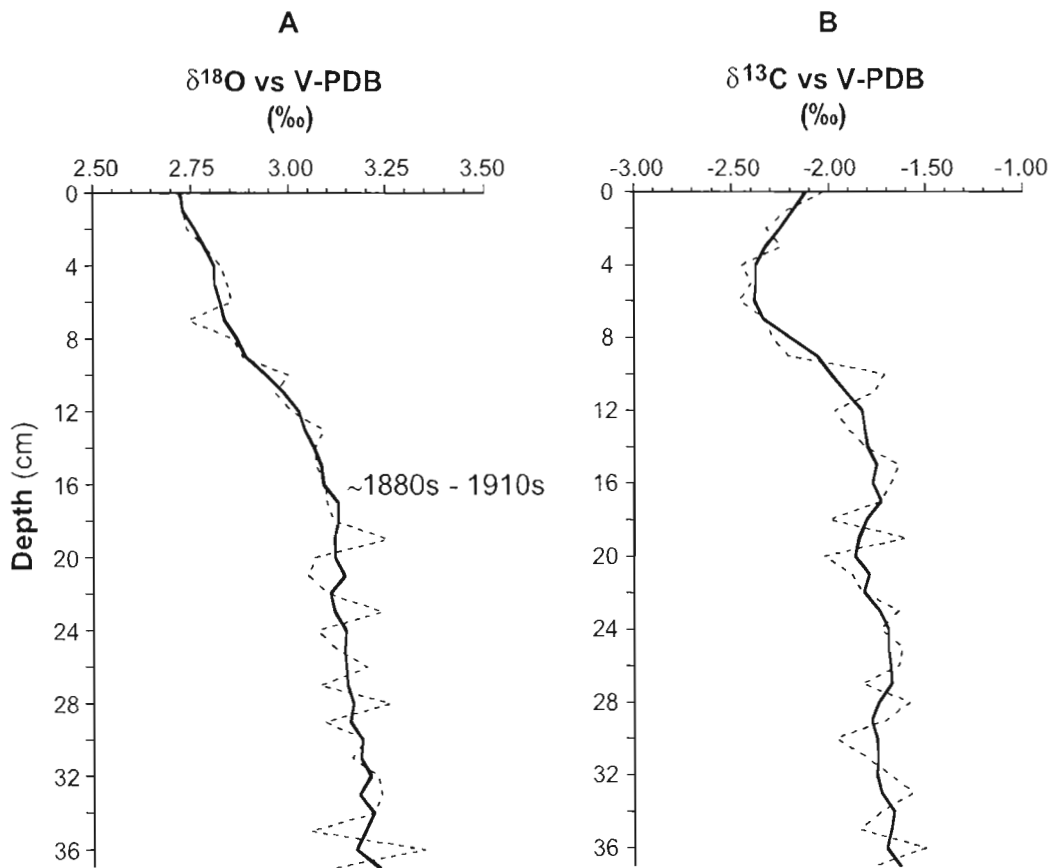


Figure 7. In core COR0503-CL05-37BC, isotopic analysis of shells of benthic foraminifera *Bulimina exilis* as a function of depth A)  $\delta^{18}\text{O}$  (‰); B)  $\delta^{13}\text{C}$  (‰). The bold curves represent 5-point running means. According to our age models, the important  $\delta^{18}\text{O}$  decrease occurring from 16 to 0 cm depth started between the 1880s and the 1910s.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'analyse micropaléontologique et géochimique de la carotte COR0503-CL05-37BC, prélevée dans le Golfe du St-Laurent, ne révèle aucun indice d'une augmentation de productivité primaire qui pourrait être à l'origine de l'hypoxie. Les résultats semblent plutôt démontrer que la diminution récente des teneurs en oxygène dissous est liée à un changement dans les proportions d'eaux du Courant du Labrador et d'eaux de l'Atlantique Nord qui pénètrent dans le chenal Laurentien, et donc d'une augmentation de la température des eaux profondes du Golfe du St-Laurent mis en évidence par les assemblages de foraminifères benthiques, particulièrement par la diminution d'abondance relative de *Nonionellina labradorica* simultanément avec l'augmentation de *Oridorsalis umbonatus*. Cette hypothèse est également soutenue par les résultats d'analyse isotopique des tests de foraminifères benthiques, lesquels indiquent un réchauffement d'environ  $\sim 1.9^{\circ}\text{C}$  des eaux profondes du Golfe du St-Laurent durant le dernier siècle.

Le chenal Laurentien est non seulement sensible à l'eutrophisation, mais aussi aux variations de température, soit un paramètre dépendant de la circulation océanique et de l'équilibre thermique global. Afin de déterminer si l'augmentation de température dans les eaux profondes du Golfe du St-Laurent est une manifestation d'un réchauffement climatique récent ou s'il fait partie d'une variabilité naturelle, une étude de séries temporelles plus longues serait nécessaire.

**BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE**

- Antoine, D., André, J-M., Morel, A. 1996. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll. *Global Biochemical Cycles* 10(1):57-69
- Barmawidjaja, D.M., van der Zwaan, G.J., Jorissen, F.J., Puskaric, S., 1995. 150 years of eutrophication in the northern Adriatic sea: Evidence from a benthic foraminiferal record. *Marine Geology* 122: 367-384
- Berhenfeld, M.J., Falkowski, P.G., 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography* 42(1): 1-20
- Bilodeau, G., de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., 1994. Benthic foraminiferal assemblages in Labrador Sea sediments : relations with deep-water mass changes since deglaciation. *Can. J. Earth Sci.* 31: 128-138.
- Bratton, J.F., Colman, S.M., Seal, R.R., 2003. Eutrophication and carbon sources in Chesapeake Bay over the last 2700 yr: Human impacts in context. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67(18): 3385-3402
- Cloern, J.E., 2001. Our evolving conceptual model of the costal eutrophication problem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 210 : 223-253
- Coplen, T.B., 1995. Discontinuance of SMOW and Pdb. *Nature* 375: 285
- de Vernal, A., Henry, M., Bilodeau, G., 1999. Techniques de préparation et d'analyse en micropaléontologie. *Les cahiers du GEOTOP.* (28pp.)
- Devillers, R., de Vernal, A., 2000. Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments of the northern North Atlantic in relation to nutrient content and productivity in surface waters. *Marine Geology* 166: 103-124
- Dickie, L.M., Trites, R.W., 1983. The Gulf of St. Lawrence. In: Ketchum, H. (Ed), *Estuaries and enclosed seas.* Elsevier Scientific Publishing company, Amsterdam-Oxford-New York
- Flynn, W.W. 1968. The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials. *Anal. Chim. Acta* 43: 221-227
- Gilbert, D. 2004. Propagation of temperature signals from the northwest Atlantic continental shelf edge into the Laurentian Channel. *ICES CM* 2004/N:07

- Gilbert, D., Sundby, B., Gobeil, C., Mucci, A., Tremblay, G-H., 2005. A seventy-two year record of diminishing deep-water oxygen in the St. Lawrence estuary: The northwest Atlantic connection. *Limnol. Oceanogr.* 50(5): 1654-1666
- Gilbert, D., Chabot, D., Archambault, P., Rondeau, B., Hébert, S. 2007. Appauvrissement en oxygène dans les eaux profondes du St-Laurent marin : causes possibles et impacts écologiques. *Le Naturaliste Canadien*, Volume 131 No.1 : 67-75
- Jennane, A. 1992. Application de la méthode du plomb-210 dans l'Estuaire maritime et le Golfe du St-Laurent. Taux de sédimentation, flux et modes d'ablation. Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal.
- Jouanneau, J.M., Castaing, P., Grousset, F., Buat-Menard, P., Pedemay, P., 1999. Recording and chronology of a cadmium contamination by Cs-137 in the Gironde estuary (SW France). *C.R. Acad. Sci. Sér. II, Sci. Terre Planètes* 329: 265-270
- Kaiho, K., 1994. Benthic foraminiferal dissolved-oxygen index and dissolved-oxygen levels in the modern ocean. *Geology* 22: 719-722
- Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T.P., Stephens, C. 2000. Warming of the world oceans. *Science* Vol. 287: 2225-2229.
- Mendes, I., Gonzalez, R., Dias, J.M.A., Lobo F., Martins V., 2004. Factors influencing recent benthic foraminifera distribution on the Guadiana shelf (Southwestern Iberia). *Marine Micropaleontology* 51 :171-192
- Meyers, P.A., 1997. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Org. Geochem.* 27(5/6): 213-250
- Murray, J.W., 1991. Ecology and palaeoecology of benthic foraminifera. Longman Scientific & Technical (Co-published in the United-States with John Wiley & sons Inc., New York)
- Muzuka, A.N.N., Hillaire-Marcel, C. 1999. Burial rates of organic matter along the eastern Canadian margin and stable isotope constraints on its origin and diagenetic evolution. *Marine Geology* 160: 251-270
- Osterman, L.E., 2003. Benthic foraminifera from the continental shelf and slope of the Gulf of Mexico: an indicator of shelf hypoxia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 58: 17-35

- Platon, E., Sen Gupta, B.K., Rabalais, N.N., Turner, R.E., 2005. Effect of seasonal hypoxia on the benthic foraminifera community of the Louisiana inner continental shelf: The 20<sup>th</sup> century record. *Marine micropaleontology* 54: 263-283
- Pospelova, V., Chmura, G.L., Boothman, W.S., Latimer, J.S., 2002. Dinoflagellate cyst records and human disturbance in two neighboring estuaries, New Bedford Harbor and Apponagansett Bay, Massachusetts (USA). *The Science of Total Environment* 298: 81-102
- Radi, T., de Vernal, A., 2008. Dinocysts as proxy of primary productivity in mid-high latitudes of the Northern Hemisphere. *Marine Micropaleontology* 68: 84-114
- Radi, T., Pospelova, V., de Vernal, A., Barrie, J.V., 2007. Dinoflagellate cysts as indicators of water quality and productivity in British Columbia estuarine environments. *Marine Micropaleontology* 62: 269-297
- Ravelo, A.C., Hillaire-Marcel, C. 2007. The use of oxygen and carbon isotopes of foraminifera in paleoceanography. *In* C. Hillaire-Marcel and A. de Vernal [eds], *Developments in marine geology Volume 1: Proxies in late Cenozoic paleoceanography*. Geotop-Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada (Chapter 18, p.735-760)
- Rochon, A., de Vernal, A., Turon, J-L., Matthiessen, J., Head, M.J., 1999. Distribution of recent dinoflagellate cysts in surface sediments from the North Atlantic ocean and adjacent seas in relation to sea-surface parameters. *Am. Assoc. Stratigr. Palynol. Found.* 35 (140pp.)
- Rodrigues, C.G., 1980. Holocene microfauna and paleoceanography of the Gulf of St. Lawrence. Ph.D. Thesis. Carleton University, 352pp.
- Schmidt, G.A., Bigg, G. R., Rohling, E. J. 1999. Global Seawater Oxygen-18 Database. <http://data.giss.nasa.gov/o18data/>
- Sen Gupta B.K., Machain-Castillo, M.L. 1993. Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Marine Micropaleontology* 20: 183-201
- Shackleton, N.J., 1974. *In* J. Labeyrie [ed], *Méthodes quantitatives d'études des variations du climat au cours du Pléistocène*, Éditions du CNRS, Paris, p.203-209
- Silverberg, N., Nguyen, H.V., Delibrias, G., Koide, M., Sundby, B., Yokoyama, Y., Chesselet, R., 1986. Radionuclide profiles, sedimentation rates, and bioturbation in modern sediments of the Laurentian through, Gulf of St. Lawrence. *Oceanologica Acta*, Vol. 9, No.3: 285-290

Sorgente, D., Frignani, M., Langone, L., Ravaioli, M., 1999. Chronology of marine sediments : interpretation of activity-depth profiles of  $^{210}\text{Pb}$  and other radioactive tracers, Part I. Technical Report n.54, Consiglio nazionale delle ricerche istituto per la geologia marina, Bologna. 29 pp.

Steven, D.M., 1974. Primary and secondary production in the Gulf of St. Lawrence. Mar. Sci. Centre, McGill Univ., Rep., No. 26: 116 pp.

Thibodeau, B., de Vernal, A., Mucci, A., 2006. Recent eutrophication and consequent hypoxia in the bottom waters of the Lower St. Lawrence Estuary: Micropaleontological and geochemical evidence. *Marine Geology*. 231: 37-50

Tsujimoto, A., Nomura, R., Yasuhara, M., Yamazaki, H., Yoshikawa, S. 2006. Impact of eutrophication on shallow marine benthic foraminifers over the last 150 years in Osaka Bay, Japan. *Marine Micropaleontology* 60: 258-268

Zhang, D. 2000. Fluxes of short-lived radioisotopes in the marginal basins of eastern Canada. Ph.D. Thesis, Montreal, Université du Québec à Montréal.



## APPENDICE A

### Dénombrement et concentrations des dinokystes, grains de pollen, spores, autres palynomorphes et foraminifères benthiques dans la carotte COR0503-CL05-37BC

<b>Tableau A.1.</b> Dénombrement des dinokystes dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	41
<b>Tableau A.2.</b> Dénombrement des grains de pollen et spores dans la carotte COR0503-CL05-37BC.....	42
<b>Tableau A.3.</b> Dénombrement des palynomorphes autres que les dinokystes, les pollen et les spores dans la carotte COR0503-CL05-37BC.....	43
<b>Tableau A.4.</b> Dénombrement des foraminifères benthiques calcaires dans la carotte COR0503-CL05-37BC.....	44
<b>Tableau A.5.</b> Dénombrement des foraminifères benthiques agglutinants dans la carotte COR0503-CL05-37BC.....	45
<b>Tableau A.6.</b> Concentrations des dinokystes, grains de pollen, spores, réseaux organiques, remaniés et foraminifères benthiques dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	46
<b>Figure A.7.</b> Concentrations et abondances relatives des grains de pollen et spores dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	47
<b>Figure A.8.</b> Ratio dinokystes/pollen dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	48

Profondeur (cm)	Dinokystes												
	<i>cf. Alexandrium tamarense</i> type cyst	<i>Ataxiodinium choane</i>	<i>Nematosphaeropsis labyrinthus</i>	<i>Operculodinium centrocarpum</i>	<i>O. centrocarpum</i> short processes	<i>Spiniferites elongatus</i>	<i>Spiniferites ramosus</i>	<i>Spiniferites</i> spp.	cyst of <i>Pentapharsodinium datei</i>	<i>Islandinium minutum</i>	<i>Islandinium ? cezare</i>	<i>Brigantedinium</i> spp.	<i>Selenopemphix quanta</i>
0	0	0	52	58	0	12	9	2	143	25	0	2	2
1	0	0	50	63	0	10	7	1	152	24	0	2	3
2	0	0	34	35	0	11	3	0	114	78	7	21	7
3	0	0	42	38	0	13	7	1	92	75	6	27	2
4	0	1	25	35	0	7	6	2	129	79	3	13	4
5	0	0	28	21	0	7	0	1	148	80	3	33	1
6	0	1	36	27	0	2	0	1	136	84	12	10	0
7	0	0	24	18	0	8	6	1	139	103	9	20	3
8	0	0	43	42	0	5	6	6	122	75	8	23	2
9	0	2	26	46	0	7	4	2	103	91	5	29	1
10	0	0	34	34	0	5	1	3	122	84	7	26	3
11	0	0	25	32	0	5	6	0	114	115	3	19	6
12	0	0	53	38	0	6	0	1	104	87	3	21	1
13	0	0	52	27	0	5	3	1	121	104	2	24	1
14	0	0	38	34	1	4	5	0	123	70	6	26	2
15	0	0	44	46	0	12	4	2	96	100	2	18	3
16	0	0	35	22	1	6	2	0	126	124	2	11	1
17	0	0	28	36	0	5	5	2	121	99	0	15	2
18	0	0	35	30	1	9	2	0	93	107	2	21	3
19	0	1	39	69	0	4	4	0	69	109	4	16	6
20	0	1	33	67	0	6	5	3	66	108	5	17	2
21	0	0	26	40	0	10	2	3	64	141	3	16	3
22	0	0	27	31	0	3	2	6	92	125	4	27	4
23	0	0	40	34	0	1	2	7	64	146	0	17	4
24	0	0	45	36	0	13	5	9	77	121	2	12	3
25	0	0	25	36	0	3	2	3	105	110	0	18	2
26	0	0	48	47	0	7	2	7	77	93	3	34	7
27	0	0	36	42	0	7	1	6	99	98	1	19	2
28	0	0	29	42	0	5	5	4	53	152	0	17	5
29	0	0	28	36	0	9	3	0	81	122	3	24	4
30	0	0	57	39	1	5	4	1	111	80	1	6	5
31	0	0	44	42	3	3	4	0	99	106	0	3	1
32	0	0	46	42	0	4	7	1	107	99	0	4	1
33	0	0	44	29	0	6	4	0	123	96	0	11	1
34	2	0	45	51	0	6	2	0	119	77	0	5	3
35	1	0	38	60	0	10	6	2	98	88	0	2	2
36	0	0	45	45	0	4	10	0	120	85	0	16	1
37	1	0	48	34	0	4	2	2	116	86	0	19	1

Tableau A.1. Dénombrement des dinokystes dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

Profondeur (cm)	Pollen											Spores					
	<i>Abies</i>	<i>Picea</i>	<i>Pinus</i>	<i>Acer</i>	<i>Quercus</i>	<i>Betula</i>	<i>Alnus spp.</i>	<i>Salix</i>	<i>Ambrosia</i>	<i>Artemisia</i>	Indéterminés	<i>Lycopodium annotinum</i>	<i>Lycopodium clavatum</i>	<i>Selaginella</i>	<i>Sphagnum</i>	Spore trilète	Spore monolète
0	1	141	149	2	4	26	1	1	7	0	52	3	3	0	20	7	20
1	1	164	208	5	3	45	7	4	1	0	64	6	9	0	47	8	47
2	2	186	169	2	5	35	4	2	3	0	54	3	1	0	18	2	18
3	5	225	239	2	1	24	5	2	7	0	37	1	5	0	12	8	12
4	2	218	179	2	1	25	6	3	3	0	29	2	5	0	12	1	12
5	4	155	168	5	3	41	5	4	6	0	74	2	5	0	16	6	16
6	0	97	117	5	4	19	7	0	1	0	56	3	7	0	21	7	21
7	0	81	112	1	4	19	8	2	3	0	73	3	1	0	20	6	20
8	1	189	213	3	9	23	8	2	9	0	57	3	3	0	21	4	21
9	0	124	170	0	4	30	2	1	4	0	55	4	2	0	11	2	11
10	0	156	181	0	3	51	11	0	8	0	99	2	5	0	30	4	30
11	0	98	167	1	6	64	20	1	8	0	108	1	0	0	23	6	23
12	0	142	161	0	6	30	1	0	1	0	45	0	2	0	14	6	14
13	0	152	206	1	9	40	5	2	6	1	63	2	2	0	14	13	14
14	0	163	160	0	3	42	8	6	2	0	72	0	0	0	27	7	27
15	2	146	147	0	4	49	8	1	0	0	38	0	8	0	11	3	11
16	0	107	156	1	3	36	4	3	1	0	68	1	2	0	17	7	17
17	1	123	129	4	3	48	6	2	1	0	39	2	6	1	16	5	16
18	0	168	127	0	1	16	3	0	3	0	34	1	2	0	11	4	11
19	0	167	125	1	3	8	1	0	0	0	17	2	2	0	6	0	6
20	0	151	113	1	3	17	4	0	2	0	42	0	1	0	13	6	13
21	0	133	123	1	0	11	3	0	1	0	32	1	4	0	5	5	5
22	1	108	123	3	4	20	3	1	0	1	41	0	1	0	12	1	12
23	0	133	109	2	4	20	1	2	1	0	38	1	0	0	8	6	8
24	0	144	108	2	2	10	1	1	0	0	37	1	3	0	3	1	3
25	0	94	144	3	3	14	4	0	2	0	44	0	1	0	6	4	6
26	0	128	117	1	1	13	1	0	0	0	44	1	2	0	5	2	5
27	0	147	119	1	1	12	3	0	1	0	31	1	2	0	3	3	3
28	0	116	111	2	2	16	4	0	3	0	52	2	0	0	8	6	8
29	0	139	132	1	1	8	3	1	0	0	29	0	1	0	4	3	4
30	0	111	133	2	2	26	7	3	0	1	32	0	3	0	4	5	4
31	0	108	146	2	7	18	5	3	2	0	35	1	2	0	8	6	8
32	0	102	132	1	3	20	2	0	0	1	47	2	2	0	5	1	5
33	0	110	143	1	3	15	2	1	0	0	44	3	4	0	4	6	4
34	0	117	127	1	3	18	3	0	1	0	36	1	3	0	7	0	7
35	0	119	140	7	0	7	1	0	1	0	34	1	4	0	7	2	7
36	0	162	123		1	13	2	1	0	0	26	1	0	0	5	2	5
37	2	108	132	1	2	21	2	0	0	0	40	3	0	0	7	4	7

Tableau A.2. Dénombrement des pollens et spores dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

## Palynomorphes

Profondeur (cm)	<i>Halodinium</i>	<i>Cymatiosphaera</i>	Réseaux organiques	Acritarches
0	5	0	19	2
1	5	0	2	5
2	9	0	45	5
3	10	0	51	4
4	4	0	32	3
5	10	0	44	5
6	7	0	73	1
7	5	0	12	0
8	12	0	30	1
9	15	0	21	0
10	19	0	52	3
11	7	0	40	6
12	12	0	52	12
13	4	0	51	1
14	8	0	57	4
15	3	0	37	1
16	6	0	62	2
17	5	0	69	1
18	5	0	63	2
19	1	0	63	3
20	0	0	43	5
21	0	0	52	1
22	0	0	59	3
23	0	0	48	0
24	1	0	38	2
25	1	0	48	0
26	0	0	51	3
27	0	0	25	2
28	0	0	35	1
29	0	0	46	1
30	5	0	105	1
31	2	0	144	3
32	1	0	89	1
33	8	0	134	3
34	3	1	111	0
35	2	0	103	1
36	17	0	103	0
37	12	0	134	1

Tableau A.3. Dénombrement des palynomorphes autres que les dinokystes, pollens et spores dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

Profondeur (cm)	<i>Brizalina subaenariensis</i>	<i>Bulimina exilis</i>	<i>Bulimina marginata</i>	<i>Cibicides</i> sp.	<i>Elphidium excavatum</i>	<i>Glandulina</i> spp.	<i>Globobulimina auriculata</i>	<i>Lagena</i> sp.	<i>Nonionellina labradorica</i>	<i>Oridorsalis umbonatus</i>	<i>Rosalina</i> sp.	<i>Quinqueloculina seminulum</i>	<i>Cassidulina laevigata</i>	Indéfinis
0	6	8	1	0	1	1	4	1	2	22	1	6	14	0
1	2	36	4	0	1	1	1	0	2	6	0	0	0	1
2	4	65	2	0	3	0	3	1	0	9	0	0	1	2
3	0	69	5	0	0	1	5	3	1	10	0	0	4	0
4	2	34	4	0	1	0	4	2	1	7	0	0	2	1
5	1	30	10	0	1	0	5	2	1	4	0	0	0	0
6	1	29	4	0	1	1	7	2	0	4	0	2	4	0
7	0	15	4	0	3	1	3	2	0	0	0	5	2	0
8	2	13	1	0	0	0	1	2	2	0	0	5	0	0
9	0	15	4	0	0	1	2	4	1	1	0	4	0	0
10	3	28	6	0	2	2	0	3	2	0	0	4	0	1
11	1	13	4	0	3	0	0	3	3	2	0	0	0	0
12	1	17	4	0	2	2	9	4	3	1	1	1	1	0
13	0	10	6	0	10	0	3	5	8	0	0	3	1	0
14	0	11	2	0	7	4	1	2	12	2	0	4	0	0
15	1	18	7	0	11	2	7	5	8	1	0	0	1	0
16	2	10	9	0	6	1	2	2	4	1	0	2	1	2
17	1	11	6	0	10	1	3	4	6	0	0	1	0	2
18	0	9	3	1	7	2	2	5	12	0	0	4	0	0
19	1	15	7	0	8	0	4	1	7	0	0	0	1	3
20	1	13	3	0	15	4	5	0	11	2	0	2	1	0
21	0	9	5	0	7	0	5	2	8	0	2	0	0	1
22	2	5	4	0	17	2	3	5	10	3	0	1	0	3
23	0	10	3	0	21	1	7	2	17	0	0	0	0	0
24	0	14	10	0	15	0	2	6	12	1	0	0	0	1
25	1	15	5	0	12	0	3	1	12	0	0	3	0	0
26	0	12	15	0	11	1	2	3	6	0	0	0	0	0
27	1	17	18	0	12	0	7	3	10	0	1	0	0	0
28	0	21	12	0	19	0	3	1	24	0	0	0	0	1
29	0	9	11	0	13	3	7	3	7	0	0	0	0	1
30	0	23	22	0	15	1	3	4	19	0	2	0	0	2
31	1	19	19	0	17	1	8	13	17	0	2	0	0	1
32	0	23	14	0	17	3	8	8	22	0	1	0	0	2
33	0	13	23	0	15	1	10	7	17	0	6	0	0	3
34	4	23	22	0	11	0	6	8	11	0	1	0	0	0
35	1	19	21	0	14	1	8	7	21	0	2	0	0	0
36	1	19	34	0	8	0	5	5	17	0	2	0	0	2
37	0	13	30	0	11	0	6	5	29	0	0	0	0	0

Tableau A.4. Dénombrement des foraminifères benthiques calcaires dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

## Foraminifères benthiques agglutinants

Profondeur (cm)	<i>Adercotryma glomerata</i>	<i>Cribrostomoides</i> sp.	<i>Haplophragmoides</i> sp.	<i>Reophax</i> sp.	<i>Saccamina sphaerica</i>	<i>Tritaxis conica</i>	<i>Quinqueloculina agglutinans</i>	Indéfinitis allongés	Indéfinitis sphériques
0	3	9	46	64	9	2	0	4	4
1	0	9	26	9	4	0	0	0	4
2	2	5	9	8	3	0	0	0	1
3	1	2	4	2	2	2	0	0	0
4	0	1	1	3	2	0	0	0	0
5	0	0	0	0	3	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	2	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	1	0	0	0	0	0
28	0	0	0	1	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	1	0	0	0	0	1
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau A.5. Dénombrement des foraminifères benthiques agglutinants dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

## Concentrations

Profondeur (cm)	Densité du sédiment sec (g cm <sup>-3</sup> )	Dinokystes (nb cm <sup>-3</sup> )	Grains de pollen (nb cm <sup>-3</sup> )	Spores (nb cm <sup>-3</sup> )	Réseaux organiques (nb cm <sup>-3</sup> )	Remaniés (nb cm <sup>-3</sup> )	Foraminifères benthiques calcaires (nb cm <sup>-3</sup> )	Foraminifères benthiques agglutinants (nb cm <sup>-3</sup> )
0	1,0131	8155	15513	1414	692	81	4,46666	9,4
1	1,6217	12206	9282	1350	106	92	3,6	3,46666
2	0,6405	13093	19512	1056	1901	211	6	1,86666
3	0,617	12109	21860	1159	2038	160	6,53333	0,86666
4	0,7966	20543	31625	1487	2162	203	3,86666	0,46666
5	0,7433	17096	24689	1540	2336	265	3,6	0,26666
6	0,8257	20148	31591	4130	4760	65	3,66666	0
7	0,7656	25629	23461	2323	929	0	2,33333	0
8	0,865	34275	53065	3200	3097	103	1,73333	0,06666
9	0,6903	30114	37166	1906	2001	0	2,13333	0,13333
10	0,895	24700	39411	3407	4026	232	3,4	0,06666
11	0,758	28759	41856	2743	3540	531	1,93333	0,06666
12	0,9794	20474	25169	1760	3391	782	3,06666	0
13	0,8643	16201	23110	1572	2430	48	3,06666	0
14	0,8627	37046	54670	4316	6834	480	2,90322	0
15	0,889	40511	48935	2849	4584	124	4,06666	0
16	0,9247	27255	31302	2395	5121	165	2,8	0
17	0,9943	35251	40094	3491	7771	113	3	0
18	0,9696	25594	130824	7433	11150	354	3	0
19	0,9184	18354	149593	6039	11707	557	3,13333	0
20	0,9921	34215	82509	5947	5708	664	3,8	0
21	1,0163	19736	86911	5432	7433	143	2,6	0
22	1,0545	24348	113356	6318	14619	743	3,54838	0
23	0,9137	15610	88627	6861	7433	0	4,06666	0
24	1,0736	25380	103051	3379	5350	282	4,06666	0
25	0,8565	17409	173441	7321	7051	0	3,46666	0
26	0,8643	21117	128814	5913	9573	563	3,33333	0
27	0,9207	16512	292682	11150	7147	572	4,45161	0,06451
28	0,9514	16565	189547	12389	7652	219	5,22580	0,06451
29	0,9718	17457	291753	8362	10685	232	3,6	0
30	0,846	14224	26181	1321	4818	46	6,06666	0
31	0,9586	25190	80774	4708	11893	248	6,125	0
32	0,9539	35026	127190	4543	10024	113	6,53333	0
33	1,013	32623	49400	2787	13834	310	6,33333	0
34	0,9318	19140	31591	1342	6876	0	5,73333	0,13333
35	0,8185	18052	54687	2478	6076	59	6,26666	0
36	0,911	20255	135449	3717	6380	0	6,2	0
37	0,9842	16805	29352	1334	7218	54	6,26666	0

Tableau A.6. Tableau des concentrations de dinokystes, grains de pollen, spores, réseaux organiques, remaniés et foraminifères benthiques dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

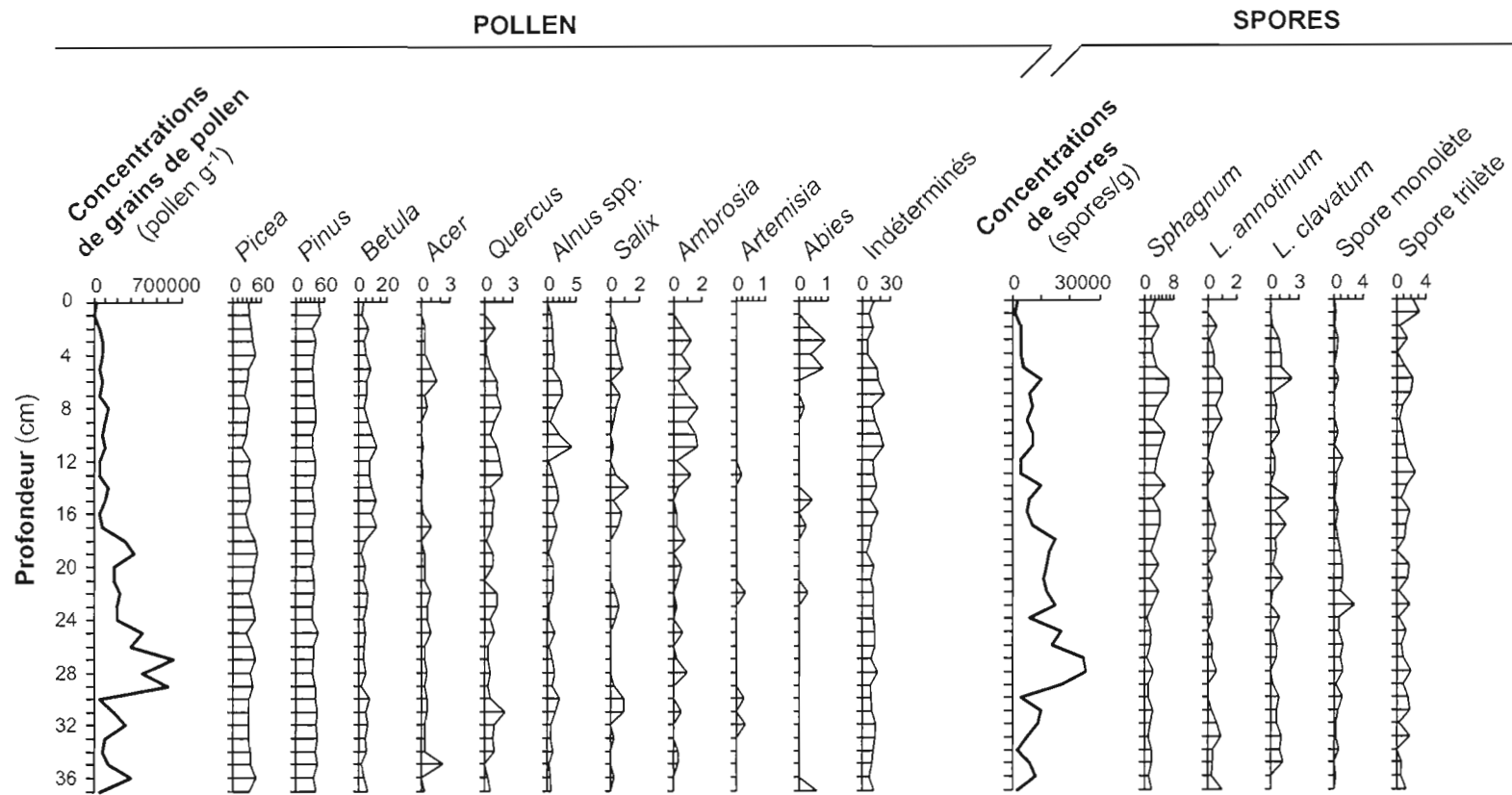


Figure A.7. Concentrations et abondances relatives des grains de pollen et spores dans la carotte COR0503-CL05-37BC.



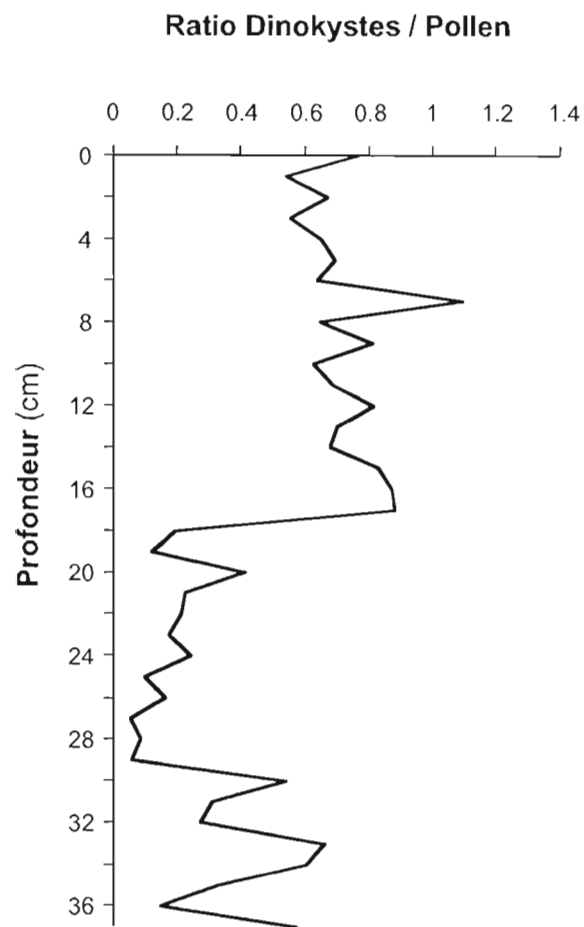


Figure A.8. Ratio dinokystes/pollen en fonction de la profondeur dans la carotte COR0503-CL05-37BC

**APPENDICE B****Reconstructions paléocéanographiques des paramètres de surface par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC.**

<b>Tableau B.1.</b> Valeurs des reconstructions de productivité primaire CZCS par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	50
<b>Tableau B.2.</b> Valeurs des reconstructions de productivité primaire MODIS par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	51
<b>Tableau B.3.</b> Valeurs des reconstructions de la température de surface par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	52
<b>Tableau B.4.</b> Valeurs des reconstructions de salinité de surface par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	53
<b>Tableau B.5.</b> Valeurs des reconstructions de couvert de glace par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	54
<b>Figure B.6.</b> Reconstructions des paramètres de surface autres que la productivité primaire par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	55

## Reconstruction de productivité primaire CZCS

Profondeur (cm)	CZCS hiver (gCm <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )		CZCS été (gCm <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )		CZCS annuelle (gCm <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )	
	Limite inférieure	Limite supérieure	Limite inférieure	Limite supérieure	Limite inférieure	Limite supérieure
0	24,4	34,2	68,0	90,6	180,5	239,6
1	21,6	34,2	62,2	90,6	167,6	239,6
2	25,3	35,2	67,0	84,5	184,7	250,4
3	26,5	34,2	69,8	90,6	184,4	239,6
4	26,4	34,2	69,2	90,6	182,9	239,6
5	19,2	34,2	79,1	109,7	202,4	262,3
6	16,7	34,2	58,3	88,7	164,2	262,3
7	26,9	35,2	69,0	84,5	187,4	250,4
8	26,2	34,2	69,9	90,6	184,1	239,6
9	27,2	37,8	65,7	78,3	176,7	202,3
10	23,4	34,2	77,8	109,7	199,6	262,3
11	25,3	35,2	66,7	84,5	184,5	250,4
12	18,7	34,2	79,8	109,7	201,9	262,3
13	22,5	28,9	65,5	78,3	172,1	202,3
14	24,4	35,2	65,4	84,5	178,3	250,4
15	26,0	34,2	69,4	90,6	182,8	239,6
16	24,2	35,2	69,6	84,5	188,3	250,4
17	25,2	34,2	67,2	90,6	177,7	239,6
18	28,5	35,2	73,6	90,6	200,9	250,4
19	27,0	35,2	69,1	84,5	187,9	250,4
20	26,4	34,2	69,7	90,6	183,8	239,6
21	23,6	34,2	69,7	90,6	182,9	239,6
22	24,0	37,8	65,1	78,3	174,0	202,3
23	23,4	37,8	65,4	90,6	174,7	239,6
24	25,9	34,2	69,6	90,6	183,1	239,6
25	21,3	28,9	63,9	78,3	167,8	202,3
26	25,4	34,2	68,7	90,6	180,9	239,6
27	21,5	28,9	65,4	78,3	171,1	202,3
28	24,8	37,8	64,2	90,6	171,6	239,6
29	28,5	35,2	73,5	90,6	200,7	250,4
30	26,2	34,2	70,1	90,6	184,7	239,6
31	18,9	28,9	58,1	78,3	150,5	202,3
32	26,2	34,2	69,6	90,6	183,7	239,6
33	28,4	35,2	73,5	90,6	199,8	250,4
34	28,4	35,2	74,2	90,6	201,4	250,4
35	24,4	34,2	68,5	90,6	180,9	239,6
36	24,3	35,2	65,0	84,5	177,0	250,4
37	21,4	28,9	64,4	78,3	169,0	202,3

Tableau B.1. Valeurs des reconstructions de productivité primaire CZCS par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

## Reconstruction de productivité primaire MODIS

Profondeur (cm)	MODIS hiver (gCm <sup>-2</sup> an <sup>-1</sup> )	Limite inférieure	Limite supérieure	MODIS été (gCm <sup>-2</sup> an <sup>-1</sup> )	Limite inférieure	Limite supérieure	MODIS annuelle (gCm <sup>-2</sup> an <sup>-1</sup> )	Limite inférieure	Limite supérieure
0	18,0	10,3	22,6	144,6	103,3	183,0	297,8	239,4	368,2
1	16,4	10,3	22,6	133,8	101,0	183,0	283,7	238,1	368,2
2	19,4	10,8	28,8	148,3	101,0	214,2	319,0	238,1	497,0
3	19,3	17,9	22,6	147,6	122,6	183,0	295,7	251,9	368,2
4	19,4	17,9	22,6	147,0	122,6	183,0	294,3	251,9	368,2
5	15,5	5,5	34,7	102,7	51,4	184,7	205,7	99,3	324,5
6	14,5	5,0	34,7	102,4	54,5	184,7	197,9	99,3	324,5
7	20,7	17,9	28,8	153,6	122,6	214,2	319,3	251,9	497,0
8	19,3	17,9	22,6	147,4	122,6	183,0	295,5	251,9	368,2
9	18,7	16,3	22,6	141,1	122,6	157,8	281,0	251,9	316,9
10	19,2	7,5	34,7	130,2	51,4	184,7	264,3	170,2	324,5
11	19,5	10,8	28,8	148,2	101,0	214,2	318,9	238,1	497,0
12	14,8	5,5	34,7	100,2	51,4	184,7	203,4	99,3	324,5
13	17,3	8,3	22,6	126,2	54,5	157,8	251,0	99,3	316,9
14	18,6	8,6	28,8	146,4	104,1	214,2	311,4	233,8	497,0
15	19,3	17,9	22,6	146,4	122,6	183,0	293,8	251,9	368,2
16	18,4	8,3	28,8	136,5	54,5	214,2	284,2	99,3	497,0
17	19,1	17,9	22,6	142,4	122,6	183,0	286,2	251,9	368,2
18	21,0	17,9	28,8	160,7	122,6	214,2	337,2	251,9	497,0
19	21,0	17,9	28,8	154,8	122,6	214,2	322,7	251,9	497,0
20	19,3	17,9	22,6	147,3	122,6	183,0	295,0	251,9	368,2
21	17,1	8,3	21,0	131,0	54,5	183,0	261,1	99,3	368,2
22	16,4	8,3	18,4	123,4	54,5	157,2	244,7	99,3	310,6
23	16,6	8,3	21,0	123,5	54,5	183,0	246,9	99,3	368,2
24	19,2	17,9	22,6	146,7	122,6	183,0	294,5	251,9	368,2
25	17,0	8,3	22,6	121,7	54,5	157,8	242,9	99,3	316,9
26	19,2	17,9	22,6	145,2	122,6	183,0	291,9	251,9	368,2
27	16,9	8,3	22,6	122,7	54,5	157,8	244,4	99,3	316,9
28	18,6	16,3	22,6	136,6	122,6	183,0	275,6	251,9	368,2
29	21,0	17,9	28,8	160,5	122,6	214,2	337,0	251,9	497,0
30	19,4	17,9	22,6	148,1	122,6	183,0	297,4	251,9	368,2
31	14,2	7,7	18,4	122,4	100,5	157,2	254,2	222,4	310,6
32	19,4	17,9	22,6	147,3	122,6	183,0	295,6	251,9	368,2
33	20,7	17,9	28,8	159,2	122,6	214,2	332,1	251,9	497,0
34	20,8	17,9	28,8	160,5	122,6	214,2	335,0	251,9	497,0
35	18,2	10,3	22,6	144,8	103,3	183,0	296,9	239,4	368,2
36	18,6	8,6	28,8	145,0	104,1	214,2	307,7	233,8	497,0
37	17,0	8,3	22,6	122,1	54,5	157,8	243,4	99,3	316,9

Tableau B.2. Valeurs des reconstructions de productivité primaire MODIS par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

## Reconstruction de la température de surface

Profondeur (cm)	Température hiver (T°)			Température été (T°)		
	Température	Limite inférieure	Limite supérieure	Température	Limite inférieure	Limite supérieure
0	0,30	-0,49	2,45	11,96	7,71	14,34
1	0,84	-0,49	2,45	10,78	7,41	14,34
2	0,00	-1,16	2,40	11,23	7,41	13,45
3	-0,29	-0,49	0,03	12,90	12,16	14,34
4	-0,30	-0,49	0,03	12,95	12,16	14,34
5	-0,25	-1,95	2,12	4,32	0,52	13,45
6	-0,48	-1,95	1,55	3,45	0,52	9,07
7	-0,42	-1,16	0,03	12,54	10,42	14,34
8	-0,28	-0,49	0,03	12,92	12,16	14,34
9	-0,28	-0,48	0,03	12,98	12,16	14,34
10	-0,05	-1,54	2,12	9,69	3,62	13,45
11	-0,03	-1,16	2,40	11,24	7,41	13,45
12	-0,17	-1,95	2,12	4,52	0,52	13,45
13	-0,52	-1,95	0,03	11,09	1,00	14,34
14	-0,29	-1,16	0,57	10,58	3,64	13,45
15	-0,27	-0,49	0,03	12,87	12,16	14,34
16	-0,74	-1,95	0,03	10,13	1,00	13,45
17	-0,26	-0,49	0,03	12,76	12,16	14,34
18	-0,50	-1,16	0,03	12,08	10,42	13,45
19	-0,43	-1,16	0,03	12,55	10,42	14,34
20	-0,28	-0,49	0,03	12,97	12,16	14,34
21	-0,52	-1,95	0,03	10,90	1,00	13,45
22	-0,47	-1,95	0,03	10,91	1,00	13,45
23	-0,48	-1,95	0,03	10,57	1,00	12,46
24	-0,26	-0,49	0,03	12,89	12,16	14,34
25	-0,51	-1,95	0,03	10,82	1,00	14,34
26	-0,25	-0,49	0,03	12,85	12,16	14,34
27	-0,56	-1,95	0,03	10,68	1,00	14,34
28	-0,19	-0,49	0,03	12,58	12,16	14,34
29	-0,50	-1,16	0,03	12,08	10,42	13,45
30	-0,28	-0,49	0,03	12,89	12,16	14,34
31	0,10	-0,48	0,65	9,17	3,64	13,45
32	-0,28	-0,49	0,03	12,88	12,16	14,34
33	-0,47	-1,16	0,03	12,17	10,42	13,45
34	-0,47	-1,16	0,03	12,17	10,42	13,45
35	0,20	-0,49	2,45	12,18	7,71	14,34
36	-0,29	-1,16	0,57	10,70	3,64	13,45
37	-0,54	-1,95	0,03	10,74	1,00	14,34

Tableau B.3. Valeurs des reconstructions de la température de surface par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

## Reconstruction de la salinité de surface

Profondeur (cm)	Salinité hiver	Limite inférieure	Limite supérieure	Salinité été	Limite inférieure	Limite supérieure
0	32,26	31,32	34,76	30,66	29,07	34,03
1	32,89	31,32	34,78	31,55	29,07	34,09
2	32,05	30,76	34,78	30,24	27,53	34,09
3	31,67	31,32	31,88	29,95	29,07	30,51
4	31,68	31,32	31,88	29,97	29,07	30,51
5	32,45	29,46	35,07	28,34	19,49	34,20
6	31,28	25,82	34,61	26,58	19,49	33,93
7	31,57	30,76	31,88	29,66	27,53	30,51
8	31,67	31,32	31,88	29,95	29,07	30,51
9	31,79	31,56	32,13	30,13	29,59	30,51
10	31,93	29,46	35,07	28,99	19,49	34,20
11	32,02	30,76	34,78	30,21	27,53	34,09
12	32,57	29,46	35,07	28,73	19,49	34,20
13	31,89	31,56	32,63	30,01	29,27	30,51
14	32,07	30,76	34,65	30,22	27,53	33,42
15	31,68	31,32	31,88	29,97	29,07	30,51
16	31,72	30,76	32,63	29,50	27,53	30,51
17	31,71	31,32	31,88	30,08	29,07	30,51
18	31,47	30,76	31,88	29,42	27,53	30,51
19	31,55	30,76	31,88	29,63	27,53	30,51
20	31,67	31,32	31,88	29,95	29,07	30,51
21	31,82	31,32	32,63	29,87	29,07	30,51
22	31,95	31,56	32,63	30,08	29,27	30,51
23	31,94	31,32	32,63	30,07	29,07	30,51
24	31,67	31,32	31,88	29,96	29,07	30,51
25	31,92	31,56	32,63	30,08	29,27	30,51
26	31,68	31,32	31,88	30,00	29,07	30,51
27	31,92	31,56	32,63	29,99	29,27	30,51
28	31,80	31,32	32,13	30,23	29,07	30,51
29	31,47	30,76	31,88	29,42	27,53	30,51
30	31,66	31,32	31,88	29,94	29,07	30,51
31	32,91	31,56	34,69	31,59	29,59	34,07
32	31,67	31,32	31,88	29,96	29,07	30,51
33	31,49	30,76	31,88	29,47	27,53	30,51
34	31,47	30,76	31,88	29,44	27,53	30,51
35	32,13	31,32	34,76	30,51	29,07	34,03
36	32,05	30,76	34,65	30,23	27,53	33,42
37	31,92	31,56	32,63	30,04	29,27	30,51

Tableau B.4. Valeurs des reconstructions de salinité de surface par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

<b>Reconstruction du couvert de glace</b>			
<b>Profondeur (cm)</b>	<b>Couvert de glace (mois)</b>	<b>Limite inférieure</b>	<b>Limite supérieure</b>
0	1,32	0,32	2,50
1	1,14	0,14	2,50
2	1,55	0,14	3,00
3	1,51	1,00	2,50
4	1,47	1,00	2,50
5	6,47	1,00	9,50
6	5,81	0,00	9,50
7	1,61	1,00	3,00
8	1,49	1,00	2,50
9	1,31	1,00	1,67
10	3,13	1,00	9,02
11	1,59	0,14	3,00
12	6,24	1,00	9,50
13	2,62	1,00	9,50
14	1,72	1,00	3,00
15	1,53	1,00	2,50
16	3,17	1,00	9,50
17	1,56	1,00	2,50
18	1,94	1,00	3,00
19	1,63	1,00	3,00
20	1,45	1,00	2,50
21	2,77	1,00	9,50
22	2,62	1,00	9,50
23	2,96	1,50	9,50
24	1,52	1,00	2,50
25	2,79	1,00	9,50
26	1,55	1,00	2,50
27	2,91	1,00	9,50
28	1,65	1,00	2,50
29	1,94	1,00	3,00
30	1,55	1,00	2,50
31	1,38	1,00	1,67
32	1,54	1,00	2,50
33	1,89	1,00	3,00
34	1,92	1,00	3,00
35	1,36	0,32	2,50
36	1,71	1,00	3,00
37	2,86	1,00	9,50

Tableau B.5. Valeurs des reconstructions de couvert de glace par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

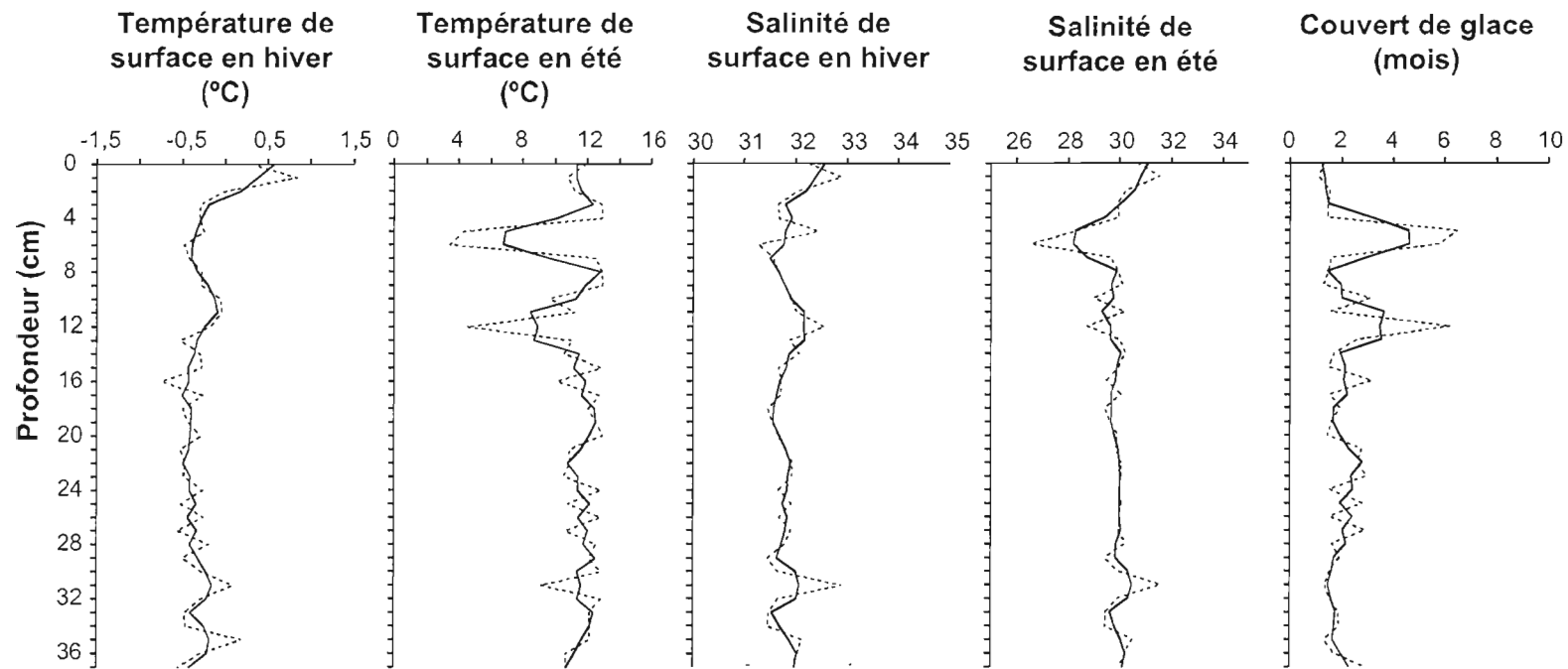


Figure B.6. Reconstructions des paramètres de surface autres que la productivité primaire par la technique des analogues modernes dans la carotte COR0503-CL05-37BC. La courbe en noir représente une moyenne glissante sur 3 points.



## APPENDICE C

**Résultats d'analyses géochimiques et isotopiques dans la carotte COR0503-CL05-37BC**

<b>Tableau C.1.</b> Tableau de résultats d'analyses géochimiques et isotopiques de la matière organique dans la carotte COR0503-CL05-37B .....	57
<b>Tableau C.2.</b> Tableau de résultats d'analyses isotopiques dans les tests carbonatés du foraminifère benthiques <i>Bulimina exilis</i> et du foraminifère planctonique <i>Neogloboquadrina pachyderma</i> levogyre dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	58
<b>Figure C.3.</b> Courbes du $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ résultant de l'analyse isotopique du foraminifère planctonique <i>Neogloboquadrina pachyderma</i> levogyre dans la carotte COR0503-CL05-37BC .....	59

Profondeur (cm)	Corg (%)	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ vs V-PDB (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ vs Air (‰)
0	1,18	5,68	-22,22	7,06
1	1,20	6,21	-22,20	6,59
2	1,20	6,20	-22,25	6,41
3	1,16	6,21	-22,29	6,20
4	1,19	6,38	-22,30	6,32
5	1,20	6,47	-22,29	6,25
6	1,16	6,27	-22,27	6,08
7	1,14	6,27	-22,25	5,82
8	1,18	6,51	-22,30	6,13
9	1,12	6,23	-22,30	6,17
10	1,19	6,39	-22,27	6,15
11	1,18	6,50	-22,24	6,17
12	1,15	6,38	-22,18	6,13
13	1,05	6,11	-22,23	6,19
14	1,12	6,33	-22,18	5,93
15	1,14	6,60	-22,24	6,09
16	1,10	6,37	-22,21	6,25
17	1,06	6,32	-22,23	6,09
18	1,01	6,11	-22,17	6,33
19	1,03	6,06	-22,26	6,88
20	0,93	6,31	-22,21	6,13
21	1,05	6,49	-22,20	6,25
22	1,07	6,42	-22,17	6,16
23	1,09	6,46	-22,23	6,02
24	1,11	6,57	-22,23	6,08
25	1,06	6,43	-22,23	6,17
26	1,07	6,07	-22,26	6,03
27	1,02	6,10	-22,16	6,16
28	1,03	6,12	-22,50	6,11
29	1,09	6,39	-22,24	6,77
30	1,10	6,43	-22,26	6,07
31	1,10	6,66	-22,23	6,00
32	1,06	6,29	-22,35	6,07
33	1,06	6,33	-22,25	6,04
34	1,21	6,40	-22,32	6,12
35	0,94	6,36	-22,23	6,08
36	1,04	6,13	-22,31	6,36
37	1,04	6,51	-22,33	6,05

Tableau C.1. Tableau de résultats des mesures géochimiques isotopiques et élémentaires de la matière organique dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

Profondeur (cm)	<i>Bulimina exilis</i>		<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> levogyre	
	$\delta^{18}\text{O}$ vs V-PDB (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ vs V-PDB (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ vs V-PDB (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ vs V-PDB (‰)
0	2,72	-2,03	-	-
1	2,73	-2,22	-	-
2	2,74	-2,32	-	-
3	2,79	-2,25	-	-
4	2,83	-2,45	1,72	0,73
5	2,84	-2,40	1,80	0,75
6	2,85	-2,46	1,72	0,73
7	2,74	-2,32	1,60	0,85
8	2,86	-2,29	1,75	0,75
9	2,88	-2,21	1,64	0,81
10	3,00	-1,71	1,66	0,80
11	2,97	-1,77	1,41	0,87
12	3,01	-1,97	1,59	0,89
13	3,09	-1,90	1,66	0,96
14	3,07	-1,82	1,93	0,97
15	3,07	-1,64	1,64	0,86
16	3,09	-1,68	1,99	0,83
17	3,10	-1,73	1,82	0,88
18	3,12	-2,00	1,63	0,76
19	3,25	-1,60	1,68	0,97
20	3,07	-2,02	1,54	0,90
21	3,05	-1,88	1,54	0,98
22	3,10	-1,83	1,51	0,91
23	3,24	-1,64	1,67	0,88
24	3,07	-1,73	1,86	0,99
25	3,12	-1,62	1,89	1,06
26	3,20	-1,64	2,02	1,01
27	3,08	-1,83	1,92	0,95
28	3,26	-1,58	1,94	0,87
29	3,09	-1,71	1,83	0,87
30	3,20	-1,96	1,79	0,89
31	3,16	-1,82	1,76	0,83
32	3,23	-1,69	1,57	0,92
33	3,24	-1,56	1,84	0,88
34	3,22	-1,73	2,12	0,78
35	3,05	-1,85	1,75	0,80
36	3,35	-1,50	1,35	0,67
37	3,12	-1,76	1,32	0,62

Tableau C.2. Tableau de résultats d'analyses isotopiques dans les tests carbonatés du foraminifère benthiques *Bulimina exilis* et du foraminifère planctonique *Neogloboquadrina pachyderma* levogyre dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

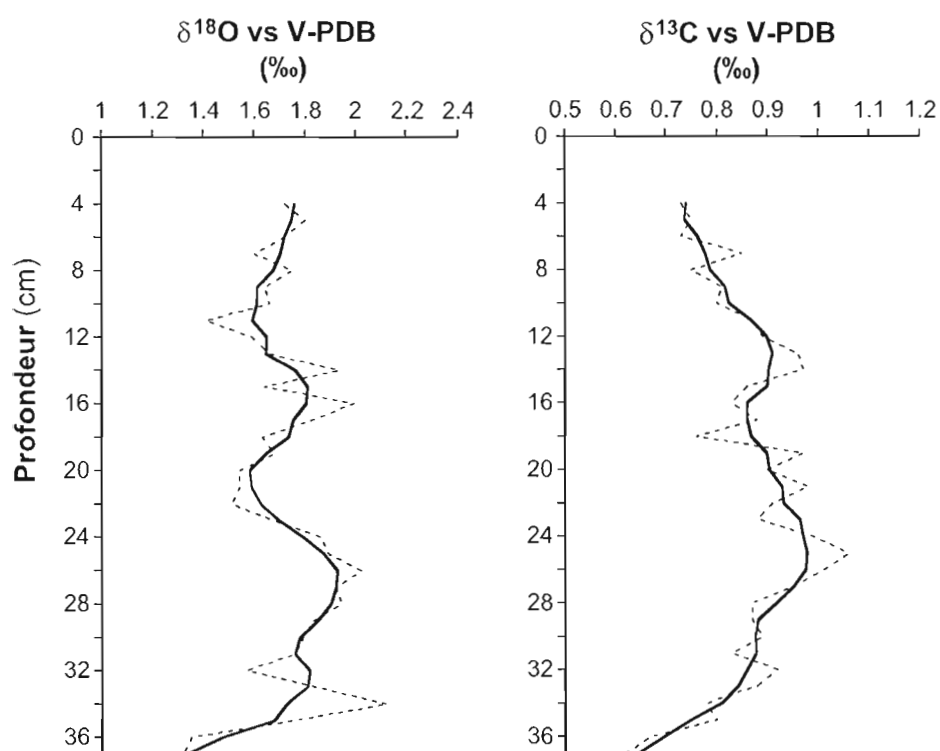


Figure C. 3. Courbes du  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) et  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) résultant de l'analyse isotopique du foraminifère planctonique *Neogloboquadrina pachyderma* levogyre dans la carotte COR0503-CL05-37BC. Aucune donnée n'est disponible pour les 4 cm supérieurs de la carotte car le nombre de foraminifères présents était insuffisant pour permettre l'analyse au spectromètre de masse.

**APPENDICE D**

**Chronologie de la carotte COR0503-CL05-37BC : modèles d'âges calculés à partir de l'excès de plomb-210 après soustraction des différentes valeurs de plomb-210 soutenu possibles.**

<b>Figure D.1.</b> Modèle d'âge no.1 .....	61
<b>Figure D.2.</b> Modèle d'âge no.2 .....	62
<b>Figure D.3.</b> Modèle d'âge no.3 .....	63
<b>Figure D.4.</b> Modèle d'âge no.4 .....	64
<b>Figure D.5.</b> Modèle d'âge no.5 .....	65
<b>Figure D.6.</b> Modèle d'âge no.6 .....	66

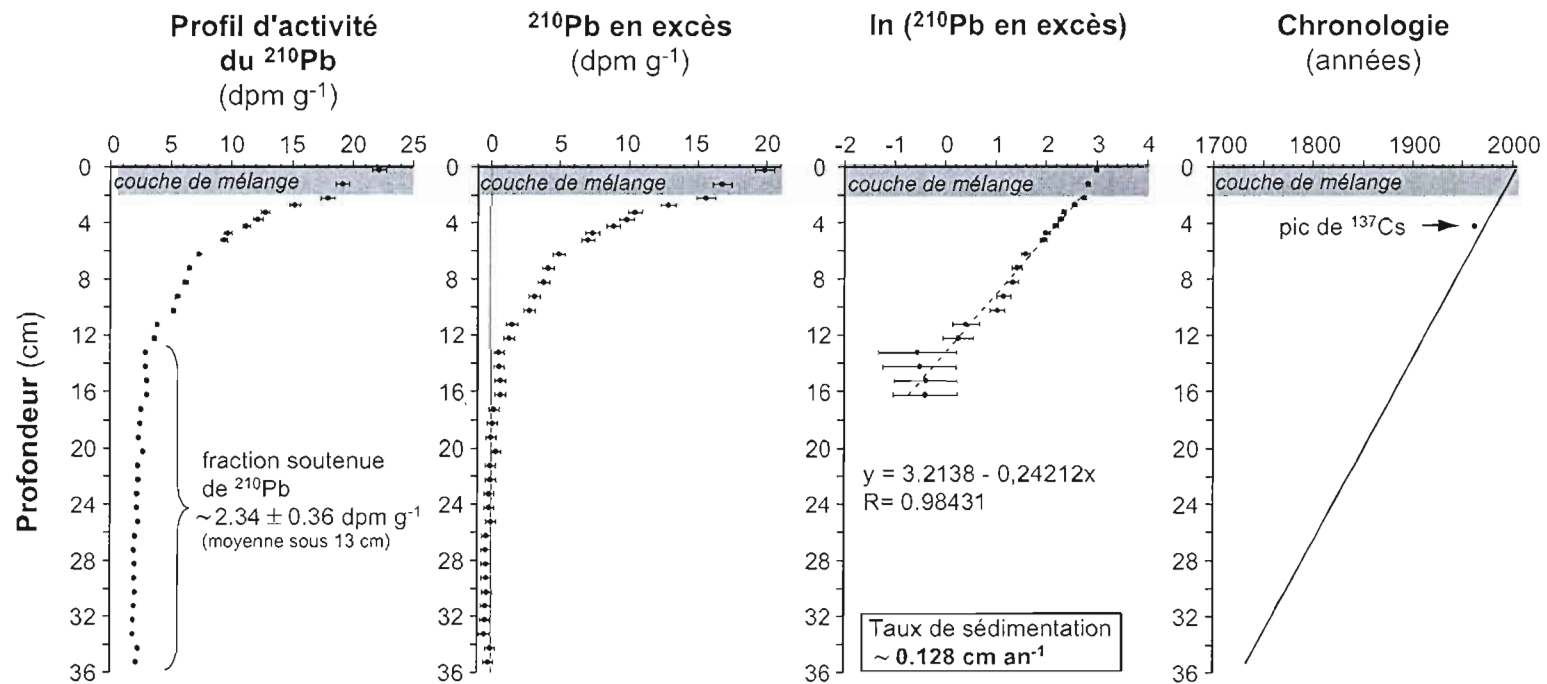


Figure D.1. Modèle d'âge no.1 obtenu à partir d'une fraction de  $^{210}\text{Pb}$  soutenu d'environ  $2.34 \pm 0.36 \text{ dpm g}^{-1}$  (moyenne sous 13 cm). À gauche, le profil d'activité du  $^{210}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur. Au centre gauche, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès en fonction de la profondeur. Au centre droit, en fonction de la profondeur, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès exprimé sur un échelle logarithmique ainsi que la régression linéaire ayant permis le calcul d'un taux de sédimentation d'environ  $0.128 \text{ cm an}^{-1}$ . À droite, la chronologie établie à partir de ce modèle d'âge ainsi que le pic de  $^{137}\text{Cs}$  se situant autour de 1963. Les 2 cm supérieurs de la carotte représentent une couche de mélange biologique, ces échantillons ont été exclus du calcul de taux de sédimentation.

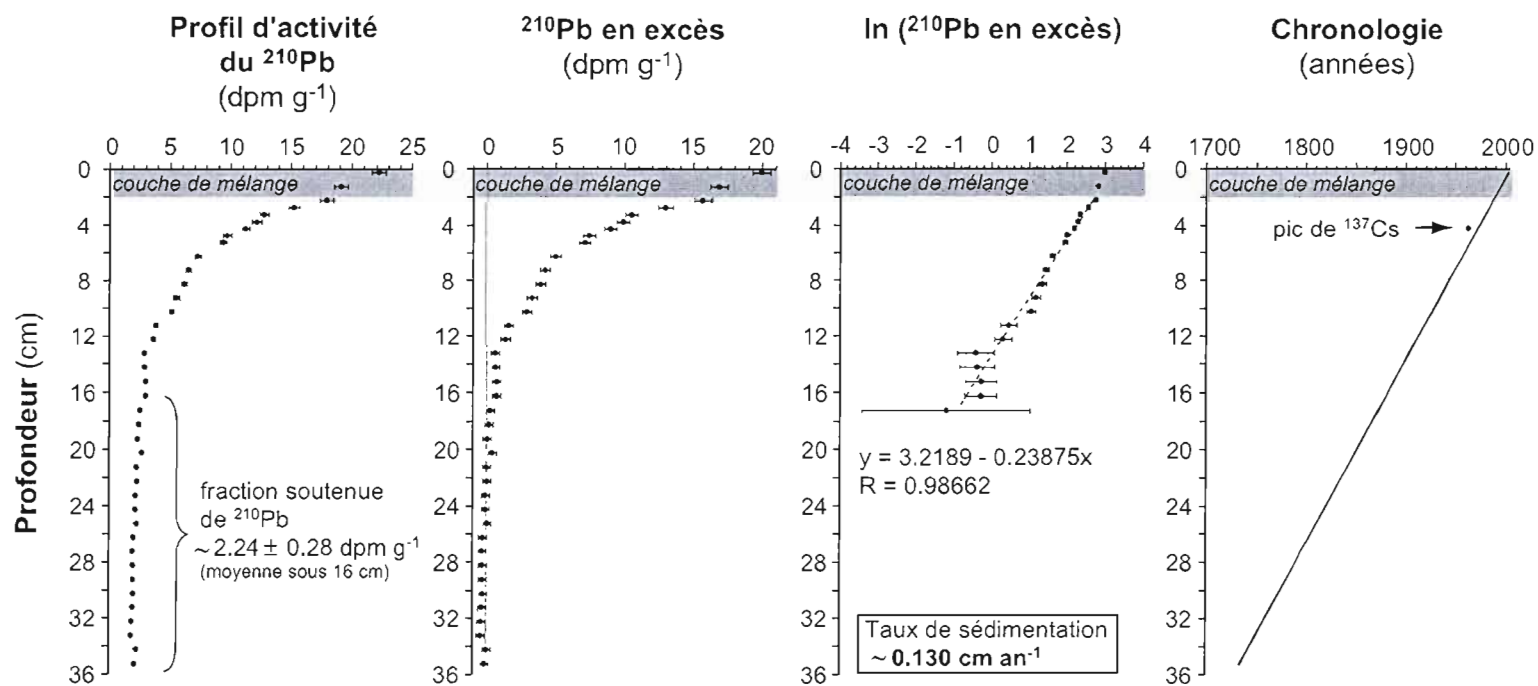


Figure D.2. Modèle d'âge no.2 obtenu à partir d'une fraction de  $^{210}\text{Pb}$  soutenu d'environ  $2.24 \pm 0.28 \text{ dpm g}^{-1}$  (moyenne sous 16 cm). À gauche, le profil d'activité du  $^{210}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur. Au centre gauche, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès en fonction de la profondeur. Au centre droit, en fonction de la profondeur, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès exprimé sur un échelle logarithmique ainsi que la régression linéaire ayant permis le calcul d'un taux de sédimentation d'environ  $0.130 \text{ cm an}^{-1}$ . À droite, la chronologie établie à partir de ce modèle d'âge ainsi que le pic de  $^{137}\text{Cs}$  se situant autour de 1963. Les 2 cm supérieurs de la carotte représentent une couche de mélange biologique, ces échantillons ont été exclus du calcul de taux de sédimentation.

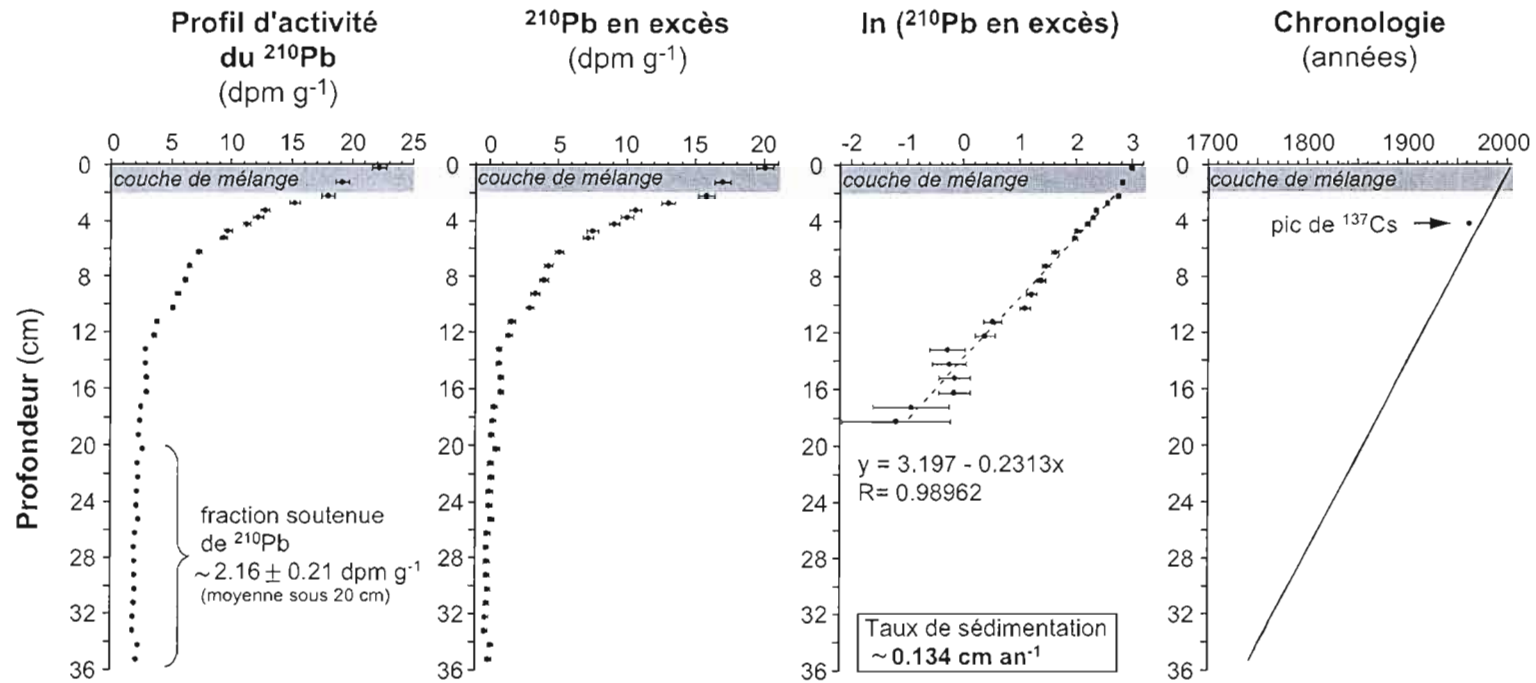


Figure D.3. Modèle d'âge no.3 obtenu à partir d'une fraction de  $^{210}\text{Pb}$  soutenue d'environ  $2.16 \pm 0.21 \text{ dpm g}^{-1}$  (moyenne sous 20 cm). À gauche, le profil d'activité du  $^{210}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur. Au centre gauche, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès en fonction de la profondeur. Au centre droit, en fonction de la profondeur, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès exprimé sur un échelle logarithmique ainsi que la régression linéaire ayant permis le calcul d'un taux de sédimentation d'environ  $0.134 \text{ cm an}^{-1}$ . À droite, la chronologie établie à partir de ce modèle d'âge ainsi que le pic de  $^{137}\text{Cs}$  se situant autour de 1963. Les 2 cm supérieurs de la carotte représentent une couche de mélange biologique, ces échantillons ont été exclus du calcul de taux de sédimentation.



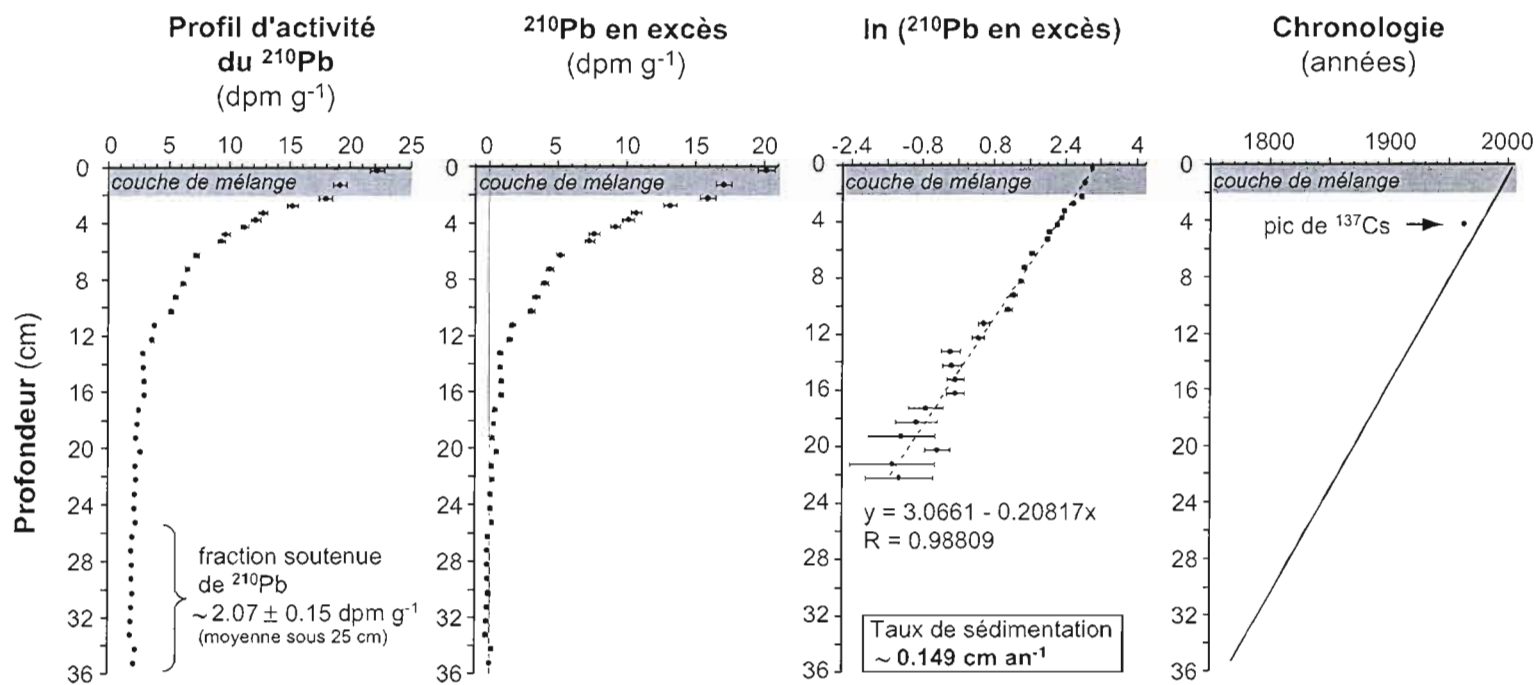


Figure D.4. Modèle d'âge no.4 obtenu à partir d'une fraction de  $^{210}\text{Pb}$  soutenue d'environ  $2.07 \pm 0.15$  dpm g $^{-1}$  (moyenne sous 25 cm). À gauche, le profil d'activité du  $^{210}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur. Au centre gauche, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès en fonction de la profondeur. Au centre droit, en fonction de la profondeur, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès exprimé sur un échelle logarithmique ainsi que la régression linéaire ayant permis le calcul d'un taux de sédimentation d'environ 0.149 cm an $^{-1}$ . À droite, la chronologie établie à partir de ce modèle d'âge ainsi que le pic de  $^{137}\text{Cs}$  se situant autour de 1963. Les 2 cm supérieurs de la carotte représentent une couche de mélange biologique, ces échantillons ont été exclus du calcul de taux de sédimentation.

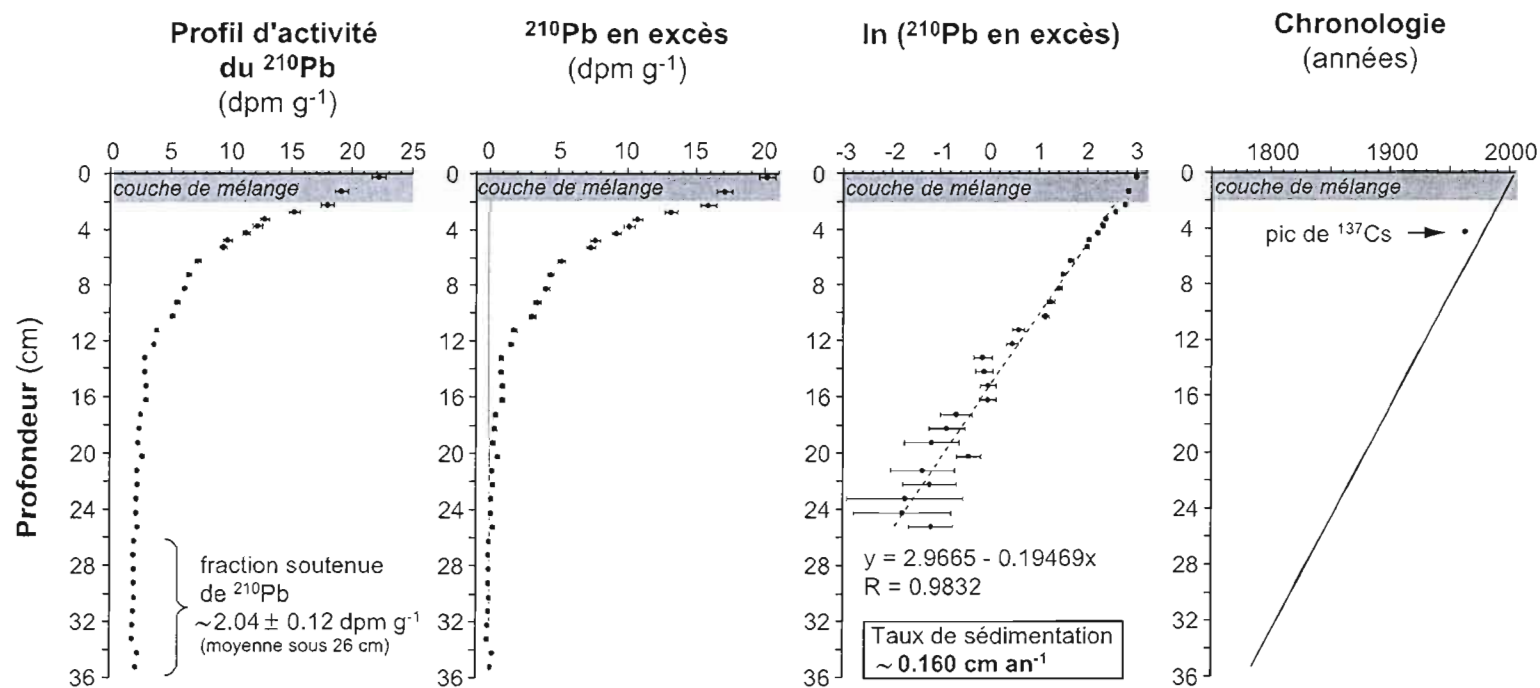


Figure D.5. Modèle d'âge no.5 obtenu à partir d'une fraction de  $^{210}\text{Pb}$  soutenu d'environ  $2.04 \pm 0.12 \text{ dpm g}^{-1}$  (moyenne sous 26 cm). À gauche, le profil d'activité du  $^{210}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur. Au centre gauche, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès en fonction de la profondeur. Au centre droit, en fonction de la profondeur, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès exprimé sur un échelle logarithmique ainsi que la régression linéaire ayant permis le calcul d'un taux de sédimentation d'environ  $0.160 \text{ cm an}^{-1}$ . À droite, la chronologie établie à partir de ce modèle d'âge ainsi que le pic de  $^{137}\text{Cs}$  se situant autour de 1963. Les 2 cm supérieurs de la carotte représentent une couche de mélange biologique, ces échantillons ont été exclus du calcul de taux de sédimentation.

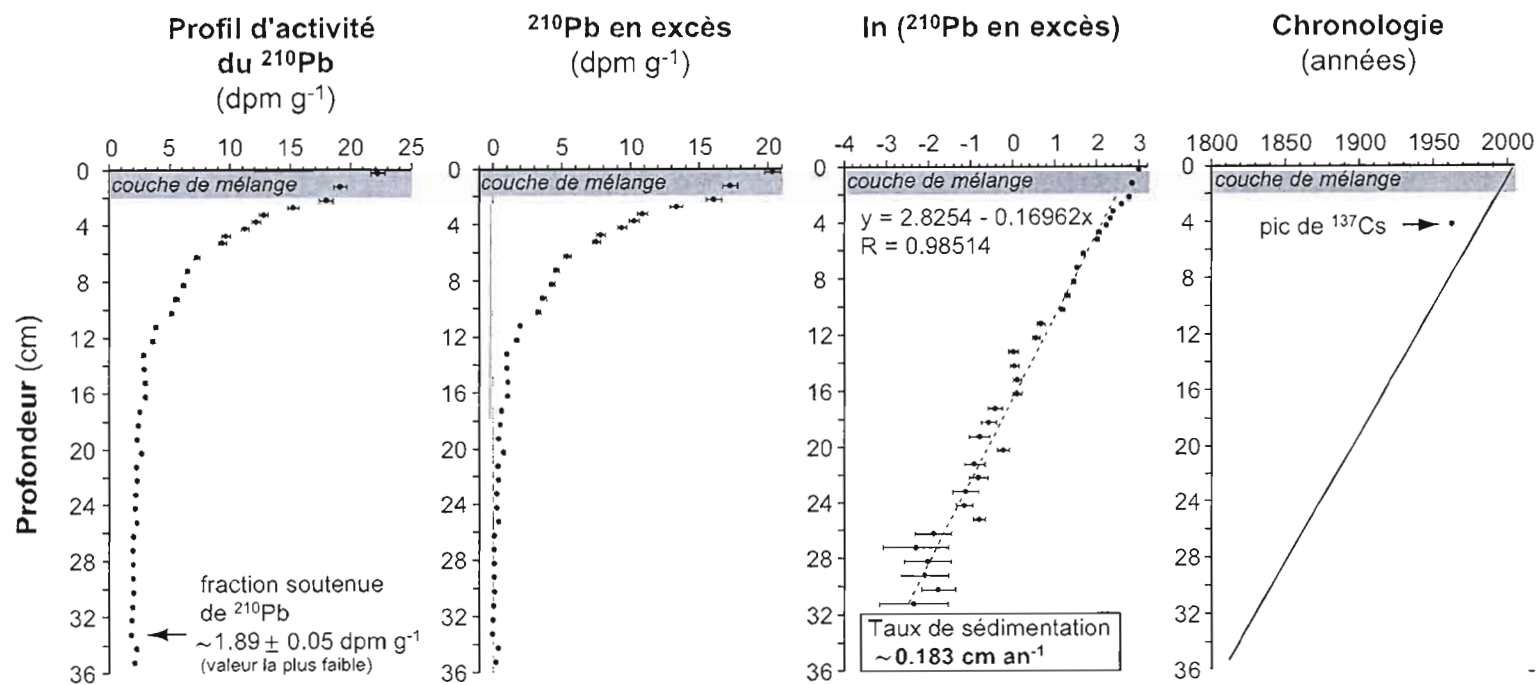


Figure D.6. Modèle d'âge no.6 obtenu à partir d'une fraction de  $^{210}\text{Pb}$  soutenu d'environ  $1.89 \pm 0.05 \text{ dpm g}^{-1}$  (valeur la plus faible). À gauche, le profil d'activité du  $^{210}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur. Au centre gauche, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès en fonction de la profondeur. Au centre droit, en fonction de la profondeur, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès exprimé sur un échelle logarithmique ainsi que la régression linéaire ayant permis le calcul d'un taux de sédimentation d'environ  $0.183 \text{ cm an}^{-1}$ . À droite, la chronologie établie à partir de ce modèle d'âge ainsi que le pic de  $^{137}\text{Cs}$  se situant autour de 1963. Les 2 cm supérieurs de la carotte représentent une couche de mélange biologique, ces échantillons ont été exclus du calcul de taux de sédimentation.

**APPENDICE E****Planches photographiques de foraminifères benthiques prises au microscope électronique à balayage**

<b>Figure E.1.</b> Planche 1 .....	68
<b>Figure E.2.</b> Planche 2 .....	69
<b>Tableau E.3.</b> Légendes .....	70
<b>Tableau E.4.</b> Réglages du microscope électronique à balayage .....	71

## Planche 1

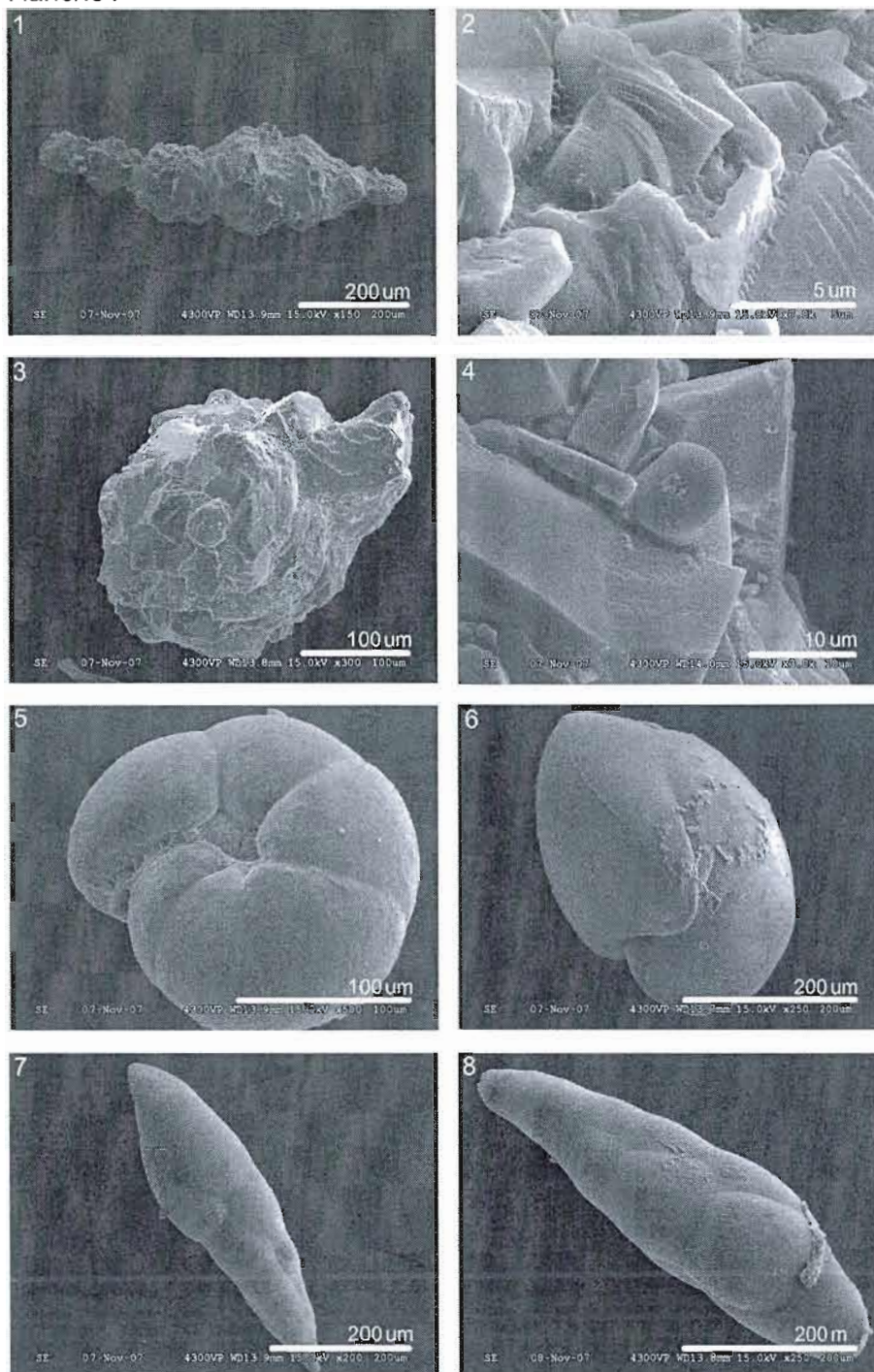


Figure E.1. Planche 1, photographies de foraminifères benthiques prélevés dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

## Planche 2

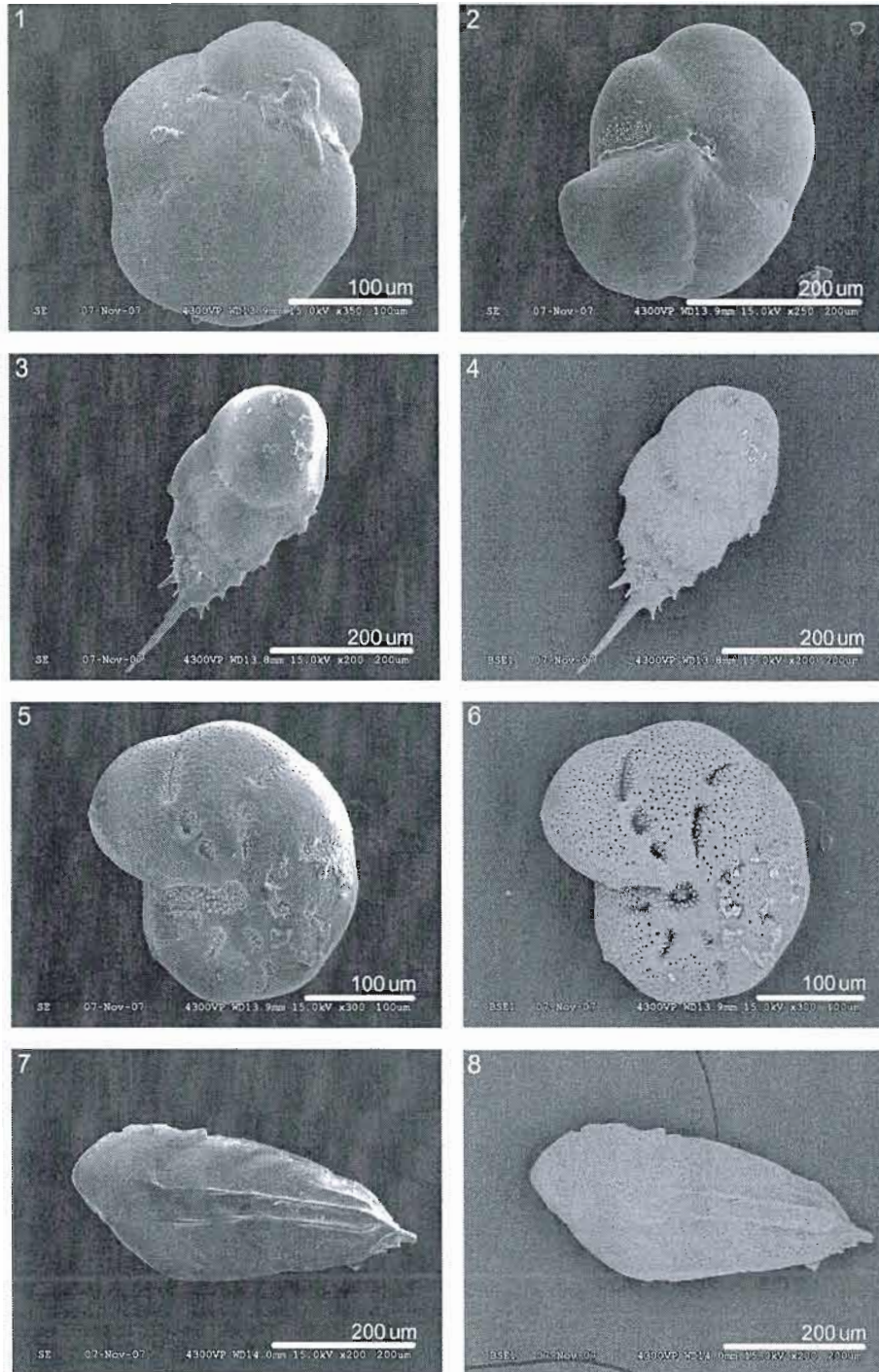


Figure E.2. Planche 2, photographies de foraminifères benthiques prélevés dans la carotte COR0503-CL05-37BC.

**Planche 1 – Photographies au MEB de tests de foraminifères benthiques**

*Les spécimens proviennent de la carotte COR0503-CL05-37BC*

- 1) *Reophax* sp.
  - 2) zoom sur test agglutiné de *Reophax* sp.
  - 3) *Saccamina sphaerica*
  - 4) zoom sur test agglutiné de *Saccamina sphaerica*
  - 5) *Haplophragmoides* sp.
  - 6) *Nonionellina labradorica*
  - 7) *Bulimina exilis*
  - 8) *Bulimina exilis*
- 

**Planche 2 – Photographies au MEB de tests de foraminifères benthiques**

*Les spécimens proviennent de la carotte COR0503-CL05-37BC*

- 1) *Oridorsalis umbonatus* (vue dorsale)
- 2) *Oridorsalis umbonatus* (vue ventrale)
- 3) *Bulimina marginata*
- 4) *Bulimina marginata* (contraste de densité)
- 5) *Elphidium excavatum*
- 6) *Elphidium excavatum* (contraste de densité)
- 7) *Brizalina subaenariensis*
- 8) *Brizalina subaenariensis* (contraste de densité)

Photo	Data number	Magnification	Accelerating voltage	Emission current	Working distance	Sub-magnification	Sub-signal	Lens mode	Vacuum
Planche 1									
1	4300VP	150	15000	44000	13900	150	SE	normal	high
2	4300VP	7000	15000	44000	13900	7000	SE	normal	high
3	4300VP	300	15000	44000	13800	300	SE	normal	high
4	4300VP	3000	15000	44000	14000	3000	SE	normal	high
5	4300VP	500	15000	44000	13900	500	SE	normal	high
6	4300VP	250	15000	44000	13700	250	SE	normal	high
7	4300VP	200	15000	44000	13900	200	SE	normal	high
8	4300VP	250	15000	44000	13800	250	SE	normal	high
Planche 2									
1	4300VP	350	15000	44000	13900	350	SE	normal	high
2	4300VP	250	15000	44000	13900	250	SE	normal	high
3	4300VP	200	15000	44000	13800	200	SE	normal	high
4	4300VP	200	15000	44000	13800	200	BSE1	normal	high
5	4300VP	300	15000	44000	13900	300	SE	normal	high
6	4300VP	300	15000	44000	13900	300	BSE1	normal	high
7	4300VP	200	15000	44000	14000	200	SE	normal	high
8	4300VP	200	15000	44000	14000	200	BSE1	normal	high

Tableau E.4. Réglages du MEB lors de la prise des photographies.