



National Institute of Marine Geology and Geo-ecology

**GEO-ECO-MARINA 13/2007**

**SPECIAL ISSUE**

# **Changements environnementaux récents dans la zone de Nord-Ouest de la Mer Noire**

**Claudia Strehie-Sliwinski**



**București-Constanța  
2007**



---

## AVANT-PROPOS

Je voudrais remercier ici tous ceux qui m'ont aidé à parvenir à la fin de ce travail de thèse, tant pour ce qui concerne la réalisation des analyses, pour l'aide à l'interprétation, mais aussi pour les conseils, l'amitié et les encouragements.

Chronologiquement, ce voyage dans le monde fascinant de la géologie marine a commencé à l'Université de Bucarest par une première rencontre avec Monsieur Dan Jipa qui nous a conduit à la connaissance des paléo-environnements sédimentaires. Je le remercie beaucoup pour son ouverture d'esprit et sa passion communicative pour la science.

Puis, ont suivi le cours de Géologie Marine de monsieur Nicolae Panin, le concours à GEOECOMAR et mon recrutement en tant qu'assistante de recherche. Je remercie Nicolae Panin pour sa confiance dans la jeune génération, son aide dans la démarche d'obtention d'une thèse en co-tutelle et pour l'honneur d'avoir accepté ma candidature en tant qu'étudiante en thèse.

Gilles Lericolais, le directeur des projets BlaSON et ASSEMBLAGE, a toujours été un important aide pendant ce travail. Merci Gilles, pour ta façon optimiste d'aborder les problèmes.

Je tiens à remercier Laurent Dever, Xavier Quidelleur et madame Elsa Cortijo (de la direction de l'école doctorale) mais aussi Herman Zeyen, le conseiller des thèses, pour m'avoir permis d'arriver à la fin de ce travail.

Un grand merci à Michel Menvielle, pour avoir accepté d'être le président du jury ainsi que pour ses diverses suggestions. Merci également aux rapporteurs et à leurs remarques constructives : Nicolas Thouveny et Nicolas Tribouvillard.

Si je devrais donner un exemple de vrai professeur, dans la complexité de ce terme, j'indiquerai sans hésitation Piotr Tucholka qui, par son extraordinaire enthousiasme, sa confiance et son dynamisme m'a énormément aidé pendant tout ce travail.

Je ne saurais jamais assez remercier Alina Tudryn qui m'a appris à aborder correctement la recherche et qui m'as encouragé dans les plus difficiles moments tout en gardant son humour et sa patience. Elle est une vraie professionnelle et une amie sans égal.

Sans le travail assidu et l'énergie positive de François Guichard, ce manuscrit n'aurait jamais la forme qu'il a aujourd'hui. Ses recommandations scientifiques, ses encouragements amicaux mais aussi ses corrections successives du français, ont beaucoup augmenté la qualité du manuscrit.

Je remercie beaucoup Christophe Colin qui m'a guidé dans le captivant domaine des argiles et m'a aidé dans le dépouillement des données RX et dans l'interprétation des analyses. Merci aussi à Olivier Dufaure, pour les analyses RX.

Monsieur Jacques Bertaux m'avait ouvert la porte de son laboratoire de l'IRD et m'avait aussi conseillé dans l'interprétation des analyses de minéralogie par infrarouge.

Michel Fontugne et Martine Paterne, du LSCE, m'ont beaucoup aidé lors de la préparation des échantillons pour les mesures  $^{14}\text{C}$ , pour l'analyse de la matière organique et pour les discussions concernant la validation des résultats. Je dois aussi remercier Michel Fontugne pour son aide compétente pendant la préparation de la soutenance.

Je suis redevable à Christine Hatté pour ses bons conseils concernant l'interprétation des données  $^{13}\text{C}$  et pour ses encouragements.

Les discussions avec Giuseppe Siani (Pepe) ont contribué à une bonne compréhension des âges réservoir.

Je remercie particulièrement Sorin Rădan pour tous ses conseils concernant les problèmes de magnétisme et aussi pour la bibliographie qu'il m'a si généreusement offerte.

Ma chère amie Irina Popescu m'a toujours réconforté avec ses bons conseils, sa sérénité et ses précieux avis scientifiques.

---

Je suis redevable à ma collègue Priscila Opreanu pour les déterminations de faunes et pour les longues discussions sur le milieu de vie préféré des diverses organismes.

Merci aussi à Ian Boomer pour les informations concernant les changements de milieu déduits des coquilles d'os-tracodes trouvées dans les sédiments.

Costina Fulga a eu la gentillesse d'analyser les minéraux lourds de mes échantillons. Aura Cehlarov s'est donné la peine de regarder des échantillons au microscope et de vérifier ma rédaction les concernant.

Je remercie Laurence Vialettes pour les analyses RX des extraits magnétiques, pour sa chaleureuse amitié et son soutien.

Un grand merci à Mihaela Melinte dont l'énergie inépuisable et l'enthousiasme scientifique m'ont beaucoup inspiré.

Comment pourrai-je assez remercier mes amis Ștefan Szobotka, Titus Brustur, Laura Jugaru, Cristina Angheluță, Irina Catianis, Maryse Mouveroux, Philippe Vialettes, Claire Waelbroek pour leur constance et confiance ?

La bataille concernant la partie graphique a été gagnée grâce à la généreuse participation de mes amis Gabriela Burcea, Rașca (Radu Cosma) et Vali Drăgoi.

Un grand merci à Mihăiță, Rici, Cristinuța et Simona pour leur dévouement, leur générosité et pour leur amitié sans équivalent. Mulțumesc, dragilor, pentru că existați !

Je remercie ma petite famille pour son support et particulièrement à Jim qui a su m'attendre autant. Thank you Jim, for your patience, love and strength!

Le soutien financier pour cette thèse a été constitué d'une bourse de doctorat du Gouvernement Français, 3 mois de bourse de la part du Département des Relations Internationales de l'Université de Paris XI et aussi le soutien de la part de GEOECOMAR, y compris par l'intermédiaire du Centre d'Excellence Euro-EcoGeoCentre-Romania.

Les mesures des paramètres magnétiques sur des u-channels ont été faites à l'Institut de Physique du Globe de Paris où j'ai été accueillie grâce à Jean-Pierre Valet et Laure Meynadier.

Une grande partie du travail en France s'est déroulée dans les locaux du LSCE à Gif-sur-Yvette (laboratoire CNRS-CEA), cette possibilité a constitué une étape importante pour la réalisation de ce travail. Je suis très reconnaissante à ce laboratoire de m'avoir reçue.

---

## RESUME

*L'objectif de ce travail est l'étude des processus et des changements environnementaux récents (durant les derniers 30000 ans) à travers leurs enregistrement sédimentaire dans la zone Nord-Ouest de la Mer Noire (carottes sédimentaires prélevées à des profondeurs allant de 55 à 2100 m sous la tranche d'eau). Nous avons privilégié des méthodes permettant d'obtenir des informations sur le milieu de dépôt et la chronologie des événements telles que : analyses des argiles, sédimentologie, magnétisme environnemental, caractéristiques isotopiques de la matière organique totale,  $^{14}\text{C}$  AMS. Afin d'obtenir une chronologie la plus fiable possible des événements nous avons effectué des datations par le  $^{14}\text{C}$  de la matière organique et des coquilles fossiles du sédiment. La comparaison des datations obtenues sur les coquilles et la matière organique provenant d'un même niveau sédimentaire nous a montré que l'application des corrections sur les données  $^{14}\text{C}$  reste difficile ; cette difficulté provient du fait*

*que le bassin a contenu tantôt de l'eau douce oxygénée, tantôt de l'eau stratifiée. C'est en associant les résultats de l'étude des taux des carbonates le long des carottes aux données  $^{14}\text{C}$  que nous avons établi l'échelle chronologique proposée. L'étude des minéraux argileux des sédiments nous a permis de conclure que pour le nord-ouest du bassin, l'origine des sédiments à smectite doit être recherchée au nord, et non au sud du bassin versant de la Mer Noire, comme il est admis dans la littérature. Les données de magnétisme environnemental nous ont permis de mettre en évidence des variations significatives dans les conditions d'oxygénation (aérobie/anaérobie) au sommet du sédiment ou dans la colonne d'eau. Ces données magnétiques, ainsi que celles de matière organique montrent aussi des modifications des conditions de salinité dans le bassin. En conclusion nous proposons une reconstitution des conditions d'environnement au cours des derniers 30000 ans.*

## ABSTRACT

*The purpose of this study is to investigate the processes and the recent environmental changes stored in the sediments from the North-Western part of the Black Sea in the last 30,000 years. We used sedimentary cores extracted from water depths ranging from 55 to 2100 m. In order to obtain information about the depositional environment and the chronology of the events, we used different methods: clay mineralogy analysis, sedimentology, environmental magnetism, organic matter characteristics and AMS radiocarbon chronology. Radiocarbon dating of the organic matter and fossil shells was used to obtain a precise chronology of the past events. It was difficult to correct the  $^{14}\text{C}$  data, because of the differences between the ages of organic matter and shells that varied significantly from one sample to another. This difficulty comes from the fact that the Black Sea basin contained*

*in some periods oxygenated fresh water and in some periods stratified salty water. The correlation between the  $^{14}\text{C}$  data and the carbonate content allowed us to set up a chronology of the sediments. The clay mineralogy pointed out that the sediments containing smectite were carried into the basin mainly from the North and not from the South of the drainage basin, as previous studies indicated. The environmental magnetism study helped us to determine the significant variations in the oxygenation of the sediment and of the water column (i.e., changes between oxygenated and anoxic conditions). The magnetism study together with the organic matter characteristics also indicates changes in the salinity of the water. Our study reveals the environmental changes that have occurred during the last 30,000 years.*



---

# TABLE DES MATIERES

<b>AVANT-PROPOS</b>	<b>3</b>
<b>RESUME</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>5</b>
<b>LISTE DE FIGURES</b>	<b>9</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX ET DES ANNEXES</b>	<b>15</b>
<b>Introduction</b>	<b>17</b>
<b>CHAPITRE 1 Présentation de la Mer Noire</b>	<b>19</b>
1.1. <i>Caractéristiques générales</i>	19
1.1.1. Description	19
1.1.2. Le climat	19
1.1.3. Caractères morphologiques du fond de la mer Noire	21
1.1.4. Apports liquides et solides dans le bassin	23
1.2. <i>Paléoclimat et paléogéographie de la région</i>	24
1.2.1. Introduction	24
1.2.2. La dernière glaciation et le dernier maximum glaciaire (DMG)	26
1.2.3. Paléogéographie de la région de la Mer Noire	29
a) Les environnements glaciaires : extension des calottes	29
b) Les environnements periglaciaires : le permafrost	29
<b>CHAPITRE 2 Matériel d'étude et chronologie</b>	<b>33</b>
2.1. <i>Présentation de la zone d'étude</i>	33
2.2. <i>Dépôts sédimentaires de surface dans la Mer Noire</i>	36
2.3. <i>Description des carottes</i>	41
2.4. <i>Identification des faciès sédimentaires</i>	41
2.5. <i>Chronologie</i>	42
2.5.1. Problématique et l'utilisation du <sup>14</sup> C pour la chronologie récente en Mer Noire	49
a) dans la littérature	49
b) cette étude	51
2.5.2. Calcul des taux de sédimentation	55
2.5.3. Chronologie proposée	58
a) âge des discontinuités	58
b) âges des limites des unités I et II	58
c) âges des faciès	58
2.6. <i>Conclusion</i>	59
<b>CHAPITRE 3 Carbonates</b>	<b>61</b>
3.1. <i>Problèmes à résoudre</i>	61
3.2. <i>Les carbonates dans le milieu aquatique</i>	61
3.3. <i>Méthode</i>	64
3.4. <i>Résultats</i>	64
3.5. <i>Discussion et interprétation</i>	65
3.5.1. Les carbonates dans les sédiments récents de la Mer Noire	65
3.5.2. Corrélation des carottes et comparaison avec les données de la littérature	70
3.6. <i>Conclusions</i>	75

<b>CHAPITRE 4 Carbone organique, rapport C/N, <math>\delta^{13}\text{C}</math></b>	<b>79</b>
4.1. Problèmes à résoudre	79
4.2. Données de la littérature	79
4.2.1. Considérations théoriques	79
4.2.2. Taux de carbone organique et rapport $\delta^{13}\text{C}$ dans les sédiments de la Mer Noire	81
4.3. Méthode	84
4.4. Résultats	84
4.4.1. Carottes peu profondes (BLKS 98-04 et BLKS 98-06)	88
4.4.2. Carottes profondes (BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-11 et BLKS 98-22)	88
4.5. Discussion et interprétation	88
4.6. Conclusion	98
<b>CHAPITRE 5 Argiles et minéralogie</b>	<b>103</b>
5.1. Introduction	103
5.2. Résultats minéralogiques	103
5.3. Discussion	107
5.3.1. Origine des minéraux argileux des sédiments	107
a) Apports du bassin versant de la Mer Noire	107
b) Cas des carottes marines étudiées	111
c) Comparaison de nos données à celles de la littérature	116
5.3.2. Signification climatique des changements minéralogiques	119
5.4. Conclusion	122
<b>CHAPITRE 6 Magnétisme environnemental</b>	<b>125</b>
6.1. Introduction	125
6.2. Paramètres magnétiques mesurés	125
6.3. Méthode	128
6.3.1. Echantillonnage	128
6.3.2. Mesures des paramètres magnétiques	128
6.4. Résultats et début d'interprétation	130
6.5. Discussion	158
6.5.1. Revue de la littérature	158
6.5.2. Interprétation des résultats	162
6.6. Conclusion	168
<b>CHAPITRE 7 Interprétation synthétique des résultats</b>	<b>177</b>
7.1. Variations des paramètres mesurés et leur relation avec le climat	177
7.2. Enregistrements des variations du niveau de la Mer Noire dans les sédiments de la plate-forme du Nord-ouest	188
<b>CHAPITRE 8 Conclusions</b>	<b>193</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>195</b>
<b>ANNEXE 1 Description lithologique des carottes</b>	<b>203</b>
<b>ANNEXE 2 Datation <math>^{14}\text{C}</math> - principe et méthode</b>	<b>243</b>
<b>ANNEXE 3 Datation <math>^{14}\text{C}</math> des sédiments et de coquilles de la Mer Noire, dans la littérature</b>	<b>247</b>
<b>ANNEXE 4 Tableaux de détermination de la faune et type de milieu pour chaque espèce</b>	<b>257</b>
<b>ANNEXE 5 Méthodes d'analyse utilisées</b>	<b>265</b>

---

## LISTE DE FIGURES

1. **Fig.1.1** Localisation de la zone d'étude (carte physique de l'Europe selon l'Atlas mondial - Mérienne, 2001)
2. **Fig.1.2** Flux moyens annuels d'eau dans les détroits du Bosphore et des Dardanelles, selon Ünlüata *et al.*, 1990 et Latif *et al.*, 1991. *Sal.* = salinité (d'après Murray *et al.*, 1991)
3. **Fig.1.3** Morphologie du bassin de la Mer Noire:
  - a) provinces physiographiques d'après Black Sea GIS, 1997
  - b) profil bathymétrique vertical au nord-ouest de la Mer Noire
4. **Fig.1.4** Circulation des eaux de surface dans la Mer Noire (d'après Oguz *et al.*, 1993)
5. **Fig.1.5** Chronostratigraphie orbitale globale (SPECMAP) des derniers 200 000 ans, d'après Imbrie *et al.* (1984), stades isotopiques basées sur la variabilité du  $\delta^{18}\text{O}$  des foraminifères benthiques d'après Martinson *et al.* (1987) et sur la stratigraphie terrestre
6. **Fig.1.6** Extension de la calotte pendant le maximum glaciaire du Weichselien inférieur (cca 90 000 – 80 000 ans BP) et localisation des lacs proglaciaires adjacents: Lac Baltique (B), Lac du Bassin de la Mer Blanche (WSB), Lac Komi (LK), Lac Ouest Sibérien (WS). Dans la zone hachurée, la limite de la calotte n'est pas connue (d'après Mangerud *et al.*, 2004; Krinner *et al.*, 2004; marges de la calotte d'après Svendsen *et al.*, 2004a)
7. **Fig.1.7** Extension de la calotte pendant le maximum glaciaire du Weichselien moyen (cca 60 000 – 50 000 ans BP) et extension des lacs proglaciaires adjacents (d'après Mangerud *et al.*, 2004; les marges de la calotte d'après Svendsen *et al.*, 2004a)
8. **Fig.1.8** Extension de la calotte eurasiennne pendant le maximum glaciaire du Weichselien supérieur (cca 20 000 ans BP) (d'après Mangerud *et al.*, 2004; Svendsen *et al.*, 2004a)
9. **Fig.1.9** Extension des glaciers en Eurasie pendant le DMG (~20 000 ans BP) et systèmes pro-glaciaires adjacents (d'après Grosswald, 1977, 1980; Arkhipov *et al.*, 1995; Svendsen *et al.*, 2004)
10. **Fig.1.10** Carte paléogéographique de la zone nord de la Mer Noire, avec les limites du permafrost continu et discontinu (Peulvast *et al.*, 2000)
11. **Fig.2.1** Profils sismiques de la mission BlaSON 1 et localisation des carottes étudiées
12. **Fig.2.2** Localisation des carottes sur les profils sismiques HR 24-traces 9, 8 et 7 (Lericolais, document non publié)
13. **Fig.2.3** Distribution des unités litho-stratigraphiques à la surface de sédiments de la plate-forme Nord-ouest de la Mer Noire (d'après Rădan, données non publiés)
14. **Fig.2.4** Limites et âges des unités litho-stratigraphiques selon divers auteurs (modifié d'après Jones et Gagnon, 1994)
15. **Fig.2.5** L'unité I et ses trois sous-unités : la première invasion du coccolite *Emiliana huxleyi*, le sapropèle de transition et la dernière invasion de *Emiliana huxleyi* (carotte BLKS 98-11, 0-23 cm)
16. **Fig.2.6** Faciès similaires dans les carottes situées sur la plate-forme continentale (a), sur le piémont continental (b) et dans la zone abyssale (c)
17. **Fig.2.7** Faciès M1: vase à débris de *Modiolus phaseolinus* (Carotte BLKS 98-06, 0-5 cm)
18. **Fig.2.8** Faciès M2: vase à *Mytilus galloprovincialis* (Carotte BLKS 98-01, 19-34 cm)
19. **Fig.2.9** Faciès S1a et b: vase sableuse à débris de *Dreissena* (en haut S1a: carotte BLVK 98-01, 34-49 cm; en bas S1a et b: carotte BLKS 98-04, 7-10 et 10-29 cm)
20. **Fig.2.10** Faciès S2 : alternance sable fin - silt avec des granules et des lamines noirs, sans coquille (Carotte BLKS 98-05 ; 12-76 cm)
21. **Fig.2.11** Faciès S3 : sable fin à débris des coquilles, granoclassement normal et points noirs (carotte BLKS 98-06 ; 21-46 cm)

22. **Fig.2.12** Faciès S4. En haut: S4a - vase sableuse avec des granules, points dispersés et lamines noirs, sans coquille (carotte BLKS 98-06; 46-105 cm). En bas: S4b - sable fin à lamines noirs et intercalations sableuses (carotte BLKS 98-06; 105-125 cm)
23. **Fig.2.13** Faciès S5 - alternance vase sableuse - sable fin. Les niveaux sont homogènes à limites nettes, sans granoclassement, sans faune visible. Rares nodules de sable micacé (Carotte BLKS 98-06; 125-265 cm)
24. **Fig.2.14** Faciès S6 - Vase à forte odeur de H<sub>2</sub>S et à niveaux de coquilles ; la vase contient des débris de coquilles et même de rares coquilles entières, dispersées (BLKS 98-07 ; 10-105 cm)
25. **Fig.2.15** Faciès S7 - Vase à rares débris de coquilles et à coquilles entières bien conservées; la vase présente des taches noires et des niveaux sableux sub-centimétriques (BLKS 98-07; 105-324 cm)
26. **Fig.2.16** Faciès S8 - Vase très fine, homogène, sans coquille (S8) (carotte BLKS 98-07 ; 109-126 et 138-146 cm)
27. **Fig.2.17** Faciès M3 (0-23cm) et M4 (23-43cm) : a) Vase à coccolites (M3) ; b) vase à sapropèle (M4) : 23-61 cm (carotte BLKS 98-11, 0-61 cm).
28. **Fig.2.18** Faciès S9 - Vase colorée, sans organisation interne, à lamines et taches noires (carotte BLKS 98-22, 30-50 cm)
29. **Fig.2.19** Faciès S10 - vase très fine avec des bandes et des nodules noirs (carotte BLKS 98-22, 50-107 cm)
30. **Fig.2.20** Faciès S11 - vase brune avec des fissures et moins de granules noirs (carotte BLKS 98-11, 300-320 cm)
31. **Fig.2.21** Faciès S12 – alternances de vases fines et grossières (BLKS 98-22, 130-150).
32. **Fig.2.22** Disposition des âges mesurés en fonction de la profondeur dans la carotte
33. **Fig.2.23** Localisation des carottes de la littérature et de cette étude avec des datations <sup>14</sup>C de la limite des unités II et III.
34. **Fig.2.24** Représentation d'âges <sup>14</sup>C conventionnels non-correctés des carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06 en fonction de la profondeur des échantillons dans la carotte. L'erreur 1 sigma est indiqué
35. **Fig.2.25** Intervalle sans sédimentation dans les carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06
36. **Fig.3.1** Milieux de dépôt des carbonates
37. **Fig.3.2** Milieux marins avec dépôts de carbonates
38. **Fig.3.3** Structures carbonatées associées aux émissions de méthane dans les sédiments (d'après Gulin *et al.*, 2003)
39. **Fig.3.4** Taux de carbonates, faciès et âges pour les carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06
40. **Fig.3.5** Taux de carbonates, faciès et âges pour les carottes BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-10, BLKS 98-11 et BLKS 98-22 (les valeurs de carbonates pour la carotte 10 d'après Major, 2002; une partie de valeurs de carbonates pour la carotte 22 d'après Popescu, 2002)
41. **Fig.3.6** Localisation des carottes analysées pour les taux de carbonates dans la littérature et dans cette étude
42. **Fig.3.7** Taux des carbonates et de carbone organique dans les sédiments de carottes de la Mer Noire, dans la littérature: a) Ross *et al.*, 1970 ; b) Calvert *et al.*, 1987 ; c) Arthur *et al.*, 1994 ; d) Calvert et Karlin, 1998; e) Arthur et Dean, 1998; f) Major *et al.*, 2002
43. **Fig.3.8** Similarités entre les résultats d'Arthur et Dean, 1998 et ceux de cette étude pour les carottes BLKS 98-11 et BLKS 98-22
44. **Fig.3.9** Taux de carbonates dans le sédiment des carottes BLKS 98-11 et BLKS 98-22, en fonction de l'âge; comparaison avec les valeurs de carbonates de Major *et al.*, 2002 pour la carotte BLKS 98-10; taux des sédimentation de la carotte BLKS 98-11 calculés : a) en utilisant l'âge 17310 ans BP; b) en ignorant l'âge 17310 ans BP
45. **Fig.4.1** Composition isotopique du carbone fixé par la photosynthèse. A. Plantes terrestres ; B. Plantes **C3** et **C4** ; C. Plantes CAM ; D. Algues ; E. Plantes aquatiques ; F. Plantes marines sans plancton ; G. Plantes lacustres sans plancton ; H. Plancton marin (compilation par Deines, 1980). Les zones d'ombre représentent l'intervalle de variations des valeurs rencontrées lors de cette étude
46. **Fig.4.2** Composition isotopique des sédiments récents marins (compilation par Deines, 1980)
47. **Fig.4.3** Sources de la matière organique distinguées en fonction des rapports C/N et δ<sup>13</sup>C (d'après Meyers, 1994)
48. **Fig.4.4** Taux de δ<sup>13</sup>C, carbone organique, azote et C/N pour la carotte BLKS 98-04
49. **Fig.4.5** Taux de δ<sup>13</sup>C, carbone organique, azote et C/N le long de la carotte BLKS 98-06
50. **Fig.4.6** Taux de δ<sup>13</sup>C, carbone organique, azote et rapport C/N pour le carottier pilote BLCP 98-09 et la carotte BLKS 98-09
51. **Fig.4.7** Taux de δ<sup>13</sup>C, carbone organique, azote et rapport C/N le long de la carotte BLKS 98-11
52. **Fig.4.8** Taux de δ<sup>13</sup>C, carbone organique, azote et rapport C/N le long de la carotte BLKS 98-22
53. **Fig.4.9** Rapport isotopique δ<sup>13</sup>C de la matière organique du sédiment le long de carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06, BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-11 et BLKS 98-22
54. **Fig.4.10** Fréquence de distribution des rapports δ<sup>13</sup>C et C/N pour 10 groupes de plantes (d'après Cloern *et al.*, 2002) et intervalles de variation de ces paramètres dans les carottes étudiées:  
a) BLKS 98-04 et BLKS 98-06  
b) BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-11 et BLKS 98-22 – faciès S10, S9 et S6

- b2) BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-11 et BLKS 98-22 – faciès M4 et M3 (sapropèle et coccolites)
55. **Fig.4.11** Identification de la source possible de la matière organique par la représentation du rapport C/N en fonction des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  (d'après Meyers, 1994) pour les carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06, BLKS 98-09 et BLKS 98-11 et BLKS 98-22 : a) toutes les analyses ; b) analyses pour chaque carotte ; c) analyses pour toutes les carottes profondes et ensuite sur chaque unité sédimentaire
56. **Fig.4.12** Taux de carbone organique, d'azote et rapport C/N de la matière organique du sédiment pour le sommet des carottes BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-11 et BLKS 98-22
57. **Fig.5.1** Variation de la susceptibilité magnétique des sédiments, en parallèle avec le rapport smectite/illite (S/I), les types d'argiles, les minéraux argileux déterminés par IR, les carbonates et la lithologie de la carotte BLKS 98-06
58. **Fig.5.2** Coefficients de corrélation entre les argiles de la carotte BLKS 98-06, et représentation graphique de l'anti-corrélation entre la smectite et l'illite.
59. **Fig.5.3** Contenu en minéraux lourds dans les sédiments de quelques niveaux des carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06
60. **Fig.5.4** Variation de la susceptibilité magnétique, du rapport smectite/illite (S/I), des types d'argiles, des minéraux déterminés par IR et de la lithologie de la carotte BLKS 98-22. L'échelle verticale représente la profondeur dans la carotte
61. **Fig.5.5.** Coefficients de corrélation entre les argiles de la carotte BLKS 98-22, représentation graphique des anti-corrélations illite-smectite, smectite-kaolinite, smectite-chlorite et de la corrélation illite-kaolinite. NB : les corrélations S-K, S-Ch et I-K sont restreints à l'intervalle 27-706 cm
62. **Fig.5.6** Distribution des minéraux argileux dans les sédiments de surface de la Mer Noire (d'après Stoffers et Müller, 1972)
63. **Fig.5.7** Variation du rapport smectite/illite dans les sédiments superficiels de la Mer Noire et contenu en minéraux argileux dans les suspensions de quelques fleuves (d'après Rădan et Jipa, 1975). Les étoiles représentent les carottes de notre étude ; les cercles vides: les carottes de la mission *Odysseus 65* et le cercle plein : une carotte de la mission *Atlantis II*, 1969
64. **Fig.5.8** Distribution des minéraux argileux dans les sédiments superficiels du Nord-Ouest de la Mer Noire (d'après Rădan, 1999) et localisation de carottes étudiées. Les étoiles représentent les carottes étudiées ici, les triangles : les points d'échantillonnage pour la réalisation de la carte, le cercle vide: la carotte P6507-14. A noter les échelles différentes pour les pourcentages d'argiles
65. **Fig.5.9** Provinces minéralogiques de la Mer Noire (modifié par Fulga 2005, d'après Müller et Stoffers, 1974 ; Novicova et Dimitrov, 1979 ; Fulga, 1996)
66. **Fig.5.10** Variation de la k, du rapport smectite/illite, du type d'argiles, des minéraux argileux déterminés par IR et de la lithologie de la carotte BLKS 98-22, en fonction de l'âge
67. **Fig.5.11** Corrélation des courbes de smectite des carottes BLKS 98-22 et 1474
68. **Fig.5.12** Corrélation des pics de smectite des carottes BLKS 98-22 et P6507-15
69. **Fig.5.13** Corrélation des pics de smectite des carottes BLKS 98-22 et BLKS 98-10
70. **Fig.6.1** Le diagramme de Day *et al.* (1977) pour les principaux minéraux magnétiques, selon les données de Hcr/Hc et Mrs/Ms trouvés dans la littérature (compilation par Peters et Dekkers, 2003)
71. **Fig.6.2** Schéma du magnétomètre cryogénique à SQUID 2G Enterprises 755-R de l'IPG Paris
72. **Fig.6.3** Balance de Curie de l'Université de Paris-Sud XI, Orsay ; A. Vue d'ensemble; B. Détail
73. **Fig.6.4** Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-04 ( $\kappa$ , ARN, ARN20, ARA, Ms/masse, Hc, ARA/ $\kappa$ , ARN20/ $\kappa$ ) ; âges 14C conventionnelles non-corrigées ; MO – matière organique
74. **Fig.6.5** Paramètres d'hystérésis et comportement thermomagnétique des échantillons discrets de la carotte BLKS 98-04
75. **Fig.6.6** Représentation des rapports Hcr/Hc en fonction de Mrs/Ms sur un diagramme de Day. Les échantillons de la carotte BLKS 98-04 sont représentés en vert, ceux de la carotte BLKS 98-06 en jaune
76. **Fig.6.7** DRX pour deux niveaux de la carotte BLKS 98-04 : – a) greigite (G) et quartz (Q) au niveau 64 cm et b) pyrite (P), quartz, calcite (Ca) et aragonite (A) au niveau 17 cm
77. **Fig.6.8** Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-06 ( $\kappa$ , ARN, ARN20, ARA, Ms/masse, Hc, ARA/ $\kappa$ , ARN20/ $\kappa$ ) ; D – *Dreissena*, MO – matière organique
78. **Fig.6.9** Paramètres d'hystérésis et comportement thermomagnétique des échantillons discrets de la carotte BLKS 98-06
79. **Fig.6.10** DRX pour deux niveaux de la carotte BLKS 98-06: a) greigite (G), quartz (Q) et calcite (Ca) au niveau 27 cm et b) pyrite (P) et quartz dans le sédiment décarbonaté du niveau 4 cm (analysé par F. André, 1999)
80. **Fig.6.11** Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-09:  $\kappa$ , ARN20, ARN20/ $\kappa$ , Ms/masse, Mrs/masse, Hc, Hcr, Mrs/Ms, S.C./masse et le comportement thermomagnétique des échantillons
81. **Fig.6.12** Représentation de Hcr /Hc en fonction de Mrs/ Ms (diagramme de Day-Fuller-Schmidt) pour les échantillons de la carotte BLKS 98-09

82. **Fig.6.13** Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-10 :  $\kappa$ , ARA, ARA/ $\kappa$  et comportement thermomagnétique des échantillons discrets
83. **Fig.6.14** Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-11 :  $\kappa$ , ARN20, ARA, ARA/ $\kappa$ , ARN20/ $\kappa$
84. **Fig.6.15** Paramètres d'hystérésis et comportement thermomagnétique des échantillons discrets de la carotte BLKS 98-11
85. **Fig.6.16** Représentation de Hcr /Hc en fonction de Mrs/Ms (diagramme de Day-Fuller-Schmidt) pour les échantillons de la carotte BLKS 98-11
86. **Fig.6.17** Comportement de sédiments de la carotte BLKS 98-11 pendant les expériences à la Balance de Curie. Sédiment total chauffé à l'air jusqu'à 650°C pour un cycle de 50 minutes (25' de chauffe, 25' de refroidissement) dans un champ de 0,375 T : a) Niveaux 1 - 183 cm ; b) Niveaux 190 - 736 cm
87. **Fig.6.18** Spectres DRX sur le sédiment total de la carotte BLKS 98-11 au niveaux:
- 9 cm - contenant de la calcite (Ca), du quartz (Q) et de la pyrite (P) ;
  - 56 cm - contenant de la pyrite (P) de la muscovite (Mu) et de la calcite (Ca) ;
  - 116 cm - contenant de la calcite (Ca), du quartz (Q), de la pyrite (P), et peut-être de la sidérite (S) ;
  - 166-167 cm - contenant du quartz (Q), de l'albite (Ab), et peut-être de la pyrrhotite hexagonale (Py)
88. **Fig.6.19** Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-22:  $\kappa$ , ARN, ARN20mT, ARA, Ms/masse, Hc, ARA/  $\kappa$ , ARN20-mT/  $\kappa$ ; âges  $^{14}\text{C}$  conventionnelles non-corrigées
89. **Fig.6.20** Paramètres d'hystérésis et comportement thermomagnétique des échantillons discrets de la carotte BLKS 98-22. A l'exception du niveau 241 cm dont la courbe représente le comportement thermomagnétique de l'extrait magnétique, le reste des expériences à la Balance de Curie sont réalisées sur le sédiment total chauffé à l'air jusqu'à 650°C, pour un cycle de 50 minutes (25' de chauffe, 25' de refroidissement) dans un champ de 0,375 T.
90. **Fig.6.21** Représentation de Hcr /Hc en fonction de Mrs/Ms (diagramme de Day-Fuller-Schmidt) pour les échantillons de la carotte BLKS 98-22
91. **Fig.6.22** Comportement de sédiments de la carotte BLKS 98-22 pendant les expériences à la Balance de Curie. Sédiment total chauffé à 650°C pour un cycle de 50 minutes (25' de chauffe, 25' de refroidissement) dans un champ de 0,375 T
92. **Fig.6.23** Spectres DRX pour le niveau 241 cm de la carotte BLKS 98-22 : a) sédiment total contenant de la pyrrhotite hexagonale (Py), de la greigite, du quartz et de la calcite (Ca) ; b) extrait magnétique du sédiment, contenant de la greigite (G) et du quartz (Q).
93. **Fig.6.24** Susceptibilité magnétique des sédiments de fond du nord-ouest de la Mer Noire (d'après Rădan *et al.*, 1998)
94. **Fig.6.25** Courbes de la susceptibilité magnétique des carottes étudiées et leur minéralogie magnétique. Ages  $^{14}\text{C}$  conventionnels non-corrigés
95. **Fig.6.26** Rapport Hcr/Hc vs. Mrs/Ms (diagramme de Day-Fuller-Schmidt) de tous les échantillons analysés dans les carottes BLKS 98-04, 06, 09, 11 et 22
96. **Fig.6.27** Comparaison des propriétés magnétiques des carottes d'eau peu profonde BLKS 98-04 et BLKS 98-06 (les premiers 80 cm) ; sur le graphe est marqué le type de faune dominante sur certains intervalles
97. **Fig.6.28** Comparaison des propriétés magnétiques des carottes d'eau profonde BLKS 98-10, MD04-2754, BLKS 98-11 et BLKS 98-22
98. **Fig.6.29** Représentation de la susceptibilité magnétique et des carbonates en fonction du temps pour les carottes BLKS et pour la carotte MD04-2754
99. **Fig.7.1** Les derniers 30 000 ans: chronostratigraphie orbitale globale (SPECMAP), stades isotopiques sur le  $\delta^{18}\text{O}$  des foraminifères stratigraphie terrestre et de la Mer Noire
100. **Fig.7.2** Variations du niveau et changements du milieu dans le bassin de la Mer Noire pendant le Pléistocène supérieur et l'Holocène (d'après Chepalyga, 1984)
101. **Fig.7.3** Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-04 et les intervalles de temps analysés dans le texte
102. **Fig.7.4** Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-06 et les intervalles de temps analysés dans le texte
103. **Fig.7.5** Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-11 et les intervalles de temps analysés dans le texte
104. **Fig.7.6** Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-22 et les intervalles de temps analysés dans le texte
105. **Fig.7.7** Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-09 et les intervalles de temps analysés dans le texte
106. **Fig.7.8** Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-10 et les intervalles de temps analysés dans le texte
107. **Fig.7.9** Âges des discontinuités et taux de sédimentation dans les carottes de plateforme continentale BLKS 98-04 et BLKS 98-06

- 
108. **Fig.7.10** Terrasse créée par l'abrasion des vagues (wave-cut terrace = WCT) identifiée à -90 ÷ -110 m de profondeur par Popescu *et al.*, 2004, sur les profils sismiques de cette zone et la position des carottes de cette étude le long des profils de carottage
109. **Fig.7.11** Courbes de variation du niveau de la Mer Noire et de l'Océan Mondial pendant les derniers 20000 ans. Sont sélectionnés en principal les courbes pour la partie nord-ouest du bassin, à l'exception de ceux de Serebryanny (1982), Fedorov (1971) et Nevevskiy (1967) qui représentent des compilations des données des différentes zones autour du bassin
110. **Fig.A2.1** Dispersion des âges  $^{14}\text{C}$  en fonction des rapports  $\delta^{13}\text{C}$ , en nature (d'après Polach, 1976).
111. **Fig.A2.2** Dérive des âges  $^{14}\text{C}$  mise en évidence par les études dendro-chronologiques (d'après Fontugne, 1996).
112. **Fig.A5.1** Aimantations et désaimantations linéaires des corps **A.** dia- et **B.** paramagnétiques ; **C.** Cycle hystérésis pour un calcaire pélagique rose, présentant l'aimantation de saturation ( $M_s$ ), la rémanence de saturation ( $M_{rs}$ ) et le champ coercitif ( $H_c$ ). Le cycle resserré est dû à la présence de magnétite à coercivité basse et d'hématite à coercivité haute. (modifié d'après Opdyke et Channell, 1996 et Maher *et al.*, 1999)
113. **Fig.A5.2** a. Orientations des domaines dans un corps polycristallin ; b. Parois de Bloch
114. **Fig.A5.3** L'arrangement des moments de spin associés aux différents comportements magnétiques
115. **Fig.A5.4** Diagramme ternaire indiquant les minéraux magnétiques formés d'oxydes de fer, les solutions solides de titanomagnétite et titanohématite, et la tendance d'oxydation vers la titanomagnétite (d'après Opdyke et Channell, 1996)

+ 37 Planches (descriptions de carottes)



---

## LISTE DES TABLEAUX ET DES ANNEXES

1. **Tab. 1.1** Morphologie du fond de la Mer Noire (d'après Ross *et al.*, 1974 ; Panin *et al.*, 1977)
2. **Tab. 1.2** Apports liquides et solides des rivières qui débouchent dans la mer Noire (d'après Panin et Jipa, 1998)
3. **Tab. 1.3** Corrélation des périodes glaciaires interglaciaires du Pléistocène en domaine continental d'Europe et Amérique de Nord avec les bassins marins de la Mer Noire et de la Mer Méditerranée (compilation d'après Haq et Van Eysinga, 1987 et Koreneva et Kartasova, 1978)
4. **Tab. 2.1** Coordonnées et types des carottes analysées
5. **Tab. 2.2** Corrélations de la stratigraphie des derniers 40 000 ans de la Mer Noire avec celle de l'Europe du Nord-ouest (compilation d'après Degens et Ross, 1972 ; Wall et Dale, 1974 ; Koreneva et Kartasova, 1978 ; Scherbakov et Babak, 1979 ; Caraivan et Selaru, 1985 ; Haq et Eysinga, 1987 ; Hay *et al.*, 1991, Jones et Gagnon, 1994)
6. **Tab. 2.3** Corrélation des faciès de diverses profondeurs dans le bassin de la Mer Noire (d'après Panin et Popescu, 2002)
7. **Tab. 2.4** Liste des échantillons datés, dans 7 carottes du NO de la Mer Noire. Les dates ont été obtenues sur des coquilles de mollusques et sur la matière organique (MO) du sédiment décarbonaté
8. **Tab. 2.5** Différences entre les dates  $^{14}\text{C}$  des coquilles et de la matière organique de sédiments, obtenus pour 4 niveaux des carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06
9. **Tab. 2.6** Calcul de taux de sédimentation pour certains intervalles des carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06, BLKS 98-11 et BLKS 98-22
10. **Tab. 2.7** Données sur les taux de sédimentation en Mer Noire selon les auteurs
11. **Tab. 2.8** Synthèse de faciès identifiés avec leurs âges
12. **Tab. 3.1** Analyses de taux de carbonates des sédiments des carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06, BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-10, BLKS 98-11, BLKS 98-22
13. **Tab. 4.1** Rapports atomiques C/N et valeurs du  $\delta^{13}\text{C}$  organique représentatifs pour différentes sources de matière organique dans les sédiments aquatiques : algues marines, algues lacustres, plantes C3 et plantes C4 (modifié d'après Meyers, 1994 et Cloern *et al.*, 2002)
14. **Tab. 4.2** Valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  du carbone provenant de diverses sources (matière organique, carbonates,  $\text{CO}_2$ ) (compilation d'après Deines, 1980 et Meyers, 1994)
15. **Tab. 4.3** Analyses du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$ , du taux de carbone organique, de l'azote et du rapport C/N, pour la carotte BLKS 98-04
16. **Tab. 4.4** Analyses du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$ , du taux de carbone organique, de l'azote et du rapport C/N, pour la carotte BLKS 98-06
17. **Tab. 4.5** Analyses du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$ , du taux de carbone organique, de l'azote et du rapport C/N, pour les carottes BLCP 98-09 et BLKS 98-09
18. **Tab. 4.6** Analyses du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$ , du taux de carbone organique, de l'azote et du rapport C/N, pour la carotte BLKS 98-11
19. **Tab. 4.7** Analyses du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$ , du taux de carbone organique, de l'azote et du rapport C/N, pour la carotte BLKS 98-22
20. **Tab. 5.1** Pourcentage de divers types d'argiles, indice de cristallinité de l'illite (Ic) et rapport smectite /illite (S/I) dans les sédiments de la carotte BLKS 98-06
21. **Tab. 5.2** Minéraux lourds dans les sédiments de quelques niveaux de carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06

- 
22. **Tab. 5.3** Pourcentage de divers types d'argiles, indice de cristallinité de l'illite (Ic) et rapport smectite /illite (S/I) dans les sédiments de la carotte BLKS 98-22
23. **Tab. 6.1** Paramètres magnétiques à la température ambiante, pour les plus importants minéraux magnétiques (compilation d'après Thompson et Oldfield (1986), Roberts (1995), Maher *et al.* (1999) et Peters et Dekkers (2003))
24. **Tab. 6.2** Carottes analysées pour les paramètres magnétiques
25. **Tab. 6.3** Paramètres d'hystérésis des carottes : a) BLKS 98-04 et b) BLKS 98-06
26. **Tab. 6.4** Paramètres d'hystérésis des carottes : a) BLKS 98-09 ; b) BLKS 98-11 et c) BLKS 98-22
27. **Tab. 7.1** Type et nombre d'analyses effectuées sur les carottes de cette étude

**Annexe 1** Description lithologique des carottes

**Annexe 2** Datation <sup>14</sup>C - principe et méthode

**Annexe 3** Datations <sup>14</sup>C des sédiments et coquilles de la Mer Noire, dans la littérature

**Annexe 4** Tableaux de détermination de la faune avec le milieu préférée par les diverses espèces

**Annexe 5** Méthodes d'analyse utilisées

---

## INTRODUCTION

Le bassin intracontinental de la Mer Noire est le plus grand des bassins européens de ce type et le plus grand bassin anoxique de la Terre. Ses sédiments sont susceptibles de servir de matériel pour comprendre les liens entre les enregistrements paléoclimatiques obtenus en milieux marins ouverts et des enregistrements paléoclimatiques continentaux concernant l'Europe occidentale (via les apports issus du Danube), les plaines russes (via les apports du Dniepr et du Dniestr), éventuellement une Europe plus sud-orientale (dans le cas d'un débordement de la Mer Caspienne via la dépression de Manych) et enfin la Turquie septentrionale et le Caucase occidental.

L'alimentation de la Mer Noire en eau marine se fait par l'intermédiaire de deux seuils peu profonds (Dardanelles et Bosphore) qui ont été exondés lors de périodes de bas niveaux marins au cours du passé, mais on dispose davantage d'hypothèses que d'informations fiables sur les variations de niveau du « Lac Noir » lorsque celui-ci n'est plus alimenté par les eaux salées méditerranéennes.

C'est un bassin marginal susceptible d'amplifier les événements paléoclimatiques globaux ou régionaux. Par exemple, sa position géographique fait qu'il est influencé par le rôle de la calotte fennoscandienne lors d'un climat froid, ne serait-ce que parce que l'exutoire de certains fleuves vers l'Arctique se trouve alors fermé et que le drainage vers le sud (Caspienne

et Mer Noire) est alors possible (il s'agit alors d'enregistrements de modifications hydrologiques importantes).

L'objectif de ce travail est l'étude des processus et de l'enregistrement sédimentaire des changements environnementaux récents (c'est à dire depuis environ 30000 ans) à partir des données obtenues principalement dans la zone Nord-Ouest de la Mer Noire. Nous avons disposé de carottes de sédiments et de mesures géophysiques, obtenues lors de campagnes océanographiques franco-roumaines et internationales en 1998 et 2004.

Nous avons privilégié des méthodes permettant d'établir la plus fiable chronologie possible (datations par le  $^{14}\text{C}$  de la matière organique et/ou de coquilles fossiles associées) et d'obtenir des informations sur le milieu de dépôt (analyses des argiles, sédimentologie, magnétisme environnemental, caractéristiques isotopiques de la matière organique totale).

Nous présenterons les caractéristiques de la Mer Noire (chapitre 1), le matériel d'étude et la chronologie adoptée (chapitre 2), l'apport des études des carbonates (chapitre 3), du carbone organique et du rapport C/N (chapitre 4), du magnétisme environnemental (chapitre 5), de la minéralogie et des argiles (chapitre 6) avant de discuter des variations des proxies utilisées en rapport avec le climat et le niveau de l'eau dans le bassin (chapitre 7 et conclusion).



---

# CHAPITRE 1

## PRÉSENTATION DE LA MER NOIRE

### 1.1. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

#### 1.1.1. DESCRIPTION

Située entre deux chaînes montagneuses alpines : la Chaîne Pontique<sup>1</sup> au sud et le Caucase<sup>2</sup> à l'est et au nord, la Mer Noire est bordée vers le nord-ouest et le nord par des zones basses, à l'exception de la Crimée où l'altitude atteint un peu plus de 400 m (**Fig.1.1**).

Le bassin semi fermé de cette mer a une surface de 423 000 km<sup>2</sup> et un volume de 534 000 km<sup>3</sup>. Sa profondeur maximale est de 2206 m et la profondeur moyenne du bassin est de 1240 m (Ross *et al.*, 1974). Il est délimité par les parallèles 40°55'N et 46°37'N et les méridiens 27°27'E et 41°47'E, sa longueur maximale O-E est de 1130 Km et sa largeur maximale N-S est de 530 Km (Panin *et al.*, 1977 et les références citées). Les pays riverains sont la Bulgarie et la Roumanie à l'ouest, l'Ukraine et la Russie au nord, la Georgie à l'est et la Turquie au sud (**Fig.1.1**).

Les eaux de la Mer Noire sont presque isolées de celles de l'océan mondial, la communication se fait par l'intermédiaire des Mers de Marmara et la Méditerranée, via les Détroits du Bosphore (=le Détroit d'Istanbul) et des Dardanelles (=Çanak-kale). Le « couloir<sup>3</sup> » de communication entre la Mer Noire et la Méditerranée s'étend sur 300 Km, il est donc représenté par le Bosphore (31 Km), la Mer de Marmara (210 Km) et les Dardanelles (62 Km). Le Bosphore est un chenal méandré de 0,5 à 3,5 Km de largeur et avec une profondeur qui varie de -34 à plus de -110 m (Gunnerson et Özturgut, 1974 ; Kerey *et al.*, 2004). La Mer de Marmara est un bassin allongé de 75 Km de largeur, et avec une profondeur maximale de 1273m. La largeur du détroit des Dardanelles varie entre 1,2 et 7 Km, sa profondeur moyenne est de -55 m et les profondeurs maxi-

males atteignent les -110 m (Ünlüata *et al.*, 1990 ; Ergin *et al.*, 1997 ; Yaltirak *et al.*, 2000).

Par le Bosphore, il y a un échange bi-directionnel des eaux. En surface, les eaux peu salées (17,5-18,5‰) de la Mer Noire s'écoulent vers la Méditerranée tandis qu'en profondeur, les eaux salées (35‰) et plus lourdes de la Méditerranée entrent. Du fait de l'absence de courants verticaux, il y a une forte stratification des eaux de la Mer Noire et la salinité augmente avec la profondeur, jusqu'à 22.33 ‰ (Murray *et al.*, 1991). Une des conséquences de l'absence de courants verticaux et de la stratification des eaux est la diminution du taux d'oxygène avec la profondeur et l'installation d'un milieu anoxique au-delà de 150-180 m. L'hydrogène sulfuré est alors le principal gaz dissous. Une halocline permanente sépare les deux milieux.

Les flux calculés pour la sortie des eaux par le Bosphore et les Dardanelles sont représentés schématiquement dans la **figure 1.2**. Le bilan des eaux est positif: ~600 km<sup>3</sup>/y (~20000 m<sup>3</sup>/s) sortent tandis que seulement ~300 km<sup>3</sup>/y (~10000 m<sup>3</sup>/s) entrent par le Bosphore (Özsöy *et al.*, 1995 et les références citées).

Deux des plus grands fleuves de l'Europe se jettent en Mer Noire (le Danube et le Dniepr) ainsi que la plupart des fleuves de l'Ukraine : le Dniestr, le Boug et le Don. Le bassin versant est de 1 864 000 km<sup>2</sup> (Stöffers & Müller, 1972). Les apports liquides et solides de la région asiatique ne sont pas très importants (apport par des fleuves anatoliens : la Sakarya et le Kizil Irmak).

#### 1.1.2. LE CLIMAT

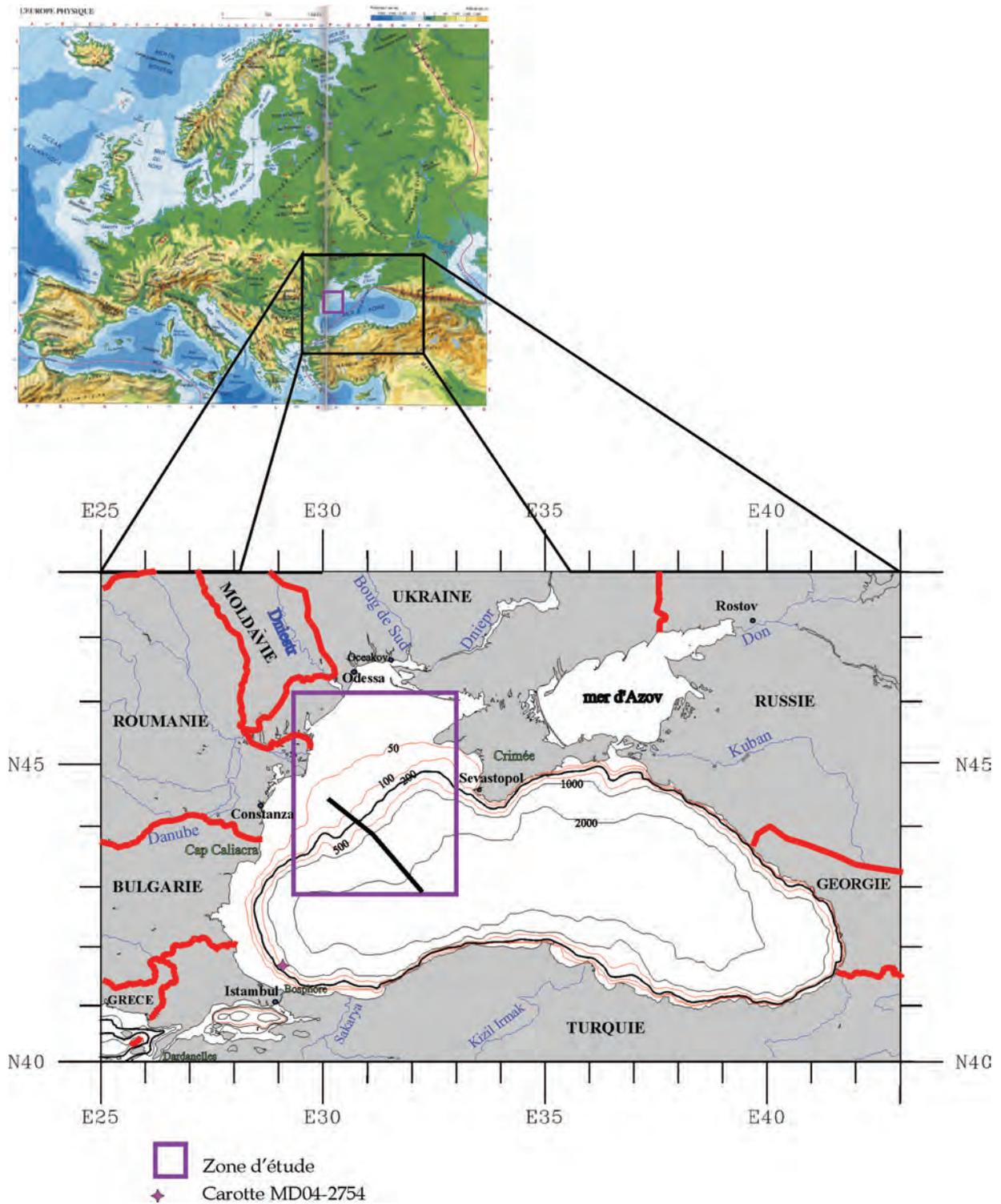
Même si le climat de la région de Mer Noire est de type continental, l'effet modérateur de la mer et la protection apportée par le Caucase se combinent pour donner des hivers doux sur les côtes. La température moyenne des eaux au nord descend jusqu'à 0°C en hiver, et augmente jusqu'à 20-22°C en été. Lors des mois d'hiver on observe des tempêtes fréquentes et de forts vents de N-NE avec des vagues pou-

---

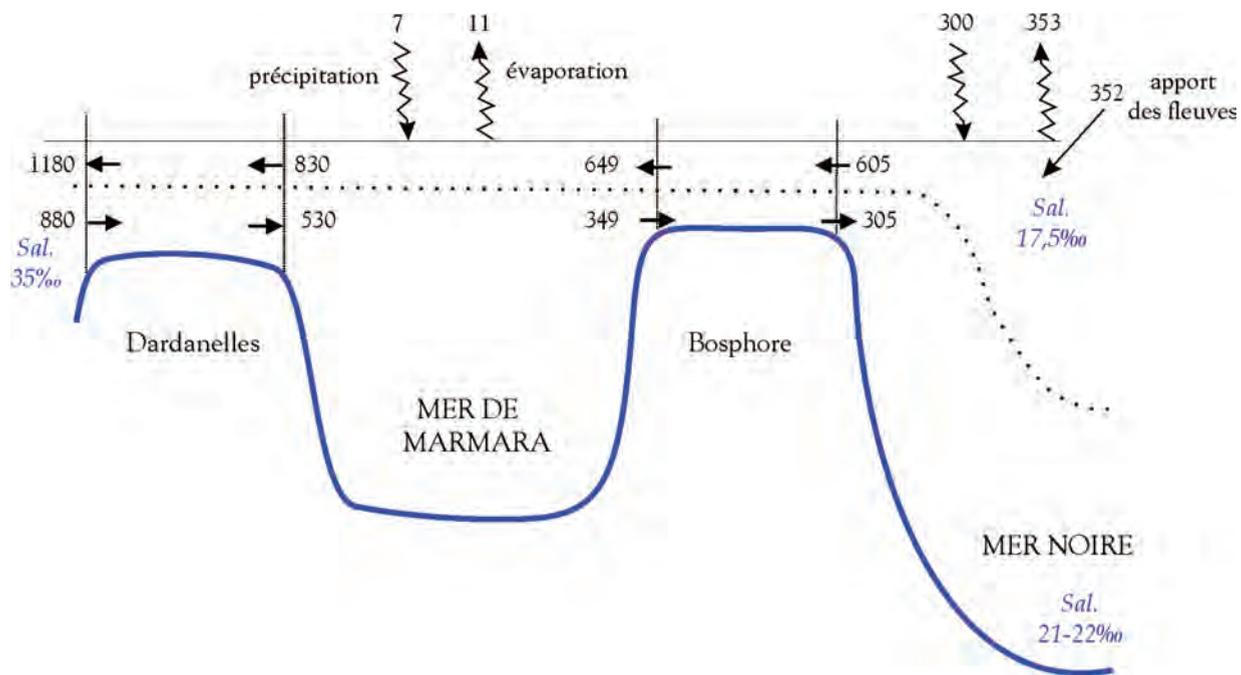
<sup>1</sup> altitude maximale Kaçkar Dağı: 3932 m

<sup>2</sup> altitude maximale Elbrouz: 5642 m

<sup>3</sup> Angl. Turkish Straits System



**Fig.1.1.** Localisation de la zone d'étude (carte physique de l'Europe selon l'Atlas mondial - Méridienne, 2001)



**Fig.1.2.** Flux moyens annuels d'eau dans les détroits du Bosphore et des Dardanelles, selon Ünlüata *et al.*, 1990 et Latif *et al.*, 1991. Sal. = salinité (d'après Murray *et al.*, 1991). Les flux sont exprimés en km<sup>3</sup>/an (1 km<sup>3</sup>/an = 31.7 m<sup>3</sup>/s)

vant atteindre 11 m de hauteur. Mais en été, elles dépassent rarement 2-4 m. Les ports, le long de la plate-forme continentale d'Odessa, sont en général gelés en janvier et février.

### 1.1.3. CARACTÈRES MORPHOLOGIQUES DU FOND DE LA MER NOIRE

On distingue couramment quatre provinces physiographiques pour la décrire: la plate-forme continentale, la pente continentale, le piémont continental (le glacis) et la plaine bathyale (Fig.1.3 et Tableau 1.1) (Ross *et al.*, 1974a, Panin *et al.*, 1977).

**La plate-forme continentale** (*angl.*: shelf) est très bien développée dans la partie nord-ouest et occupe environ 126 500 km<sup>2</sup> (29,9% de la surface totale du bassin). Sa nature est une conséquence des variations eustatiques du niveau de la mer, des mouvements tectoniques et des apports fluviaux. Sa limite est marquée, presque partout dans le bassin, par l'isobathe de 100-110 m. Néanmoins, la flexure vers la pente continentale se trouve à des profondeurs variables: entre 110 et 160 m au nord-ouest du bassin et devant la Crimée. En certaines régions devant l'Anatolie la marge de la plate-forme n'est pas exprimée clairement, le passage vers la pente continentale s'effectuant à des profondeurs de 400-500 m. D'une façon générale la pente de cette plate-forme est faible pour les zones où elle est étendue (1-2 : 1000) et plus raide pour les zones où elle est étroite (30-70 : 1000) (Buachidze, 1974). Elle est très large au nord-ouest de la Mer Noire, surtout à l'ouest de la presqu'île de Crimée (>190 km). Devant la côte roumaine, la largeur de la plate-forme diminue du nord vers le sud de

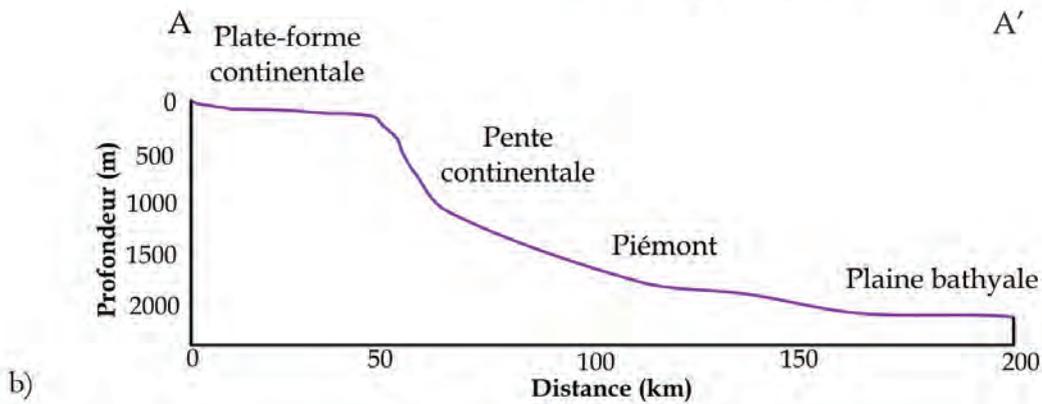
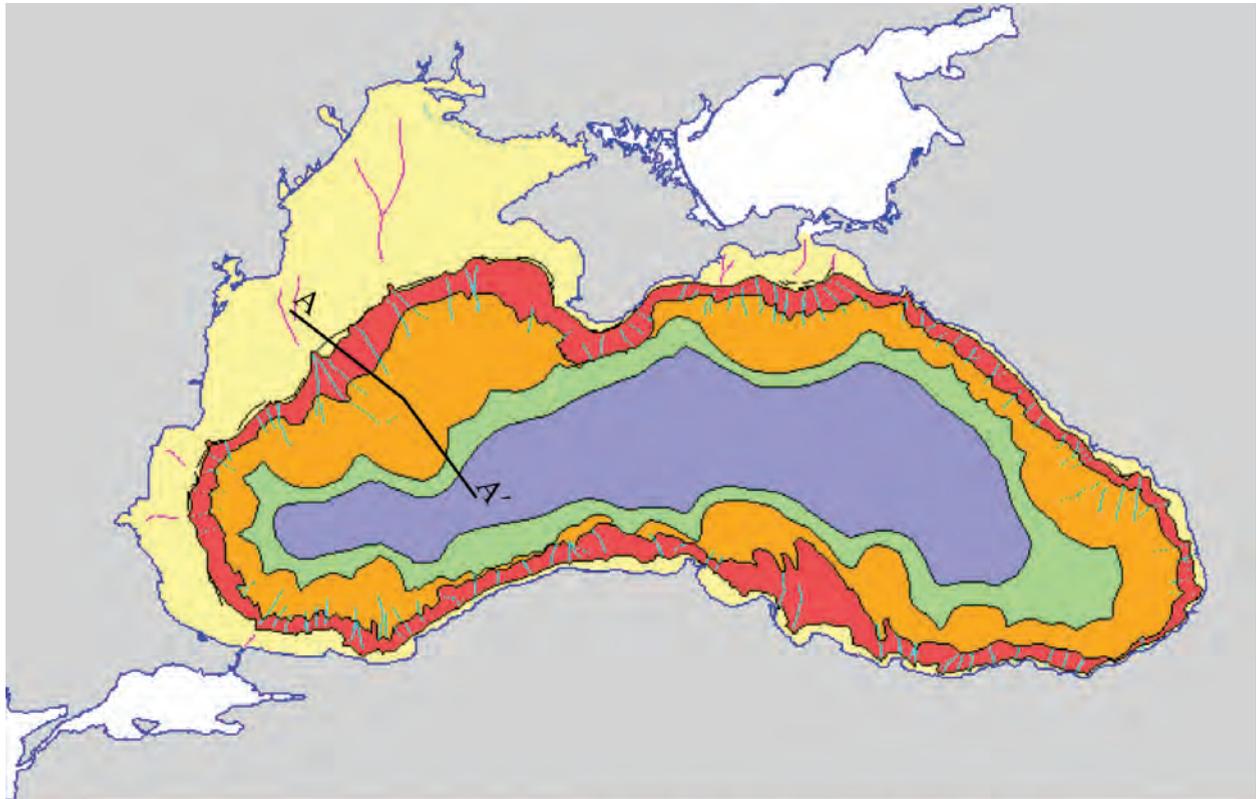
150 jusqu'à 120 km. Devant la côte bulgare et au sud de la Mer d'Azov, elle atteint 40 Km, tandis qu'au long des côtes turques, géorgiennes, russes et ukrainiennes – au sud de la presqu'île de Crimée, elle dépasse rarement les 20 km de largeur.

La **pente continentale** (*angl.*: basin slope) occupe une surface d'environ 115 000 km<sup>2</sup> (27,3% du bassin) avec des profondeurs de 200 à 1000 m. Dans la Mer Noire, on peut distinguer deux types différents de pente continentale selon Ross *et al.* (1974a), Panin *et al.* (1977) :

- Des pentes raides (inclinaison 1 : 40) incisées par des nombreux canyons submergés. Ce type existe devant Caucase, le long de la côte turque et devant la côte sud de Crimée. L'inclinaison de ces pentes est de 6-10°. Mais il existe aussi des secteurs ayant des inclinaisons de 20-30° et même plus.
- Des pentes à faible inclinaison (1-3° seulement) à l'ouest de la Crimée et au sud-est de la Mer d'Azov.

Goncearov *et al.*, 1972, parlent d'un troisième type morphologique, la pente continentale mixte, avec des secteurs raides juxtaposés aux secteurs à faible inclinaison. Ce type est identifié entre le cap Caliacra et la Crimée.

Le **piémont continental (glacis ; angl.: basin apron) occupe environ 129 500 km<sup>2</sup> (30,6 % du bassin) avec des profondeurs des eaux de 1000 à 2000 m. Il est localisé à la base de la pente continentale et est caractérisé par des pentes de 1 : 40 – 1 : 1000. Sa continuité est interrompue par de petites formes de relief qui ressemblent à des collines.**



**Fig.1.3.** Morphologie du bassin de la Mer Noire: a) provinces physiographiques d'après Black Sea GIS, 1997; b) profil bathymétrique vertical au Nord-Ouest de la Mer Noire

**Tableau 1.1.** Morphologie du fond des la Mer Noire (d'après Ross *et al.*, 1974 ; Panin *et al.*, 1977)

Français	Anglais	Pente	% surface angl. (russes)	Surface km <sup>2</sup>
Plate-forme continentale	Shelf	1-2 :1000 30-70 :1000	29,9 (26,8)	126 500
Pente continentale	Basin slope	1 :40	27,3	115 000
Glacis	Basin apron	1 : 40 à 1 : 1000	30,6	129 500
Plaine bathyale	Abyssal plain	<1 :1000	12,2 (>20%)	51 500

La **plaine bathyale** (*angl.*: abyssal plain) est la partie s'étendant au-delà de 2000 m de profondeur. Elle occupe environ 51 500 km<sup>2</sup> (12,2 % de la surface totale du bassin). Ses inclinaisons sont de moins de 1 : 1000. Elle est mieux développée dans la partie est de la Mer Noire.

#### 1.1.4. APPORTS LIQUIDES ET SOLIDES DANS LE BASSIN

Le bassin versant de la Mer Noire couvre environ 1 864 000 km<sup>2</sup>, la plus grande partie étant représentée par les bassins versants des fleuves du nord-ouest : le Danube (43,8%), le Dniestr, le Bug, le Dniepr, le Don et le Kuban. Le Dniestr, le Boug et le Dniepr déchargent leurs débits solides dans des limans<sup>4</sup> (en roumain: *limane*) tandis que le Don et

le Kuban débouchent dans la Mer d'Azov, en communication avec la Mer Noire par le détroit de Kerch. Par conséquent, seule une très petite partie de la charge sédimentaire de ces fleuves parvient à la Mer Noire. Les fleuves ukrainiens (Dniestr, Boug et Dniepr) ont subi une diminution importante de leur débit liquide du fait de la construction d'énormes lacs réservoirs et de l'utilisation massive de l'eau pour l'irrigation des terrains agricoles. Il ne reste donc que le Danube qui contrôle les processus sédimentaires actuels de cette zone, d'autant plus qu'il transporte 81 % du total des sédiments arrivés par les fleuves du nord-ouest de la mer (Balkas *et al.*, 1990 cité dans Rădan, 1999).

**Tableau 1.2.** Apports liquides et solides des rivières qui débouchent dans le mer Noire (d'après Panin et Jipa, 1998)

	Longueur (Km)	Surface du bassin versant (Km <sup>2</sup> )	Apport d'eau (km <sup>3</sup> /an)	Apport sédimentaire (10 <sup>6</sup> tonnes/an)
<b>Région Nord-Ouest de la mer Noire</b>				
Danube	2.860	817.000	190,70	51,70*
Dniestr	1.360	72.100	9,80	2,50
Dniepr	2.285	503.000	52,60	2,12
Bug de sud	806	63.700	2,60	0,53
Sub-total I		1.455.800	255,70	56,85
<b>Mer d'Azov</b>				
Don	1.870	442.500	29,50	6,40
Kuban	870	57.900	13,40	8,40
Sub-total II		500.400	42,90	14,80
<b>Rivières de la côte caucasienne</b>			41,00	29,00
<b>Rivières de la côte anatolienne</b>			29,70	51,00
<b>Rivières de la côte bulgare</b>			3,00	0,50
<b>Total</b>			372,30	152,15

\*apport sédimentaire multi- annuel moyen, avant la construction du barrage de Portes de Fer

Le débit solide moyen annuel du Danube avant la construction du barrage de Portile de Fier (Les Portes de Fer) a été estimé à 67.5x10<sup>6</sup> tonnes/an, dont 10% environ sont des alluvions sableuses (Almazov *et al.*, 1963). D'après Bondar *et al.* (1991), le débit solide est de 52.8x10<sup>6</sup> tonnes/an à l'entrée du delta, et de 51.7x10<sup>6</sup> tonnes/an à l'embouchure des bras du delta. Après la construction de deux lacs de barrage (Portile de Fier I et II) en 1970 et 1983), le débit solide à l'embouchure du Danube a baissé de 50 %. A présent, il ne dépasse pas 25-35x10<sup>6</sup> tonnes/an (Panin et Jipa, 1998).

<sup>4</sup> du gr. *limên*, port = Lagune isolée par un cordon littoral barrant partiellement l'embouchure d'un fleuve.

La circulation des eaux de surface dans la Mer Noire est actuellement caractérisée par la présence d'un courant principal : le « Rim » cyclonique, bien défini, auquel sont associées des paires de courants moins forts : cycloniques - anticycloniques (Fig.1.4). Le « Rim » est méandré, il tourne autour du bassin au-dessus de la rupture de pente. Il a une structure verticale à deux couches. La couche supérieure uniforme sur les premiers 100 m de la colonne d'eau a des vitesses de 50 à 100 cm/s. Une diminution de la vitesse a travers la pycnocline (à 100-200 m de profondeur), fait que la couche inférieure du courant, entre 200 et 350 m, s'écoule à environ 20 à 40 cm/s (Oguz et Besiktepe, 1999).

## 1.2. PALÉOCLIMAT ET PALÉOGÉOGRAPHIE DE LA RÉGION

### 1.2.1. INTRODUCTION

Les glaciations Pléistocènes font partie d'une longue série d'oscillations climatiques durant lesquelles la Terre a subi des alternances de conditions climatiques où la température moyenne annuelle diminuait d'environ 10°C (Anderson et Borns, 1997), suivies de périodes plus chaudes ou la température augmentait de nouveau. Pendant les périodes froides, les calottes de glace se développaient et leur avancement sur le continent et dans la mer a été enregistré dans les dépôts sédimentaires. Les causes de ces

changements importants sont principalement les variations des paramètres orbitaux de la Terre, les changements des concentrations de CO<sub>2</sub> de son atmosphère mais aussi parfois des épisodes de débâcles massives d'icebergs (Imbrie *et al.*, 1984, 1992 ; Pisias et Shackleton, 1984 ; Pisias et Imbrie, 1986 ; Berger, 1988 et les références citées; Dansgaard *et al.*, 1993). La nomenclature des périodes glaciaires et interglaciaires quaternaires est différente selon chaque région et la corrélation des unités chrono-stratigraphiques n'est pas facile. Ceci est dû aux différences locales, à la distance entre les stratotypes, parfois à l'imprécision des guides chrono-stratigraphiques, etc. Il en découle une certaine complexité observable dans le **tableau 1.3.**

Pendant les périodes froides la taille des calottes de glace change, avec des multiples conséquences sur le niveau de l'océan, le débit des fleuves et implicitement, sur les niveaux des bassins connectés à l'océan mondial ou isolés. Quand ces périodes froides sont reliées à une augmentation des précipitations, les calottes augmentent, s'étendant parfois non seulement sur le continent mais aussi sur le shelf. Elles bloquent l'écoulement des certaines fleuves, favorisant l'apparition des lacs proglaciaires en marge des calottes et modifient essentiellement les apports liquides et solides dans les bassins semi-fermés du type de celui de la Mer Noire.

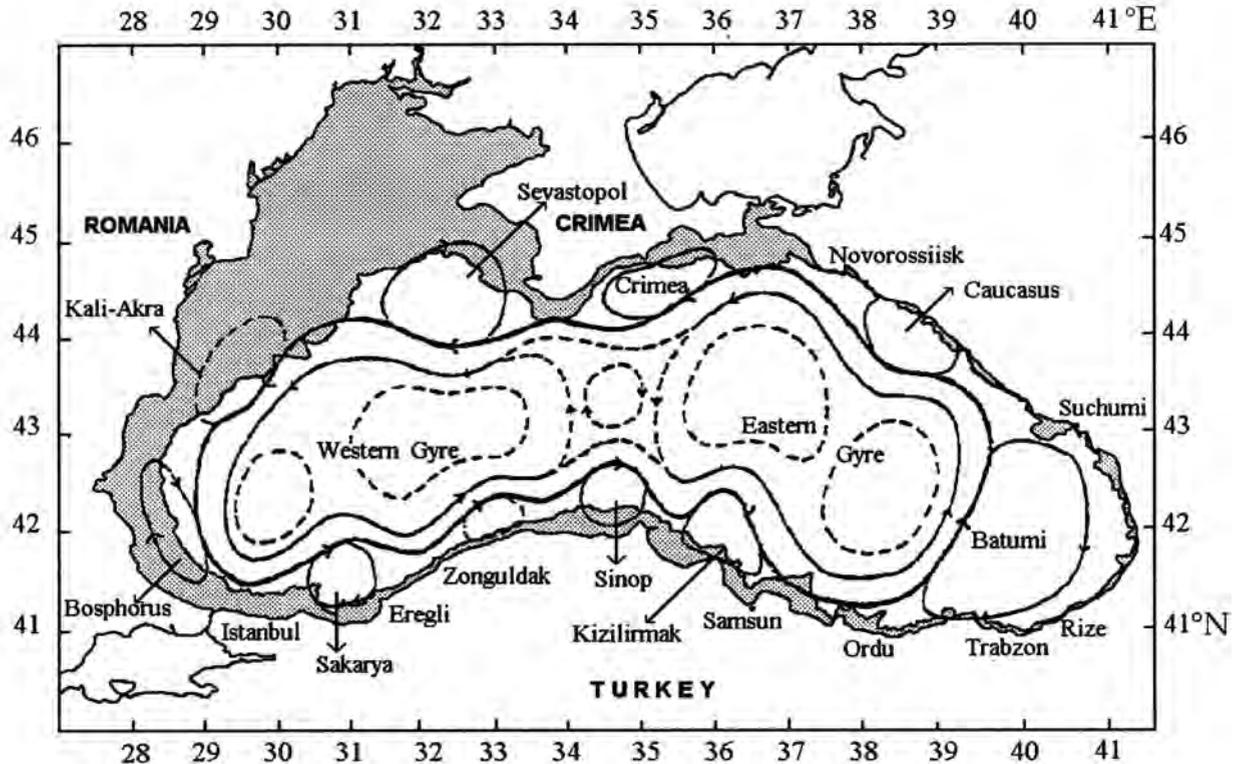


Fig.1.4. Circulation des eaux de surface dans la Mer Noire (d'après Oguz *et al.*, 1993)

DOMAINE CONTINENTAL										DOMAINE MARIN				
PERIODES GLACIAIRES ET INTERGLACIAIRES										MER NOIRE*	MER MEDITERRANNEE*			
N-O EUROPE		ILES BRITANNIQUES		GLACIERS ALPINS		ITALIE		AMERIQUE DU NORD		EUROPE D'EST				
Pleistocène	Holocène	(Flandrian)	Holocène	Holocène	Holocène	Holocène	Holocène	Holocène	Holocène	Holocène	Holocène	Black Sea	Flandrian	
	Weichselien	(Tubantian)	Devensian	Würm	Pontinian	Wisconsin	Wisconsin	Wisconsin	Wisconsin	Wisconsin	Wisconsin	Black Sea	Black Sea	
	Eemien	(Warthian)	Ipswichian	R/W Interglaciaire	Nomentanian	Sangamon	Sangamon	Sangamon	Sangamon	Sangamon	Sangamon	Black Sea	Black Sea	
	Saalien	(Treenan) (Drenthian)	Wolstonian	Riss	Nomentanian	Illinois	Illinois	Illinois	Illinois	Illinois	Illinois	Black Sea	Black Sea	
	Holsteinien	(Needian)	Hoxnian	M/R Interglaciaire	Flaminian	Yarmouth	Yarmouth	Yarmouth	Yarmouth	Yarmouth	Yarmouth	Black Sea	Black Sea	
	Elster		Anglian	Mindel	Flaminian	Kansas	Kansas	Kansas	Kansas	Kansas	Kansas	Black Sea	Black Sea	
	Cromérien complexe	V		Cromerien	G/M Interglaciaire		Afton	Afton	Afton	Afton	Afton	Black Sea	Black Sea	
		IV		Beestonian								Black Sea	Black Sea	
		III		Pastonian								Black Sea	Black Sea	
		II										Black Sea	Black Sea	
	Ménapien											Black Sea	Black Sea	
	Waalien											Black Sea	Black Sea	
	Eburonien			Baventian	Donau								Black Sea	Black Sea
				Antian									Black Sea	Black Sea
				Thurnian									Black Sea	Black Sea
Tiglien		(Icenian)	Ludhamian	B/D Interglaciaire								Black Sea	Black Sea	
	Praetiglien/Bruggenien	(Amstelian)	Waltonian	Biber	Aquatransian							Black Sea	Black Sea	
Piocéne														

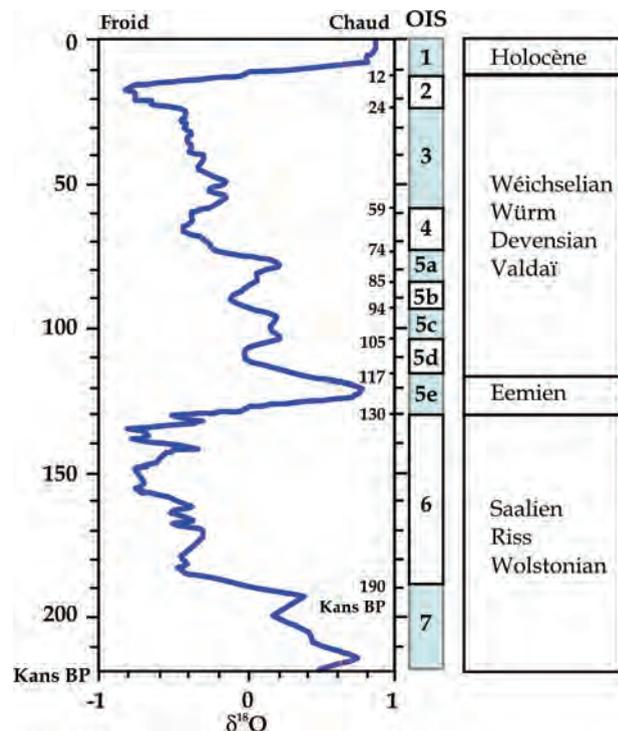
Tableau 1.3. Corrélation des périodes glaciaires interglaciaires du Pléistocène en domaine continental d'Europe et Amérique de Nord avec les bassins marins de la Mer Noire et de la Mer Méditerranée (compilation d'après Haq et Van Eysinga, 1987 et Koreneva et Kartasova, 1978\*)

### 1.2.2. LA DERNIÈRE GLACIATION ET LE DERNIER MAXIMUM GLACIAIRE (DMG)

La dernière glaciation est dénommée selon la région : **Weichselien** (=Vistulien)<sup>5</sup> en Europe de Nord et d'Ouest, *Würm* dans les Alpes, *Pontinian* en Italie, *Valdaï* en Russie européenne et la Plaine Russe, *Zyryanka* en Sibérie ou *Wisconsin* aux Etats-Unis. La limite inférieure de la période Weichselienne se trouve vers 117 000 ans BP (e.g. Martinson *et al.*, 1987 ; Mangerud, 1989 ; van Andel et Tzedakis, 1996) tandis que la limite supérieure correspond au début de l'Holocène : ~10 000 ans BP. La correspondance des phases glaciaires terrestres avec la chronologie orbitale (SPECMAP) et aux stades isotopiques marins (OIS) est donnée dans la **figure 1.5**. Le Weichselien est divisée en trois stades (Inférieur, Moyen et Supérieur) liés aux différentes unités identifiées sur le continent et à la chronologie isotopique (**Tableau 1.3**). Pendant ces trois stades, le climat a enregistré trois périodes glaciaires, avec des extensions des glaciers. Même si, du fait de la position géographique du bassin de la Mer Noire, la terminologie valable en Europe d'Est et en Russie Orientale semble mieux adaptée, nous allons utiliser ici le terme ouest Européen de 'Weichselien'. En effet le marqueur interglaciaire principal de la région de la Petchora est déjà corrélé avec l'Eemien marin en Europe de l'Ouest par l'intermédiaire de l'interglaciaire Mikulino de Russie. Les noms Weichselien et Valdaï sont liés tous les deux à la calotte glaciaire scandinave. La plupart des auteurs russes utilisent d'ailleurs généralement la nomenclature ouest-européenne.

Dans l'intervalle **Weichselien inférieur** (Valdaï inférieur, Kalinian; OIS 5d-a) entre 117 000 et 75 000 ans BP (Mangerud, 1989, 1991a; Svendsen *et al.*, 2004a) le climat s'est détérioré, avec une diminution du niveau de la mer d'environ 50 m (Chapell *et al.*, 1996) et une augmentation du volume de la glace. L'extension maximale de la calotte eurasiennne pendant cet intervalle a été enregistrée entre 90 000 et 80 000 ans BP. La calotte Barents-Kara s'étendait alors beaucoup sur le continent et bloquait le drainage des fleuves (Ienisseï, Ob, Petchora, Dvina etc.) vers l'océan Arctique (par ex. Astakhov, 1993 ; Svendsen *et al.*, 1999 ; Mangerud *et al.*, 2001a, b ; Svendsen *et al.*, 2004b). En conséquence, plusieurs lacs proglaciaires immenses se sont formés, couvrant une surface totale deux fois plus grande que celle de la Mer Caspienne actuelle (**Fig.1.6**). La présence de ces lacs contribuait beaucoup, elle aussi, au refroidissement du climat (d'une manière comparable à celle des océans froids) et empêchait la fonte de glaces (par ex. Krinner *et al.*, 2004). Il faut remarquer que pendant cette période, la calotte glaciaire de la région ouest de l'Europe n'avait pas atteint son extension maximale (Mangerud, 1991a).

<sup>5</sup> Le nom vient du Wisła (*angl.* et *fr.*: Vistula, *alle.*: Weichsel) principal fleuve de Pologne qui passe par Varsovie et rejoint la Baltique dans le golfe de Gdansk. Le nom allemand Weichsel est utilisé largement, parce que le stratotype a été décrit pour la première fois au long de la vallée du fleuve, par les géologues allemands.

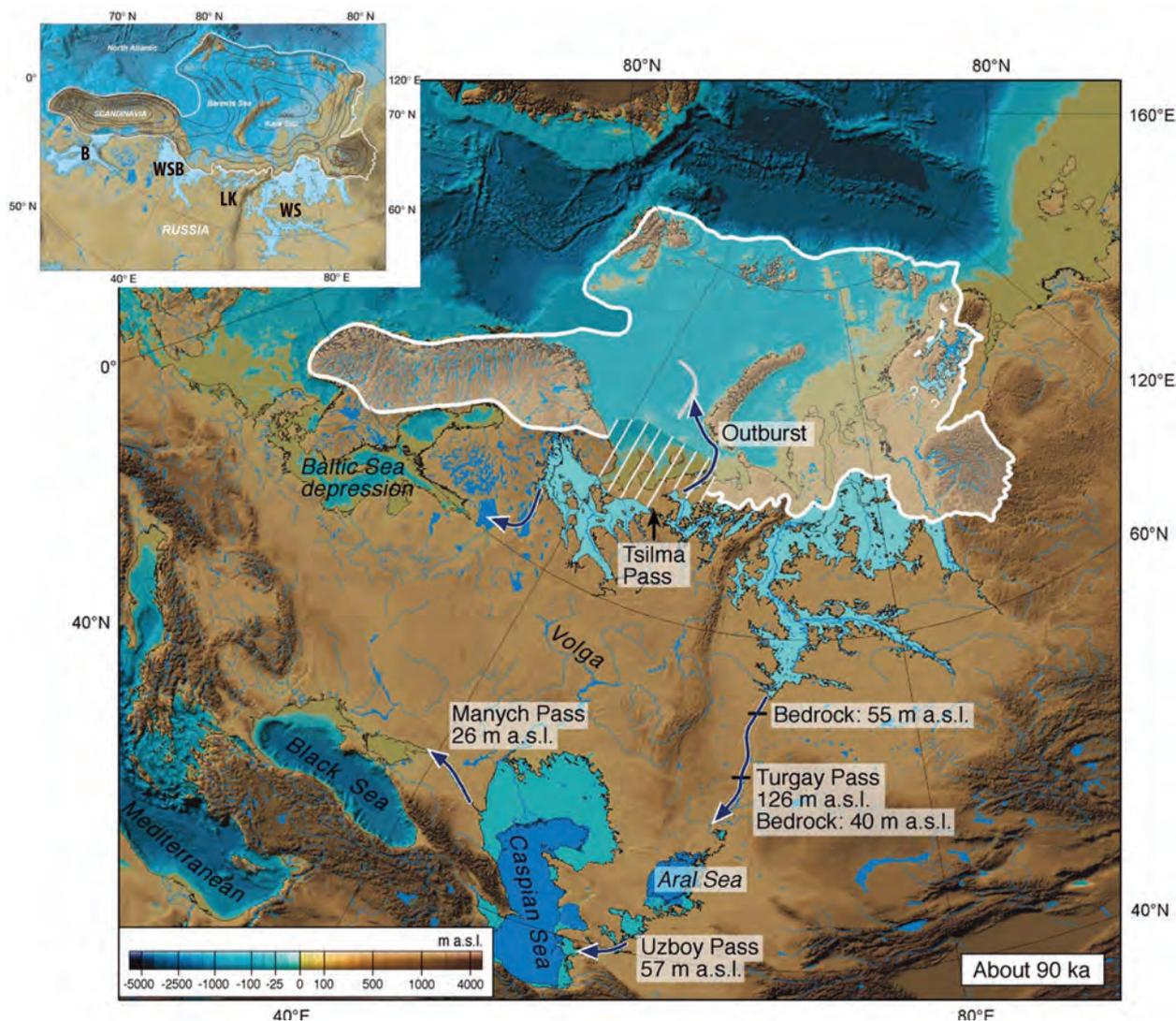


**Fig.1.5.** Chronostratigraphie orbitale globale (SPECMAP) des derniers 200 000 ans, d'après Imbrie *et al.* (1984), stades isotopiques sur le  $\delta^{18}O$  des foraminifères benthiques d'après Martinson *et al.* (1987) et stratigraphie terrestre

Pendant le **Weichselien moyen** (Valdaï moyen, Mologosheksian ; OIS 4-3) (75 000 – 25 000 ans BP) (Chaline *et al.*, 1980 ; Mangerud, 1989 ; Svendsen *et al.*, 2004a) les glaciers ont atteint leur développement maximal entre 60 000 et 50 000 ans BP (Svendsen *et al.*, 2004a). L'extension de la calotte vers l'est était moindre par rapport à celle du Weichselien inférieur, tandis que vers l'ouest, surtout la partie scandinave, était plus étendue (**Fig.1.7**) (Svendsen *et al.*, 2004a). Un lobe avait rempli le Bassin Baltique et il avait avancé jusqu'au sud de Danemark (Houmark-Nielsen, 1989, 1999). A cette époque, la plus grande partie de la Finlande était couverte de glace et la calotte Scandinave entraînait probablement dans la mer Blanche (Svendsen *et al.*, 2004a). Le niveau de l'océan mondial était cca 60 m plus bas que l'actuel (Chappell, 2002).

Le glaciaire **Weichselien supérieur** (Valdaï supérieur, Ostashkovian, Sartan) (25 000 – 10 000 ans BP) (Mangerud, 1989 ; Svendsen *et al.*, 2004a) a connu son maximum vers 18 000 – 20 000 ans BP (COHMAP, 1988 ; Peterson *et al.*, 1979 ; Farrera *et al.*, 1999 ; Svendsen *et al.*, 2004a). Dénommé le dernier maximum glaciaire<sup>6</sup> (DMG) il est l'intervalle froid le plus récent pendant lequel le volume des calottes de glace à atteint son point culminant (Mix *et al.*, 2001). Le niveau de l'océan mondial avait baissé à -105 m (Peltier, 1994), à -120 - -130 m selon Fleming *et al.*, 1998 et Peltier, 1998a et b ou même à -135 m (Yokoyama *et al.*, 2000).

<sup>6</sup> *angl.* Last Glacial Maximum (LGM)



**Fig.1.6.** Extension de la calotte pendant le maximum glaciaire du Weichselien inférieur (cca 90 000 – 80 000 ans BP) et localisation des lacs proglaciaires adjacents: Lac Baltique (B), Lac du Bassin de la Mer Blanche (WSB), Lac Komi (LK), Lac Ouest Sibérien (WS). Dans la zone hachurée, la limite de la calotte n'est pas connue. La distribution des glaciers des Iles Britanniques, Islande, Groenland, Alpes et d'autres zones montagneuses n'est pas figurée dans cette reconstruction (d'après Mangerud *et al.*, 2004; Krinner *et al.*, 2004; marges de la calotte d'après Svendsen *et al.*, 2004a). Les hauteurs des seuils sont indiqués en mètres par rapport au niveau de la mer (m a.s.l.)

La diminution du niveau de la mer calculé dans le cadre du programme CLIMAP (1981) est comprise entre 127 et 163 m (Denton et Hughes, 1981). Le plus bas niveau a été atteint avant 16 000 ans BP (19 000 ans cal) (Fairbanks, 1989 ; Bard *et al.*, 1990), probablement autour de 18 000 – 19 000 ans BP (Fleming *et al.*, 1998).

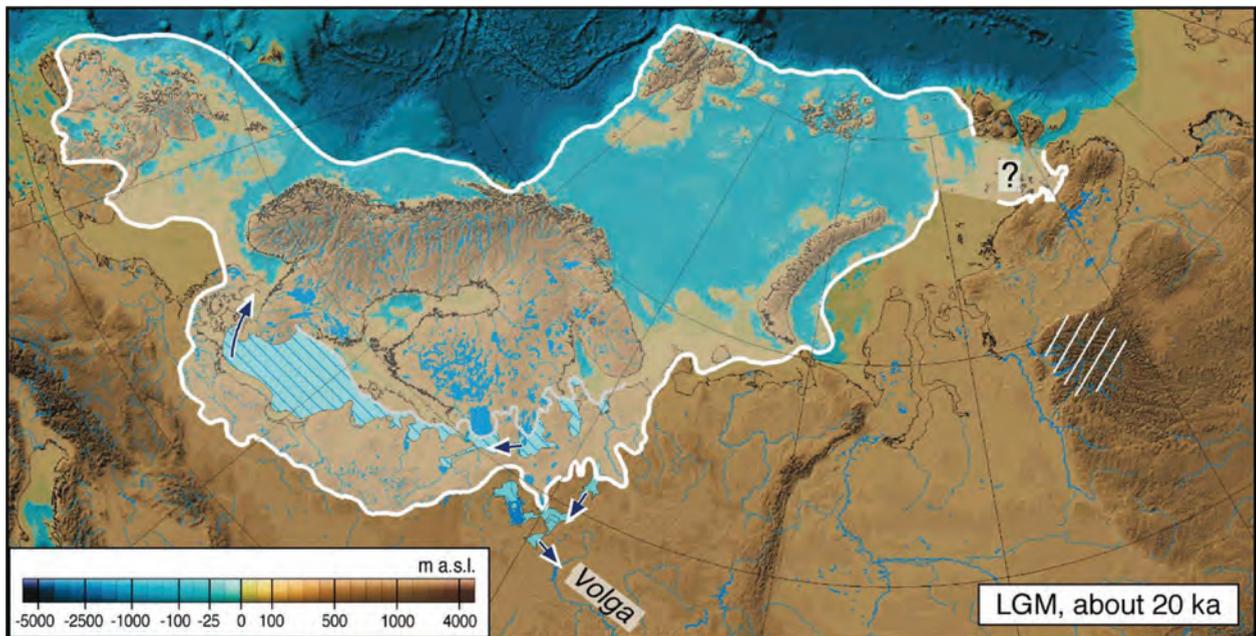
Le refroidissement progressif du climat commencé autour de 30 000 ans BP a provoqué l'augmentation de la calotte sur la Scandinavie et sur la partie NO de la plateforme continentale Barents – Kara, favorisé par le climat maritime riche en précipitations. Le maximum d'extension de la calotte et le climat froid le plus marqué ont été atteints autour de 20 000 – 15 000 ans BP. Le début du réchauffement a été enregistré autour de 15 000 ans (Hubberten *et al.*, 2004).

Deux types de reconstitutions sont envisagées pour le Weichselien supérieur. D'une part une hypothèse faisant appel à une calotte unique s'étalant sur les plates-formes continentales et sur le continent (e.g. Hughes *et al.*, 1977 ; Grosswald, 1977, 1980, 1993, 1998; Mangerud *et al.*, 1996 ; Svendsen *et al.*, 2004a) et d'autre part une hypothèse faisant appel à la présence de plusieurs glaciers distincts centrés sur les Iles Britanniques, l'Islande, les Iles François Joseph et Svalbard, sur la Fennoscandie et le Plateau Mi-Sibérien, sur le Plateau de Putorana et sur des montagnes comme le Verkhoïansk et les Alpes (e.g. Astakhov, 1992, 1993 ; Arkhipov *et al.*, 1995 ; Velichko *et al.*, 1997).

La **figure 1.8** présente la reconstitution de la calotte du Weichselien supérieur de Svendsen *et al.*, 2004a. Pour la partie européenne, les limites sont reconstituées à l'aide de la littérature existante.



**Fig.1.7.** Extension de la calotte pendant le maximum glaciaire du Weichselien moyen (cca 60 000 – 50 000 ans BP) et extension des lacs proglaciaires adjacents. Dans les zones hachurées, les limites de la calotte ne sont pas connues (d'après Mangerud *et al.*, 2004; les marges de la calotte d'après Svendsen *et al.*, 2004a)



**Fig.1.8.** Extension de la calotte eurasiennne pendant le maximum glaciaire du Weichselien supérieur (cca 20 000 ans BP). A l'intérieur de la limite DGM sont marqués les lacs proglaciaires plus jeunes (~14 000 ans BP) situés autour du Lac Onega et de la dépression de la Mer Baltique, ainsi que leurs déversoirs. La présence des glaciers de vallées dans les Montagnes de Putorana est représentée par des hachures. La distribution des glaciers sur l'Islande, le Groenland, les Alpes ou d'autres zones montagneuses n'est pas représentée sur cette reconstruction (d'après Mangerud *et al.*, 2004; Svendsen *et al.*, 2004a)

D'après Svendsen *et al.*, 2004a, pendant le Weichselien supérieur, la partie scandinave de la calotte (**Fig.1.8**) a atteint son extension maximale depuis le Saalien supérieur et des lacs proglaciaires inondaient les vallées des rivières devant la limite de la glace. Dans la Plaine Russe de nord-ouest, ces lacs interconnectés étaient drainés par l'intermédiaire du fleuve Volga dans la Mer Caspienne (Grosswald, 1980 ; Mangerud *et al.*, 2004). L'extension maximale de la calotte n'a pas été synchrone d'ouest à l'est (Faustova, 1984 ; Sejrup *et al.*, 1994 ; Velichko *et al.*, 1997 ; Larsen *et al.*, 1999 ; Mangerud, 2004). Au long de la marge ouest de la calotte scandinave le maximum a été atteint autour de 22 000 ans BP (Sejrup *et al.*, 1994 ; Larsen *et al.*, 1999 ; Mangerud, 2004), dans la Plaine russe de nord-ouest – autour de 20 000 – 18 000 ans BP (Velichko *et al.*, 1997 ; Lunkka *et al.*, 2001a) et dans la région Arkhangelsk – autour de 17 000 – 15 000 ans BP (Larsen *et al.*, 1999). La déglaciation semble synchrone le long des toutes les marges, vers 17 000 – 15 000 ans (Svendsen *et al.*, 2004a ; Hubberten *et al.*, 2004).

### 1.2.3. PALÉOGÉOGRAPHIE DE LA RÉGION DE LA MER NOIRE

#### a) Les environnements glaciaires : extension des calottes

L'extension des calottes glaciaires a joué un rôle très important pour l'alimentation de la Mer Noire. Ainsi, les diverses reconstitutions de la couverture de glace au nord du bassin vont fournir des bilans différents des apports liquides et solides.

Les glaciations majeures du Pléistocène ont affecté des zones importantes d'Europe et d'ouest de Sibérie, et ont beaucoup influencé le bassin de la Mer Noire. Pendant leurs extensions maximales, les glaciers bloquaient les rivières qui coulaient vers le nord. Ainsi, les eaux de fonte de glaces et les rivières s'écoulaient vers la Méditerranée par l'intermédiaire de la Mer Caspienne et de la Mer Noire de l'est vers l'ouest.

Les changements majeurs concernant le drainage étaient les suivants (d'après Arkhipov *et al.*, 1995):

- blocage des principaux fleuves qui coulaient vers la Mer Baltique et leur déviation vers l'ouest (en direction de la Mer du Nord), vers le sud (Danube) ou vers sud-est (Dniepr);
- drainage de la partie couverte de glace de la Plaine russe à l'ouest des Monts Oural. Les eaux de fonte coulaient vers la Mer Noire par l'intermédiaire des fleuves Pripet et Dniepr et, par l'intermédiaire de la Volga, vers la Mer Caspienne et puis la Mer Noire.

Pour la partie scandinave de la calotte du Weichselien supérieur, les reconstitutions récentes de Svendsen *et al.* (2004a) sont en général en accord avec celles de Grosswald (1977, 1980), Mangerud (1991b) et Arkhipov *et al.* (1995). Sur la **figure 1.10** nous avons superposé les limites des calottes reconstituées par plusieurs auteurs. On constate donc que les limites des calottes dans la zone Nord de la Mer Noire et de la Mer Caspienne sont presque identiques.

La différence principale repose sur la description des lacs proglaciaires qui occupent de grandes étendues dans la Plaine Russe et en Sibérie dans le modèle de Grosswald (1977 ; 1980), tandis que pour Svendsen *et al.* (2004a et b) et Hubberten *et al.* (2004), la glace n'occupe pas tant de surface, ce qui permet aux rivières de couler vers le nord. En conséquence, les apports liquides et solides dans les bassins des mers Caspienne et Noire via le couloir de Manytch, varient en fonction du modèle accepté.

Kvasov (1975) et Grosswald (1977, 1980) parlent des lacs étendus en marge de la calotte fénno-scandinave. De ces lacs s'écoulaient des eaux par l'intermédiaire des fleuves et rivières Dvina, Petchora et Volga dans la Mer Caspienne et par l'intermédiaire du Dniepr dans la Mer Noire. Jusqu'à environ 13 500 ans BP, le système des lacs proglaciaires et des déversoirs était radial, les eaux s'écoulaient par l'intermédiaire de la Mer Caspienne et la Mer Noire jusqu'à la Méditerranée, pour devenir ensuite un système marginal qui déchargeait ses eaux principalement en Mer de Norvège (Grosswald, 1980).

Une idée similaire est exprimée par Mangerud *et al.* (2004) qui est d'accord avec l'existence de lacs proglaciaires sur environ 500 Km le long de la calotte. Ces lacs s'écoulaient dans la Volga et dans la Mer Caspienne (Kvasov, 1979 ; Lunkka *et al.*, 2001b). Ils envisagent en plus des lacs proglaciaires à courte vie, formés au début de la débâcle et de la retraite de la calotte du Weichselien supérieur à 17 000 – 15 000 ans BP, à 16 000 – 15 000 ans BP et vers 14 000 ans BP (**Fig.1.8**).

Au contraire, Arkhipov *et al.* (1995) mettent en question l'existence de tels lacs, ou alors en envisagent seulement de très petits bassins en marge de la calotte.

#### b) Les environnements periglaciaires : le permafrost

Une conséquence de conditions climatiques très dures pendant les glaciations est la présence, dans les régions non couvertes par la glace, des sols gelés en permanence appelés permafrost. Leur présence diminue beaucoup l'apport sédimentaire des fleuves. C'est le cas de la plupart d'entre eux au glaciaire dans le bassin étudié.

Pour la dernière glaciation en Russie européenne, les limites du permafrost s'étendaient 2000 Km vers le sud par rapport à l'actuel, l'épaisseur du sol gelé pouvant atteindre 200-400m (Kondratjeva *et al.*, 1993). En Europe Centrale et de l'Ouest, la plupart des régions situées au nord du fleuve Garonne, des Alpes ou des Carpates, étaient caractérisées par un permafrost continu de 10 à 100 m d'épaisseur.

Sur la carte paléo-environnementale du Dernier Maximum Glaciaire de Peulvast *et al.* (2000), les limites du permafrost continu et discontinu sont tracées (**Fig.1.9**).

Pourtant, l'extension vers le sud du permafrost est un sujet de discussion et les limites sont légèrement différentes en fonction des auteurs. Par exemple pour Velichko (1990), la limite du permafrost Pléistocène supérieur passe tout près du nord de la Mer Noire, elle est presque coïncidente avec la limite du permafrost discontinu de la carte de Peulvast *et al.* (2000).

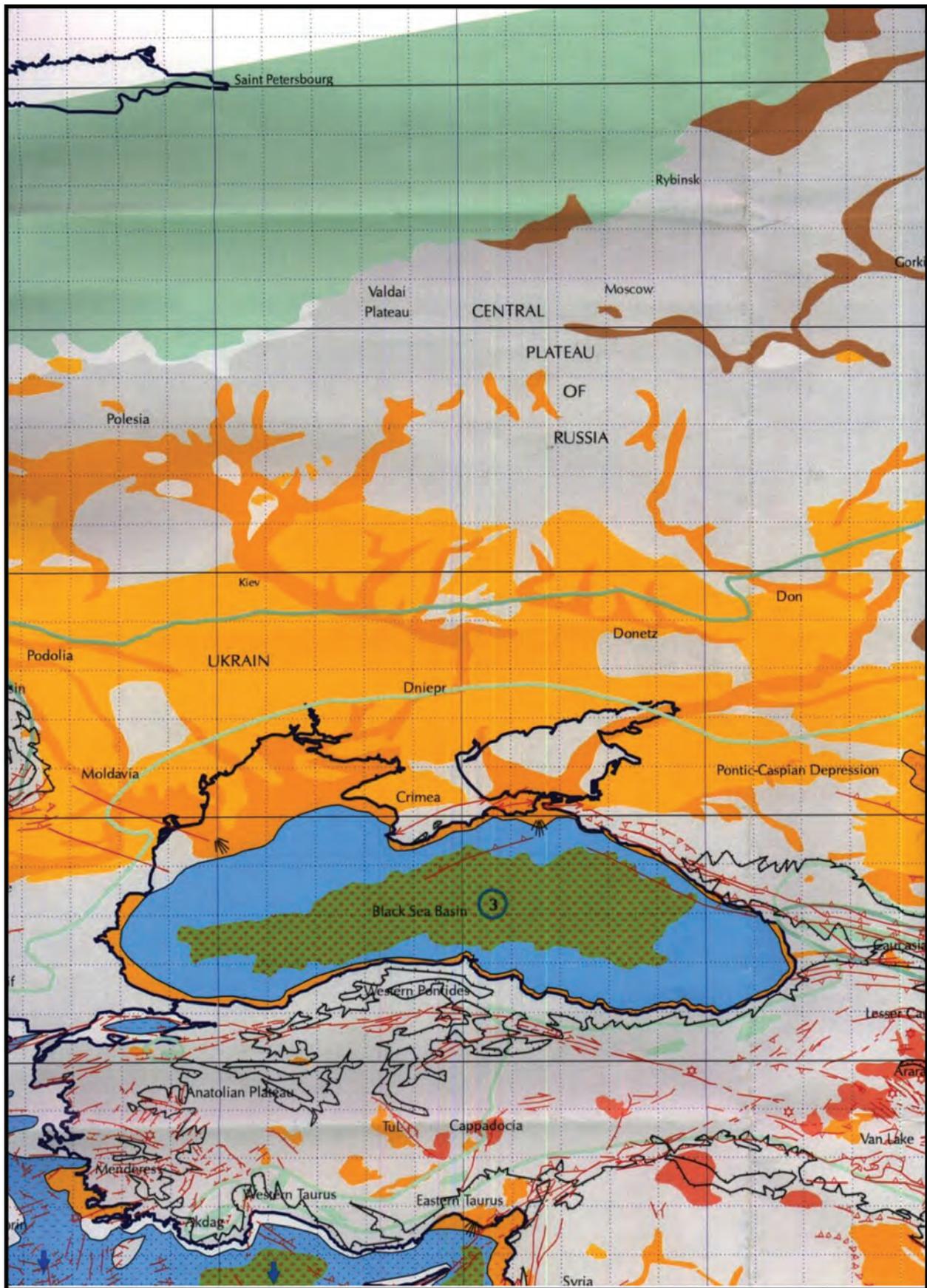
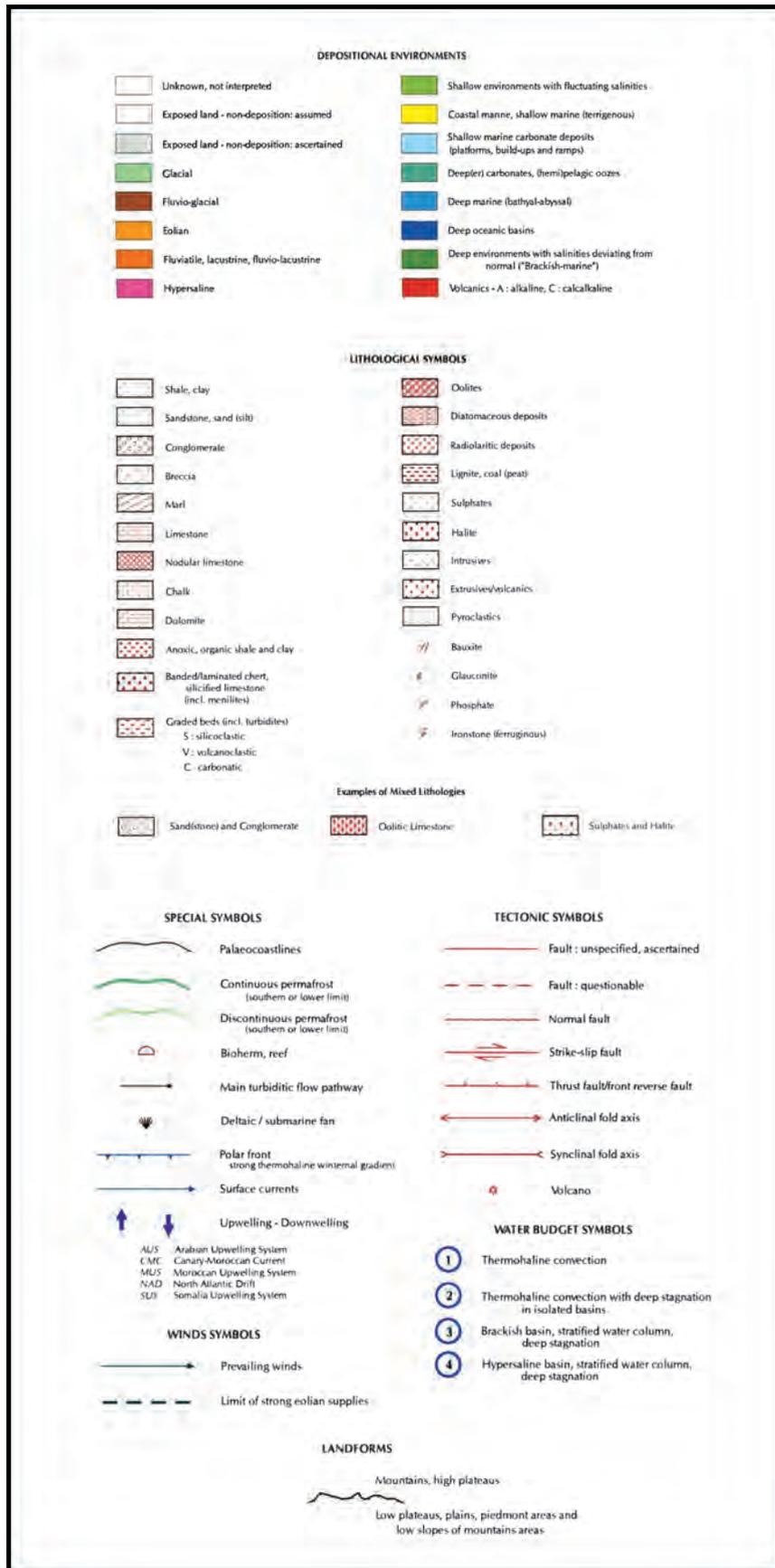


Fig.1.9. Carte paléogéographique de la zone nord de la Mer Noire, avec les limites du permafrost continu et discontinu (Peulvast et al., 2000)

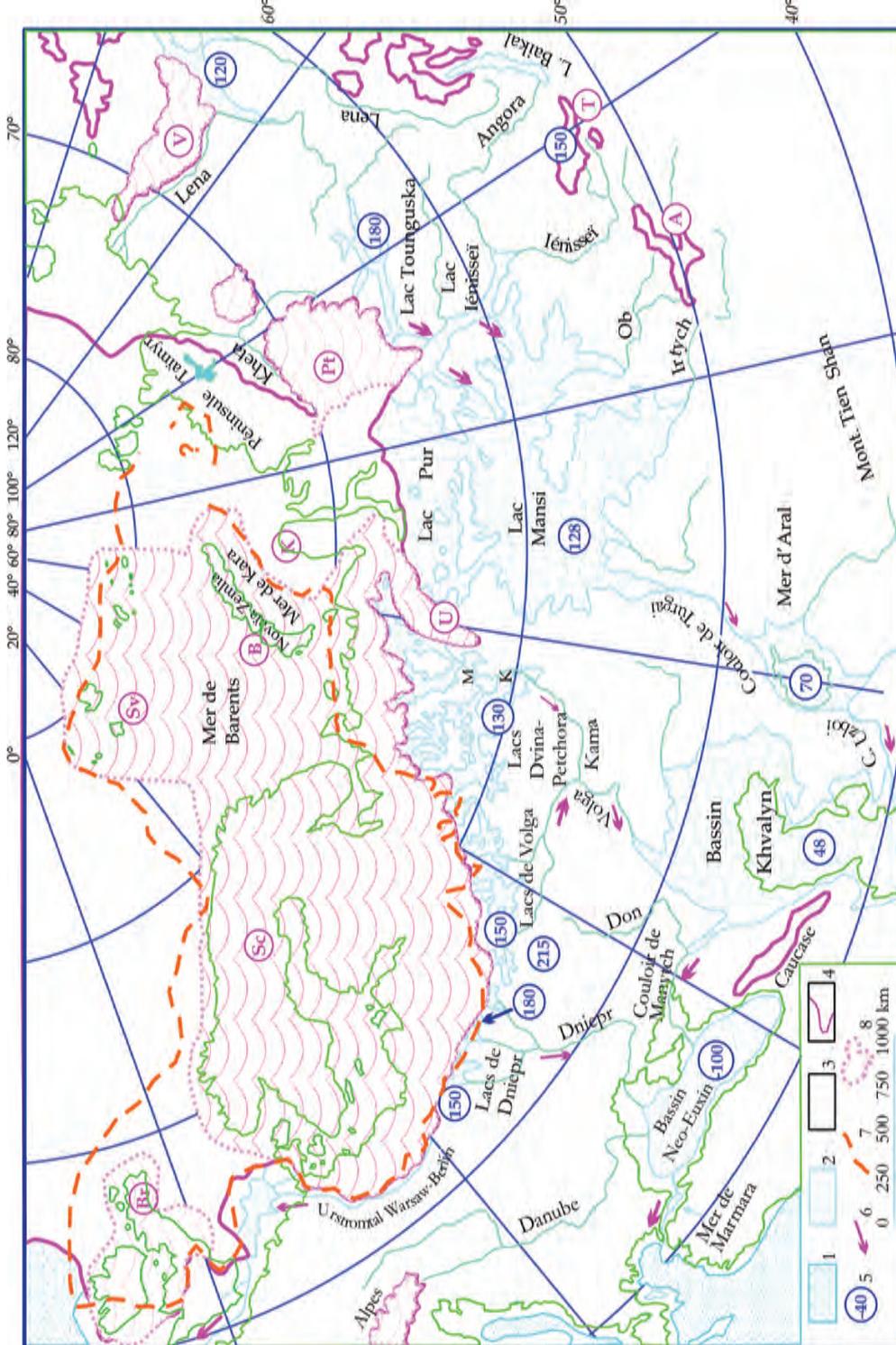


Légende

**Fig.1.10.** Extension des glaciers en Eurasie pendant le DMG (~20 000 ans BP) et systèmes pro-glaciaires adjacents d'après Grosswald, 1977, 1980; Arkhipov *et al.*, 1995; Svendsen *et al.*, 2004a et b)

**Légende:** 1. - mers profondes sans glaciers; 2. lacs pro-glaciaires et d'autres bassins intérieurs à l'eau douce; 3. terres sans glaciers; 4. limites des calottes glaciaires et complexes glaciaires de montagne d'après Grosswald, 1977, 1980; 5. altitude de la surface des bassins continentaux [m]; 6. direction d'écoulement des eaux dans les chenaux du système de drainage (M= chenal Mylva; K= Chenal Keltma); 7. limite de calotte d'après Svendsen *et al.*, 2004, 8. limites des calottes d'après Arkhipov *et al.*, 1995. Les rivages actuels sont marqués en vert.

**Dômes de glace et complexes glaciaires de montagne:** (Br) Britannique; (Sc) Scandinave; (B) Barents; (Sv) Svalbard; (K) Kara; (U) Ural; (Pt) Plateau de Putorana; (V) Montagnes Verkhhoïansk; (T) Montagnes Tuva-Sayan; (A) Montagnes Altai.



## CHAPITRE 2

# MATÉRIEL D'ÉTUDE ET CHRONOLOGIE

### 2.1. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le périmètre de travail se trouve au nord-ouest de la mer, devant les côtes roumaine et ukrainienne (Fig.2.1). Le matériel utilisé pour cette étude provient de 13 carottes marines, 12 prélevées dans le cadre de la mission franco-roumaine BlaSON 1 (1998), sur le *N/O le Suroît*, et une provenant de la Mission ASSEMBLAGE 1 (2004) sur le *N/O Marion Dufresne*. Cette zone a été choisie car la plate-forme continentale étant large, les processus sédimentaires et les variations du niveau de la mer doivent être bien enregistrés (Fig.2.1). Nous avons analysé en détail uniquement 6 carottes, mais nous avons utilisé les observations lithologiques de toutes les 13, afin de mieux comprendre l'évolution du niveau de l'eau au cours des derniers 30 000 ans.

Un des objectifs du projet BlaSON est l'étude de l'enregistrement des variations quaternaires du niveau marin de la Mer Noire en relation avec le climat, le glacio-eustatisme et la néotectonique, et repérer et comprendre leurs effets dans

l'organisation des dépôts sédimentaires sur la plate-forme et la pente continentale.

Les enregistrements sismiques effectués dans les années '80 par *GeoEcoMar* et ceux obtenus dans le cadre du projet BlaSON ont montré qu'il s'agit d'une zone où les sédiments sont affectés par la tectonique récente (*i.e.* Popescu, 2002). Les déplacements positifs ou négatifs de ces failles sont de l'ordre de quelques mètres. La figure 2.2 représente une juxtaposition des profils sismiques HR 24 traces au long desquels ont été effectués des carottages. L'échelle a été ajustée de façon à faire tenir la carte dans une feuille A4, mais les failles récentes restent encore visibles.

Les carottes présentées ont été prélevées le long des profils 7, 8 et 9, d'orientation NO-SE, globalement perpendiculaires à la côte et sur le profil 37 d'orientation O-E. Ces carottes s'étagent entre 55 et 2100 m sous la tranche d'eau (Fig.2.1 et Tableau 2.1).

**Tableau 2.1.** Coordonnées et types des carottes analysées et/ou mentionnées

Carotte no.	Carottier utilisé	Latitude N	Longitude E	Profondeur d'eau (m)	Longueur de la carotte (cm)	Profil sismique
BLVK 98-01	VK	44°15,27	30°24,68	92	49	9
BLKS 98-04	CG	44°12,02	30°32,21	101	81	8
BLKS 98-05	CG	44°08,95	30°39,24	131	102	8
BLKS 98-06	CG	44°07,386	30°42,983	135	265	8
BLKS 98-07	CG	44°05,761	30°46,807	163	324	8
BLKS 98-08	CG	44°05,47	30°47,21	186	368	8
BLKS 98-09	CG	44°05,238	30°47,986	240	844	8
BLKS 98-10	CG	44°04,04	30°50,68	378	755	8
BLKS 98-11	CG	44°03,02	30°53,12	500	757	8
BLKS 98-22	CG	43°02,271	32°07,492	2100	712	7
BLVK 98-14	VK	44°07,99	29°19,53	55	212	37
BLVK 98-15	VK	44°08,136	29°21,851	55	119	37
MD04-2754	CC	41°59,23	28°40,99	453	32	

CG – carottier à piston, type Kullenberg; VK – vibro-carottier; CC – carottier géant Calypso

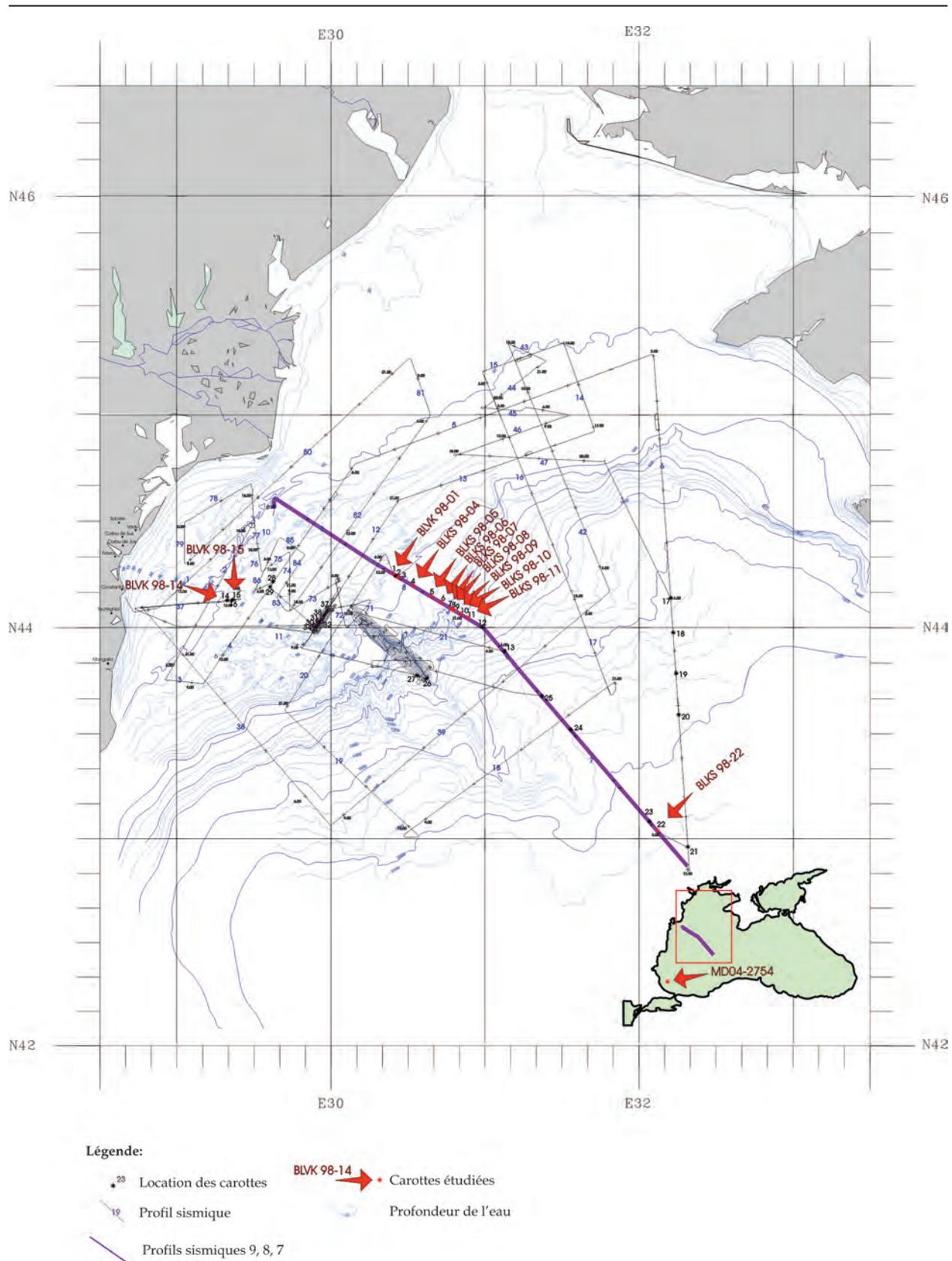


Fig.2.1. Profils sismiques de la mission BlaSON 1 et localisation des carottes étudiées



**Fig.2.2.** Localisation des carottes sur les profils sismiques HR 24-traces 9, 8 et 7 (Lericolais, document non-publié). Localisation du profil sur la figure 2.1.

## 2.2. DÉPÔTS SÉDIMENTAIRES DE SURFACE DANS LA MER NOIRE

Les sédiments de surface de la Mer Noire ont été décrits pour la première fois par Andrusov, 1890, 1893 (cité dans Ross et Degens, 1974). Ensuite, des expéditions océanographiques du début des années 1920 ont conduit à des études plus détaillées (Arkhangel'skiy, 1927, 1928 ; Arkhangel'skiy et Strakhov, 1932, 1938 cités dans Ross et Degens, 1974). Puis sont venues les travaux de Strakhov, 1947, 1954, 1961 (cités dans Ross et Degens, 1974) sur les processus sédimentaires actifs dans la Mer Noire et les travaux sur les sédiments des zones côtières par Barkovskaya, 1961 et Neveskiy, 1967 ainsi que des compilations d'études sur les sédiments par Strakhov, 1954, Raupach, 1952, Erünal-Erentöz, 1956 et Caspers, 1957 (cités dans Ross et Degens, 1974). Après l'expédition *Atlantis II*, de 1969, des études beaucoup plus complètes ont été publiées par Ross *et al.*, 1970, Degens, 1971, Ross et Degens, 1974 qui ont aussi proposé une chronologie des sédiments basé sur des mesures <sup>14</sup>C.

Un problème important concerne la corrélation entre les unités stratigraphiques, du fait d'une grande variabilité des dénominations des couches sédimentaires décrites par les divers auteurs. Dans le **tableau 2.2**, nous proposons une corrélation de ces unités stratigraphiques de la Mer Noire, avec les classifications stratigraphiques de la glaciation Weichselienne et de l'Holocène dans l'Europe du Nord-ouest, telle qu'elle a été réalisée par Haq et Eysinga en 1987.

On différencie les dépôts sédimentaires actuels sur la plate-forme continentale, entre 0 et 50 m de profondeur d'eau, et entre 50 m et jusqu'à environ 150-200 m, de ceux du bassin profond. Une équivalence entre ces faciès est donnée dans le **tableau 2.3** (d'après Panin et Popescu, 2002).

Dans la zone bathymétrique 0-50m, le stade Djemetinskian (0-2800 ans BP) est caractérisé par la présence de bivalves tels que : *Divaricella divaricata*, *Gafrarium minimum* Pitar rudis, *Cardium papillosum*, le stade Kalamitien (2800-4800 ans BP) par la présence de *Chione gallina*, *Spisula subtruncata*, *Mytilus galloprovincialis*, celui Bugazien-Viteazien (4800-7800 ans BP) par la présence de *Cardium edule*, *Abra ovata*, *Corbula mediterranea*, *Mytilaster lineatus*, *Monodacna caspia*, *Dreissena polymorpha* et le Neoeuxinien (7800-17760 ans BP) par la présence de *Monodacna caspia*, *Dreissena polymorpha*, *Viviparus fasciatus*, *Unio* sp. (Scherbakov *et al.*, 1978)

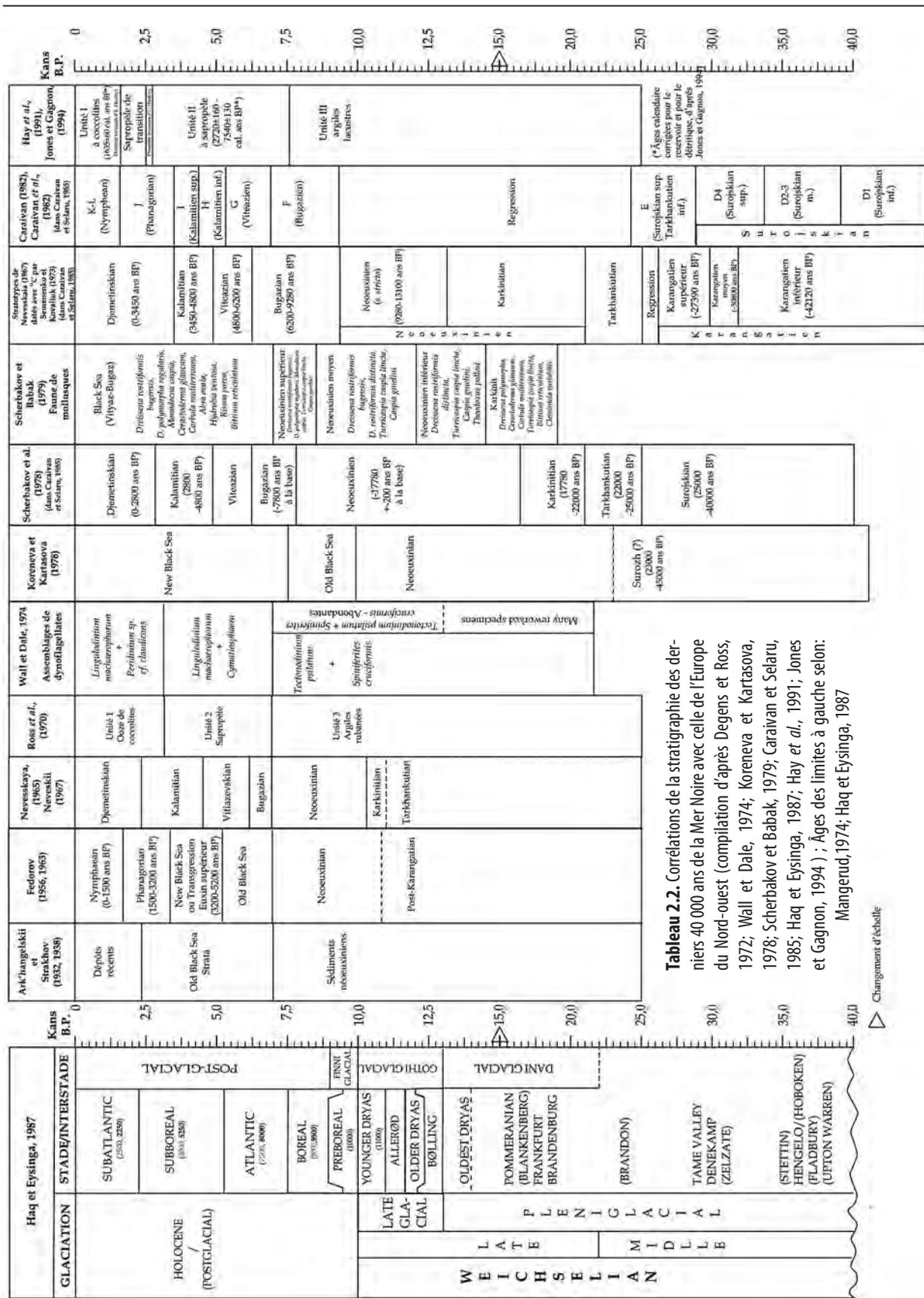
Sur la plate-forme continentale, les unités définies auparavant par Arkhangel'skiy et Strakhov, 1938 ; Fedorov, 1962 ; Nevevskaya, 1965 ; Nevevskiy, 1967 ; Muratov, 1972 ; Scherbakov *et al.*, 1978, se disposent en surface comme indiqué dans la **figure 2.3**. Elles sont dénommées selon les espèces de bivalves qui dominent dans le sédiment :

- Les vases à *Modiolus phaseolinus* qui se trouvent en surface entre 50 et 125 m de profondeur d'eau, dépassent rarement 30 cm d'épaisseur.

- Les vases à *Mytilus galloprovincialis* se trouvent en surface jusqu'à des profondeurs d'eau de 40-50m ; au-delà de 50 m elles sont couvertes par l'unité à *Modiolus*.
- Les vases à *Dreissena*, de couleur claire, apparaissent en surface vers 130 m, mais existent aussi en profondeur, couvertes par les vases à *Modiolus* et à *Mytilus*.

Au delà de 200 m d'eau et jusqu'au bassin profond, les sédiments superficiels sont constitués de deux unités hémipélagiques, déposées au cours de l'Holocène, et dont l'épaisseur est en général de quelques dizaines de centimètres. Elles ont été définies un peu différemment selon les divers auteurs (Ross *et al.*, 1970; Ross et Degens, 1974 ; Hay *et al.*, 1990, 1991). On utilisera dans cette étude la numérotation et la définition des unités choisies par Hay *et al.*, 1991.

- **l'unité I** est une alternance de lamines très fines, claires et noires, riches en carbonates (Hay *et al.*, 1991). Il y a autour de 50-100 lamines pour un centimètre d'épaisseur. Les lamines blanches sont constituées principalement par *Emiliana huxleyi*, elles sont déposées en automne - début de l'hiver (périodes de développement maximal des coccolithophoridés). Les lamines noires sont formées de matériel terrigène et de matière organique. Leur formation intervient en hiver et au début du printemps, quand les diatomées connaissent leur maximum de productivité (*i.e.* Belogorskaya & Kondratyeva, 1965 ; Hay *et al.*, 1990 ; Krupatkina *et al.*, 1991). Cependant, on ne trouve pas ces diatomées en grand nombre dans les lamines noires car elles se dissolvent rapidement à l'interface eau-sédiment. Un couple de lamines blanche-noire se dépose annuellement, mais il peut survenir des moments lors desquels la production dans les eaux de surface et la sédimentation sont si faibles que les couples ne se déposent pas. C'est la raison pour laquelle les estimations des âges obtenus par le comptage de varves donnent des erreurs atteignant 20% (Arthur *et al.*, 1994 ; Jones et Gagnon, 1994). La limite entre cette unité et celle du dessous a été définie différemment selon les auteurs (**Fig.2.4**). Ross *et al.*, 1970, ensuite Ross et Degens, 1974 avaient placé cette limite à la base de la plus récente invasion d'*Emiliana huxleyi* dans la Mer Noire et avaient numéroté les unités avec des chiffres arabes : " unités 1 et 2 ". Hay *et al.*, 1991, ont déplacé cette limite en bas de la première invasion des coccolithes, incluant dans l'unité I le sapropèle de transition et la première invasion de coccolithes (moment qui représente probablement, une augmentation de la salinité de la Mer Noire, au delà de 11-12‰ selon Bukry, 1974). Hay *et al.*, 1991, ont utilisé une numérotation romaine des unités : I et II. Dans la **figure 2.5** on peut remarquer les trois sous-unités de l'unité I : la première invasion du coccolithe *Emiliana huxleyi*, le sapropèle de transition et la dernière invasion de *Emiliana huxleyi*. L'épaisseur de l'unité I peut varier entre quelques centimètres et 50-60 cm.
- **l'unité II** est un sédiment fin granulaire, laminé, de couleur vert-foncé-noire à noire, à faible concentration de carbonates, très riche en matière organique, dénommé

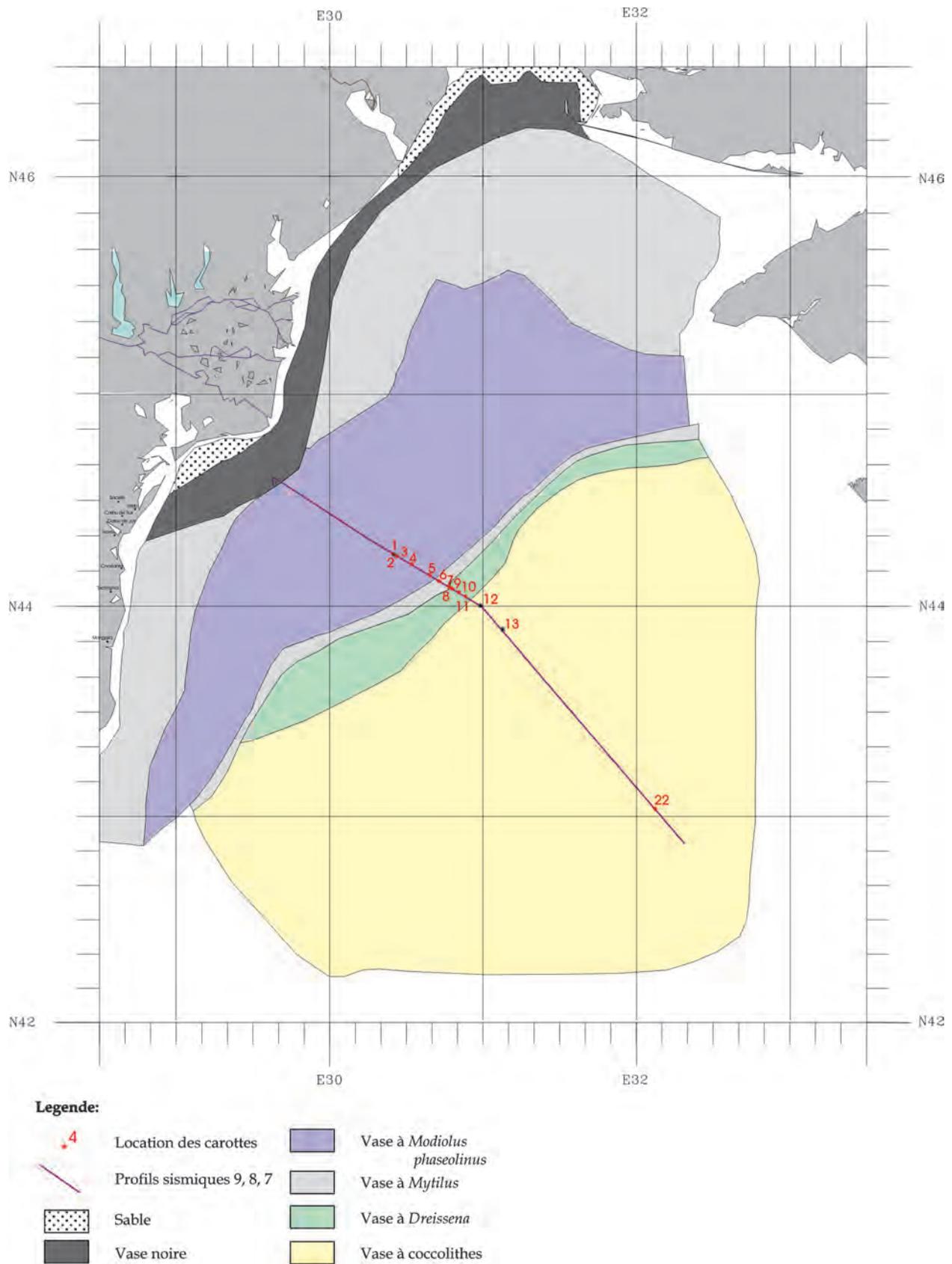


**Tableau 2.2.** Corrélation de la stratigraphie des derniers 40 000 ans de la Mer Noire avec celle de l'Europe du Nord-ouest (compilation d'après Degens et Ross, 1972; Wall et Dale, 1974; Koreneva et Kartasova, 1978; Scherbakov et Babak, 1979; Caravan et Selaru, 1985; Haq et Eysinga, 1987; Hay et al., 1991; Jones et Gagnon, 1994) ; Âges des limites à gauche selon: Mangerud, 1974; Haq et Eysinga, 1987

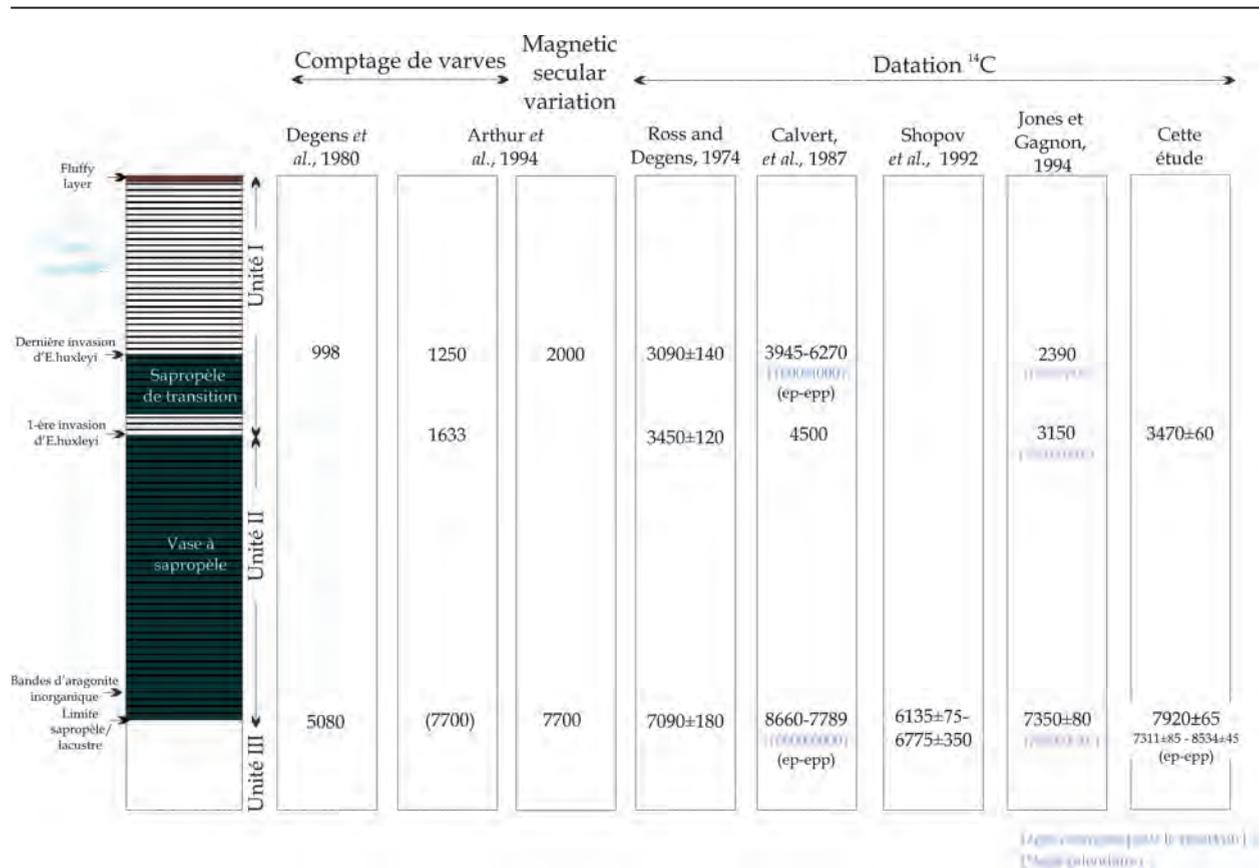
△ Changement d'échelle

Europe du Nord		B L A C K S E A						Zone profonde - au sud du bassin		
Stratigraphie		Zone bathystratigue 0-50 m		Zone bathystratigue 50-200 m		Zone profonde - au nord du bassin		Zone profonde - au sud du bassin		
Niveau		Bivalves		Horizon		Horizon		Horizon		
Niveau		Bivalves		Horizon		Horizon		Horizon		
Holocène	Sup.	Subatlantique	<i>Diversicula iburvaia</i> <i>Cardium nitidum</i> <i>Pitarus</i> - <i>Cardium</i> <i>Populium</i>	Vase à Phascolinus	<i>Coccolithes radiata</i> <i>Thalassiothoa exocentra</i> <i>Chlamydomonas</i> <i>Cyclotella</i>	Vase à coccolithes	Vase à coccolithes Unité 1	<i>Eolithus baubi</i> <i>Diplommatina</i> sp. <i>Perrinitina</i> sp.	(2700)	
		Sub-boreale	<i>Chama gallina</i> <i>Spinea subtruncata</i> <i>Astarte galloprovincialis</i>	Vase à Mytilus	<i>Coccolithes radiata</i> <i>Thalassiothoa exocentra</i> <i>Astarte galloprovincialis</i>	Supapécite	Supapécite Unité 2	<i>Bourcaudophora hephey</i> <i>Perrinitina trachidonta</i>		
	Moyen	Atlantique	<i>Cardium edule</i> <i>Diplommatina</i> <i>Mytilus</i> <i>Astarte</i> <i>Alusca</i> <i>Proxys</i>	6,800 ± 140 8,550 ± 130	Vase à hydrozoaires	<i>Thalassiothoa exocentra</i> <i>Sphaerobolus</i> <i>Mytilus</i> <i>Astarte</i> <i>Alusca</i> <i>Proxys</i>	Vase terrigène-biogène	Vase terrigène-biogène	7,000± 180 (7500) 8,600± 200	
		Boreale	<i>Alusca</i> <i>Diplommatina</i> <i>Mytilus</i>	13,500±1,500 17,760 ± 200	Vase à hydrozoaires	<i>Thalassiothoa exocentra</i> <i>Sphaerobolus</i> <i>Mytilus</i> <i>Astarte</i> <i>Alusca</i> <i>Proxys</i>	Vase à hydrozoaires "oxydes" terrigènes	Vase riche en nanofossiles	13,850±200 16,900±270	
	Pléistocènesupérieur	Wurm (Valdat)	Neocénien	<i>Alusca</i> <i>Diplommatina</i> <i>Mytilus</i>	~22,000	Vases argileuses	<i>Thalassiothoa exocentra</i> <i>Sphaerobolus</i> <i>Mytilus</i> <i>Astarte</i> <i>Alusca</i> <i>Proxys</i>	Phase lacustre	Phase lacustre	22,000
			Karankintien	<i>Alusca</i> <i>Diplommatina</i> <i>Mytilus</i>	~25,000	Fragmentes et formes juvéniles de <i>Diplommatina</i> <i>Alusca</i> <i>Proxys</i>	Phase marine	Phase marine	25,000	
		Riss-Wurm	Tankankintien	<i>Alusca</i> <i>Diplommatina</i> <i>Mytilus</i>		Abbréviations : M-Sig. = Møgeløe-Skedsten (interglaciaire) K.g. = Karankintien (glaciaire)				
			Surozhen	<i>Alusca</i> <i>Diplommatina</i> <i>Mytilus</i>						
			Regression	<i>Alusca</i> <i>Diplommatina</i> <i>Mytilus</i>						
			Post-karankintien	<i>Alusca</i> <i>Diplommatina</i> <i>Mytilus</i>						

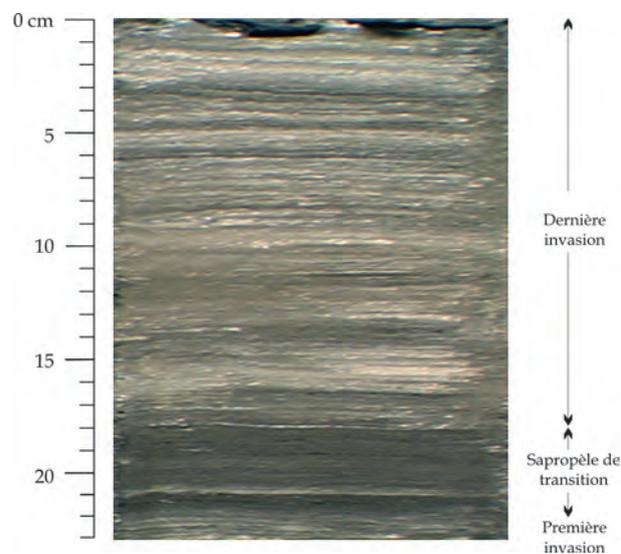
Tableau 2.3. Corrélation des faciès de di- verses profondes dans le bassin de la Mer Noire (adaptation par Panin et Popescu, 2002 d'après Scherbakov *et al.*, 1979)



**Fig.2.3.** Distribution des unités litho-stratigraphiques à la surface de sédiments de la plate-forme Nord-ouest de la Mer Noire (d'après Rădan, données non publiés)



**Fig.2.4.** Limites et âges  $^{14}\text{C}$  (conventionnels non-corrigés) des unités lithostratigraphiques selon divers auteurs (modifié d'après Jones et Gagnon, 1994); ep = âge des limites pour les carottes d'eau profonde, epp=âge dans les carottes d'eau peu profonde



**Fig.2.5.** L'unité I et ses trois sous-unités: la première invasion du coccolite *Emiliana huxleyi*, le sapropèle de transition et la dernière invasion d'*E.huxleyi* (Carotte BLKS 98-11; 0-23cm)

**sapropèle**<sup>7</sup>. L'épaisseur de cette unité est en général de 30-50 cm, mais elle peut atteindre 150 cm près du rebord de la plate-forme continentale (vers 200-400 m de profondeur). Dans la plupart des carottes, à la base de cette unité, 3 bandes blanches sont visibles: la plus récente est constituée majoritairement d'*Emiliana huxleyi*, la deuxième contient le coccolithophore *Braarudosphaera bigelowi* et des restes de kystes du dinoflagellé marin *Peridinium trochoideum*, et la troisième est constituée entièrement d'aragonite (Ross et Degens, 1974).

- en dessous de ces deux unités se trouve l'**unité III**, constituée d'alternances d'argiles claires et foncées déposées dans des conditions lacustres. Dans cette unité se trouvent aussi des intercalations de silt et de sable plus au moins grossier, granoclassé, plus fréquentes dans la partie est et le long de la côte anatolienne. Le contenu de carbone organique est en général en dessous de 1 % (Ross et Degens, 1974). Souvent, on trouve des couches noires de monosulfures de fer métastables tels que la mackinawite ou la greigite (Berner, 1974). Dans cette unité il n'y a pas de coccolithes holocènes tels que *Emiliana huxleyi*, trouvé dans les deux premières unités. En échange, sont présents des fragments des coccolithes éocènes et crétacés, probablement remaniés à partir des couches sédimentaires continentales (Ross et Degens, 1974).

L'équivalence des dépôts d'eau peu profonde décrits ci-dessus, avec ceux d'eau profonde est la suivante (voir aussi le **Tableau 2.3**):

- la vase à *Modiolus phaseolinus* de la zone de profondeur 50-200 m, correspond dans la zone profonde, à l'unité I à coccolithes ;
- la vase à *Mytilus* correspond à l'unité II à sapropèle et
- la vase à *Dreissena* correspond à l'unité III, lacustre.

### 2.3. DESCRIPTION DES CAROTTES

Les carottes analysées au cours de ce travail (BLKS 98-04 ; -06 ; -09 ; -11 ; -22) ont été choisies le long des profils 7, 8 et 9 à diverses profondeurs d'eau. Pour avoir une vision plus complète nous avons aussi effectué des observations sur des carottes des mêmes profils (BLVK 98-01 ; BLKS 98-05 ; -07 ; -08 ; -10) ou dans une zone de dunes sous-marines, plus au sud-ouest (BLVK 98-14 ; -15) (**Fig.2.1**).

L'**annexe 1** contient leurs descriptions lithologiques, avec indications des niveaux d'échantillonnage, dont ceux datés grâce au <sup>14</sup>C.

<sup>7</sup> du gr. *sapros*, pourri, et *pêlos*, boue ; angl. *sapropel*. Vase ou boue comportant une grande proportion de matière organique d'origine algale, déposé sous une colonne d'eau anoxique. La proportion du carbone organique dépasse 1-2% du sédiment, selon les divers auteurs.

### 2.4. IDENTIFICATION DES FACIÈS SÉDIMENTAIRES

Pour les carottes de la plate-forme continentale, on a retrouvé les unités sédimentaires de surface décrites antérieurement dans la littérature. Nous avons aussi identifié d'autres faciès, parfois similaires d'une carotte à l'autre, et nous les décrivons ci-dessous (voir aussi la **Fig.2.6**). Nous avons noté avec 'M' les faciès marin et avec 'S' les faciès saumâtre ou lacustre. Les chiffres arabes correspondent à des sous-différenciations de faciès.

- **Vase à *Modiolus* (M1)** : au sommet des carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06 et BLCP 98-07. Il s'agit d'une vase gris-claire à gris-foncé-verte, avec des débris et des coquilles entières de *Modiolus phaseolinus* (**Fig.2.7**).
- **Vase à *Mytilus* (M2)** : c'est une vase riche en débris très fins de coquilles (surtout des débris de *Mytilus galloprovincialis*, mais aussi des fragments de *Dreissena*). Elle a été identifiée seulement au sommet de la carotte BLVK 98-01 (**Fig.2.8**).
- **Vase sableuse à débris de *Dreissena* (S1a)** : elle contient des débris (fragments <5-7 mm) et des coquilles entières de *Dreissena rostriformis*, *Dreissena caspia* et *Modiolus* (*Modiolus* a été trouvé uniquement dans la carotte BLKS 98-04). Ce faciès a été identifié dans toutes les carottes situées sur la plate-forme (BLVK 98-01 ; BLKS 98-04 ; -05 ; -06) et aussi dans le carottier pilote BLCP 98-07, situé sur le rebord de la plate-forme (**Fig.2.9**). L'épaisseur de ce faciès est de quelques centimètres. Parfois, on observe une augmentation de la taille et de la quantité des débris vers le bas du faciès S1 (BLKS 98-04 et BLKS 98-05).
- **Vase à débris de *Dreissena* (S1b)** : c'est un faciès qui ressemble beaucoup au faciès S1a, mais le sédiment est ici plus fin. Il contient des coquilles de *Dreissena rostriformis distincta*, *Dreissena polymorpha* et *Micromelania caspia*. Il est visible dans les carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06, et a une épaisseur d'environ 10-18 cm (**Fig.2.9**).
- **Alternance de sable fin - silt avec des granules et des lamines noirs (S2)** : ce faciès n'a pas de débris de coquille. Les granules et les lamines noires peuvent être dues à la présence des monosulfures de fer dans le sédiment. C'est un faciès trouvé dans la carotte BLKS 98-05, qui ressemble au faciès S4b ; mais, dans cette carotte on ne distingue pas de discontinuité entre S2 et le faciès S1 qui se trouve au-dessous (**Fig.2.10**) ;
- **Sable fin à débris de *Dreissena* et à points noirs dispersés (S3)** : ce faciès se trouve en dessous de la discontinuité dans la carotte BLKS 98-06. Il est constitué de niveaux de sable gris-clair à gris-noir ayant des débris de coquilles très nombreux, avec un granoclassement normal. La quantité et la dimension des fragments de débris (2 à 7 mm) augmentent vers la base du niveau (**Fig.2.11**). La composition de ce sédiment semble indi-

quer la proximité de la côte. S3 a une épaisseur d'environ 25 cm.

- **Vase sableuse à granules et lamines noirs (S4a)** : le sédiment contient des granules et des lamines noires, et également des points noirs dispersés et en niveaux. Les granules, lamines et points noirs, sont constitués probablement des monosulfures de fer mais ils peuvent aussi contenir des minéraux lourds dont la présence a été confirmée par nos analyses au microscope. Les fragments de coquilles sont extrêmement rares. Ceci, en plus de la présence de minéraux lourds, indique un milieu dépositionnel de haute énergie. On trouve S4a dans les carottes BLKS 98-04 (de 30 à 81 cm) et BLKS 98-06 (de 46 à 105 cm) (**Fig.2.12a**), avec des épaisseurs de 50-60 cm.
- **Sable fin à lamines noires et intercalations de vase sableuse (S4b)** : il apparaît dans la carotte BLKS 98-06 (105-125 cm). S4b peut être simplement une variante plus grossière du faciès S4a (**Fig.2.12b**).
- **Alternance " vase sableuse - sable fin " (S5)** : les niveaux sont homogènes, sans granoclassement, sans faune visible, et le sable est micacé. Les limites sont nettes et on trouve de rares nodules de sable. Ce faciès, d'une épaisseur d'environ 140 cm, a été identifié dans la carotte BLKS 98-06 (de 125 à 265 cm) (**Fig.2.13**).
- **Vase à forte odeur de H<sub>2</sub>S avec des niveaux de coquilles (S6)** : cette vase contient des débris de coquilles et même de rares coquilles entières, dispersées (alors, les *Dreissena* prédominent ; **Fig.2.14**). Ce faciès a été identifié dans 4 carottes (BLKS 98-07, -08, -09 et -10), toutes situées sur le piémont continental (le glaciaire), à des profondeurs entre 163 et 378 m. L'épaisseur de ces dépôts atteint 1 à 8 mètres et augmente avec la tranche d'eau. La présence de coquilles entières, parfois avec les deux valves, est une indication qu'elles se trouvent *in situ*. Les niveaux de coquilles entières de la carotte BLKS 98-07 indiquent soit le fait que les mollusques sont *in situ* où qu'il y a un transport sur la pente, mais sur une courte distance.
- **Vase à rares débris de coquilles, à taches noires et à niveaux sableux (S7)** : elle est identifiée dans les carottes BLKS 98-07 et BLKS 98-08 et ressemble au faciès S5 de la carotte BLKS 98-06. Les débris de coquilles sont dispersés et parfois, il y a des coquilles entières, très bien conservées, pouvant présenter les deux valves. Les niveaux de sable fin sont sub-centimétriques (**Fig.2.15**). L'épaisseur de ce faciès est d'environ 220 cm.
- **Vase très fine, homogène, sans coquilles (S8)** : identifiée dans la carotte BLKS 98-07 (à 109-126 cm et à 138-146 cm). Ce faciès a 10-20 cm d'épaisseur (**Fig.2.16**).
- **Vase à coccolites (M3)** : ce faciès pélagique est l'unité I de Hay, 1990, décrite au sous-chapitre 2.2, **Fig.2.4**. On trouve cette vase au sommet de carottes BLCP 98-09 et

-10, BLKS 98-10, -11 et -22. Les épaisseurs, qui diminuent avec l'augmentation de la profondeur d'eau, vont de 23 à 6 cm (**Fig.2.17**).

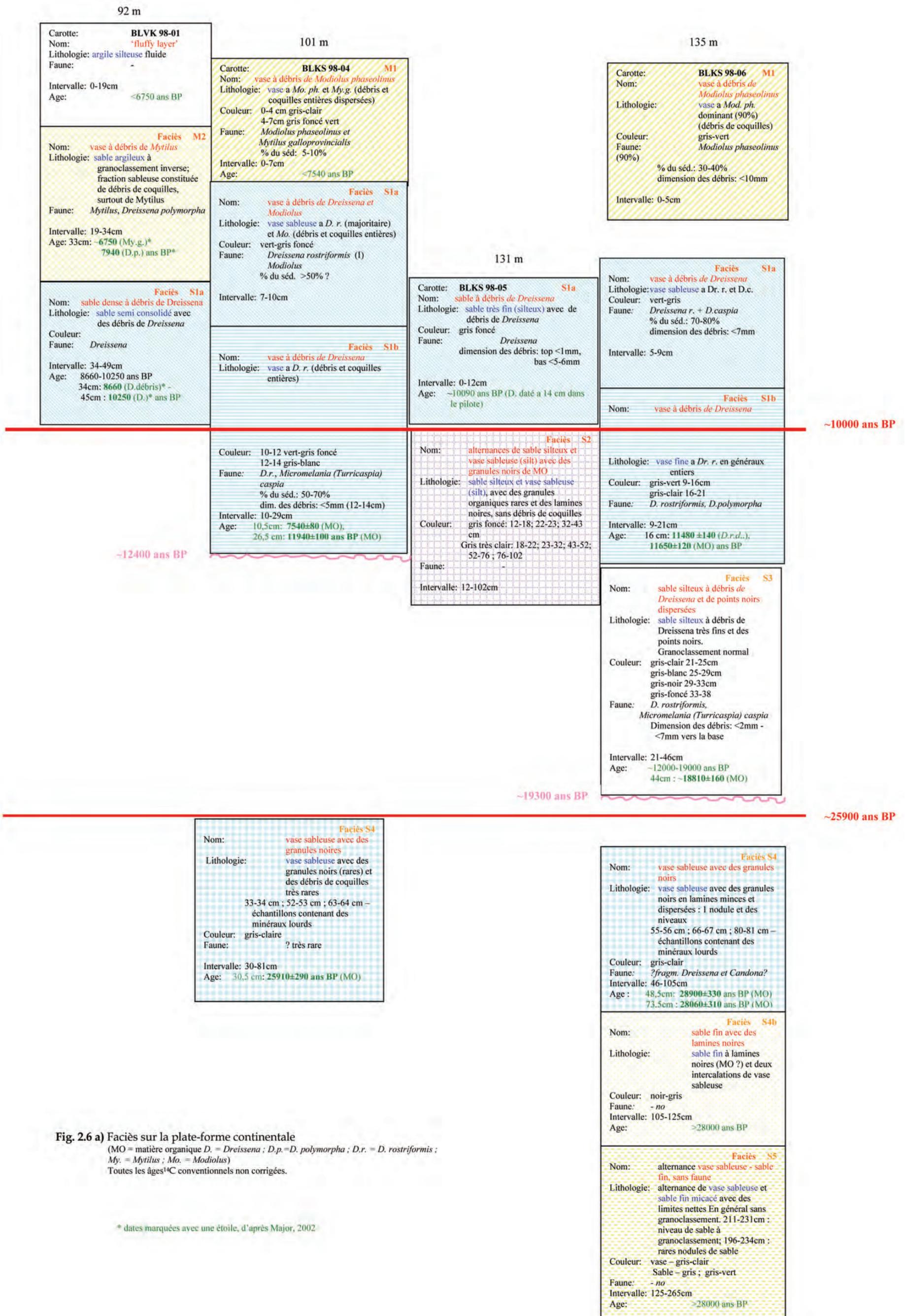
- **Vase à sapropèle (M4)** : c'est le faciès pélagique décrit par Hay, 1990, comme étant l'unité II, et dont la description se trouve déjà dans le sous-chapitre 2.2. Il est présent dans les mêmes carottes que le faciès M3 : BLCP 98-09 et -10, BLKS 98-10, -11 et -22. Il présente des épaisseurs de 18 à 38 cm (**Fig.2.17**).
- **Vase colorée, sans organisation interne, à lamines et taches noires (S9)** : c'est la partie supérieure de l'unité 3 décrite par Ross et Degens (1974) et dénommée ensuite unité III par Hay (1990). Ce faciès, présent dans les carottes BLKS 98-10 (de 35,5 à 90,5 cm), BLKS 98-11 (de 61 à 135 cm) et BLKS 98-22 (de 25 à 50 cm), a été dénommé par Popescu (2002) " silt coloré, sans organisation interne " ou " faciès A4 ". La partie supérieure de ce faciès a une couleur foncée, alors que les sédiments plus clairs du dessous sont plus carbonatés (**Fig.2.18**).
- **vase très fine avec des bandes et des nodules noirs (S10)** : c'est un faciès similaire au faciès S6 de carottes moins profondes (BLKS 98-07, -08, -09 et 10), à la différence qu'il lui manque ici les débris de coquilles (**Fig.2.19**). Il se trouve dans les carottes BLKS 98-11 (135 à 299 cm) et BLKS 98-22 (50 à 107 cm).
- **vase brune avec fissures et moins de granules noirs (S11)** : c'est un faciès homogène de la carotte BLKS 98-11 (299 à 757 cm) (**Fig.2.20**).
- **vase fine à lamines de vase plus grossière (S12)** : c'est le faciès A5 défini par Popescu (2002) en tant que succession de cycles turbiditiques: " silt organisé, avec granoclassement, stratification parallèle ". Les lamines de vase sableuse sont millimétriques. On le retrouve dans la carotte BLKS 98-22 (**Fig.2.21**).

## 2.5. CHRONOLOGIE

Afin de pouvoir établir la chronologie des unités décrites plus haut, des datations <sup>14</sup>C par AMS ont été effectués sur les carbonates de coquilles et sur la matière organique du sédiment, aussi souvent que possible. Les datations ont été réalisées sur le *Tandetron* de LSCE Gif-sur-Yvette.

Nous avons daté 35 échantillons de coquilles et de matière organique totale après décarbonatation douce. 28 des échantillons sont issus de 5 carottes situées le long des profils 7 et 8, orientés NO-SE (**Fig.2.1b**) et 7 échantillons, des carottes BLVK 98-14 et BLVK 98-15 situées plus près de la côte, à l'ouest des profils 7 et 8. Le **tableau 2.4** présente la profondeur de l'eau, les niveaux, le type de matériel daté et les âges obtenus, conventionnels non corrigés et corrigés.

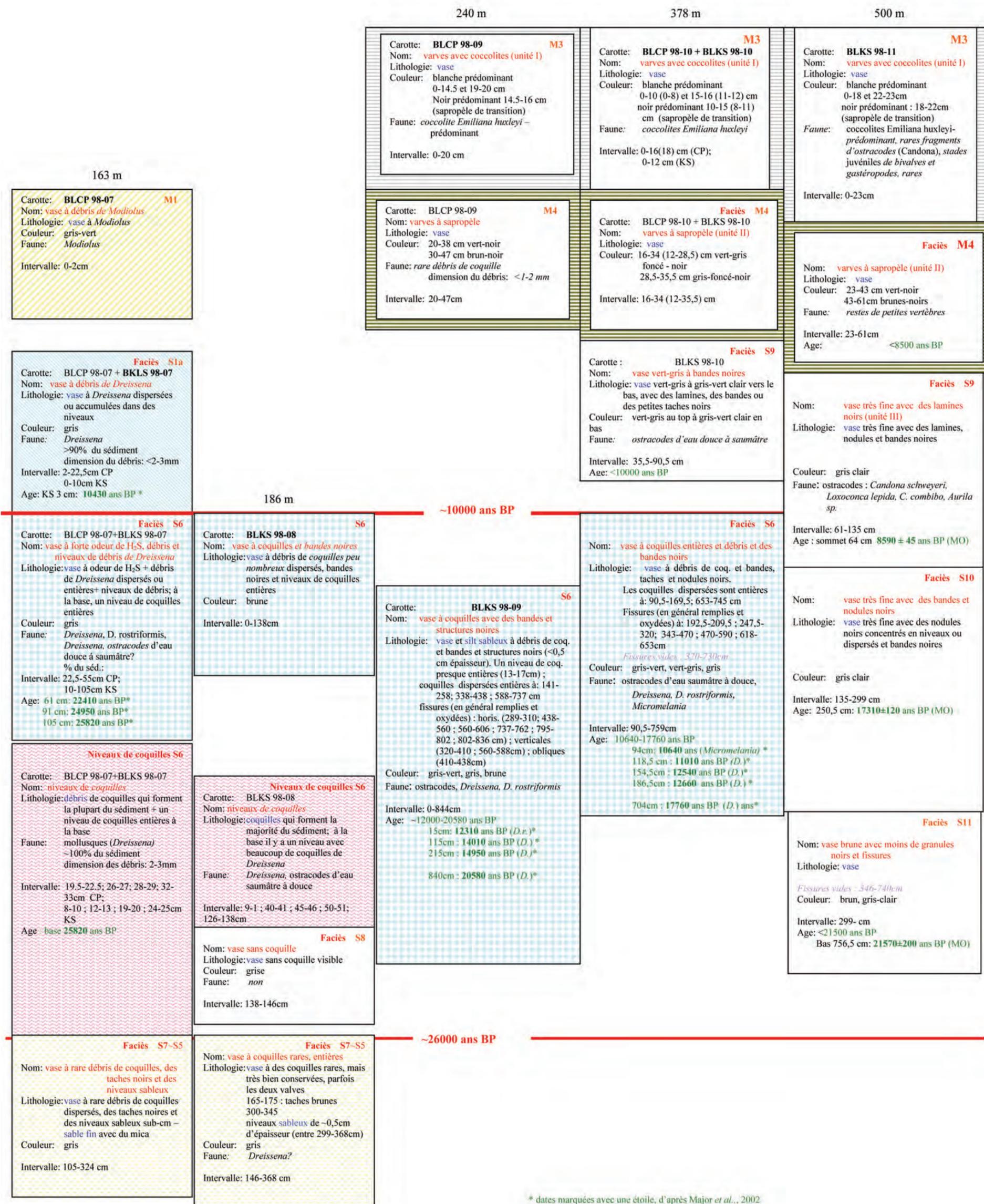
La disposition des âges en fonction de la profondeur dans chaque carotte est représentée dans la **figure 2.22**.



**Fig. 2.6 a) Facies sur la plate-forme continentale**  
 (MO = matière organique *D.* = *Dreissena* ; *D.p.* = *D. polymorpha* ; *D.r.* = *D. rostriformis* ;  
*My.* = *Mytilus* ; *Mo.* = *Modiolus*)  
 Toutes les âges<sup>14</sup>C conventionnels non corrigées.

\* dates marquées avec une étoile, d'après Major, 2002

**Fig. 2.6. a)** Facies sur la plate-forme continentale. (MO = matière organique *D.* = *Dreissena* ; *D.p.* = *D.r.* = *D. rostriformis* ; *My.* = *Mytilus* ; *Mo.* = *Modiolus*). outes les âges<sup>14</sup>C conventionnels non corrigés



\* dates marquées avec une étoile, d'après Major et al., 2002

Fig. 2.6. b) Facies similaires dans les carottes situées sur le piémont continental

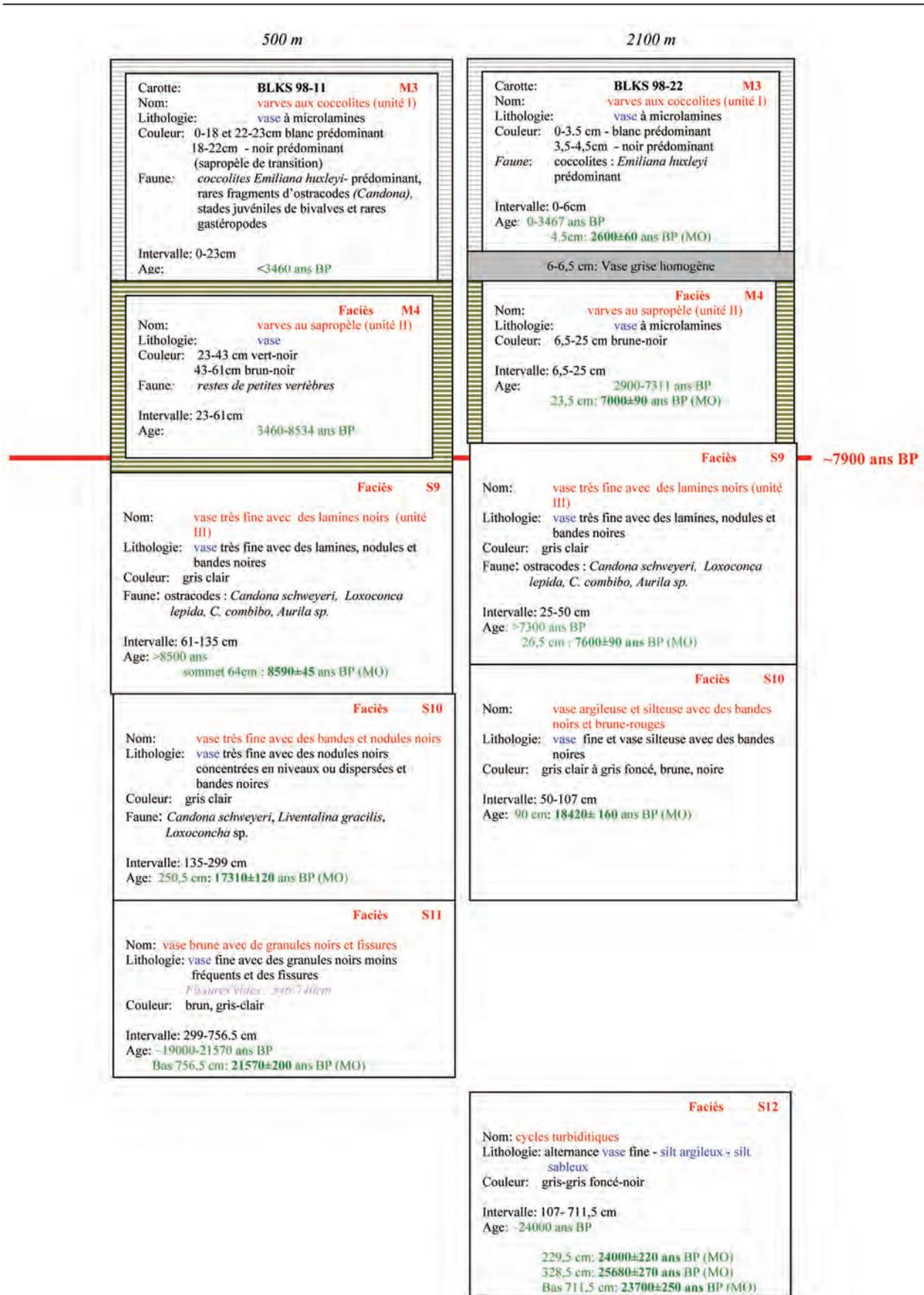
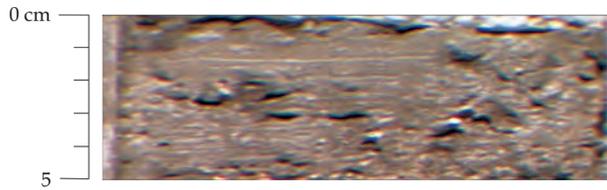


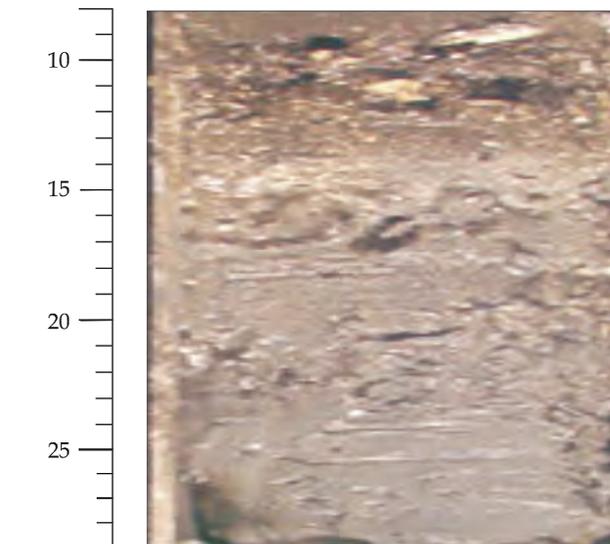
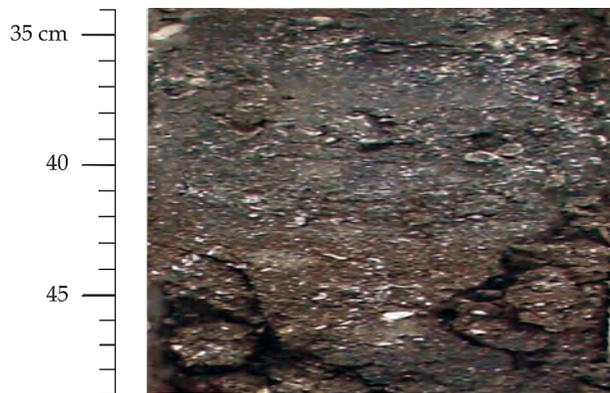
Fig.2.6. c) Faciès similaires dans les carottes situées dans la zone abyssale



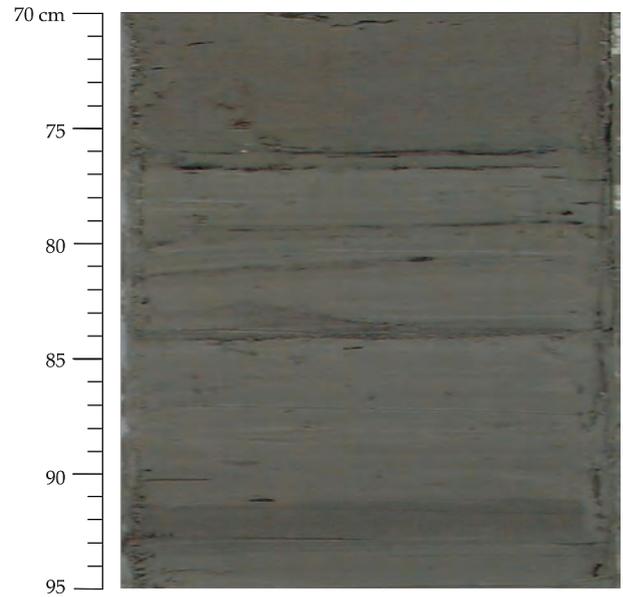
**Fig.2.7.** Faciès M1: vase à débris de *Modiolus phaseolinus* (Carotte BLKS 98-06, 0-5 cm)



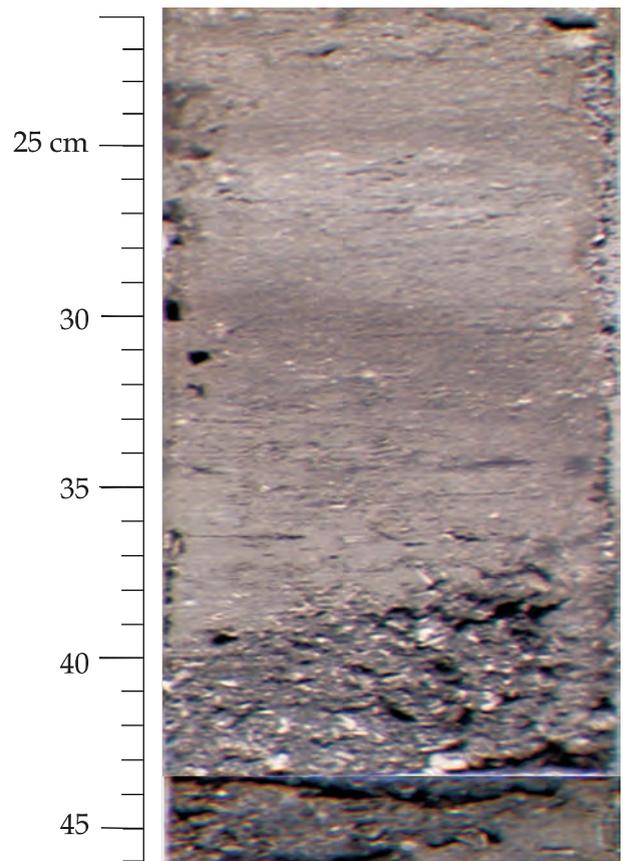
**Fig.2.8.** Faciès M2: vase à *Mytilus galloprovincialis* (Carotte BLKS 98-01, 19-34 cm)



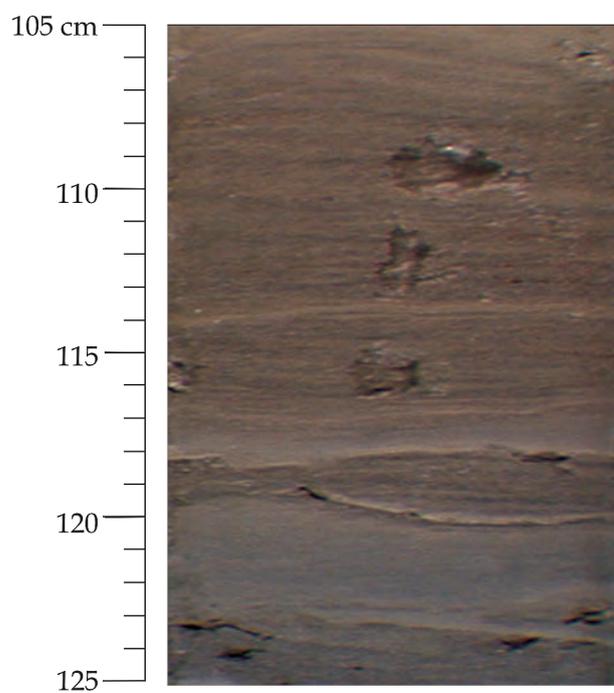
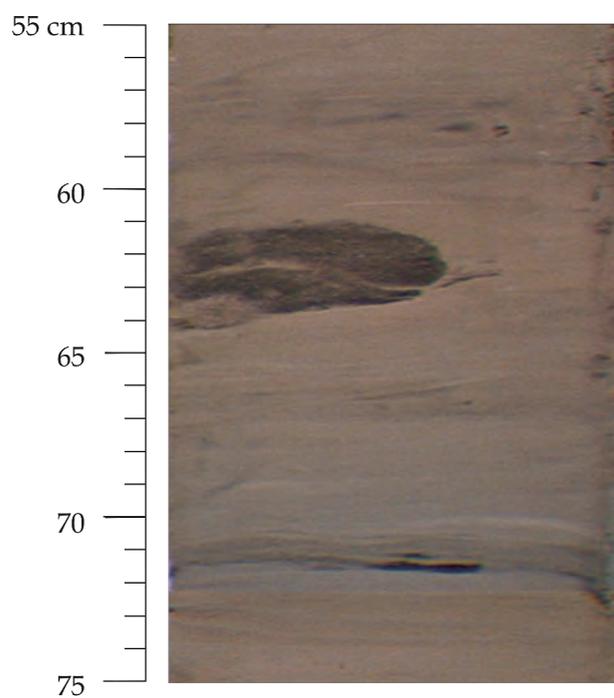
**Fig.2.9.** Faciès S1a et b: vase sableuse à débris de *Dreissena* (en haut S1a: carotte BLVK 98-01, 34-49cm; en bas S1a et b: Carotte BLKS 98-04, 7-10 et 10-29 cm)



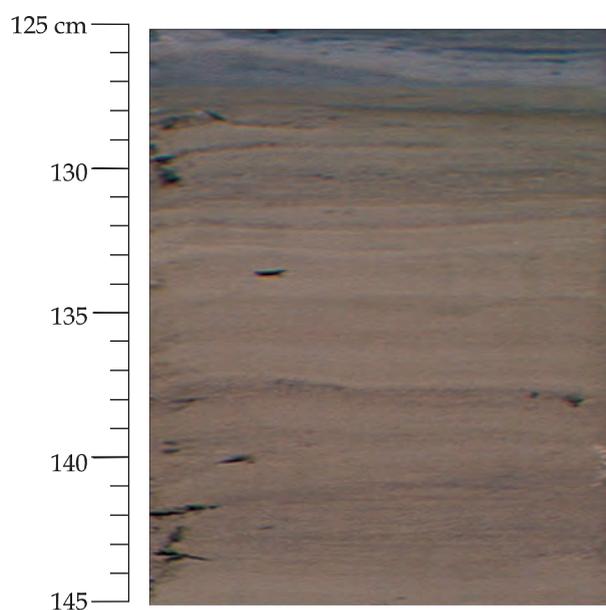
**Fig.2.10.** Faciès S2 : alternance sable fin - silt avec des granules et des lamines noirs sans coquille (Carotte BLKS 98-05 ; 12-76 cm)



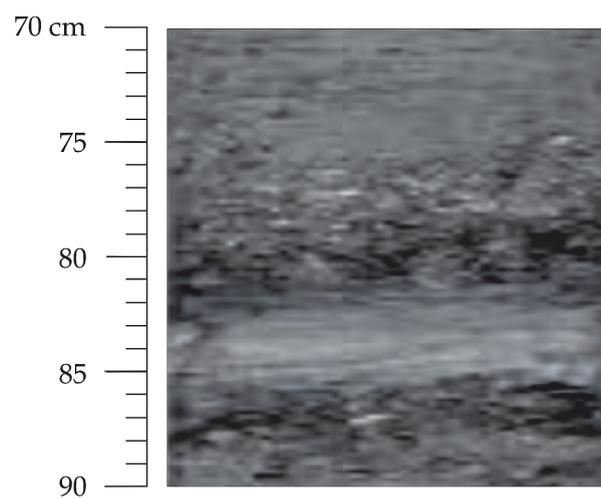
**Fig.2.11.** Faciès S3 : sable fin à débris des coquilles, granoclassement normal et points noirs (carotte BLKS 98-06 ; 21-46 cm)



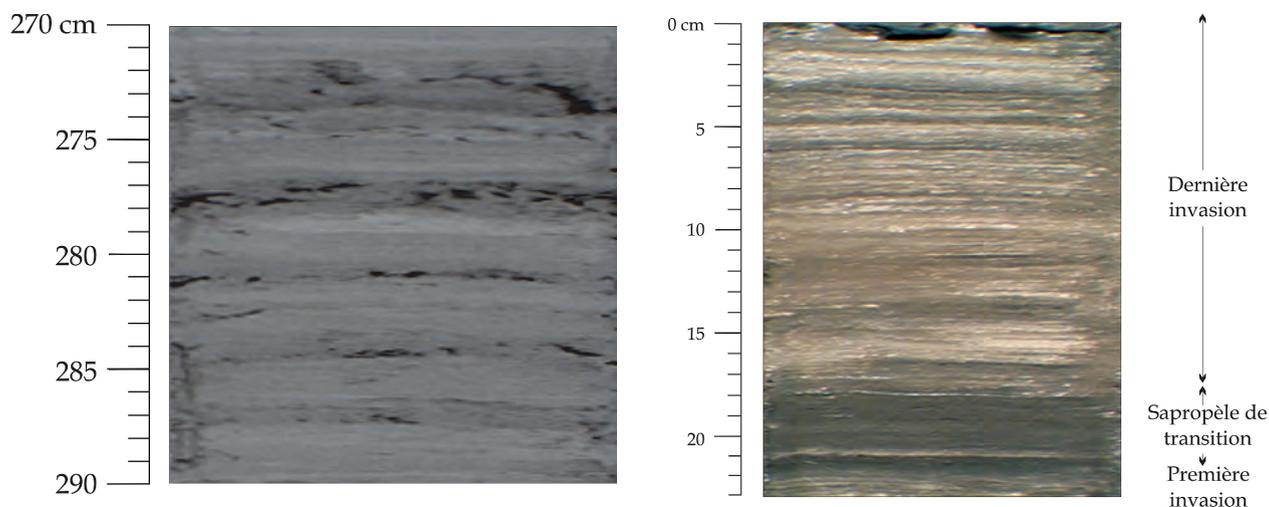
**Fig.2.12.** Faciès S4. En haut: S4a - vase sableuse avec des granules points dispersés et lamines noirs, sans coquille (carotte BLKS 98-06 ; 46-105 cm). En bas: S4b - sable fin à lamines noirs et intercalations sableuses (carotte BLKS 98-06 ; 105-125 cm)



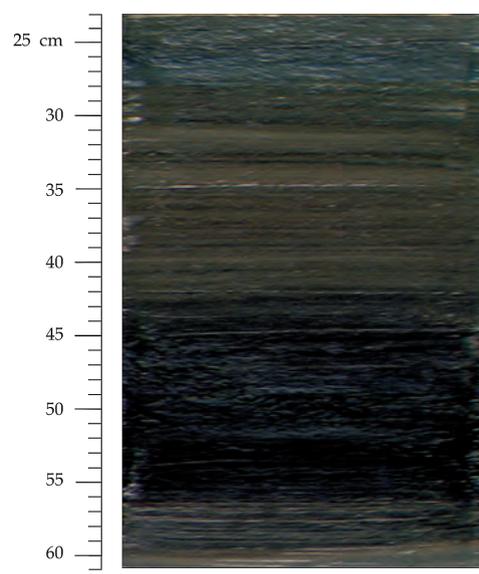
**Fig.2.13.** Faciès S5 - alternance vase sableuse - sable fin. Les niveaux sont homogènes à limites nettes, sans granoclassement, sans faune visible. Rares nodules de sable micacé. (Carotte BLKS 98-06; 125-265 cm)



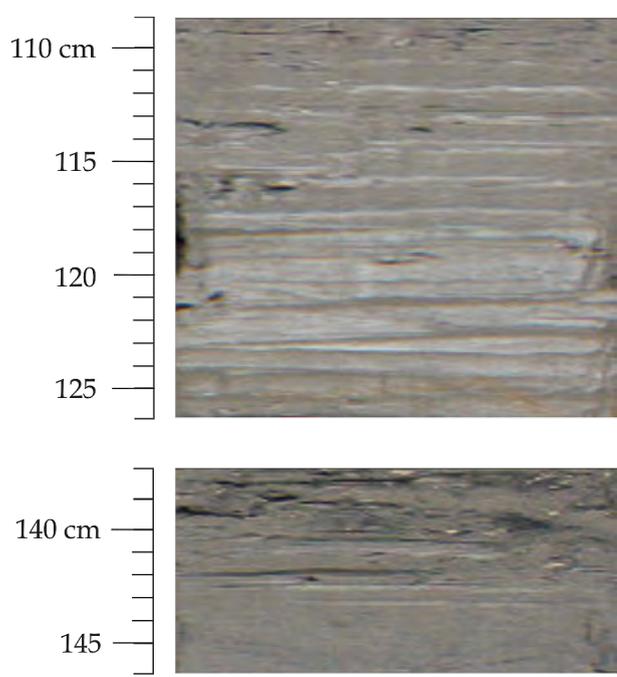
**Fig.2.14.** Faciès S6 - Vase à forte odeur de  $H_2S$  et à niveaux de coquilles ; la vase contient des débris de coquilles et même de rares coquilles entières, dispersées (BLKS 98-07 ; 10-105 cm)



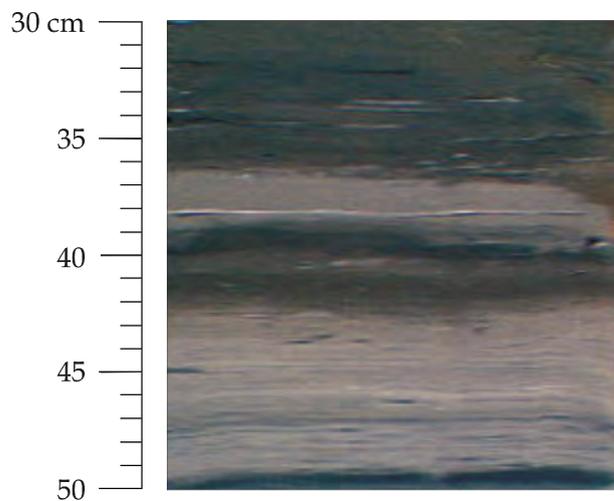
**Fig.2.15.** Faciès S7 - Vase à rares débris de coquilles et à coquilles entières bien conservées; la vase présente des taches noires et des niveaux sableux sub-centimétriques (BLKS 98-07; 105-324 cm)



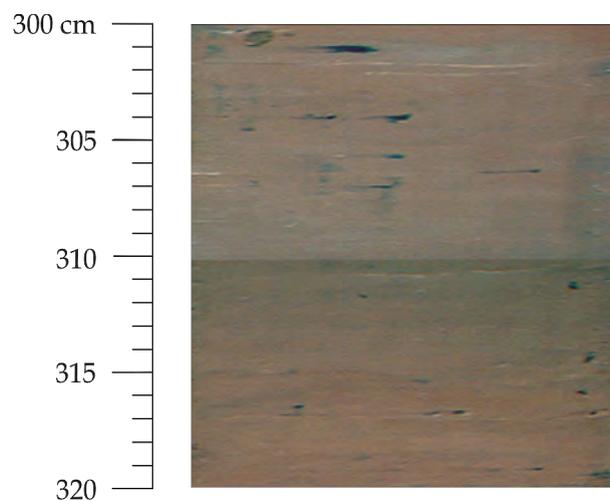
**Fig.2.17.** Faciès M3 (0-23cm) et M4 (23-43cm) : a) Vase à coccolites (M3): 22-23 cm première invasion de coccolites, 18-22 cm sapropèle de transition, 0-18 cm deuxième invasion de coccolites; b) vase à sapropèle (M4) : 23-61 cm (carotte BLKS 98-11, 0-61 cm)



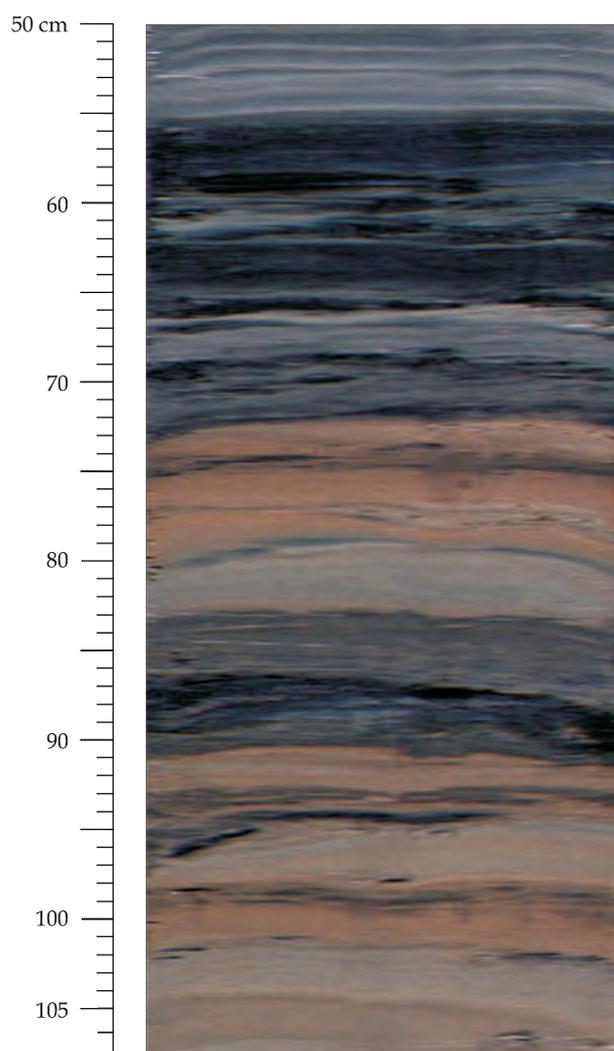
**Fig.2.16.** Faciès S8 - Vase très fine, homogène, sans coquille (S8) (carotte BLKS 98-07 ; 109-126 et 138-146 cm)



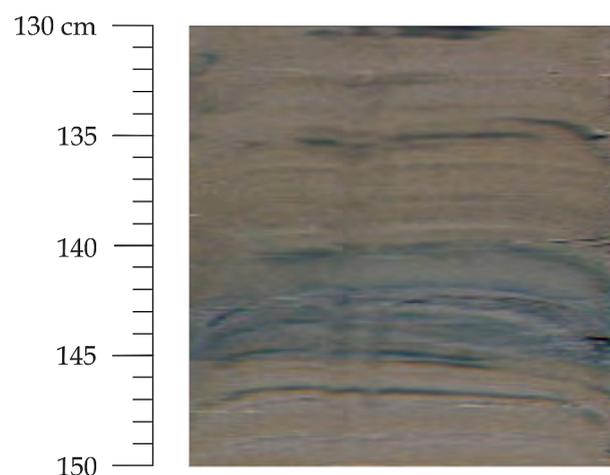
**Fig.2.18.** Faciès S9 - Vase colorée, sans organisation interne, à lamines et taches noires (carotte BLKS 98-22, 30-50 cm)



**Fig.2.20.** Faciès S11 - vase brune avec des fissures et moins de granules noirs (carotte BLKS 98-11, 300-320 cm)



**Fig.2.19.** Faciès S10 - vase très fine avec des bandes et des nodules noirs (carotte BLKS 98-22, 50-107 cm)



**Fig.2.21.** Faciès S12 – alternances de vases fines et grossières (BLKS 98-22, 130-150 cm)

**Tableau 2.4.** Liste des échantillons datés, dans 7 carottes du NO de la Mer Noire. Les dates ont été obtenues sur des coquilles de mollusques ou sur la matière organique (MO) du sédiment

No	Carotte no.	Prof. de l'eau (m)	niveau dans la carotte (cm)	âge conventionnel non corrigé (ans BP)	âge corrigée* (ans BP)	Type d'échantillon daté	Fichier <sup>14</sup> C	Laboratoire
1	BLKS 98-04	101	9	10380±120	9965±105	<i>Dreissena rostriformis distincta</i>	GifA-101 525	LSCE
2			10,5	7540±80	6960±80	MO du sédiment	GifA-101 533	LSCE
3				10280±120	9865±105	<i>Dreissena</i>	GifA-101 526	LSCE
4			26,5	10610±130	10195±110	<i>Dreissena</i>	GifA-101 527	LSCE
5				11690±130	11275±110	<i>Micromelania caspia (Turricaspia)</i>	GifA-101 528	LSCE
6				11940±100	11360±100	MO du sédiment	GifA-101 534	LSCE
7				30,5	25910±290	25330±290	MO du sédiment	GifA-101 535
8	BLKS 98-06	135	15	10800±130	10385±110	<i>Dreissena polymorpha</i>	GifA-101 529	LSCE
9			16	11480±140	11065±115	<i>Dreissena rostriformis distincta</i>	GifA-101 530	LSCE
10				11650±120	11070±120	MO du sédiment	GifA-101 536	LSCE
11			44	21180±210	20765±150	<i>Micromelania caspia (Turricaspia)</i>	GifA-101 531	LSCE
12				20850±170	20435±130	<i>Dreissena rostriformis distincta</i>	GifA-101 532	LSCE
13				18810±160	18230±160	MO du sédiment	GifA-101 537	LSCE
14				48,5	28900±330	28320±330	MO du sédiment	GifA-101 538
15	73,5	28060±310	27480±310	MO du sédiment	GifA-101 539	LSCE		
16	BLKS 98-07	163	61	22410±210	21995±150	<i>Dreissena</i>	GifA-99 252	LSCE
17			91	24950±230	24535±160	<i>Dreissena</i>	GifA-99 253	LSCE
18			105	25820±230	25405±160	<i>Dreissena</i>	GifA-99 254	LSCE
19	BLKS 98-11	500	64	8590±45	8010±45	MO du sédiment		LLNL
20			250,5	17310±120	16730±120	MO du sédiment		LLNL
21			756,5	21610±200	21030±200	MO du sédiment		LLNL
22	BLKS 98-22	2100	4,5	2600±60	2020±60	MO du sédiment	GifA-101 540	LSCE
23			23,5	7000±80	6420±80	MO du sédiment	GifA-101 541	LSCE
24			26,5	7600±90	7020±90	MO du sédiment	GifA-101 542	LSCE
25			90	18420±160	17840±160	MO du sédiment	GifA-102 101	LSCE
26			229,5	24000±220	23420±220	MO du sédiment	GifA-101 543	LSCE
27			328,5	25680±270	25100±270	MO du sédiment	GifA-101 544	LSCE
28	711,5	24280±250	23700±250	MO du sédiment		LLNL		
29	BLVK 98-14	55	10	3980±60	3565±75	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	GifA-99 255	LSCE
30			130	9580±90	9165±90	<i>Monodacna</i>	GifA-99 256	LSCE
31	BLVK 98-15	55	92	6590±80	6175±85	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	GifA-99 261	LSCE
32				7630±80	7215±85	<i>Hypanis plicatus</i>	GifA-99257	LSCE
33			6950±70	6535±80	<i>Cerastoderma</i>	GifA-99258	LSCE	
34			94	6900±70	6485±80	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	GifA-99259	LSCE
35				7770±80	7355±85	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	GifA-99260	LSCE

\* corrections: 415±90 ans pour les âges obtenus sur les coquilles (d'après Siani *et al.*, 2000) et 580 ans pour les âges obtenus sur la matière organique (d'après Jones et Gagnon, 1994)

LSCE = Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement – Gif sur Yvette

LLNL = Lawrence Livermore National Laboratory – Center for Accelerator Mass Spectrometry

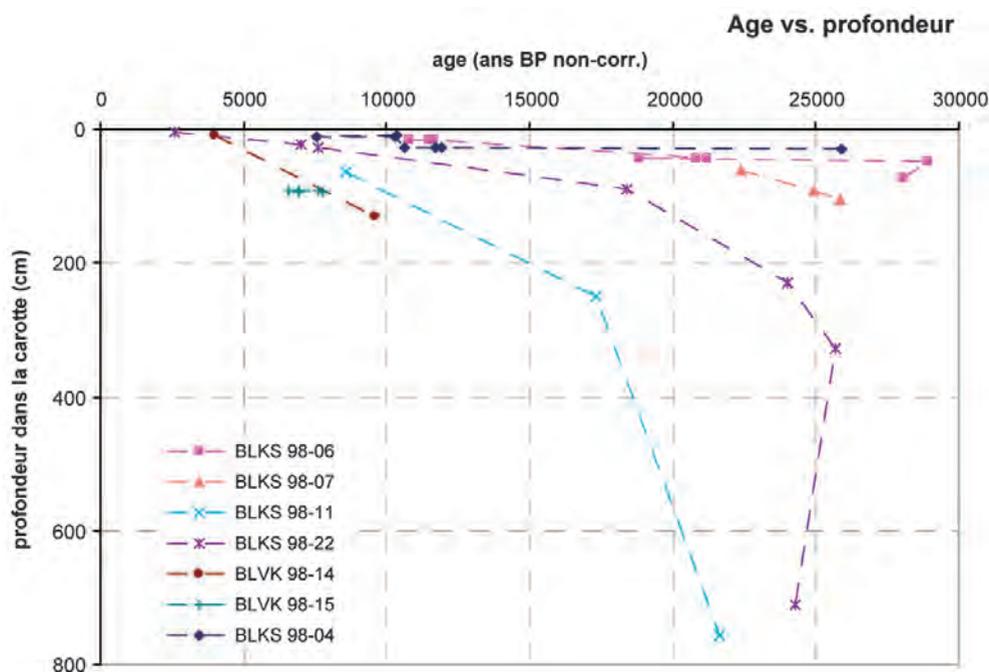


Fig.2.22. Disposition des âges mesurés en fonction de la profondeur dans la carotte

### 2.5.1. PROBLÉMATIQUE ET L'UTILISATION DU $^{14}\text{C}$ POUR LA CHRONOLOGIE RÉCENTE EN MER NOIRE

#### a) dans la littérature

Le problème de corrections des dates  $^{14}\text{C}$  est délicat à résoudre particulièrement en Mer Noire. Ce fait est dû à la présence d'unités sédimentaires qui se sont déposées dans de conditions environnementales très différentes, chacune avec un "possible" âge réservoir particulier.

L'âge réservoir des eaux de surface dans un milieu côtier ou les eaux sont brassées par les courants et par les vagues est, forcément, différent de l'âge des eaux de surface en s'éloignant vers le centre du bassin où l'influence des eaux de fond peut jouer un rôle. Il en découle que, même pour les unités sédimentaires de surface, on ne peut probablement pas appliquer la même correction de réservoir pour une carotte prélevée sur la plate forme continentale et pour une carotte de la zone abyssale. De plus, par le passé, les conditions environnementales dans le bassin de la Mer Noire ont beaucoup changé, passant successivement d'un bassin d'eau saumâtre à douce probablement avec une colonne d'eau bien oxygénée, à un bassin d'eau salée, avec des conditions anoxiques à partir d'une certaine profondeur. De plus, même en milieu peu salé une stratification des eaux peut parfois intervenir comme dans le cas des lacs: eau légère chaude en haut et plus froide et dense en bas. Cela change si des eaux de fond se forment, ces eaux plongent et provoquent un 'turn over' de toute la masse d'eau et donc une réoxygénation. Ceci a entraîné des changements dans les échanges de  $\text{CO}_2$  entre l'eau et l'atmosphère tout comme dans la productivité des eaux de surface. L'âge des unités sédimentaires déposées dans des

conditions si diverses, doit donc être corrigé par des âges réservoir spécifiques de chaque type de milieux.

Avant d'essayer d'appliquer des corrections d'âge réservoir et tenir compte de l'influence du matériel détritique, un retour sur les données de la littérature traitant de ce sujet s'impose.

Jusqu'à présent, il y a peu d'estimations de ces âges réservoir pour la Mer Noire. Pourtant, après les travaux de Degens *et al.*, 1980, Calvert *et al.*, 1987, Guichard *et al.*, 1993, Jones et Gagnon, 1994, Siani *et al.*, 2000 on peut proposer une image concernant les âges des eaux de surface pour les derniers milliers d'années.

Degens *et al.* (1980) ont constaté une différence de 2000 ans entre l'âge obtenu par le comptage des varves et les dates  $^{14}\text{C}$  des bases des unités I et II (dans des carottes prélevées en 1969 et 1974). Ils attribuent cette différence d'environ 2000 ans au vieillissement des sédiments de surface par l'apport de carbonates allogènes ou par le remaniement de coquilles. Jones et Gagnon (1994) contestent cette valeur de l'âge réservoir, car ils obtiennent des âges  $^{14}\text{C}$  plus jeunes que 2000 ans sur les premiers 25 cm des carottes prélevées en 1988. Ceci prouve la perte des sédiments des sommets des carottes datées par Ross et Degens (1974) et reprises ensuite par Degens *et al.* (1980).

Calvert *et al.* (1987), utilisent l'âge réservoir déterminé par Degens *et al.* (1980) et corrigent de 2000 ans les dates obtenues pour l'horizon à sapropèle (unité II).

Guichard *et al.* (1993), utilisent la différence d'âge  $^{14}\text{C}$  de la matière organique des niveaux adjacents aux cendres de

l'éruption minoenne du volcan Santorin identifiée dans plusieurs carottes de la Mer Noire, et l'âge  $^{14}\text{C}$  de cette éruption<sup>8</sup> obtenue en divers sites archéologiques. Ils aboutissent à un âge réservoir de ~1280 ans. Ces cendres ont été identifiées dans le tiers supérieur du niveau à sapropèle de 4 carottes du centre et du sud de la Mer Noire. L'âge réservoir obtenu, serait donc valable pour les sédiments de l'unité II, représentant l'âge des eaux de surface lors du dépôt de ces sédiments parce que la matière organique vit dans ces eaux de surface. L'argument des auteurs en faveur d'un changement du fractionnement isotopique du plancton plutôt qu'une influence terrigène dans la matière organique est basé sur les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  d'environ -25 ‰ et sur les études de la littérature qui affirment que le matériel terrigène reste piégé près du continent. Pourtant dans ce cas, il est peu probable que dans la zone près de la côte montagneuse ou les carottes ont été prélevées, à 400 et 700 mètres de profondeur sur une pente continentale très raide, il n'y ait pas d'influence terrigène (voir la **fig.2.23** pour la localisation de ces carottes). Nous pensons donc, que cet âge réservoir est tout de même vieilli par l'apport de la matière organique remaniée ou apportée du continent.

Jones et Gagnon (1994), calculent des âges réservoir de 460 ans pour les eaux de surface de la Mer Noire, à partir de la datation d'une coquille de *Mytilus galloprovincialis* collectée vivante en 1931. Ils utilisent donc respectivement des corrections de réservoir de 460 ans et 60 ans (460-400<sup>9</sup>) pour les carbonates et pour la matière organique des sédiments de l'unité I. Ils appliquent de telles corrections à la datation de sédiments des unités I et II. En même temps, ces auteurs estiment l'âge du carbone détritique qui entre dans le bassin, moyennant la différence entre 15 paires de dates (corrigées pour le réservoir) obtenues en parallèle sur les carbonates et sur la matière organique des sédiments de l'unité I. Les corrections détritiques obtenues de cette manière sont de 580 ans (320+260)<sup>10</sup> pour le carbone organique total et de 260 ans pour le carbone des carbonates totaux.

Un schéma de la façon dont Jones et Gagnon font les corrections des âges est donné plus bas

âge $^{14}\text{C}$ conventionnel	correction de réservoir	correction détritique	âge corrigé pour le réservoir et le détritique	calibration utilisée	âge calibre (ans cal. BP)
<b>TOC</b>	60	580			
	[460-400 = <i>My.g.</i> pré-bombe - âge des carbonates marins pp. dans les eaux de surface (pré-bombe) de l'océan mondial]	[320+260 = moyenne des différences (TOC corr. pour rés. - TCC corr. pour rés.) + l'âge de 'fluffy layer']		Stuiver et Braziunas, 1993	
825	-	640	=	185	→ 175
1120	-	640	=	480	→ 480
3000	-	640	=	2360	→ 2500
<b>TCC</b>	460	260			
	<i>Mytilus galloprovincialis</i> pré-bombe	L'âge de 'fluffy layer'			
1000	-	720	=	280	→ 320
3100	-	720	=	2380	→ 2520

**TOC** = Total Organic Carbon = le carbone organique total des sédiments

**TCC** = Total Carbonate Carbon = les carbonates totaux des sédiments

<sup>8</sup> Evenement daté avec  $^{14}\text{C}$  autour de 1650±50 ans BC (entre 3290 et 3410 ans BP) ; dans leur papier, Guichard *et al.* utilisent la date de 3355±32 ans BP représentant la moyenne des 4 échantillons issus des excavations archéologiques d'Akrotiri dans l'île de Santorin

<sup>9</sup> 400 ans étant l'âge des carbonates marins modernes précipités dans les eaux d'avant les explosions nucléaires

<sup>10</sup> 320 ans représentant la moyenne de la différence de 15 paires de datations et 260 ans l'âge qu'ils ont estimé pour le plus récent sédiment déposé (fluffy layer)

La chronologie que Jones et Gagnon (1994) obtiennent pour les sédiments est claire et bien argumentée. L'âge de  $460 \pm 35$  ans BP de la coquille " pré-bombe " de *Mytilus galloprovincialis* est en concordance avec l'âge réservoir de  $415 \pm 90$  ans BP calculé par Siani *et al.* (2000). Pourtant, au niveau des corrections, il y a des points moins clairs : par exemple, la façon dont les auteurs calculent la correction de réservoir de 60 ans pour la matière organique du sédiment : ils enlèvent à l'âge de 460 ans du mollusque " pré bombe ", la valeur de 400 ans, correspondant à l'âge apparent des carbonates marins précipités dans les eaux de surface pré bombes, de l'océan mondial. Mais les organismes qui vivent aujourd'hui dans un bassin précipitent des carbonates qui ont un âge différent de zéro, dû à l'équilibre entre le taux de  $^{14}\text{C}$  des eaux de surface et leurs coquilles. Cette valeur peut varier entre 200 et 800 ans, en fonction du positionnement géographique et de la présence des phénomènes locaux tels qu'un upwelling. Si l'âge " pré bombe " des eaux modernes de surface de la Mer Noire a été déterminé par la datation d'une coquille à 460 ans, il n'y a pas de raison d'enlever la valeur moyenne des eaux de surface " pré bombe " de l'océan mondial, puisque la coquille datée est, elle aussi, un carbonate marin moderne, précipité dans des eaux de surface d'avant les expériences atomiques.

Partant de la datation de 6 coquilles collectées dans la Mer Noire, la Mer de Marmara et en face du détroit de Bosphore entre 1837 et 1951, Siani *et al.* (2000), calculent un âge réservoir de  $415 \pm 90$  ans BP. Parmi les dates utilisées pour ce calcul ils ont aussi utilisé l'âge de 460 ans du *Mytilus galloprovincialis* daté par Jones et Gagnon (1994).

Dans l'**annexe 3** nous présentons une synthèse des datations  $^{14}\text{C}$  obtenues par divers auteurs sur des coquilles et des sédiments de la Mer Noire.

#### b) cette étude

La Mer Noire étant un bassin presque fermé ayant des caractéristiques différentes de celles de l'océan mondial, avec des conditions environnementales variant dans le temps, utiliser des corrections réservoir spécifiques pour chaque type de matériel daté et pour chaque unité lithologique serait l'idéal. Il reste néanmoins un manque de données pouvant fournir des informations sur les corrections d'âge réservoir et sur l'âge du détritique spécifiques à chaque unité lithologique. Nous allons examiner la relation entre les âges  $^{14}\text{C}$  obtenus dans le cadre de ce travail et l'âge des niveaux d'échantillonnage. La possibilité et/ou l'utilité d'effectuer des corrections de ces âges sera ensuite mise en discussion.

Commençons par les *carottes peu profondes*, situées sur la plate-forme continentale : BLKS 98-04 et BLKS 98-06 (respectivement à 101 m et 135 m de profondeur).

Pour 4 niveaux, on a pu dater en parallèle des coquilles et la matière organique des sédiments (**Tableau 2.5** et **Fig.2.24**).

Tout d'abord, on remarque que l'âge des deux coquilles de *Dreissena* de niveaux 10,5 et 26,5 cm est proche de 10000 ans (respectivement 10280 et 10610 ans). Cet âge est bien

différent de celui de la matière organique du sédiment de ces niveaux : la différence étant de +2740 ans pour les niveaux 10,5 cm et de -1330 ans pour le niveau 26,5 cm. Mais, encore pour le niveau 26,5 cm, la différence entre l'âge d'une autre coquille (*Micromelania caspia*) et celle de la matière organique du sédiment est de -250 ans (pour une marge d'erreur de 1 sigma). En conséquence, on peut penser que les deux coquilles de *Dreissena* sont remaniées. Pour cette raison, nous n'avons pas utilisé l'âge de ces deux coquilles (en caractères italiques dans le **Tableau 2.5**) pour établir la chronologie de nos faciès. L'âge correct de nos niveaux serait donc plus près de celui de la matière organique du sédiment.

La différence entre l'âge de carbonates de coquilles et l'âge de la matière organique du sédiment est (**Tableau 2.5**):

- **Positive et grande** dans deux cas: les niveaux 10,5 cm de la carotte BLKS 98-04 et 44 cm de la carotte BLKS 98-06, où elle est en moyenne de ~2400 ans. Les coquilles de ces niveaux seraient remaniées.
- **Négative et petite** pour les niveaux 26,5 cm de la carotte BLKS 98-04, et 16 cm de la carotte BLKS 98-06. Cette différence entre l'âge des coquilles et celui de la matière organique du sédiment est respectivement de -250 et -170 ans, valeurs comprises dans la marge d'erreur de 1 sigma (**Tableau 2.5**).

Les valeurs de la différence entre les âges obtenus sur les coquilles et ceux obtenus sur la matière organique étant tantôt positives et tantôt négatifs, nous ne pouvons pas tirer un loi générale de variation des âges  $^{14}\text{C}$  et de déterminer la correction pour le détritique. Nous avons initialement prévu d'analyser de nombreux couples coquilles - MO associée, mais des difficultés de mesures fiables de la MO par l'accélérateur sont survenues pendant une longue durée lors de ce travail. Ce problème devant être résolu par l'équipe de la machine en question, il n'était pas de mon ressort.

De plus, compte tenu des valeurs obtenues pour les rapports C/N et  $\delta^{13}\text{C}$ , ces différences semblent ne pas être due à une influence détritique sur la matière organique du sédiment: le rapport C/N < 10 et les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  autour de -25‰ témoignent d'une origine algale de la matière organique et d'une influence terrigène faible (voir le chapitre 3, **Tableaux 4.3, 4.4** et **Fig.4.12**). La même discussion est valable pour les niveaux plus profonds datés dans les carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06.

D'un autre côté, si on applique uniquement une correction d'âge réservoir de 415 ans (selon Siani *et al.*, 2000) sur les coquilles, la différence entre les âges des coquilles et ceux de la matière organique augmente beaucoup. Cette augmentation peut-être soit une indication de la nécessité d'appliquer une correction détritique pour les âges obtenus sur la matière organique, soit une indication du fait que, pour le moment, les données ne sont pas suffisantes pour appliquer une correction avec certitude. Prenant en compte les données de la littérature, pour les niveaux datés sur la matière organique

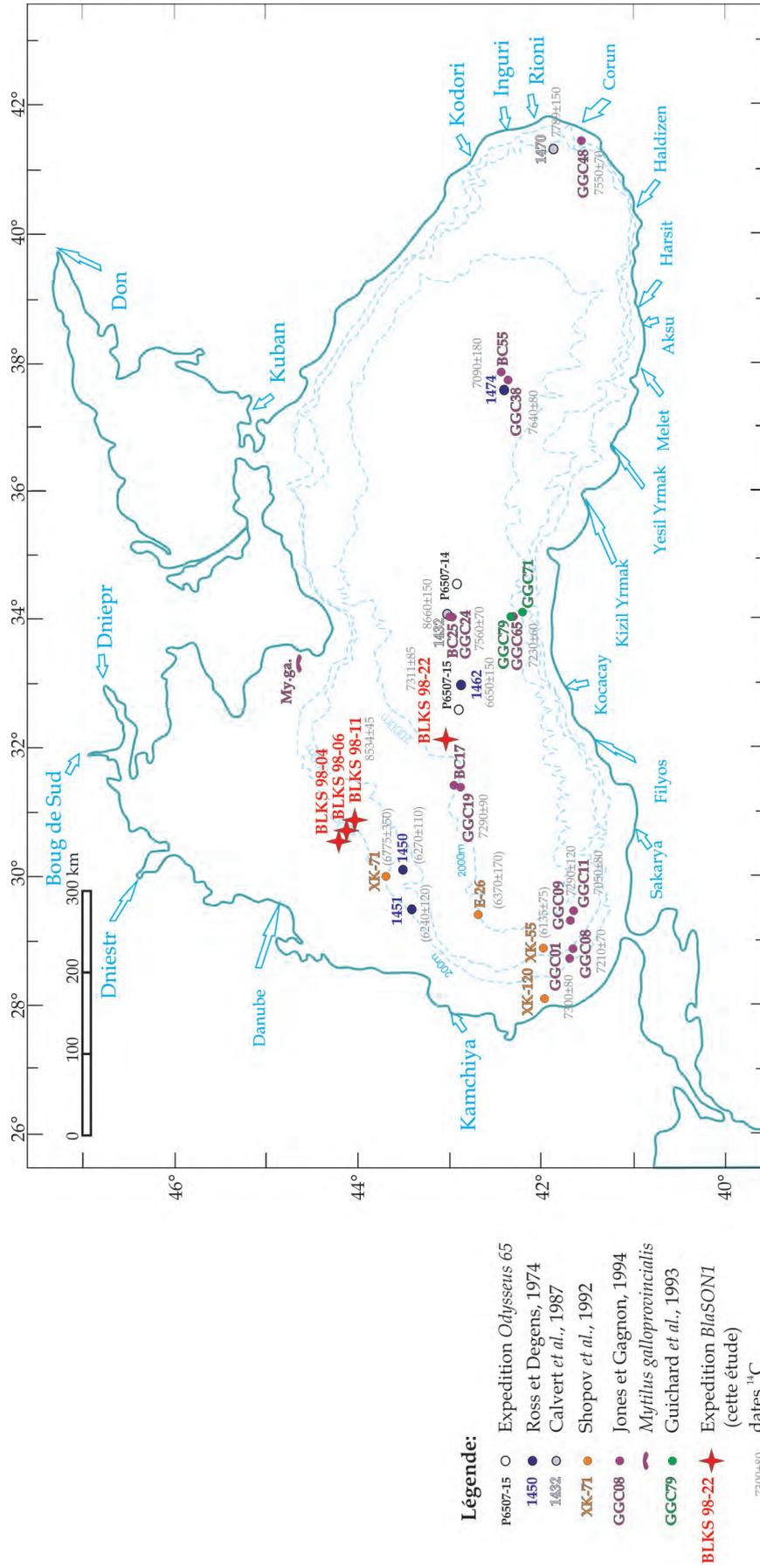
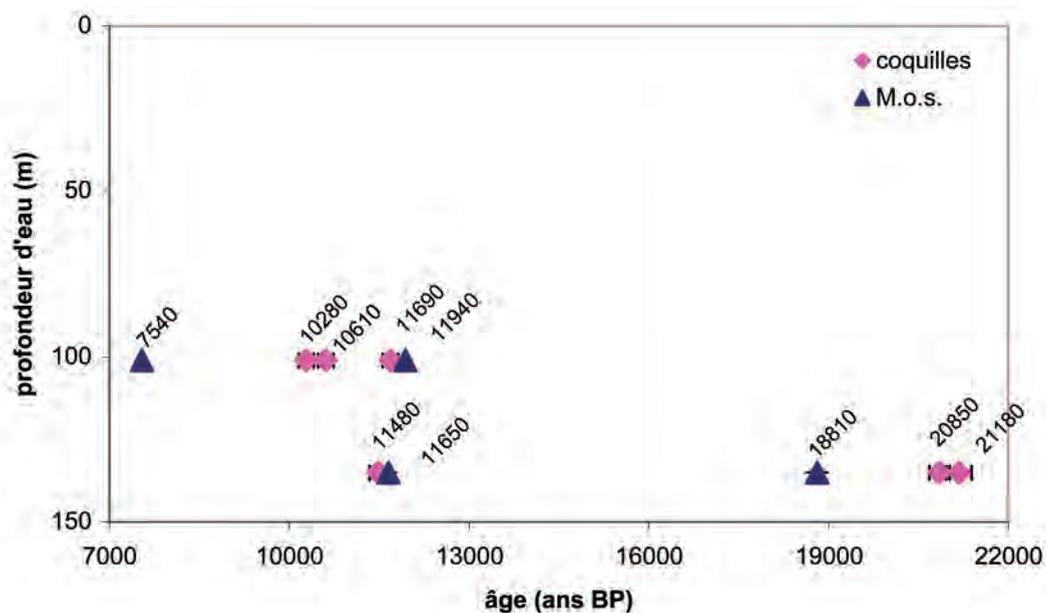


Fig.2.23. Localisation des carottes de la littérature et de cette étude avec datations <sup>14</sup>C de la limite des unités II et III



**Fig.2.24.** Représentation d'âges  $^{14}\text{C}$  conventionnels non corrigés des carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06 en fonction de la profondeur des échantillons dans la carotte. L'erreur 1 sigma est indiqué

du sédiment nous pouvons appliquer la correction détritique de 580 ans calculée par Jones et Gagnon (1994).

On peut observer donc, qu'il y a une contradiction entre la signification des données isotopiques indiquant une absence de l'influence terrigène dans la matière organique des sédiments et les valeurs des âges obtenus après l'application des corrections de réservoir uniquement sur les âges des coquilles, correction qui a comme résultat l'augmentation de la différence d'âges entre les deux types de matériel. Ceci est imputable - soit au fait qu'une correction pour l'influence détritique des âges sur la matière organique est nécessaire, soit que nous ne disposons pas d'assez d'information actuellement pour appliquer des corrections. Cette seconde hypothèse est celle qui a été choisie ici.

Les différences entre les âges obtenus sur les coquilles et de la matière organique sont présentés dans le **Tableau 2.5**. Nous avons ajouté une première proposition de correction pour chaque type de matériel. Puis un second calcul pour proposer un âge pour chacun des niveaux datés à partir des informations obtenues sur les coquilles et la MO. Les âges des ces niveaux sont obtenus en moyennant les valeurs (corrigées ou pas) obtenus sur du matériel différent.

Pour les *carottes profondes* (>200m), nous ne disposons pas de paires d'analyses sédiment-coquille. Par conséquent, nous allons utiliser pour les corrections des données de la littérature. L'étude de Jones et Gagnon (1994) a prouvé le fait que les couples de datations sur la matière organique du sédiment et sur les carbonates totaux d'un même niveau peu-

vent être utilisés pour la détermination des corrections détritiques uniquement dans le cas des sédiments très récents de l'unité I. Pour les autres dates, les différences sont comprises dans un intervalle trop large (entre - 290 ans et +11250 ans) pour pouvoir aboutir à un résultat satisfaisant. Nous pensons donc qu'une approche complètement différente du sujet sera nécessaire, en tenant compte du changement dans le temps de la productivité des eaux de surface. Ces changements survenus lors de modifications de la salinité et du contenu de l'oxygène dans le bassin modifient le contenu du  $\text{CO}_2$  dans les eaux de surface. Les estimations de paléo-productivité des eaux ne sont pas des calculs faciles, surtout pour un bassin semi fermé à régimes changeants. Dans le cadre de cette étude nous allons utiliser les données de la littérature.

Jones et Gagnon (1994) et de Guichard *et al.* (1993) ont estimés des corrections applicables aux sédiments du bassin profond.

**L'unité I**, à coccolites, est constituée d'une alternance de microlamines noires et blanches. Les blanches sont principalement constituées de tests de coccolites déposées pendant le bloom du phytoplancton durant l'automne et le début de l'hiver. Les lamines noires correspondent au bloom des diatomées durant l'hiver et le début du printemps. Cependant, comme la plupart des diatomées sont dissoutes à l'interface eau-sédiment, ce qui reste dans les lamines noires est un mélange de matière organique et du matériel terrigène. La présence de cet matériel terrigène dans le sédiment de l'unité I a été démontré par plusieurs auteurs (Deuser, 1972 ; Müller et Stoffers, 1974 ; Calvert et Fontugne, 1987). Il faut donc suppo-

**Tableau 2.5.** Différences entre les dates  $^{14}\text{C}$  des coquilles et de la matière organique de sédiments (MO), obtenus pour 4 niveaux des carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06. Les corrections utilisées sont : 415 ans d'âge réservoir pour les coquilles (d'après Siani *et al.*, 2000) et 580 ans pour la matière organique du fait de l'influence détritique (selon Jones et Gagnon, 1994). Les âges des niveaux 26,5 cm et 16 cm sont des moyennes des deux datations retenues pour chaque niveau. Les âges non retenus sont marqués en caractères italiques

No	Carotte no.	Niveau (cm)	Type d'échantillon	Âges non corrigés (ans BP)	1 sigma (ans)	Différence coquille – MO	Âges corrigés (ans BP)	Âges des niveaux (ans BP)	
								non corrigés	corrigés pour le réservoir ou pour le détritique
1	BLKS 98-04	10.5	<i>Dreissena</i>	10280	120	2740	6960±80	7540±80	6960±80
2			Matière organique du sédiment (MO)	7540	80				
3		<i>Dreissena</i>	10610	130	-1330	11275±130	11815±115	11318±115	
4		<i>Micromelania caspia</i>	11690	130	-250				
5		MO	11940	100					
6	16	<i>Dreissena rostriformis distincta</i>	11480	140	-170	11065±140	11565±130	11068±130	
7		MO	11650	120					
8	BLKS 98-06	44	<i>Micromelania caspia</i>	21180	210	2370	20765±210	18810±160	18230±160
9			<i>Dreissena rostriformis distincta</i>	20850	170	2040			
10		MO	18810	160					

ser que le matériel terrigène n'est pas constitué uniquement du carbone des carbonates, mais aussi du carbone organique des plantes terrestre. L'existence de pollen dans les sédiments de cette unité a été mentionnée (Degens *et al.*, 1970 ; Traverse, 1974). Selon notre opinion, cela constitue une preuve de l'influence détritique sur les âges obtenus pour la matière organique présente dans cette unité.

La correction détritique correspondante, calculée par Jones et Gagnon (1994), est de 580 ans. Nous allons l'appliquer à nos données  $^{14}\text{C}$  de l'unité à coccolites.

**L'unité II à sapropèle** est constituée de matière organique dont l'origine algaire prépondérante marine a été démontrée par Calvert *et al.*, 1987 (étude du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$ ). Pourtant, Degens *et al.* (1970), Traverse (1974), Ross et Degens (1974), Hay *et al.* (1991), Atanassova et Bozilova (1992) etc., montrent que le sapropèle contient aussi beaucoup de matériel terrigène et du pollen. Dans le cadre de cette étude, nous avons observé aussi des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  et C/N indicatrices d'une origine algaire marine du matériel organique, mais également un apport de matériel terrigène (voir le sous-chapitre 4.5). Une correction des âges tenant compte de l'influence du carbone détritique sera donc nécessaire.

Pour le sapropèle, la seule correction de réservoir calculée dans la littérature est celle de Guichard *et al.* (1993), de ~1280 ans. Les considérations présentées auparavant sur le possible vieillissement de cet âge réservoir par l'influence de la matière organique terrestre dans le matériel daté ainsi que le rajeunissement excessif des âges obtenus à la limite inférieure du sapropèle, nous font préférer la correction de 580 ans selon Jones et Gagnon (1994).

Pour **l'unité III**, il n'y a pas de valeur de correction de réservoir dans la littérature. Une estimation de cette correction n'étant pas possible à ce stade de l'étude, une solution acceptable sera d'utiliser la même correction détritique que celle utilisée pour les autres niveaux des carottes profondes. Même si cette unité a été déposée dans des conditions lacustres, très probablement dans un milieu oxygéné, il est peu probable qu'à des profondeurs plus grandes que 500 mètres le mouvement vertical des eaux ait été rapide. Le problème de l'influence terrigène est encore controversée. Tout d'abord Calvert et Fontugne, 1987 considèrent que l'influence terrigène n'est pas importante dans les sédiments lacustres car ces apports seront piégés près du continent. Dans cette étude, nous séparerons des faciès différents à l'intérieur de l'unité III avec des caractéristiques de la matière organique légèrement différents (voir le sous-chapitre 4.5). Par exemple, la matière organique du faciès S6 semble être principalement formée à partir d'algues lacustres tandis qu'une influence des plantes vasculaires flottantes ou de la dégradation du matériel organique peut-être observée pour le faciès S9. Afin d'avoir une indication sur l'ordre de grandeur de la correction que l'on peut appliquer, nous avons regardé dans la littérature les informations sur l'âge des eaux de fond de la Mer Noire, tout en sachant que l'âge et le temps de résidence des eaux de fond jouent aussi un rôle dans le vieillissement des eaux de surface. Östlund (1974) a calculé un temps de résidence moyen des eaux de fond de 935 ans. Les eaux profondes ont des âges variant de 1470 ans à des profondeurs >600 mètres et jusqu'à 2000 ans à plus de 1400 mètres (Östlund et Dryssen, 1986). Ceci est valable pour le système actuel de stratification des eaux. Pendant la période lacustre du bassin, quand la stratification

des eaux était moindre ou inexistante, le temps de résidence des eaux était plus petit que 935 ans. L'application d'une correction inférieure à cette valeur est donc admissible. Pour toutes ces raisons, nous allons appliquer, pour les âges des sédiments lacustres, la même correction que les 580 ans utilisés pour les autres unités de carottes profondes.

Une des raisons pour laquelle nous avons essayé de corriger nos données était de comparer les âges des limites des unités sédimentaires à ceux de l'étude la plus complète sur ce sujet (Jones et Gagnon, 1994).

Cette discussion montre la grande difficulté d'apprécier les valeurs exactes des corrections applicables pour les âges des différentes unités sédimentaires. La preuve en est aussi que les âges publiés sont généralement conventionnels non corrigés. En conséquence, afin de pouvoir comparer nos données avec ceux de la littérature et aussi pour éviter de fausser nos données par des corrections plus au moins précises, nous utiliserons aussi des âges  $^{14}\text{C}$  conventionnels non corrigés.

### 2.5.2. CALCUL DES TAUX DE SÉDIMENTATION

Afin de pouvoir construire des échelles de temps pour nos carottes, nous avons estimé les taux de sédimentation pour les intervalles présentant des lithologies similaires (comme, par exemple, la partie supérieure du sapropèle).

Le calcul des taux de sédimentation a été effectué à partir des niveaux datés au radiocarbone. Dans le cas des intervalles sans datations, les taux de sédimentation ont été estimés : nous avons appliqué les valeurs obtenus sur les mêmes unités lithologiques ou sur des unités similaires des carottes datées. Cela a le mérite de conduire à une évaluation de l'âge des limites des unités I et II pour les carottes profondes : on y a effectué des datations à quelques centimètres de part et d'autre de ces limites. Les taux de sédimentation obtenus sont présentés dans le **Tableau 2.6**. A partir de ce tableau, remarquons que :

- la période avant 18800 ans est caractérisée par un taux de sédimentation décimétrique, de 13 cm/1000 ans dans la carotte BLKS 98-22 ;
- pour les carottes situées sur la plate-forme continentale, le taux de sédimentation depuis 18800 ans et jusqu'à 7500 ans est de ~4 cm / 1000 ans. Dans les carottes profondes, entre 18400 ans et l'installation du sapropèle le taux de sédimentation varie selon la profondeur de la carotte, entre 6 et 21 cm/1000 ans (respectivement pour les carottes BLKS 98-22 et BLKS 98-11). Nous pouvons conclure que la période 18800-7300 ans est caractérisée par des taux de sédimentations compris entre 4 et 21 cm/1000 ans ;
- dans les carottes profondes étudiées, la présence de turbidites<sup>11</sup> avant la phase marine de la Mer Noire conduit à

des taux de sédimentation d'environ un mètre par 1000 ans. Dans la carotte BLKS 98-11, un taux de sédimentation de ~118 cm/1000 ans pour l'intervalle 21610 – 17310 ans BP confirme la présence d'une coulée de sédiment. Pareillement, une valeur de ~59 cm/1000 ans (intervalle 25680 – 24000 ans) dans la carotte BLKS 98-22 correspond à des successions de cycles turbiditiques décrites par Popescu (2002);

- les taux de sédimentation dans les unités à sapropèle et à coccolites sont <10 cm/1000 ans (respectivement de 4 cm /1000 ans et de 2 cm/1000 ans). Ils concordent avec ceux calculés par Ross *et al.* (1970) et Ross et Degens (1974) pour des carottes situées à l'Ouest de la Mer Noire, mais ils sont plus faibles que ceux calculés ultérieurement par divers auteurs.

Dans la littérature, les taux de sédimentations à l'échelle du bassin sont rarement en accord les uns avec les autres. Les causes de ces différences reposent sur la localisation des carottes analysées, sur la façon de calculer et même sur l'âge de la base des unités holocènes choisie par chaque auteur. Ces différences d'estimations des taux de sédimentation sont représentées dans le **Tableau 2.7**.

Ross *et al.*, (1970) ont montré que, du moins pour les derniers 3000 ans, dans la Mer Noire, il y a une zonation des taux de sédimentation: faibles (<10 cm/1000 ans) dans la partie ouest du bassin, augmentant au centre (10-30 cm/1000 ans) et vers le sud (à l'approche de la côte turque) jusqu'à >30 cm/1000 ans.

Les taux de sédimentations sont calculés différemment selon les auteurs: à partir des datations  $^{14}\text{C}$  (Ross *et al.*, 1970, Ross et Degens, 1974 ; Glenn et Arthur, 1985 ; Calvert *et al.*, 1987) ou du comptage des varves (Degens *et al.*, 1978 ; Hay, 1988) .

Les bases des unités Holocènes prises en considération sont : 1000 ans à la base de l'unité I pour Degens *et al.* (1978), Glenn et Arthur (1985) et Calvert *et al.* (1987) ou ~3000 ans pour Ross *et al.* (1970), Ross et Degens (1974) et Calvert *et al.* (1991). En ce qui concerne la base de l'unité II à sapropèle, elle est considérée à 5000 ans par Degens *et al.* (1978) et Glenn et Arthur (1985), tandis que pour Ross *et al.* (1970) et Ross et Degens (1974) elle est de 7000 ans.

Il existe très peu d'estimations des taux de sédimentation pour l'unité III : Deuser, 1972 et Ross et Degens, 1974 présentent des valeurs comprises entre 40 et 90 cm/1000 ans, tandis que Degens *et al.*, 1978 donne une valeur de 20 cm/1000 ans et Calvert *et al.*, 1987 un de 7,7 cm/1000 ans (**Tableau 2.7**).

et laminaire ; E : argileux. Cette séquence type est souvent incomplète, et l'examen des séries qui en sont formées (analyse séquentielle) donne des indications sur les conditions de la sédimentation : près ou loin de la source des apports.

<sup>11</sup> **Turbidite** n.f. [du lat. *turbidus*, trouble ; angl. *turbidite*] – couche de sédiments détritiques déposée en une fois par un courant de turbidité. Son épaisseur est de l'ordre de quelques décimètres, parfois un ou deux mètres, rarement plus. Sous sa forme la plus complète, une turbidite peut être décrite par la *séquence type de A. Bouma* qui comprend cinq intervalles, de bas en haut : A. grossier et granoclassée ; B. gréseux, fin et laminaire ; C : fin, convoluté ou ondulé ; D : silteux, fin

**Tableau 2.6.** Calcul des taux de sédimentation pour des intervalles des carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06, BLKS 98-11 et BLKS 98-22. Âges conventionnels non corrigés

Carotte	Intervalle (cm)	âge du niveau (ans BP)		cm séd. déposé	durée (ans)	taux de séd (cm/1000 ans)	Observations	
		supérieur	inférieur					
BLKS 98-04	10,5-26,5	<b>7540</b>	11815	16	4275	<b>3,7</b>	discontinuité a 29 cm	
	26,5-29	11815	<b>12440</b>	2,5	625	<b>3,7</b>		
BLKS 98-06	16-44	11565	<b>18810</b>	28	7245	<b>3,9</b>	discontinuité a 46 cm	
	44-46	<b>18810</b>	19328	2	518	<b>3,9</b>		
BLKS 98-11	0-23	0	3467	23	3467	<b>6,6</b>	âge de limite de BLKS 98-22; unité I à coccolites : 0-23cm	
	23-61	3467	8534	38	5067	<b>7,5</b>		
	61-64	8534	<b>8590</b>	3	56	<b>53,4</b>	unité II à sapropèle : 23-61cm	
	64_250,5	8590	17310	186,5	8720	21,4		
	250,5-756,5	17310	21570	506	4260	118,8		
	64_756,5	<b>8590</b>	<b>21570</b>	692,5	12980	<b>53,4</b>		
BLKS 98-22	0-4,5	0	<b>2600</b>	4,5	2600	<b>1,7</b>	unité I à coccolites: 0-6 cm	
	4,5-6	<b>2600</b>	3467	1,5	867	<b>1,7</b>		
	6-6,5	3467	3472	0,5	5	<b>100,0</b>		taux de sédimentation estimé, pour une turbidite
	6,5-23,5	3472	<b>7000</b>	17	3528	<b>4,8</b>	unité II à sapropèle : 6,5-25cm	
	23,5-25	<b>7000</b>	7311	1,5	311	<b>4,8</b>		
	25-26,5	7311	<b>7600</b>	1,5	289	<b>5,9</b>		
	26,5-90	<b>7600</b>	<b>18420</b>	63,5	10820	<b>5,9</b>		
	90-143	<b>18420</b>	22660	53	4240	<b>12,5</b>		Taux de sédimentation estimé comme étant la moitié de celui de l'intervalle 90-229,5
	143-229,5	22660	<b>24000</b>	86,5	1340	<b>58,9</b>		143 cm changement de faciès, apparition des turbidites
	229,5-328,5	<b>24000</b>	<b>25680</b>	99	1680	<b>58,9</b>		turbidite

âges mesurés

âges calculés

**Tableau 2.7.** Données sur les taux de sédimentation en Mer Noire selon les auteurs

Auteurs	Localisation/ profondeur d'eau	Carottes	Taux de sédimentation (cm/1000 ans)						Période	Méthode de calcul
			unité I	unité II	unité III	déglacia- tion	gla- cia- tion	turbidi- tes		
<b>Ross et al., 1970</b>	Ouest du bassin		0-10						derniers 3000 ans	
	Centre et sud-est à >-2000m de profondeur	1462	10-30						derniers 3000 ans	datations <sup>14</sup> C
	Sud et est	1474	>30						derniers 3000 ans	datations <sup>14</sup> C
<b>Deuser, 1972</b>			10	10	40-80				80 cm/1000 ans pour la partie inférieure de l'unité III, 40 cm/1000 ans pour sa partie supérieure	
<b>Ross &amp; Degens, 1974</b>	Centre ouest et est	1474; 1462; 1451; 1450	10	10	40-90				0-7000: unités I et II; 7000-min 25000: unité III	
<b>Degens et al., 1978</b>	Basin profond >-2000m		30	10	20	1000		100	0-1000 ans : unité I aux coccolites; 1000-5000 ans : unité II à sapropèle	comptage des varves
	Pente continentale supérieure -470m	35	3 fois plus grande que dans le bassin profond							
<b>Hsü, 1978</b>	Sud-ouest, devant le Bosphore	Site 380 DSDP	10					90		
<b>Schrader, 1979</b>	Centre est / >-2000m	Site 379 DSDP	100							
<b>Glenn &amp; Arthur, 1985</b>	Centre / -2248 m	1432	22	2,6					0-1000 ans : coccoli- tes ; 1000-5000 ans : sapropèle	rapport de l'épaisseur de l'unité et son âge extrapolé
	Centre / -2179 m	1462	30	28						
	Est / -960 m	1470	40	39,3						
<b>Calvert et al., 1987</b>	Centre / -2248 m	1432	25	15,5					base de l'unité A à 1000 ans BP	pentés âge/profondeur
	Est / -960 m	1470	38	21,5	7,7					
<b>Hay, 1988</b>	Centre et sud-ouest / -2050, -2160 et -470 m	5, 18 et 35	26	9						rapport entre l'épaisseur du sédiment et le numéro des couples de varves
	Centre / -2050 m	5	25,4						1004 ans, unité I	
	Centre / -2160 m	18	27,4	8,9					1168 ans, unité I	
<b>Calvert et al., 1991</b>	centre est / -2087 m	BS4-9BC	15,9						0-3000 ans	
	Centre / -2218 m	BS4-14BC	15,8						0-3000 ans	
	Centre sud / -198 m	BS4-15BC	17						0-3000 ans	
<b>Jones et Gagnon, 1994</b>			20							
<b>Arthur et Dean, 1998</b>	Sud-ouest, près du Bosphore	GC01	33	16,2						
	SO, près du Bosphore	GC09	10,5	7,8						
	Sud-est centre	GC59	28	20,2						
	Sud centre	GC79	25	15,9						
	Sud centre	GC71	25	21,4						
	Centre	GC66	4,5	8,1						
<b>Cette étude</b>	Nord-ouest	BLKS 98-11	6,6	7,5	53,4					Datations <sup>14</sup> C
	Nord-ouest	BLKS 98-22	1,7	4,8	5,9			59		Datations <sup>14</sup> C

### 2.5.3 CHRONOLOGIE PROPOSÉE

#### a) âge des discontinuités

Pour les carottes BLKS 98-04 (profondeur 101 m) et BLKS 98-06 (profondeur 135 m), nous avons daté les sédiments de part et d'autre des discontinuités. L'âge de celles-ci est donc compris **entre 28000 et 19300 ans BP dans la carotte BLKS 98-06** et **entre 25900 et 12400 ans BP dans la carotte BLKS 98-04**. L'intervalle de temps commun aux deux carottes et caractérisé par le manque des sédiments (dû à la non déposition ou à l'érosion) est compris entre 25900 et 19300 ans BP soit environs 6600 ans (voir **Fig.2.25**).

#### b) âges des limites des unités I et II

En ce qui concerne les unités I et II des carottes profondes, leurs âges sont déterminés par la datation de niveaux près des limites, puis par une extrapolation à l'aide des taux de sédimentation (**Tableau 2.6**).

**La base de l'unité II à sapropèle a  $7311\pm 85$  ans BP dans la carotte BLKS 98-22** (zone abyssale, à 2100 m de profondeur) et  **$8534\pm 45$  ans dans la carotte BLKS 98-11** (piémont continental, à 500 m de profondeur), **la moyenne de ces deux dates étant de  $7923\pm 65$  ans BP**.

En comparant cet âge à celui de  $7350\pm 80$  ans BP ( $=7540\pm 130$  ans BP calendaire) calculé par Jones et Gagnon (1994) on obtient une différence de 573 ans. Toutefois, Jones et Gagnon, ont moyenné 9 valeurs obtenues sur la matière organique de sédiments dans des carottes des profondeurs variant entre 205 et 2195 mètres. L'intervalle de variation des âges obtenus est : 7050-7640 ans BP. La différence entre notre résultat et ceux obtenus par Jones et Gagnon est faible. Nous avons marqué les carottes où la base du sapropèle a été datée

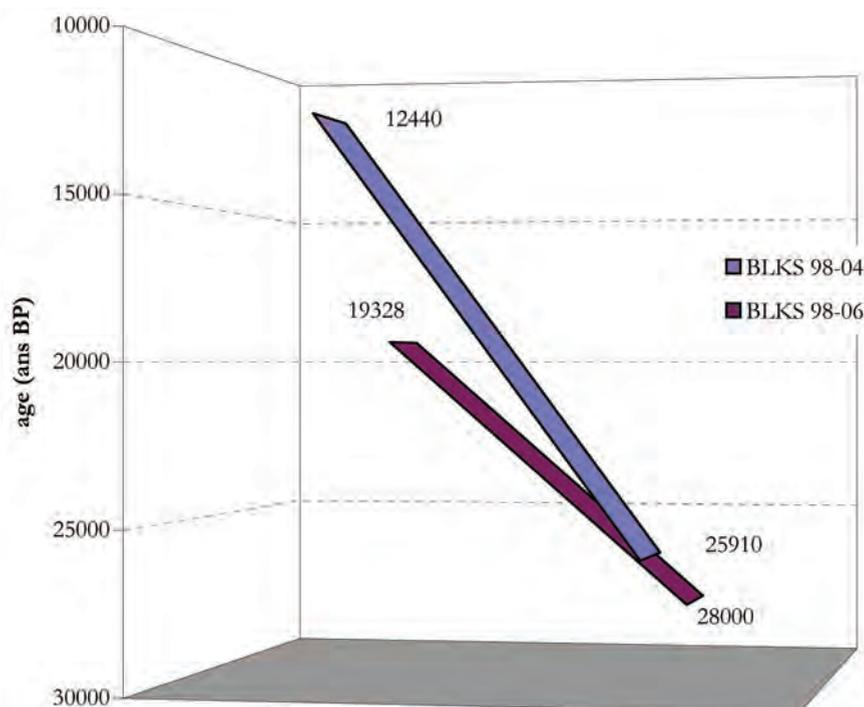
dans la littérature sur la **Figure 2.23**. Nous pouvons observer que ces âges sont compris entre  $<6135\pm 75$  ans (Shopov *et al.*, 1992) et 8660 (Calvert *et al.*, 1987). Il s'agit d'âges conventionnels non corrigés. Dans le cas d'âges conventionnels non corrigés, nos dates ( $7311\pm 85$  ans BP et  $8534\pm 45$  ans BP) sont comprises dans l'intervalle des résultats publiés par ailleurs.

Cependant, une apparente diminution de l'âge du sapropèle vers le bassin profond peut être observée selon les données de Shopov *et al.* (1992). Ils datent des échantillons dans le sapropèle et obtiennent  $6775\pm 350$  ans dans une carotte à 520 m de profondeur,  $6135\pm 75$  ans pour une carotte à 1430 m et  $6370\pm 170$  ans pour une carotte à 2165 m (**Fig.2.23**). Ces carottes se trouvent dans la partie ouest de la Mer Noire, devant la Bulgarie, donc une plate-forme continentale identique celle que nous travaillons. Selon la description des carottes, les niveaux échantillonnés ne sont pas à la base du sapropèle, mais au-dessus, de 7 à 18 cm. Si on tient compte des taux de sédimentation de 4 cm/1000 ans dans le sapropèle, ceci peut augmenter l'âge de la base de quelques milliers d'années. Les valeurs atteignent alors environ 8600 ans, ce qui est similaires au résultat de la carotte BLKS 98-11.

Pour la **base de l'unité I** à coccolites, on obtient un âge d'environ  **$3467\pm 60$  ans BP** dans la carotte BLKS 98-22. Cette date n'est pas éloignée de celle de  $3450\pm 120$  ans BP obtenue par Ross et Degens, 1974 et présente une différence de 317 ans par rapport à l'âge conventionnel de 3150 ans BP ( $=2720\pm 160$  ans BP calendaire) obtenu par Jones et Gagnon (1994) (**Fig.2.4**) en moyennant les niveaux datés de six carottes. Elles ont fourni des dates comprises entre 2810 et 3640 ans BP.

#### c) âges des faciès

Les âges des faciès sont synthétisés dans le **Tableau 2.8**.



**Fig.2.25.** Intervalles sans sédimentation dans les carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06

**Tableau 2.8.** Synthèse de faciès identifiés avec leurs âges

Faciès		Carottes	Âge (ans BP <sup>1</sup> )	Observations
M1	vase à <i>Modiolus</i>	BLKS 98-04 ; BLKS 98-06 ; BLCP 98-07	< 7500	similaire à L1 de Major <i>et al.</i> , 2002.
M2	vase à <i>Mytilus</i>	BLVK 98-01	En base : 6750 à 8660 ans	dates <sup>14</sup> C d'après Major, 2002
S1a	vase sableuse à débris de <i>Dreissena</i>	BLVK 98-01 ; BLKS 98-04 ; BLKS 98-05 ; BLKS 98-06 ; BLCP 98-07	<7500 à 12 000	
S1b	vase à débris de <i>Dreissena</i>	BLKS 98-04 ; BLKS 98-06		similaire à S1a, sédiment plus fin, différence d'âge
S2	alternance de sable fin - silt avec des granules et des lamines noirs, sans débris de coquilles	BLKS 98-05	>10 000	dates d'après Major, 2002 ; ressemble au faciès S4b
S3	sable fin à débris de <i>Dreissena</i> et à points noirs dispersés	BLKS 98-06	12 000 – 19 000	
S4a	vase sableuse à granules et lamines noirs	BLKS 98-04 ; BLKS 98-06	25 900-28 000	des minéraux lourds identifiés par l'analyse au microscope
S4b	sable fin à lamines noires et intercalations de vase sableuse	BLKS 98-06	>28 000	peut être une variante plus grossière du faciès S4a
S5	alternance « vase sableuse - sable fin »	BLKS 98-06	>28 000	
S6	vase à forte odeur de H <sub>2</sub> S avec des niveaux de coquilles	BLCP 98-07 ; BLKS 98-07 ; BLKS 98-08 ; BLKS 98-09 ; BLKS 98-10	10 000 – 25 800	
S7	vase à rares débris de coquilles, à taches noires et à niveaux sableux	BLKS 98-07 ; BLKS 98-08	>25 800	ressemble au faciès S5
S8	vase très fine, homogène, sans coquille	BLKS 98-08	> 25 000	
M3	vase à coccolites	BLCP 98-09 ; BLCP 98-10 ; BLKS 98-10 ; BLKS 98-11 ; BLKS 98-22	<b>Base à 3467±60</b>	= unité I
M4	vase à sapropèle	BLCP 98-09 ; BLCP 98-10 ; BLKS 98-10 ; BLKS 98-11 ; BLKS 98-22	<b>Base à 7923±65 ans</b> (7311±85 dans BLKS 98-22 et 8534±45 dans BLKS 98-11)	= unité II
S9	vase colorée, sans organisation interne, à lamine et taches noires	BLKS 98-10 ; BLKS 98-11 ; BLKS 98-22	~7900-10000 (BLKS 98-10 : <10600 ans; BLKS 98-11 : >8534 ans; BLKS 98-22 : >7311 ans BP)	p. sup. unité III (selon Hay <i>et al.</i> , 1991) ou de l'unité 3 (selon Ross et Degens, 1974) ; faciès A4 (Popescu, 2002)
S10	vase très fine avec des bandes et des nodules noirs	BLKS 98-11 ; BLKS 98-22	~10000-19000	similaire au faciès S6, mais sans débris
S11	vase brune avec fissures et moins de granules noirs	BLKS 98-11	~19000-21500	
S12	vase fine à lamines de vase plus grossière	BLKS 98-22	~24000	faciès A5 de Popescu (2002)

## 2.6. CONCLUSION

Nous avons décrit en détail la lithologie des 12 carottes et nous avons identifié des faciès sédimentaires communs pour plusieurs d'entre-elles. Ces faciès marins ou lacustres sont différents selon la profondeur des carottes. Ils sont spécifiques pour les carottes peu profondes (<200 m) et pour celles qui sont profondes (>200 m).

35 datations <sup>14</sup>C, dans 7 carottes de diverses profondeurs, nous ont permis d'établir les âges des limites des unités sédimentaires et les âges des faciès. L'âge des bases des unités I et II est respectivement de 3467±60 ans BP et 7923±65 ans BP. Ceci est en accord avec les données publiées. Les âges

des discontinuités identifiées dans les carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06 sont respectivement compris entre 25900 et 12400 ans BP et, entre 28000 et 19300 ans BP. Un intervalle de temps d'environ 6600 ans (entre 25900 et 19300 ans BP) est caractérisé par une absence de sédiment (non déposition ou érosion) dans ces deux carottes.

Les datations en parallèle de la matière organique de sédiments et des coquilles montrent des différences parfois importantes entre les âges obtenus sur les mêmes niveaux. Compte tenu du fait que ces différences sont parfois positives, parfois négatives, la valeur absolue de ces différences

---

étant variable, nous en déduisons que certains coquilles étaient remaniées.

Toute la discussion sur la possibilité et l'utilité de l'application des corrections (de réservoir ou détritiques) des âges obtenus nous a prouvé la difficulté d'apprécier les valeurs exactes des corrections applicables pour les différentes unités sédimentaires de la Mer Noire. Un essai concernant nos données  $^{14}\text{C}$  nous a permis de comparer nos dates avec celles de l'étude de Jones et Gagnon (1994). Comme la plupart des valeurs  $^{14}\text{C}$  des travaux antérieurs sont conventionnelles non corrigées, nous allons utiliser dorénavant les âges  $^{14}\text{C}$  conventionnels non corrigés.

Nos datations nous ont permis de calculer des taux de sédimentation conduisant à l'établissement des échelles de temps précises. Nous les utiliserons par la suite en examinant quelle est la distribution de divers paramètres mesurés dans le sédiment en fonction de l'âge. Les taux de sédimentation obtenus pour les unités I et II sont compris entre 1,7 et 6,6 cm/1000 ans pour l'unité I et entre 4,8 et 7,5 cm/1000 ans dans l'unité II. Ces valeurs sont généralement en accord avec les données de la littérature. Les taux de sédimentation de l'unité III est peu documenté. Les valeurs que nous avons obtenues sont comprises entre 5,9 et 53,4 cm/1000 ans.

---

## CHAPITRE 3 CARBONATES

### 3.1. PROBLÈMES À RÉSOUDRE

La nécessité d'une étude détaillée de la variation des taux des carbonates le long des nos carottes sédimentaires s'est révélé assez tard dans le cadre de cette étude. Elle est devenue évidente quand nous avons remarqué une tendance à une corrélation entre les propriétés magnétiques des sédiments et leur taux de carbonates, et aussi une similitude des allures des courbes de carbonates des diverses carottes. Des carbonates peuvent aussi contribuer à clarifier le problème de corrélation de divers 'épisodes' dans le bassin de la Mer Noire et à l'amélioration de la chronologie, compte tenu de la sensibilité des dépôts carbonatés aux changements climatiques et aux caractéristiques du milieu aquatique (température, pression, taux d'oxygène ou l'anoxie, stratification des eaux).

### 3.2. LES CARBONATES DANS LE MILIEU AQUATIQUE

Le terme 'carbonates' se réfère à tous les sédiments où les roches sédimentaires composés principalement de  $\text{CaCO}_3$  et/ou  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Malgré leur formule chimique simple, les roches carbonatées présentent des textures très différentes.

Les sédiments de ce type se forment et s'accumulent dans des milieux très différents. Malgré le fait qu'ils soient associés plutôt aux mers tropicales peu profondes, les sédiments carbonatés peuvent se former aussi dans les océans, les lacs, les cavernes et dans les sources d'eau froide ou chaude. Les animaux et les plantes sont importants pour la formation de ces sédiments du fait de l'apport de leurs squelettes calcaires, la favorisation de la précipitation par la modification de l'environnement local, par le piégeage et la fixation des sédiments.

#### *Distribution et composition des carbonates marins*

Plusieurs minéraux différents peuvent être précipités dans les eaux marines en fonction des conditions locales. L'eau de mer contient beaucoup de sels, mais dans des conditions d'augmentation de la température,  $\text{CaCO}_3$  est un des principaux composants qui précipite en tant que calcite ou aragonite.

te. Dans les océans modernes les sédiments carbonatés ont le potentiel de se former et de s'accumuler partout où la profondeur de l'eau est plus faible que le *niveau de compensation des carbonates*<sup>12</sup> et où il y a très peu ou pas d'apport de sédiments siliceux. Dans les zones où sont introduites des grands volumes de sédiments siliceux (e.g., à l'embouchure des fleuves), les sédiments carbonatés qui se forment à des taux beaucoup plus faibles, seront si masqués qu'ils sembleront inexistantes. Des zones étendues d'accumulation des sédiments carbonatés sont : les eaux peu profondes des plateformes continentales (typiquement <30 m de profondeur) qui reçoivent peu ou pas de sédiments siliceux, ou les bancs isolés entourés d'eaux océaniques profondes. Dans les océans, **la minéralogie des sédiments carbonatés est déterminée par la température et la pression de l'eau**. Ainsi, l'aragonite prédomine dans les sédiments qui se forment dans les mers tropicales tandis que la calcite prédomine dans les eaux tempérés et les eaux plus profondes et plus froides de zones tropicales (Jones, 2004).

#### *Systèmes de dépôt*

Les carbonates marins se déposent typiquement sur une plateforme qui se développe quand les sédiments s'accumulent dans une zone de subsidence. Ces systèmes de dépôt s'appellent en général plateformes ou bancs carbonatés (angl. carbonate shelf) et ils couvrent des centaines de kilo-

---

<sup>12</sup> **Niveau de compensation des carbonates** (ou profondeur de -) (angl. *Carbonate compensation depth*, abrev. CCD) – profondeur à partir de laquelle on ne trouve plus des carbonates dans les dépôts marins, ceux-ci étant dissous dans ces conditions de température et pression. Elle est variable selon les conditions locales, le taux de sédimentation, la productivité en carbonates de la tranche d'eau sus-jacente, et est aujourd'hui de l'ordre de 4500 à 5000 m. Il semble qu'elle ait varié considérablement dans le passé. Au-dessous de cette profondeur, on ne trouve guère que des argiles des grands fonds sauf si, par exception, il y a apport de débris calcaires ou siliceux. On parle aussi parfois de niveaux de compensation pour l'aragonite et pour la silice (d'après le Dictionnaire de Géologie - Foucault et Raoult, 2000). Pour les bassins avec des eaux stratifiés comme la Mer Noire, la situation est bien différente, le niveau de compensation de carbonates coïncidant avec l'interface  $\text{O}_2\text{-H}_2\text{S}$  et la thermo-halocline (Degens et Stoffers, 1976).

mètres carrés. Une plateforme carbonatée a une partie continentale d'un côté et les eaux océaniques profondes de l'autre côté tandis qu'un banc est entouré par les eaux océaniques profondes.

La plupart des sédiments carbonatés se forment en général dans la partie peu profonde, éclairée, de la plateforme continentale. Les conditions y sont idéales pour la précipitation des sédiments carbonatés directement à partir de l'eau de mer et pour le développement des animaux et des plantes à l'origine de l'aragonite et/ou avec des squelettes de calcite. La plupart des sédiments restent à l'endroit où ils ont été formés ou proche de celui-ci. Néanmoins, les vagues et les courants peuvent déplacer le sédiment vers le continent, dans les plaines intertidales ou supratidales, ou bien vers le bassin profond.

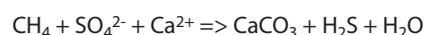
Les **facteurs** essentiels pour la formation des carbonates incluent la profondeur, la température et la circulation de l'eau, l'oxygénation, la salinité et la pénétration de la lumière. En particulier, ces paramètres contrôlent et influencent fortement la croissance et le développement des plantes et des animaux contenant des squelettes calcaires qui vont entrer dans la composition du sédiment. Les eaux peu profondes, bien oxygénées, chaudes, de salinité normale sont, par exemple, idéales pour la croissance de la plupart des plantes et des animaux (par exemple : les algues calcaires, les coraux, les bivalves et les gastéropodes). Inversement, beaucoup de plantes et d'animaux ne peuvent pas survivre dans les eaux aux salinités trop faibles ou trop élevées, trop froides ou trop chaudes, ou avec une faible circulation. Des conditions environnementales défavorables ont comme résultat la formation de biota composé des nombreux individus appartenant à peu de taxa. D'une manière similaire, la pénétration de la lumière joue un rôle majeur dans le contrôle de la distribution des plantes (*e.g.*, algues calcaires et *Thalassia*) ou des animaux (*e.g.*, coraux) qui ont une relation symbiotique avec les plantes (*e.g.*, algues).

Les microorganismes jouent un rôle déterminant dans la sédimentation des carbonates surtout par la construction des stromatolithes, par le piégeage et la stabilisation du sédiment sur le fond de la mer ou par leur rôle de sites de nucléation pour la précipitation de l'aragonite et/ou de la calcite (d'après Jones, 2004).

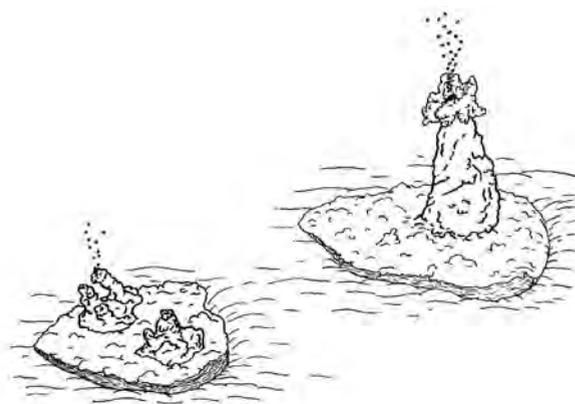
La sédimentation dans les systèmes marins est un processus dynamique qui est finalement contrôlé par l'équilibre entre la subsidence du fond du bassin, la sédimentation et les variations du niveau de la mer. La formation des carbonates va continuer à fonctionner le temps que les conditions favorables à la croissance des plantes et d'animaux seront maintenues. Une augmentation rapide du niveau de la mer, quelque soit sa cause, va fermer l'usine à carbonates et, dans les cas extrêmes, va inonder la plateforme. D'une manière similaire, une diminution du niveau de la mer peut affecter profondément le système de dépôt par l'exposition des récifs et par l'augmentation des plaines tidales, avec des conditions infratidales moins favorables à la croissance des plantes et des animaux (d'après Jones, 2004).

### Processus sédimentaires marins

Un processus très important de formation des carbonates dans les sédiments marins profonds est lié à la présence **des accumulations de méthane**. Les émissions de ce gaz forment des volcans de boue sur le fond de la mer et favorisent aussi la formation des structures carbonatées microbiennes dans ces zones. L'oxydation anaérobie de méthane avec les *Archaea*<sup>13</sup> et les bactéries sulfato-réductrices en tant que médiatrices, a comme résultat la formation des carbonates et des sulfures (Nauhaus *et al.*, 2002, cité dans Michaelis *et al.*, 2002). La formation d'un milieu alcalin favorise la précipitation des bicarbonates dérivés du méthane selon la réaction :



C'est le cas de la partie nord, nord-ouest et centrale de la Mer Noire, où il y a des centaines de sources actives avec fuites de gaz (gas seeps) à des profondeurs de 35 à 2070 m (Ivanov *et al.*, 1991, Polikarpov *et al.*, 1992, Shniukov *et al.*, 2003 cités dans Gulin *et al.*, 2003). Associées à ces fuites de méthane, on trouve des structures carbonatées, telles des cheminées, hautes de 1 à 4 m, formées dans les eaux toujours anoxiques de la Mer Noire, jusqu'à des profondeurs de 2124 m (*e.g.*, Simonov et Altman, 1991, cité dans Gulin *et al.*, 2003) (**Fig.3.1**). Comme ces structures carbonatées n'ont pas été trouvées dans les eaux oxygénées, il est supposé que les constructions microbiennes carbonatées de la Mer Noire sont le résultat de l'oxydation microbienne anaérobie des fuites de méthane des sédiments (Ivanov *et al.*, 1991, Polikarpov *et al.*, 1992, cités dans Gulin *et al.*, 2003).



**Fig.3.1.** Structures carbonatées associées aux émissions de méthane dans les sédiments (d'après Gulin *et al.*, 2003)

<sup>13</sup> *Archaea* est un groupe majeur d'organismes similaires aux bactéries. Elles ont été décrites au début dans des environnements extrêmes, mais depuis, elles ont été trouvées dans tous les habitats. La plupart des *Archaeans* vivent dans des environnements extrêmes: des températures très hautes, souvent au-dessus de 100°C (comme par exemple dans les geysers), à des températures très basses, ou dans des eaux très salines, acides, alcalines ou anoxiques. Parmi les divers types d'*Archaea*, il y a le subtype des *methanogenes* qui produisent du gaz méthane en tant que déchet de la 'digestion', ou du processus de la production d'énergie

## La diagenèse

La diagenèse des carbonates est influencée par leur grande réactivité aux changements de température et de pression, particulièrement en présence de grandes quantités d'eau. La dissolution, la cémentation, l'inversion, la recristallisation et le remplacement, qui sont en général conditionnés par les changements de pression et de température, peuvent conduire au changement complet des sédiments carbonatés et des calcaires. La diagenèse des carbonates va commencer sur le fond de la mer et va continuer jusqu'à l'enfouissement du sédiment à des profondeurs où débute le métamorphisme.

La diagenèse sur le fond et le long de la côte implique, typiquement, la précipitation de ciment d'aragonite et/ou de calcite directement à partir de l'eau de mer. Une fois exposées dans les zones d'eau très peu profonde, ces séquences carbonatées sont prédisposées à des changements. Le climat joue un rôle primordial parce que la diagenèse la plus intense des carbonates a lieu quand des grandes quantités d'eau s'écoulent sur les roches, sous des conditions de hautes températures. Ainsi, les roches carbonatées situées dans des climats chauds et humides ont tendance à subir une diagenèse plus rapide que celles situées dans des climats froids et secs (d'après Jones, 2004).

### Sédiments carbonatés dans les eaux stratifiées

La stratification des eaux, dans les lacs, les mers comme la Mer Noire et les océans, provoque l'installation de conditions d'anoxie en dessous de la pycnocline<sup>14</sup>. Le sédiment déposé va enregistrer ces changements.

Partant de l'idée que les propriétés physico-chimiques de milieux oxygénés et réducteurs sont inscrites dans la couche d'eau qui délimite les zones oxygénées/anoxiques, Degens et Stoffers (1976) ont étudié cette interface pour la Mer Noire et quelques lacs du rift Est Africain. Dans ces cas, l'interface est représentée par une thermo-halocline<sup>15,16</sup>.

Le mécanisme et les taux d'échange moléculaire à travers une thermo-halocline bien développée ont été étudiés en détail (Craig, 1969 ; Spencer et Brewer, 1971 ; Brewer et Spencer, 1974 cités par Degens et Stoffers, 1976). L'advection verticale

et la diffusion vont déplacer l'eau profonde à travers la limite de densité, vers la surface. En contrepartie du gradient d'advection ascendant il y a un gradient de diffusion descendant de l'oxygène. Ces deux flux opposés vont générer un potentiel redox important dans un segment étroit de la colonne d'eau. En réponse à ce gradient d'Eh, certains éléments et minéraux seront réduits ou oxydés, et, respectivement, précipités ou dissous. En échange, des minéraux peuvent se former, mais en descendant à travers un gradient d'Eh, ils seront à nouveau dissous. En fonction de la vitesse de cette réaction et des conditions hydrographiques générales, le processus de précipitation et de dissolution peut continuer indéfiniment et peut conduire à des concentrations importantes des certains éléments et minéraux près de la pycnocline.

**Si l'interface baisse rapidement, une minéralisation presque spasmodique va se produire dans la couche de surface, ayant comme résultat une précipitation massive d'une série des minéraux. Au contraire, une ascension de l'interface va provoquer la dissolution des ces minéraux. Il est important de noter que tous les carbonates y compris la dolomite et la sidérite vont se dissoudre s'ils sont exposés aux environnements très réducteurs.**

**Dans les sédiments marins actuels, la précipitation chimique des carbonates de calcium ou des dolomites est pratiquement inexistante.** Les carbonates marins récents sont principalement d'origine biogène. Les foraminifères calciques et les vases à coccolites (angl. Oozes) couvrent des zones étendues du bassin profond, tandis que les coquilles se trouvent dans certains milieux d'eaux peu profondes. La distribution des 'oozes' calcaires est contrôlée par le niveau de compensation des carbonates et par quelques autres facteurs qui déterminent les taux de dissolution (Plummer et Wigley, 1976 cité par Degens et Stoffers, 1976). Par contraste, le sable et les argiles sont des faciès typiques dans les dépôts modernes d'eau peu profonde.

Degens et Stoffers (1976) montrent dans leur étude que dans les bassins d'eaux toujours stratifiés, **les carbonates précipitent dans les eaux oxygénées peu profondes, et ils sont dissous dans les eaux anoxiques profondes.** L'advection verticale et la diffusion vont renvoyer les espèces minérales dissoutes dans les eaux oxygénées. Cependant, une minéralisation plus importante dans la zone euphotique est obtenue dans le cas d'une baisse de l'interface O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S.

Dans les périodes oxygénées, la distribution du sédiment dans la mer profonde ressemblera à celle de l'océan actuel, tandis que dans les périodes à H<sub>2</sub>S le sapropèle va apparaître et les 'oozes' calcaire et les marnes présenteront des phases de dissolution. Ce processus peut aller jusqu'au développement d'un hiatus et l'accumulation des espèces chimiques dissoutes dans les eaux profondes. Dans le bassin profond, des saumures peuvent s'accumuler. Les processus d'upwelling et de renversement des masses d'eau causeront la libération de ces substances et la formation des phosphorites, des carbonates et des oxydes et hydroxydes de Fe et Mn (Degens et Stoffers, 1976).

<sup>14</sup> **Pycnocline** [du gr. Puknos, dense, et *klinein*, s'incliner; angl. *pycnocline*] = niveau de l'océan où l'eau présente, vers le bas, une brusque augmentation de densité (d'après le Dictionnaire de géologie – Foucault et Raoult, 2000)

<sup>15</sup> **Thermocline** = zone entre les eaux froides profondes des océans et les eaux chaudes de surface. Dans la zone de la thermocline, la température enregistre des variations importantes. Dans la zone de surface, où les eaux sont en permanence en mouvement, et dans les zones profondes, où il n'y a pas des sources de chaleur, la température est en général uniforme. ([http://www.jason.oceanobs.com/html/general/glossaire/t\\_uk.html](http://www.jason.oceanobs.com/html/general/glossaire/t_uk.html))

<sup>16</sup> **Halocline** = très fort gradient vertical de la salinité. Lorsque la salinité (avec la température) influence la densité de l'eau de mer, un rôle dans la stratification verticale. L'eau à salinité faible (avec une densité faible) 'flotte' au dessus de l'eau plus dense à salinité haute. La magnitude du gradient de densité résultant a un rôle important dans le mélange vertical des eaux. Un gradient fort de salinité va résister au mélange tandis qu'un gradient faible se mélange plus facilement.

### 3.3. MÉTHODE

Nous avons obtenu les taux de carbonates de nos sédiments après un traitement de décarbonatation lente, nécessaire dans le cas d'une analyse ultérieure des échantillons pour les taux de carbone organique, de  $\delta^{13}\text{C}$  et d'azote. Il s'agit d'un traitement de plusieurs jours à l'acide chlorhydrique faiblement concentré (0,3 N) afin que la matière organique ne s'hydrolyse pas.

### 3.4. RÉSULTATS

Nous avons analysés 173 niveaux, de 6 carottes. Les analyses ont été effectuées au Laboratoire LSCE de Gif-sur-Yvette et à *GeoEcoMar* – Bucarest. Afin d'avoir une image plus complète nous avons tenu compte des 57 niveaux de la carotte BLKS 98-22 analysés par Popescu (2002) à *GeoEcoMar* - Constanta et les taux de carbonates de la carotte BLKS 98-10, analysés par Major (2002) à L.D.E.O. - Columbia University. Il faut remarquer que, pour ces deux carottes, la méthode de décarbonatation a été différente de celle employée dans le cadre de cette étude. La décarbonatation a été plus rapide et les taux de carbonates sont, généralement, moins élevés

que ceux obtenus par la décarbonatation lente utilisée pour cette étude. Malgré cela, l'allure des courbes ne change pas beaucoup.

#### CAROTTES PEU PROFONDES : BLKS 98-04 ET BLKS 98-06

Pour les carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06, les mesures montrent des valeurs assez stables sous les discontinuités et une augmentation progressive au-dessus (Tableau 3.1; Fig.3.2). Ceci est logique, puisque la quantité de débris de coquilles augmente dans le même sens (description lithologique dans l'annexe 1). Si au dessous de celle-ci, les valeurs de carbonates sont en moyenne de 20-30 % (min. 17,9%, max. 51%), au-dessus de la discontinuité les valeurs augmentent et aboutissent à 63 % du sédiment. On observe une augmentation de l'importance des débris de coquilles qui deviennent dominants dans le sédiment à env. 10 cm de la surface des carottes.

Les symboles des faciès (S1 à S5) définis dans le chapitre antérieur sont aussi indiqués dans la figure 3.2. Nous remarquons que les carottes en question ont seulement deux faciès communs : S1 (a et b) et S4, où les caractéristiques des paramètres analysés sont bien similaires. Nous allons décrire ces paramètres pour chaque faciès.

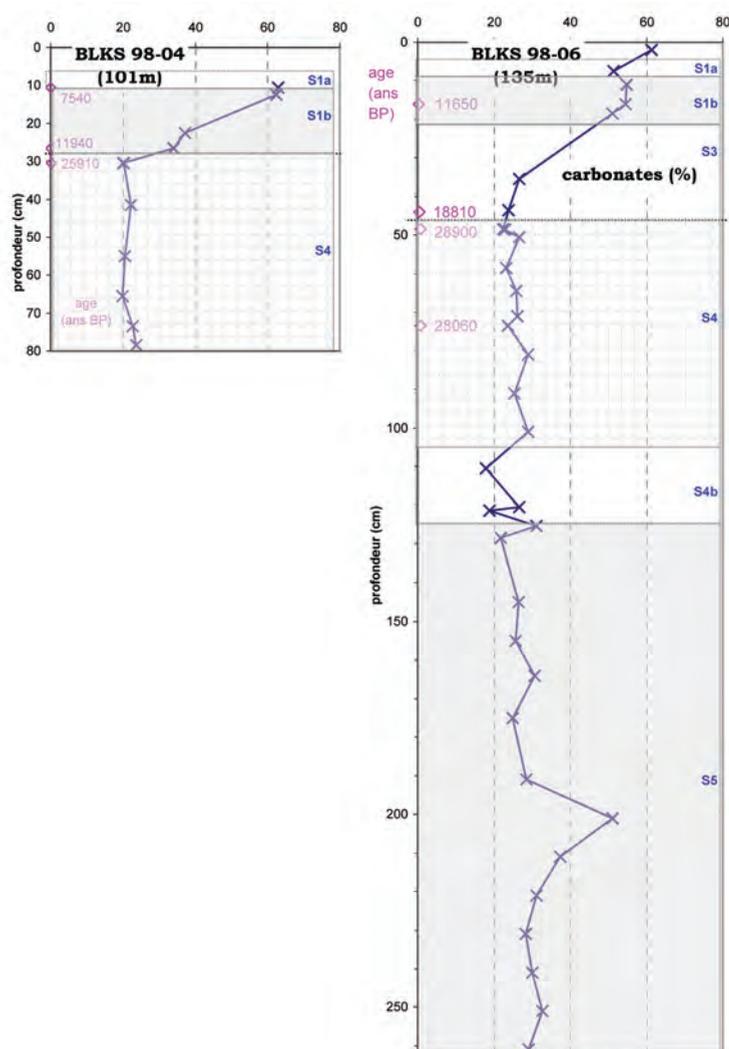


Fig.3.2. Taux de carbonates, faciès et âges pour les carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06

Les carbonates varient entre 21,8 et 51 % dans le faciès S5, entre 18 et 26,7 % dans le faciès S4b (ceux-ci sont présents seulement dans la carotte BLKS 98-06). Dans le faciès S4 (présent dans les 2 carottes en dessous de la discontinuité) ils varient entre 19,8 et 29%. Le faciès S3 présente des valeurs similaires aux faciès décrits antérieurement, entre 23,8 et 26,6%. L'augmentation importante des valeurs est enregistrée dans les faciès S1, particulièrement dans le S1a où les valeurs atteignent leurs maxima de 61-63%.

**CAROTTES PROFONDES : BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-10, BLKS 98-11 ET BLKS 98-22**

Les valeurs des taux de carbonates de ces quatre carottes sont présentées dans le **Tableau 3.1**. La variation de ces paramètres, tout comme les faciès présents le long des carottes sont visibles dans la **figure 3.3**.

Nous avons déjà identifié, dans le 2-ème chapitre, les faciès de pente continentale et de plaine abyssale : S6, S9, S10, M3 et M4 (voir la **Fig. 2.6b** et **c**). Nous allons décrire le comportement des taux de carbonates pour chaque faciès.

Les carbonates des faciès S6 et S10 (présents dans les carottes BLKS 98-09 et BLKS 98-10) ont des valeurs relativement constantes : aux environs de 20% pour la carotte BLKS 98-09 et de 10% pour la carotte BLKS 98-10 (à l'exception de la partie supérieure où ils augmentent jusqu'à 41,6%). Cette augmentation est sous forme d'un pic de carbonates qui peut être retrouvé partout, sa largeur étant bien sur différente selon les taux de sédimentation de chaque carotte. Le faciès S9 (carottes BLKS 98-10, BLKS 98-11 et BLKS 98-22) est caractérisé par une grande variabilité des valeurs de carbonates dans l'intervalle 2,9-74,7%. Ce faciès contient une grosse augmentation des taux de carbonates, se traduisant par un pic important sur la courbe de variation. Il peut être observé dans les trois carottes. Les valeurs, dans le faciès marin M4, sont comprises en moyenne entre 26-30%, l'intervalle de variation étant : 25,8-35,3. Le niveau 59 cm de la carotte BLKS 98-11 constitue une exception avec 45 % de carbonates. Le taux les plus élevés se retrouvent dans le faciès marin à coccolites M3 : 37,5 à 71,4%.

### 3.5. DISCUSSION ET INTERPRÉTATION

#### 3.5.1. LES CARBONATES DANS LES SÉDIMENTS RÉCENTS DE LA MER NOIRE

Une carte des carottes analysées pour les carbonates ayant fait l'objet de publications, est présentée dans la **figure 3.4**.

Les premières mesures de taux des carbonates ont été présentées par **Degens et Ross, 1970** et **Ross et al., 1970**, à la suite de la campagne d'échantillonnage du printemps de 1969 avec le *N/O Atlantis II*. Les analyses sont faites sur la carotte 1474 K, prélevée dans la partie est de la Mer, à 2117 m. Elle a été choisie comme section standard. Les auteurs reportent des valeurs variables mais allant jusqu'à 10-30 % dans l'unité III, des valeurs basses (5 à 10 %) dans l'unité II à sapro-

pèle et des valeurs très élevées (40 à 60%) dans l'unité I avec des coccolites (**Fig.3.5a**).

**Degens et Ross, 1972, 1974** suggèrent que la phase lacustre en Mer Noire a duré environ 12 -13 000 ans. Entre 15 000 et 10 000 ans, les taux de carbonates augmentent et les taux de sédimentations diminuent de moitié.

**Müller et Stoffers, 1974** traitent le problème du point de vue minéralogique et montrent que **le carbonate le plus abondant** dans les sédiments de la Mer Noire **est la calcite**, le principal constituant de l'unité 1. Il est accompagné partout par la dolomite et, dans beaucoup de couches sédimentaires, par des petites quantités d'aragonite. Ils présentent dans leur annexe les courbes de variation des taux des carbonates et du rapport calcite/dolomite des sédiments de 34 carottes. Comme les auteurs ne donnent aucune indication sur les limites des unités sédimentaires, il nous est difficile de comparer leurs données avec les autres travaux dont le notre.

**Calvert et al., 1987** et **Calvert et Fontugne, 1987** analysent le sommet de 2 carottes issues de la même expédition (1969) : la carotte 1432 – de la zone abyssale à 2238 m, et la carotte 1470 dans la partie est de la pente, à 906 m de profondeur. Ils identifient les 3 unités de **Ross et al., 1970** et **Degens et Ross, 1972, 1974**, mais aussi une unité supplémentaire, entre le sapropèle et l'unité aux coccolites, représentant une coulée de sédiment.

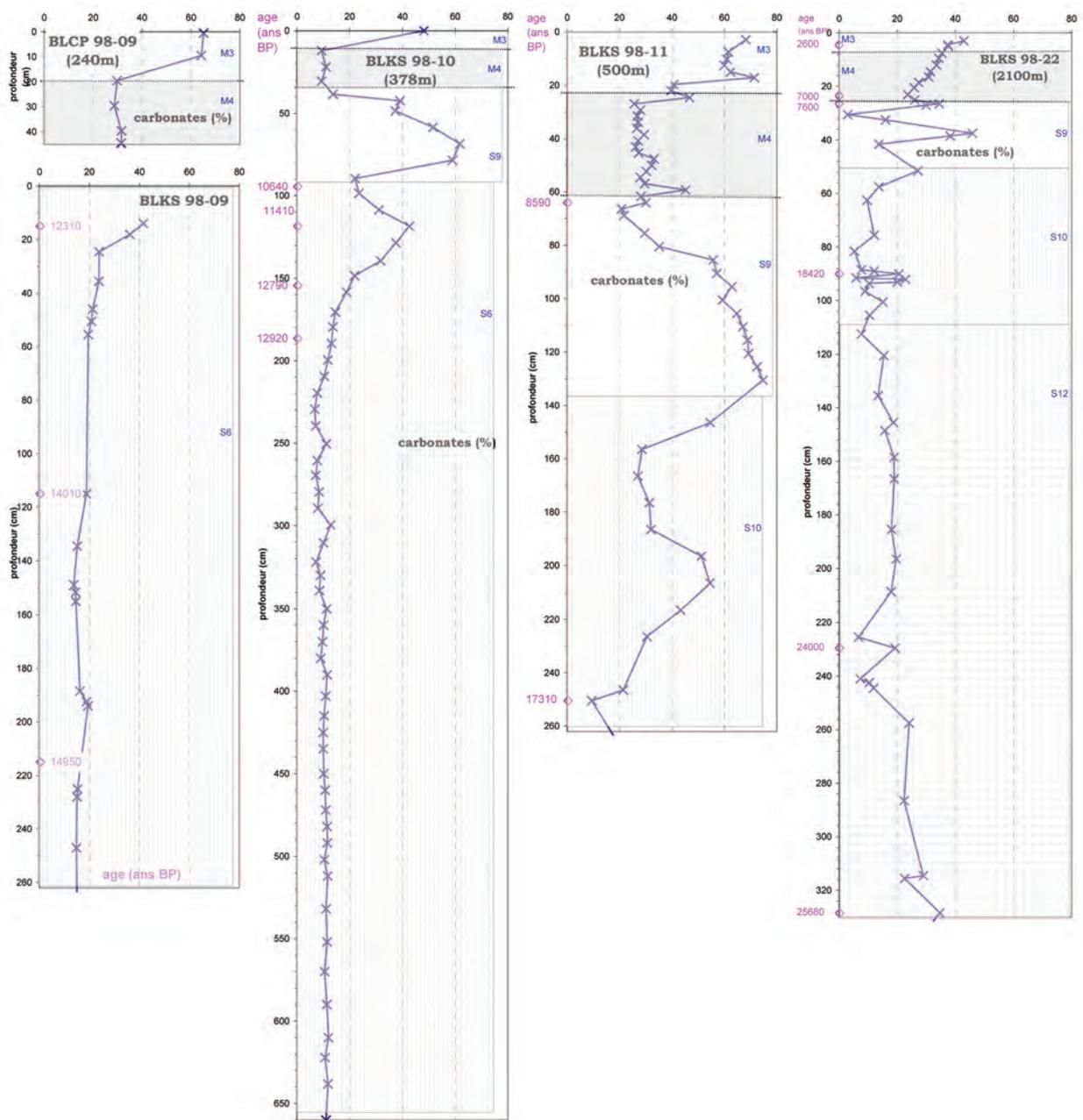
Ces auteurs ont analysé les taux de carbone organique, les carbonates, mesuré des âges  $^{14}\text{C}$  (**Calvert et al., 1987**), et des  $\delta^{13}\text{C}$  (**Calvert et Fontugne, 1987**). Ils montrent que l'unité à coccolites contient 13,9 à 55,6 % de carbonates dans la carotte 1432 et de 12 à 24,8% dans la carotte 1470. L'unité lacustre possède des taux de carbonates très bas, entre 15,6 et 26 %, à une exception près. Dans la **figure 3.5b** nous présentons uniquement les taux des carbonates de la carotte 1470 parce que les analyses s'étendent dans la partie lacustre, tandis que pour la carotte 1432, elles s'arrêtent dans le sapropèle.

**Hay, 1988**, mesure les carbonates des 3 carottes issues de l'expédition 120-1 du *N/O Chain*, 1975, mais uniquement pour les unités I et II.

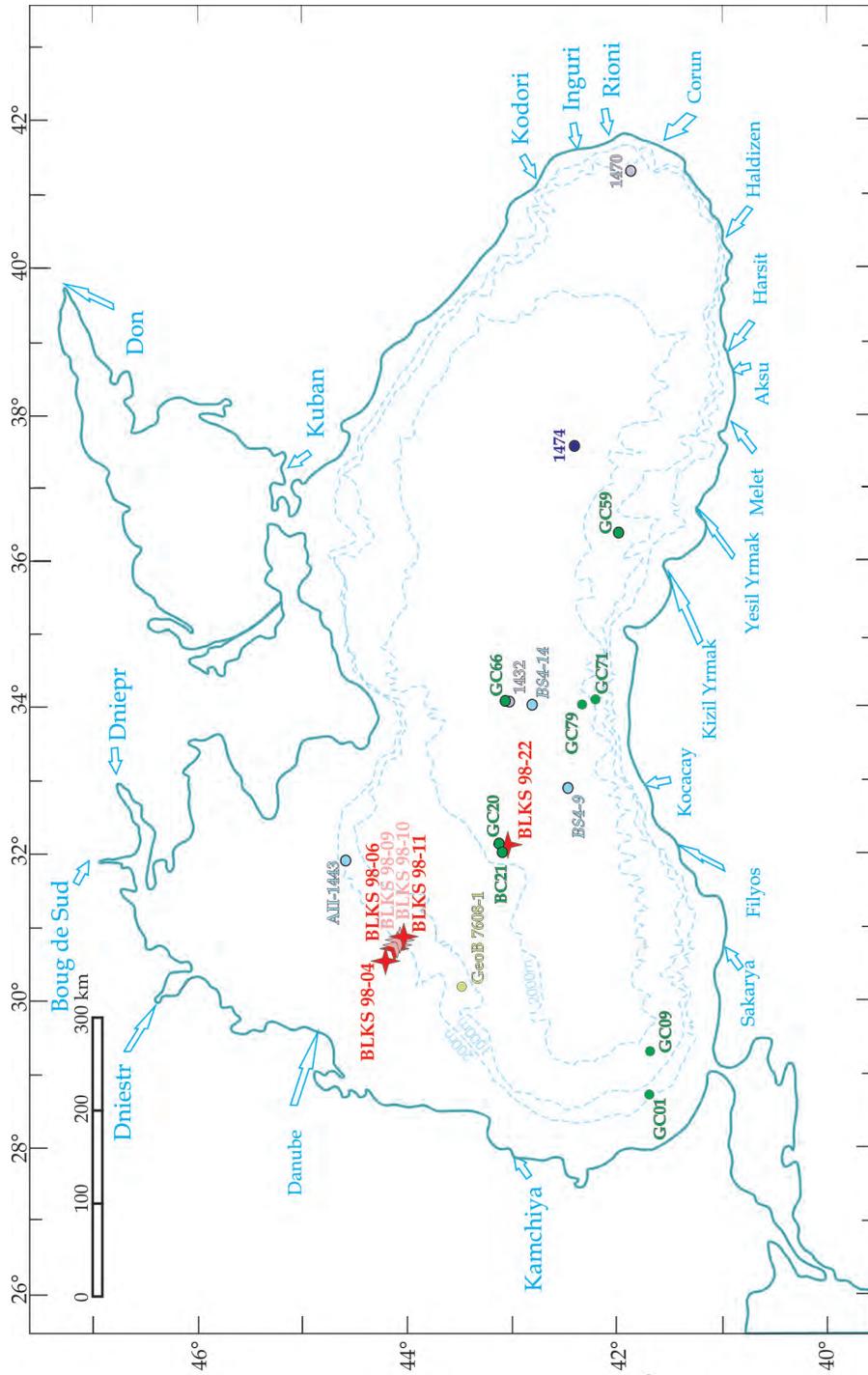
**Arthur et al., 1994** ont déterminé des taux des carbonates pour le sédiment de plusieurs carottes prélevées avec des carottiers à gravité et des carottiers boîtes<sup>17</sup> de la partie sud de la Mer Noire (sédiments prélevés pendant l'expédition de 1988 à bord du *N/O Knorr*). Ils présentent un graphique composite du % de  $\text{CaCO}_3$  et de carbone organique dans les carottes GC20 et BC21, situées dans un site proche de la carotte profonde BLKS 98-22. Nous pouvons observer sur leurs graphes deux pics de carbonates dans la partie supérieure de l'unité III, et des pics à la base du sapropèle (**Fig.3.5c**).

Remarquons la présence d'un pic de carbonates à la base du sapropèle, et deux pics, dans l'unité lacustre, qui sont pré-

<sup>17</sup> *Angl. box-corers*



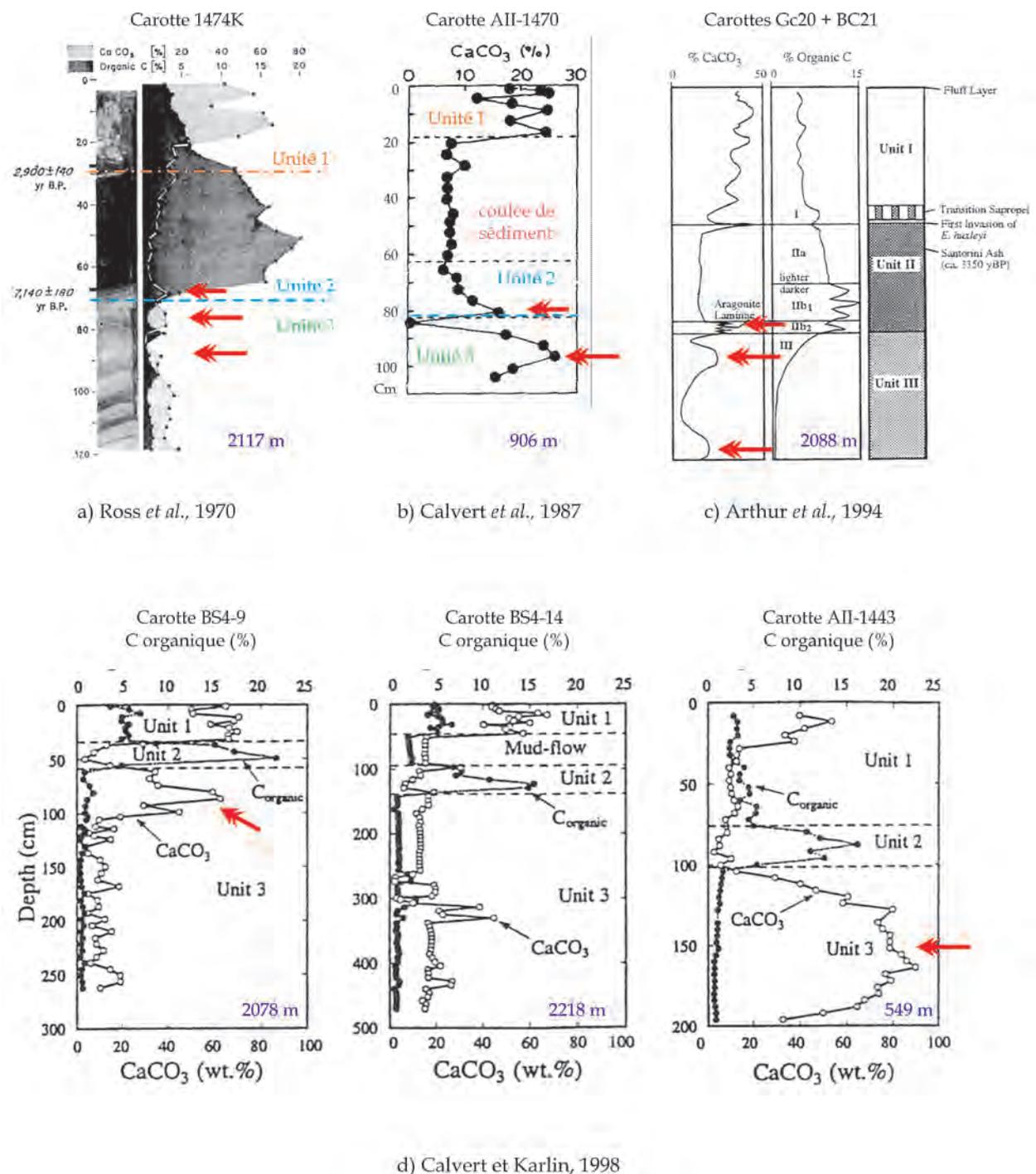
**Fig.3.3.** Taux de carbonates, faciès et âges pour les carottes BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-10, BLKS 98-11 et BLKS 98-22 (les valeurs de carbonates pour la carotte 10 d'après Major, 2002; une partie de valeurs de carbonates pour la carotte 22 d'après Popescu, 2002)



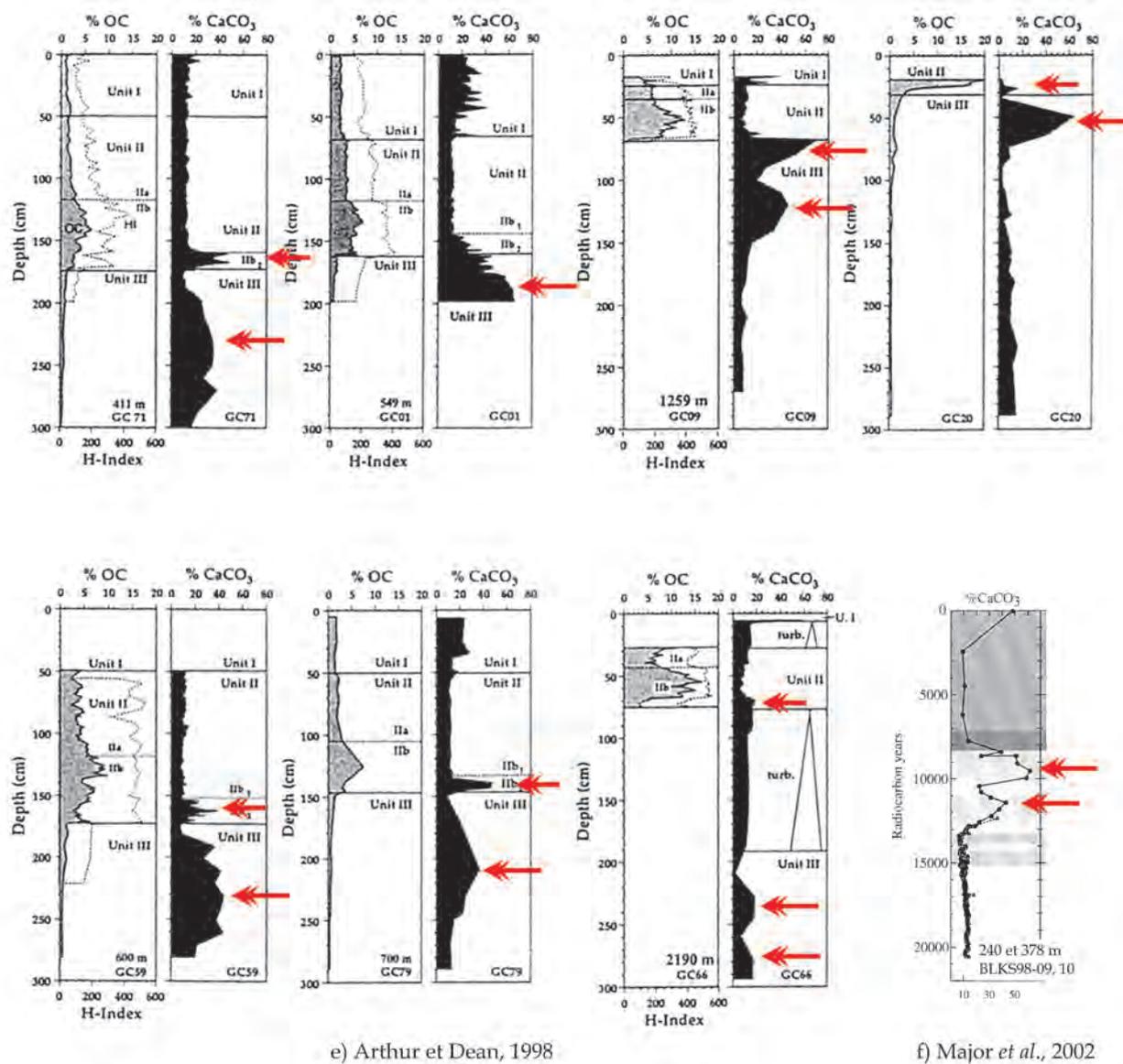
**Légende:**

- 1450 ● Ross *et al.*, 1970
- 1452 ○ Calvert *et al.*, 1987
- AII-1443 ○ Calvert et Karlin, 1998
- GC79 ● Arthur *et al.*, 1994;
- Arthur et Dean, 1998
- GeoB 7608-1 ● Bahr *et al.*, 2005
- Expedition *Blasoni*:  
 BLKS 98-22 ★ cette étude  
 BLKS 98-09 ★ Major *et al.*, 2002

**Fig.3.4.** Localisation des carottes analysées pour les taux de carbonates dans la littérature et dans cette étude



**Fig.3.5.** Taux des carbonates et de carbone organique dans les sédiments de carottes de la Mer Noire, dans la littérature: a) Ross *et al.*, 1970 ; b) Calvert *et al.*, 1987 ; c) Arthur *et al.*, 1994 ; d) Calvert et Karlin, 1998. Les pics des carbonates intéressants pour notre discussion sont indiqués par des flèches rouges. La localisation des carottes est présentée dans la figure 3.4



**Fig.3.5.** Taux des carbonates et de carbone organique dans les sédiments de carottes de la Mer Noire, dans la littérature: e) Arthur et Dean, 1998; f) Major *et al.*, 2002

sents dans toutes les carottes présentées ci-dessus (Cf. aussi: **Fig.3.5a, b** et **c**).

**Calvert et Karlin, 1998** analysent 3 carottes : une provenant de l'expédition de 1969 du *R/V Atlantis II* (All-1443) et deux de l'expédition de 1988 avec le *R/V Knorr* : BS4-9 et BS4-14. Les carottes sont situées dans la partie nord-ouest du bassin (All-1443) et dans sa partie centrale (BS4-9 et BS4-14) à des profondeurs de 549m et de plus de 2000m (**Fig.3.4**). On remarque un important pic des carbonates qui peut être observé dans la partie supérieure de l'unité III des carottes BS4-9 et All-1443 (**Fig.3.5d**).

**Arthur et Dean, 1998** analysent les taux des carbonates de 7 carottes, de diverses profondeurs entre 411 et 2190 m. Ils observent que l'unité II contient des taux de 5 à 15 %, plus grands dans le bassin profond, qui diminuent dans les eaux peu profondes du fait de la dilution par le matériel clastique. Pour l'unité III, les profils des carbonates montrent un contenu d'environ 20%, mais avec un ou deux maxima atteignant jusqu'à 60% en dessous de la limite avec l'unité II. Sur leurs figures nous pouvons donc observer un ou deux pics dans la partie supérieure de l'unité III, et les pics à la base de sapropèle. Ces auteurs les considèrent comme étant dûs à la présence de lamines d'aragonite (**Fig.3.5e**).

**Major et al., 2002** analysent une carotte de la mission BlaSON1 : BLKS 98-10 situé à 378 m de profondeur. Elle est présentée aussi dans cette étude car analysée pour la susceptibilité magnétique et la minéralogie magnétique. Les auteurs montrent l'existence, dans l'unité III, des deux pics des carbonates : un de 42 % à **11 400 ans BP** et un autre de plus de 60% **entre 10 000 et 8 400 ans BP**. L'observation au microscope optique et au RX des ces échantillons montre que les pics des carbonates sont accompagnés par l'apparition de grains de calcite euhédrale en tant que constituant majeur du sédiment, tandis que les carbonates du reste de la carotte sont représentés par un mélange de coccolites remaniés, de fragments de coquilles de mollusques et de grains de carbonates détritiques (**Fig.3.5f**). Les pics des carbonates inorganiques de ~12 000 et ~9 500 ans BP sont expliqués par la supersaturation des eaux, du fait d'une évaporation intense pendant des périodes chaudes.

**Bahr et al., 2005**, présentent une corrélation entre la courbe de calcium de la carotte GeoB 76-08-1 situé au nord-ouest du bassin, à 1202 m de profondeur (**Fig.3.4**) et celles des carbonates de Major et al., 2002. Ils identifient 3 pics de calcium sur leur courbe, le plus haut représentant, selon son âge, les niveaux d'aragonite du sapropèle. Les auteurs ne remarquent pas ceci et ne décrivent pas la lithologie de chaque carotte pour pouvoir avoir la certitude qu'il s'agit d'un pic dans le sapropèle, mais dans la littérature, les niveaux d'aragonite sont assez souvent décrits. L'explication de Bahr et al., concernant les autres deux pics, est la précipitation des carbonates authigènes, due au climat chaud pendant Bølling/Allerød et au début de l'Holocène, climat qui favorisait l'assimilation du CO<sub>2</sub> par le phytoplancton et l'augmentation du pH.

### L'aragonite

Les premiers à signaler la présence d'une bande blanche d'aragonite à la base du sapropèle Holocène sont **Ross et Degens, 1970**. Quant à l'origine de ce niveau, ils ne donnent aucune explication.

**Degens et Ross, 1972** et **Ross et Degens, 1974** reportent la présence, dans le sapropèle de la carotte 1474 K, de 3 bandes blanches fines (< 1mm) constitués principalement de: (i) *Emiliana huxleyi* à ~40 cm profondeur dans la carotte; (ii) *Braarudosphaera bigelowi* et des restes calcaires de *Peridinium trochoideum* à ~50 cm; (iii) **grains d'aragonite** avec une apparence spongieuse, précipité anorganique à ~60 cm.

**Arthur et al., 1994** et **Arthur et Dean, 1998** signalent eux aussi la présence de l'aragonite à la base du sapropèle, sous forme de lamines blanches constituées d'aragonite sous forme des grains ayant l'aspect de grains de riz (« rice grains », Ross et Degens, 1974). La différence par rapport aux autres auteurs tiens au fait qu'ils comptent environ 100 couplets de lamines aragonite-argile dans les carottes d'eau profondes et beaucoup plus (jusqu'à 1000) dans les carottes d'eau moins profonde. En conséquence, ils considèrent que les pics de carbonates observés à la base du sapropèle sont dûs à la présence de ces lamines à aragonite.

### 3.5.2. CORRÉLATION DES CAROTTES ET COMPARAISON AVEC LES DONNÉES DE LA LITTÉRATURE

La comparaison des courbes des *carbonates* des 6 carottes étudiées nous a permis de remarquer que pour les deux moins profondes (BLKS 98-04 et BLKS 98-06) les allures des courbes sont semblables. En général, on constate une augmentation des valeurs de carbonates du passé vers le présent (**Fig.3.2**), dû à l'augmentation du nombre de coquilles dans le sédiment, au-dessus de la discontinuité et vers le sommet des carottes.

De même, pour les carottes profondes, les courbes des sommets de BLCP 98-09, BLKS 98-10, BLKS 98-11 et BLKS 98-22 sont similaires : l'unité II avec sapropèle (faciès M4) étant caractérisée par des valeurs moyennes de carbonates d'environ 30 %, tandis que dans l'unité I avec coccolites (faciès M3) les valeurs augmentent jusqu'à 60-65% (**Fig.3.3**). Ceci est en accord avec la présence très abondante des tests des coccolites en carbonate de calcium qui forment grande partie du sédiment de l'unité I. Le niveau d'aragonite décrit par d'autres auteurs à la base de l'unité à sapropèle est représenté très probablement par le pic de carbonates à 59 cm de profondeur dans la carotte BLKS 98-11. Il est visible sur la courbe du fait de nombreux points d'analyse. Un pic de carbonates similaire à celui-ci se retrouve presque à la limite des unités II et III de la carotte BLKS 98-22. Nous pensons qu'il représente aussi le niveau d'aragonite, même si, selon la description lithologique, et surtout les photos du sédiment, on ne sait pas s'il se situe à la base du sapropèle ou dans la partie supérieure de l'unité lacustre.

L'allure de la courbe de la carotte profonde – BLKS 98-22 est légèrement différente des autres, et elle présente une plus grande variabilité des teneurs. Ce fait peut être expliqué par la distance entre les points d'analyse, et par le fait que cette carotte présente des taux de sédimentation réduits pour les derniers 18 000 ans, du fait de sa position dans le bassin profond. La section lithologique est donc condensée. De plus, pour la période antérieure à 18 000 ans, le sédiment est représenté par des turbidites (Popescu, 2002). Ceci est une caractéristique différente des autres carottes de cette étude.

La corrélation entre les carottes basée sur les carbonates est indiquée dans la **figure 3.3**. Par exemple, le pic situé au sommet de l'unité III dans le faciès S9 est présent dans les trois carottes BLKS 98-10, 11 et 22. De même, le pic plus profond, est toujours situé dans les faciès similaires S6 ou S10.

Dans la littérature, la plupart des auteurs montrent des courbes de carbonates présentant des similarités avec les nôtres (**Fig.3.5**). A savoir: la présence d'un pic à la base du niveau à sapropèle (correspondant au niveau d'aragonite), et un ou deux pics de carbonates dans la partie supérieure du niveau lacustre.

Dans nos carottes, le pic correspondant probablement au niveau d'aragonite se retrouve clairement dans la carotte BLKS 98-11, et moins nettement dans la carotte BLKS 98-22. Les pics de carbonates de la partie supérieure de l'unité III sont visibles dans les carottes BLKS 98-10 et 11, mais ils sont moins développés dans BLKS 98-22, du fait des différences des taux de sédimentation. Une comparaison de nos courbes avec celles obtenues par Arthur et Dean (1998) est une bonne illustration de cette situation (**Fig.3.6**). Les carottes de 400 à 700 m de profondeur ont des allures de carbonates similaires à celle de BLKS 98-11 située à 500 m, tandis que les carottes plus profondes, de 1200 à 2190 m de profondeur sont similaires à BLKS 98-22, située à 2100 m. Remarquons aussi que la courbe de la carotte GC20 d'Arthur et Dean (1988) présente la même allure que celle de BLKS 98-22. Les deux sont sur l'éventail profond du Danube, à plus de 2000 mètres de profondeur.

Un problème intervient lorsque les courbes de carbonates sont placées sur une échelle chronologique (**Tableau 2.4**). Sur la **figure 3.7a** nous pouvons remarquer que le pic correspondant au niveau d'aragonite est daté à environ 7600 ans BP dans la carotte BLKS 98-22 et à environ 8200 ans dans la carotte BLKS 98-11. Une différence similaire, d'environ 600 ans, est enregistrée pour la diminution des taux de carbonates, placé à ~8200 ans BP dans la carotte 22 et à ~8800 ans BP dans 11. En ce qui concerne le pic suivant, dans la partie supérieure de l'unité III, la comparaison est plus délicate, du fait d'une résolution différente des points d'analyse dans la carotte 22 et aussi, du fait de la diminution des taux de sédimentation dans le bassin profond. La succession sédimentaire de la carotte BLKS 98-22, est comprimée par rapport à celle de la carotte 11, soumise à des taux de sédimentation plus élevés.

Afin de pouvoir comparer nos courbes des carbonates avec celle de la carotte BLKS 98-10, nous allons utiliser la notation utilisée par Major *et al.*, 2002 : C1 pour le pic plus jeune et C2 pour le plus âgé de l'unité III.

Le pic C1 s'étend de 12500 à 9400 ans BP avec une valeur maximale à ~11700 ans BP dans la carotte BLKS 98-11 et de 9600 à 9400 ans avec un maximum à ~9500 ans BP dans la carotte BLKS 98-22. Le pic C2 dure de 9600 à 9400 ans BP, avec un maximum de ~55% à ~15200 ans BP dans la carotte BLKS 98-11 et se trouve à environ 11800 ans BP dans la carotte BLKS 98-22 (**Fig.3.7a**). Nous pouvons donc observer des différences importantes d'âge entre ces deux pics de carbonates de la carotte BLKS 98-11 par rapport à la carotte BLKS 98-22: +2200 ans pour le pic C1 et +3400 ans pour le pic C2.

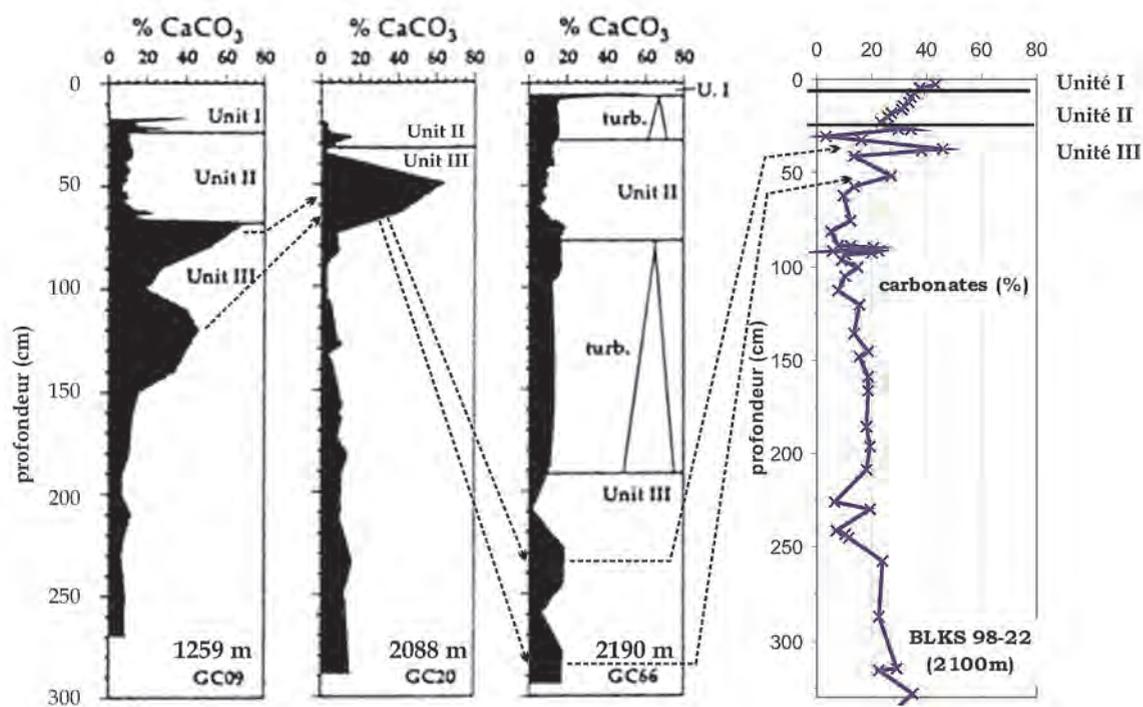
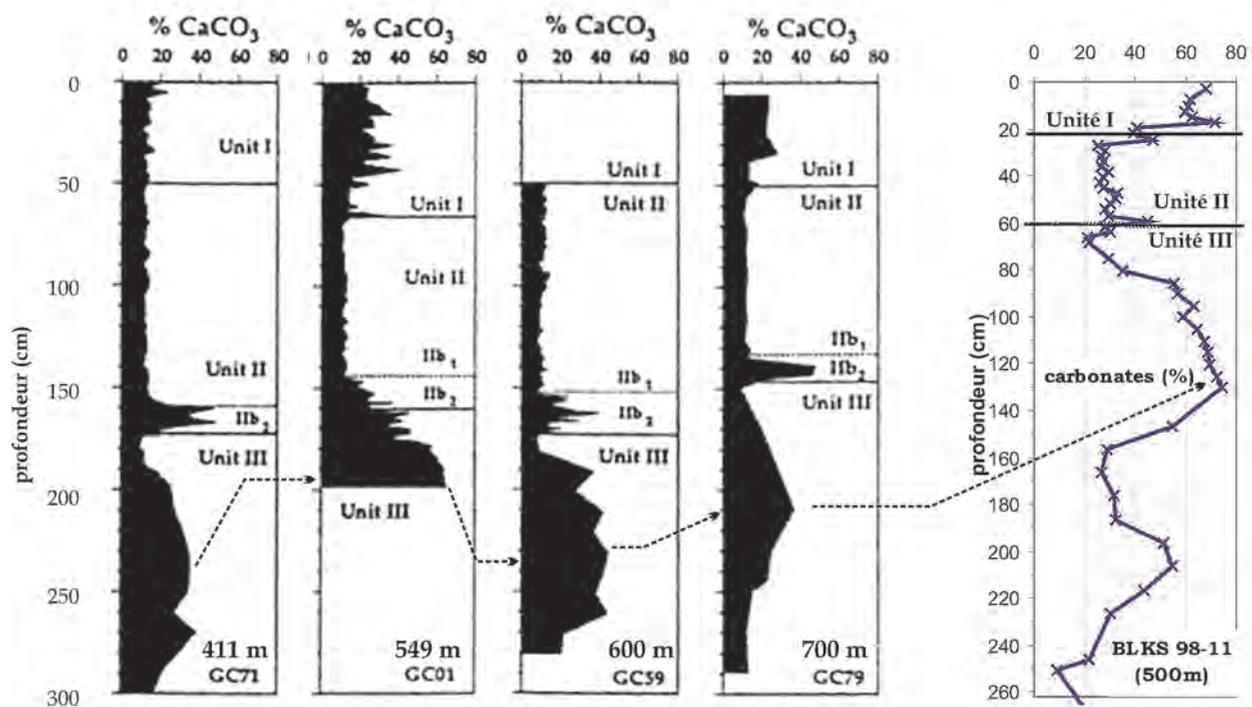
Malgré cela, la comparaison entre la carotte BLKS 98-22 et BLKS 98-10, nous montre une corrélation très bonne des pics C1 et C2, qui sont presque contemporains, avec une différence d'environ +400 ans pour les pics de la carotte 22. Cela nous donne à penser que les âges des pics C1 et C2 sont corrects.

Revenant maintenant à la comparaison entre BLKS 98-11 et 22, nous pouvons observer que l'âge du pic d'aragonite est presque le même pour les deux carottes, tandis que les pics C1 et C2 semblent être complètement différents. Il est possible que, dans le cas de la carotte BLKS 98-11, les âges utilisés pour les calculs des taux de sédimentation sont corrects pour l'intervalle 23-61 cm mais ils sont moins pour les intervalles 64-250.5 cm et 61-64 cm. L'âge de la base de cet intervalle,  $17310 \pm 120$  ans BP, peut être mis en doute.

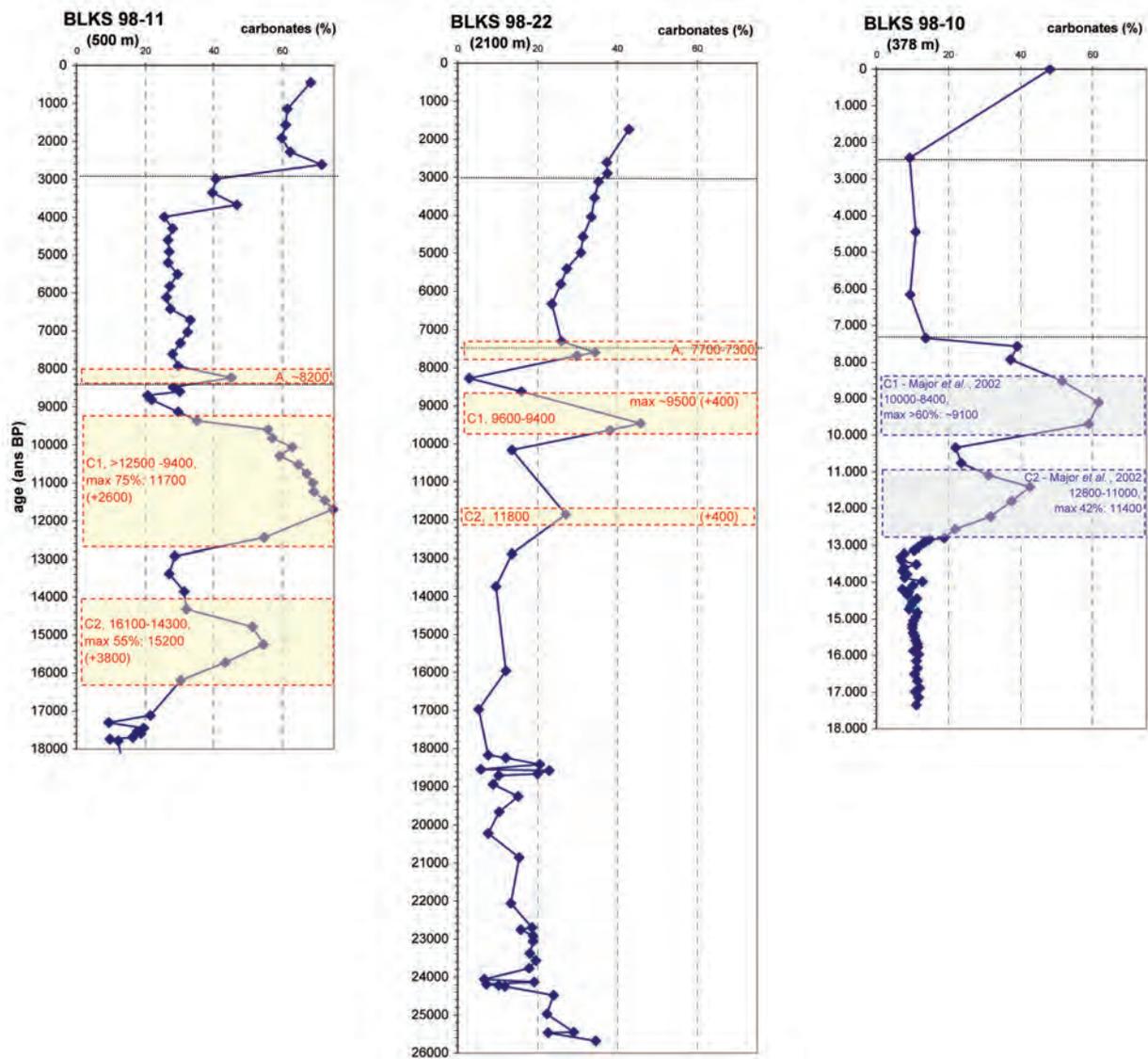
Dans la **figure 3.7b**, nous avons ignoré cet âge, et nous avons calculé le taux de sédimentation pour les intervalles 64-756,5 cm et 61-64 cm à l'aide de la datation disponible suivante :  $21570 \pm 200$  ans BP à 756,5 cm. On obtient un taux de sédimentation de 53,35 cm/1000 ans pour ces intervalles, et la courbe de carbonates en fonction d'âge se corrèle alors parfaitement avec les deux autres.

Ces pics de carbonates peuvent se suivre dans la plupart des carottes publiées, ce qui indique que le phénomène a bien eu lieu à l'échelle du bassin. D'après les observations de Major *et al.* (2002), les pics dans la partie supérieure de l'unité III de la carotte BLKS 98-10, sont représentés par des cristaux euhedraux de calcite, tandis que le reste des carbonates dans les sédiments est représenté par des restes de coquilles. Les carbonates des pics d'abondance sont formés à partir de l'eau de la mer, dans des périodes où le milieu favorisait la formation des dépôts carbonatés. Major *et al.* (2002) pensent qu'un réchauffement des eaux du bassin peut être responsable de la précipitation massive des ceux-ci en certaines périodes post-glaciaires.

En ce qui concerne les conditions environnementales favorables à leur précipitation des carbonates, peuvent être les suivantes : les changements de conditions de température



**Fig.3.6.** Similarités entre les résultats d'Arthur et Dean (1998) et ceux de cette étude pour les carottes BLKS 98-11 et BLKS 98-22



**Fig.3.7a.** Taux de carbonates dans le sédiment des carottes BLKS 98-11 et BLKS 98-22, en fonction de l'âge; comparaison avec les valeurs de carbonates de Major *et al.* (2002) pour la carotte BLKS 98-10; taux des sédimentation de la carotte BLKS 98-11 calculés : a) en utilisant l'âge 17310 ans BP. (En rouge : A – le pic d'aragonite, C1 – premier pic de carbonates, C2 – deuxième pic de carbonates)

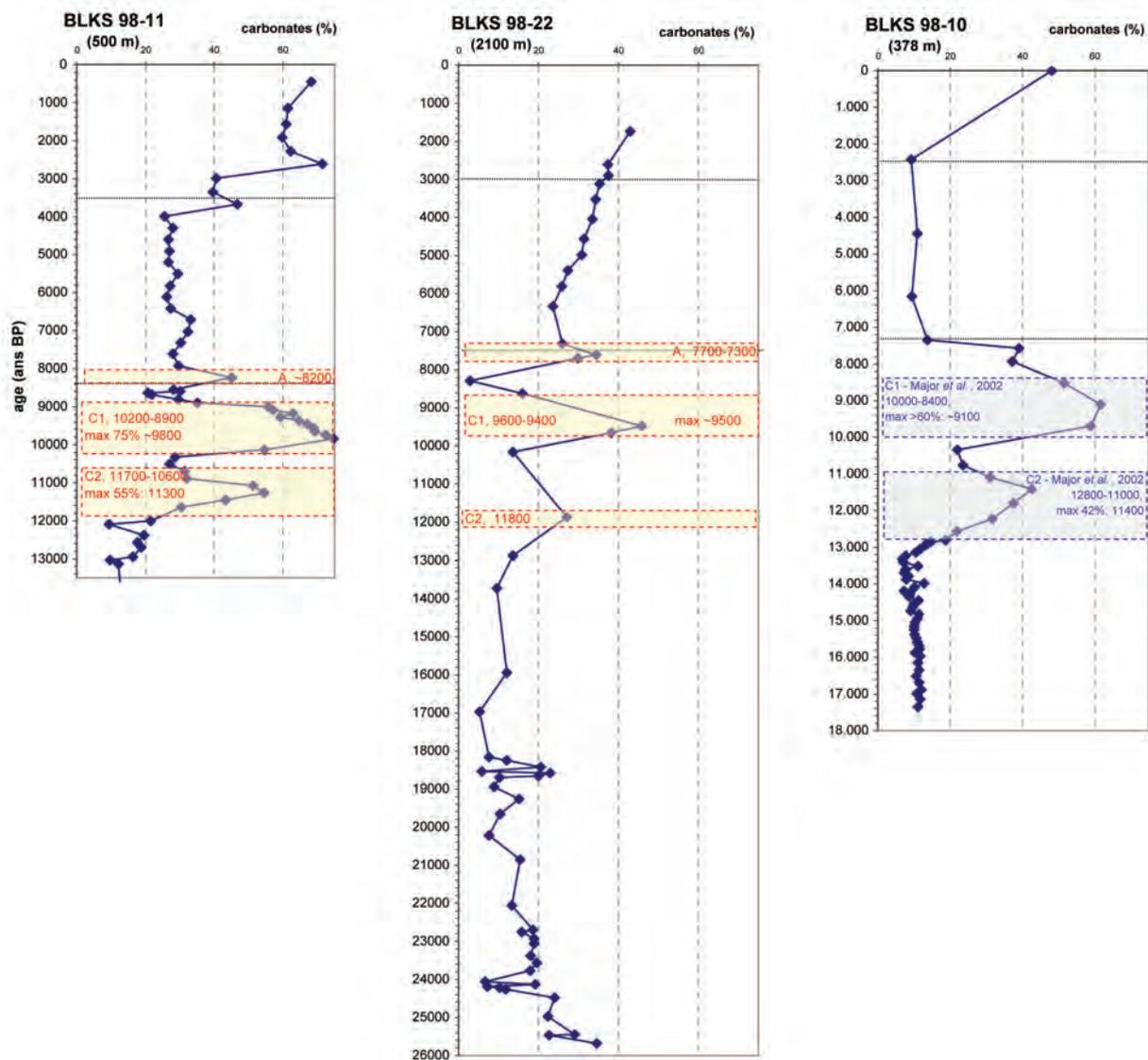


Fig.3.7 b. en ignorant l'âge 17310 ans BP

(réchauffement), d'oxygénation, de la circulation, de la salinité ou de la profondeur des eaux du bassin.

Le réchauffement des eaux du bassin est une première hypothèse à prendre en considération. Les intervalles de temps caractérisés par l'apparition de pics de carbonates (~11 800 – 10 600 ans BP et ~10 000 – 9 000 ans BP) correspondent aux périodes de réchauffement du climat Allerød (11 800 – 11 000 ans BP) et Préboréal (10 000 – 9 000 ans BP) (Mangerud, 1974 ; Wohlfarth, 1996). La diminution des taux de carbonates dans la période 10 600 – 10 200 ans BP correspond bien au refroidissement du climat pendant le Younger Dryas (11 000 – 10 000 ans BP). Nous pouvons aussi remarquer qu'une diminution des taux de carbonates autour de 12 000 – 11 800 ans peut correspondre au bref épisode de refroidissement du climat connue sur le nom de Older Dryas (Mangerud, 1974). Pourtant cette chronozone n'est pas acceptée par la totalité

des auteurs (*i.e.* Welten, 1982 ; Bjork, 1984 ; Amman et Lotter, 1989 cités dans Wohlfarth, 1996).

Une deuxième explication peut être celle qui lie la précipitation des carbonates à la position de la pycnocline dans le bassin. Comme nous avons vu dans le chapitre 3.2.3, dans les sédiments marins actuels, la précipitation des carbonates est quasi inexistante, les carbonates marins étant en général d'origine biogène. Pourtant, la situation du passé était différente: des dépôts très épais de carbonates formés en milieu marin se retrouvent sur des surfaces étendues du continent. Degens et Stoffers, 1976 pensent que ces dépôts sont formés dans des bassins d'eaux stratifiées, similaires à la Mer Noire d'aujourd'hui. La précipitation des carbonates est liée à la position de la pycnocline, qui coïncide avec la limite  $O_2-H_2S$  dans les bassins stratifiés actuels. Le modèle présenté par Degens et Stoffers en 1976 indique que les carbonates précipitent au-dessus de la pycnocline, tandis que au-dessous, se déposent

---

des sédiments euxiniques. Dans le cas d'une migration de la pycnocline vers la surface de l'eau, les carbonates qui vont se retrouver en dessous de celle-ci vont se dissoudre. A l'inverse, dans le cas d'une migration de la pycnocline vers le fond du bassin, les carbonates vont précipiter à des profondeurs plus grandes dans le bassin. Dans cette perspective, la présence des pics de carbonates observés dans l'unité III, peut être aussi liée à l'installation de l'anoxie dans le bassin et à la remontée de la pycnocline vers sa position actuelle. La formation des deux pics de carbonates, peut être attribué aux périodes de stagnation de la pycnocline.

Si la formation des pics des carbonates est liée à l'installation graduelle de l'anoxie dans le bassin, nous pouvons penser que le phénomène à commencé dans les eaux profondes il y a environ 12 000 ans BP.

La combinaison des plusieurs facteurs contribuant à favoriser la précipitation des carbonates ne peut pas être exclue. L'augmentation de la température des eaux et la migration de la pycnocline peuvent donc agir ensemble.

### 3.6. CONCLUSIONS

Nous avons remarqué une très bonne corrélation des courbes de carbonates entre les carottes profondes, que ce soit pour celles de cette étude ou pour celles publiées par ailleurs. Grâce à cette corrélation, nous avons eu la possibilité de corriger l'échelle d'âge proposée pour la carotte BLKS 98-11.

Les pics de carbonates de l'unité III s'étendent entre 11 700 et 10 600 ans BP et 10 200 à 8900 ans BP, périodes correspondant aux épisodes chauds Allerød et Préboréal. La diminution de carbonates de 10 600 à 10 200 ans BP correspond au refroidissement pendant le Younger Dryas.

Nous pouvons lier les épisodes caractérisés par des pics des carbonates aux périodes de réchauffement du climat, à la migration de la pycnocline dans le bassin ou à une combinaison de facteurs. Si la migration de la pycnocline était le facteur important, nous pouvons estimer que l'installation de l'anoxie dans le bassin a pu commencer à partir des zones très profondes du bassin, aux alentours de 12 000 ans.

**Tableau 3.1.** Analyses de taux de carbonates des sédiments des carottes **BLKS 98-04, BLKS 98-06, BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-10, BLKS 98-11, BLKS 98-22**

BLKS 98-04		BLKS 98-06		BLCP 98-09 (pilote) & BLKS 98-09			BLKS 98-10		BLKS 98-11		BLKS 98-22	
niveau (cm)	carbonates %	niveau (cm)	carbonates* %	carotte	niveau (cm)	carbonates %	niveau (cm)	carbonates** %	niveau (cm)	carbonates %	niveau (cm)	carbonates %
10-11	62,93	1-3	61,32	CP-09	0-1	65,17	0	48,19	2,5-3,5	68,23	3,0	42,91
12-13	62,37	7-8	51,35	CP-09	9-10	64,24	12	9,31	7,1-8,1	61,45	4,5	37,37
22-24	37,05	10-12	54,82	CP-09	19-20	29,76	22	11,01	9,8-10,8	60,93	5,0	37,55
26-27	34,06	15,5-16,5	54,40	CP-09	29-30	28,66	30,5	9,34	12,1-13,1	59,88	7,5	35,34
30-31	20,14	18-20	51,04	CP-09	39-40	31,59	38,5	13,71	14,5-15,5	62,29	9,5	34,36
41-43	22,22	35-37	26,61	CP-09	44-45	31,43	42,5	39,09	16,7-17,7	71,39	12,0	33,47
54,5-55,5	20,46	43,5-44,5	23,83	KS-09	13,5-14,5	41,62	48,5	37,30	19,2-20,2	40,61	14,5	31,43
65-66	19,84	48-49	22,34	KS-09	17,5-18,5	36,25	58,5	51,62	21,6-22,6	39,59	16,5	30,82
73-74	22,7	48,51	22,93	KS-09	24-25	23,89	68,5	61,75	24,1-25,1	46,79	18,5	27,40
78-79	23,72	50-52	26,60	KS-09	35-36	23,79	78,5	58,94	26,5-27,5	25,57	20,5	25,83
		58-59	23,13	KS-09	45,5-46,5	21,32	89,5	22,10	28,8-29,8	27,90	23,0	23,55
		64-65	25,77	KS-09	50-52	20,83	98,5	23,55	31,1-32,26	26,75	25,0	26,03
		70-72	26,14	KS-09	55-56	19,59	108,5	31,15	33,4-34,4	27,06	26,5	34,43
		73-74	23,58	KS-09	114,5-115,5	18,76	118,5	42,70	35,7-36,7	26,61	27,0	29,87
		80-82	29,01	KS-09	134-135	15,19	128,5	37,53	38-39	29,41	30,5	2,93
		90-92	25,42	KS-09	148,5-149,5	13,76	139,5	31,72	40,4-41,4	27,11	32,5	15,95
		100-102	28,92	KS-09	150-152	14,43	148,5	21,86	42,6-43,6	26,15	37,5	45,83
		110,5-111,5	17,95	KS-09	154,5-155,5	14,63	158,5	18,83	44,9-45,9	27,30	38,5	38,22
		120-121	26,66	KS-09	188-189	16,29	170,5	14,59	47,1-48,1	33,18	41,5	13,64
		121-122	18,85	KS-09	192-193	18,88	179,5	13,68	49,5-50,5	32,33	51,5	27,1
		125-126	31,05	KS-09	193,5-194,5	19,46	189,5	13,13	51,8-52,8	30,19	57,5	13,64
		128,5-129,5	21,77	KS-09	224,5-225,5	15,26	199,5	11,75	54-55	27,88	62,5	9,65
		144-146	26,46	KS-09	227,5-228,5	14,98	209,5	10,40	56,4-57,4	29,59	75,5	12,12
		154-156	25,72	KS-09	246,5-247,5	14,80	219,5	7,65	58,7-59,7	45,14	81,5	5,26
		163-165	30,69	KS-09	667,5-668,5	20,04	229,5	6,80	61,2-62,2	28,15	88,5	7,64
		174-176	24,95	KS-09	824-825	19,76	239,5	7,15	63,5-64,5	30,02	89	12,05
		190-192	28,50	KS-09	834-835	18,66	250,5	11,15	65,9-66,9	20,76	90	20,56
		200-202	51,03				260,5	7,69	68,3-69,3	21,80	91,5	5,81
		210-212	37,31				269,5	7,23	75-76	29,57	92	22,86
		220-222	31,17				279,5	8,41	80-81	35,13	93	19,95
		230-232	28,39				289,5	7,90	85-86	55,69	93,5	10,3
		240-242	30,10				299,5	12,77	90-91	57,13	96,5	8,89
		250-252	32,72				310,5	10,14	95-96	62,87	100,5	15,07
		260-262	29,17				322	7,27	100-101	59,20	105,5	10,47
							330	8,91	105-106	64,69	112,5	7,63
							339	8,57	110-111	67,03	120,5	15,37
							350	11,27	115-116	68,81	135,5	13,4
							360	10,06	120-121	69,19	145,5	18,66
							370	9,72	125-126	72,47	148,5	15,77
							380	9,06	130-131	74,66	158,5	18,91

\* mesures de F. André, 1999

\*\*mesures de C. Major, 2000

BLKS 98-10		BLKS 98-11		BLKS 98-22	
niveau (cm)	carbonates** %	niveau (cm)	carbonates %	niveau (cm)	carbonates %
390	11,42	146-147	54,55	166,5	18,93
403	10,93	156-157	28,56	185,5	18,05
415	10,30	166-167	27,00	196,5	19,59
425	9,95	176-177	31,37	208,5	17,88
435	9,98	186-187	31,97	225,5	6,67
450	10,21	196-197	51,23	229,5	19,23
460	10,69	206-207	54,50	241	7,27
472	10,97	216-217	43,29	242,5	10,34
482	11,47	226-227	30,46	244,5	11,87
492	11,52	246-247	21,45	257,5	24,09
502	10,39	266-267	19,56	286,5	22,36
512	11,69	276-277	17,70	314,5	28,99
532	11,05	283-284	18,67	315,5	22,58
552	11,46	296-297	16,31	328,5	34,64
570	10,55	301-302	9,73	339,5	26,73
590	11,38	306-307	12,19	340,5	21,68
610	12,01	756-757	19,50	382,5	25,92
622	10,73	niveau (cm)	carbonates %	383,5	21,68
638	11,75	<b>BLKS 98-11</b>		412,5	21,91
660	11,05			449,5	27,1
niveau (cm)	carbonates** %			450,5	25,28
<b>BLKS 98-10</b>				464,5	22,21
				497,5	27,9
				498,5	25,66
				509,5	24,82
				534,5	25,76
				535,5	22,85
				556,5	22,24
				557,5	25,17
				597,5	26,23
				598,5	27,51
				611,5	22,58
				618,5	19,85
				621,5	25,85
				623,5	21,76
				627,5	24,85
				632,5	20,75
				652,5	30,38
				681,5	27,05
				709,5	25,02
				712,5	32,20
				niveau (cm)	carbonates %
				<b>BLKS 98-22</b>	



---

## CHAPITRE 4

# CARBONE ORGANIQUE, RAPPORT C/N, $\delta^{13}\text{C}$

La quantité et l'origine marine ou continentale de la matière organique présente dans les sédiments marins peut permettre de comprendre des caractéristiques des changements du paleoenvironnement dont le climat du passé. Après une altération et une destruction partielle de la matière organique aquatique initiale, principalement dans la colonne d'eau, seule une petite fraction (~4%) de la matière organique aquatique initiale se conserve (Emerson et Hedges, 1988). Une dégradation sélective modifie le caractère des fractions qui sont incorporées dans les sédiments de fond. L'altération peut continuer à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres sous le fond de la mer, ce qui peut correspondre à des millions d'années. Pourtant, la source et des informations environnementales sont souvent préservées dans la composition moléculaire, élémentaire et isotopique de la matière organique. Le rapport C/N et les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  sont des paramètres qui retiennent bien les informations relatives aux paléo-milieus sur de longues périodes de temps (Meyers, 1994).

### 4.1. PROBLÈMES À RÉSOUDRE

Par l'étude des propriétés de la matière organique des sédiments, nous pouvons caractériser les matières organiques et leur origine et aussi obtenir des informations sur les paléo-milieus lors du dépôt.

### 4.2. DONNÉES DE LA LITTÉRATURE

#### 4.2.1. CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

La matière organique subit beaucoup de changements entre le moment de sa synthèse et l'enfouissement dans les sédiments. La diagenèse précoce commence dans la zone euphotique des bassins aquatiques (lacs, mers ou océans), continue pendant la sédimentation des particules organiques, elle est intense dans la partie bioturbée des sédiments et beaucoup moins rapide dans le sédiment anoxique. Seuls quelques pour cents de la matière organique échappent à la

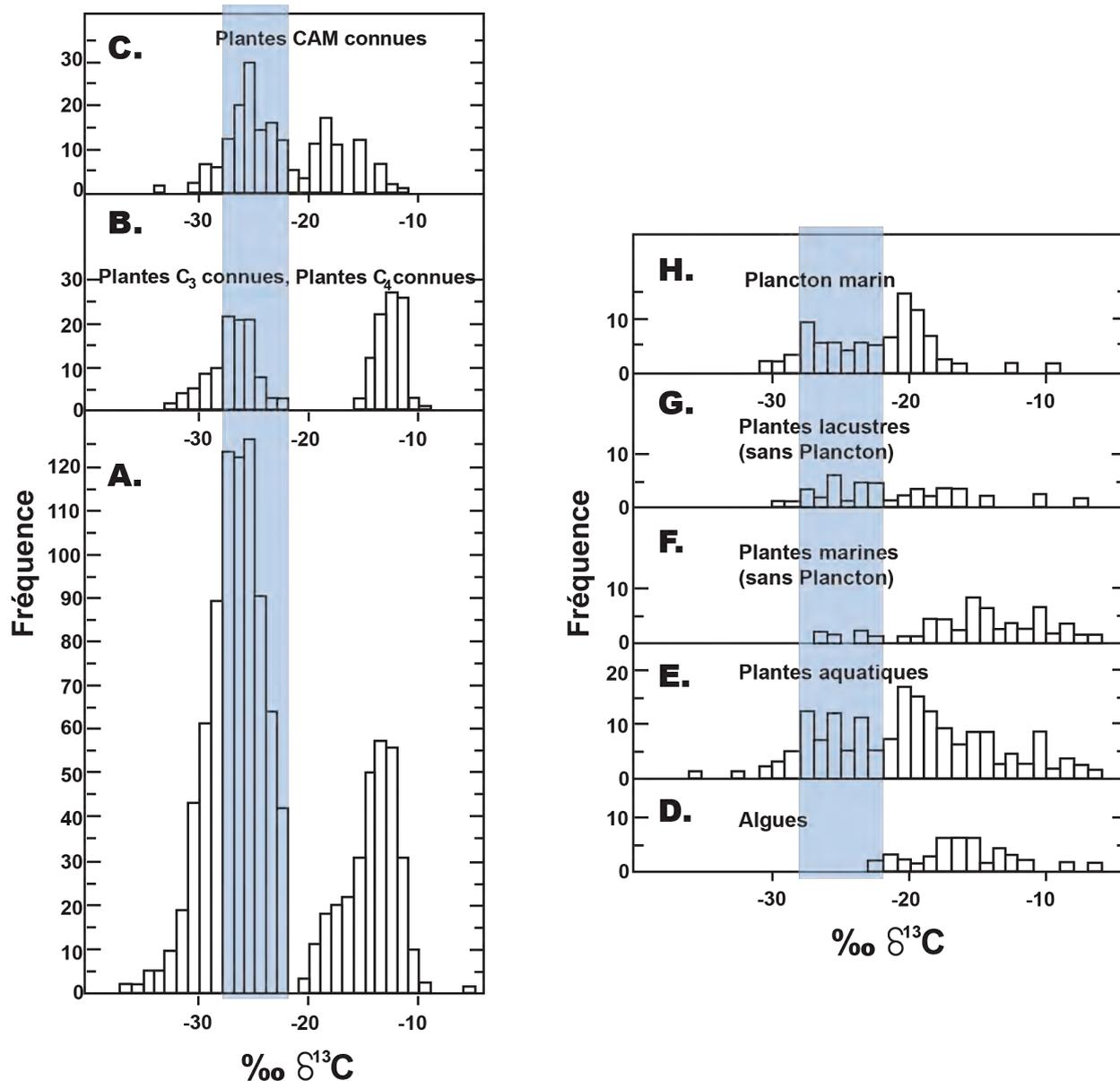
reminéralisation et sont englobés dans les sédiments (Meyers, 1994 et les références citées).

Un des sujets d'études importants consacrés aux bassins marins est l'identification des sources de matière organique (MO) dans les sédiments. Malgré la disparition d'une grande partie due à la diagenèse, deux indicateurs de son origine (marine ou continentale) peuvent être utilisés : les rapports C/N et  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  (Meyers, 1994). Si le rapport isotopique ne semble pas modifié significativement lors de la sédimentation de MO il n'en est pas de même pour le rapport élémentaire qui reste néanmoins un bon indicateur.

**Les rapports C/N** ont été souvent utilisés pour distinguer l'origine *algale* ou de *plantes terrestres* de la matière organique (par ex. Prahl *et al.*, 1980 ; Premuzic *et al.*, 1982 ; Ishiwatari et Uzaki, 1987 ; Jasper et Gagosian, 1990). Les algues ont typiquement des rapports C/N entre 4 et 10, tandis que les plantes vasculaires terrestres ont des rapports C/N  $\geq 20$  (**Tableau 4.1**). Néanmoins, la dégradation préférentielle de molécules azotées des algues entraîne parfois une augmentation du rapport C/N au-delà de 15. Cette distinction est due à l'absence de la cellulose dans les algues, mais à son abondance dans les plantes continentales.

**Les rapports  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$**  permettent de distinguer entre les sources constituées de *plantes marines* ou *continentales*, et aussi de déceler entre *différents types de plantes terrestres* qui sont à l'origine de la matière organique du sédiment.

La plupart des plantes photosynthétiques incorporent le carbone dans la matière organique par le biais du cycle  $\text{C}_3$  – Calvin-Benson, ce qui produit une variation de ~-20‰ du  $\delta^{13}\text{C}$ , par rapport à la source inorganique de carbone (**Tableaux 4.1 et 4.2**). D'autres plantes utilisent le cycle  $\text{C}_4$  – Hatch et Slack, qui produit un changement d'environ ~-7‰. En conséquence, la *matière organique* produite à partir du



**Fig.4.1.** Composition isotopique du carbone fixé par la photosynthèse. A. Plantes terrestres ; B. Plantes **C<sub>3</sub>** et **C<sub>4</sub>** ; C. Plantes CAM ; D. Algues ; E. Plantes aquatiques ; F. Plantes marines sans plancton ; G. Plantes lacustres sans plancton ; H. Plancton marin (compilation par Deines, 1980). Les zones d'ombre représentent l'intervalle de variations des valeurs rencontrées lors de cette étude

CO<sub>2</sub> atmosphérique ( $\delta^{13}\text{C} \approx -7\text{‰}^{18}$ ) par les plantes continentales C<sub>3</sub> à une valeur moyenne du  $\delta^{13}\text{C}$  d'environ  $-27 \pm 3\text{‰}$  (PDB<sup>19</sup>) et celles utilisant le cycle C<sub>4</sub>  $-14 \pm 3\text{‰}$  (O'Leary, 1988) (**Fig.4.1B**).

<sup>18</sup> Cette valeur moyenne du  $\delta^{13}\text{C}$  atmosphérique est valable en l'absence d'activité industrielle, tout en sachant que depuis la révolution industrielle et l'utilisation massive de combustible fossile ( $\delta^{13}\text{C} \sim -26\text{‰}$ ), le  $\delta^{13}\text{C}$  atm est en diminution continue : de  $-6,7\text{‰}$  en 1956 à  $-7,9\text{‰}$  en 1982 (Keeling *et al.*, 1979 ; Mook *et al.*, 1983).

<sup>19</sup> Les taux d'isotopes de carbone stable sont présentés en fonction de PDB (pour **Pee Dee Belemnite**), un standard obtenu à partir du rostre d'une bélemnite marine fossile du Crétacé, *Belemnitella americana*, de la formation Pee Dee de Carolina de Sud. Ce matériel a un rapport <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C plus grand que presque toutes les autres substances naturelles à base de carbone. Par commodité, il est considéré comme

Une autre voie photosynthétique intermédiaire associant les cycles C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> a été mise en évidence chez les crassulacées, notamment. Ces plantes CAM<sup>20</sup>, présentent une composition isotopique oscillant entre les deux pôles à savoir  $-38\text{‰}$  s'il y a 100% de fixation du CO<sub>2</sub> par le cycle de Calvin<sup>21</sup> et  $-9\text{‰}$  pour 100% de fixation par la voie synthétique de Hatch et Slack<sup>22</sup> (Bender, 1971 ; Osmond, 1975) (**Fig.4.1C**).

ayant la valeur zéro du  $\delta^{13}\text{C}$  ce qui donne des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  négatifs aux presque toutes autres substances naturelles

<sup>20</sup> **C**rassulacean **A**cid **M**etabolism

<sup>21</sup> suivi pendant le jour

<sup>22</sup> suivi pendant la nuit

En milieu aqueux, le carbone minéral est présent essentiellement sous trois formes chimiques ( $\text{CO}_{2\text{aq}}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ) généralement à l'équilibre.

La composition isotopique du phytoplancton marin est dépendante de la solubilité du  $\text{CO}_2$  donc indirectement de la température de l'eau : les plus petites valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  ont été mesurées pour les échantillons collectés aux hautes latitudes où les basses températures permettent les fortes concentrations en  $\text{CO}_2$  dissous ( $\text{CO}_{2\text{aq}}$ ) (Deines, 1980 et les références citées ; Fontugne et Duplessy, 1981, Rau *et al.*, 1989, Bentaleb *et al.* 1998) (voir aussi la **Fig.4.1H**). Ainsi, les rapports  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  du phytoplancton varient de  $-30\text{‰}$  dans les mers polaires à  $-15\text{‰}$  dans l'océan tropical. Cependant, dans les zones de fortes productivités, l'équilibre chimique entre  $\text{CO}_{2\text{aq}}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  peut être rompu, entraînant une augmentation significative du rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ . Cet effet de productivité peut être très marqué en milieu lacustre quand les nutriments sont abondants.

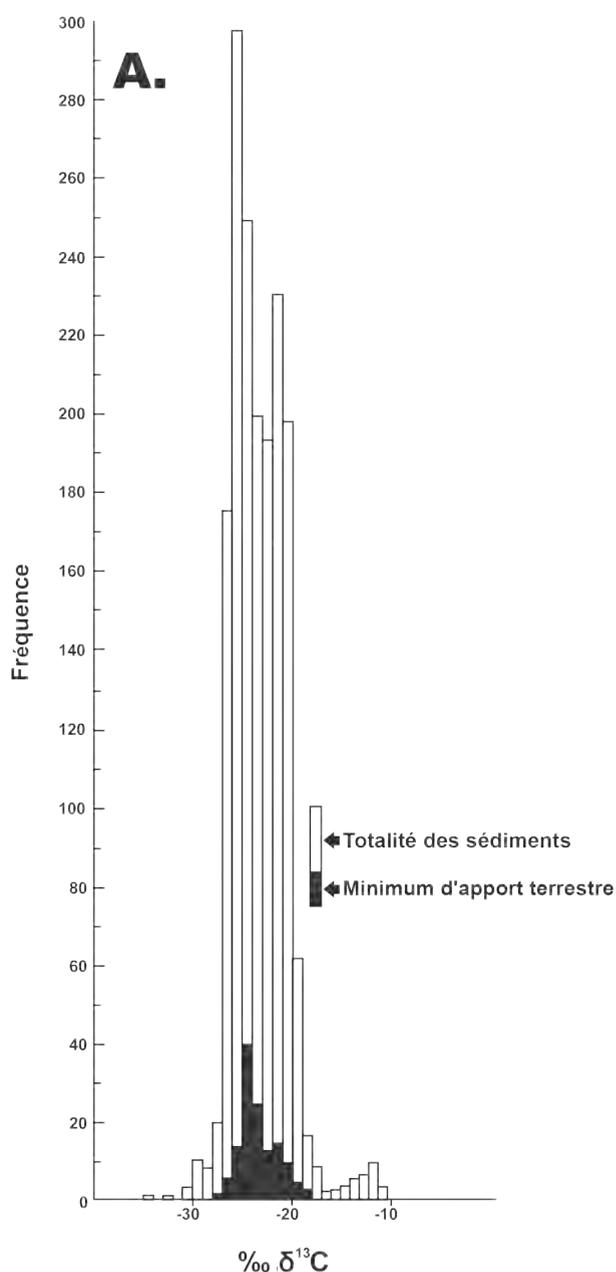
Les algues d'eau douce utilisent le  $\text{CO}_2$  dissous qui est, en général, en équilibre avec le  $\text{CO}_2$  atmosphérique. En conséquence, la composition isotopique de la matière organique dérivée de plantes lacustres ne peut pas être distinguée de celle des plantes provenant des bassins de drainage adjacents. La source de carbone inorganique des algues marines est le  $\text{CO}_2$  dissous, qui a une valeur  $\delta^{13}\text{C} \sim 0\text{‰}$ . La matière organique marine a en conséquence des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  entre  $-22$  et  $-20\text{‰}$  (**Tab. 4.1**). La différence de  $\sim 7\text{‰}$  entre la matière organique produite par les plantes  $\text{C}_3$  et les algues marines a été utilisée avec succès pour identifier les sources et la distribution de la matière organique dans les sédiments côtiers océaniques. Néanmoins, compte tenu des grandes variations du rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  du phytoplancton, il est difficile d'identifier l'origine des matières organiques par sa seule mesure, particulièrement en milieu côtier recevant à la fois de la matière organique des algues et des plantes  $\text{C}_3$  et  $\text{C}_4$  (**Fig.4.1**). Dans de tels environnements le couplage des valeurs C/N et  $\delta^{13}\text{C}$  permettent une meilleure distinction entre les sources de matière organique (Meyers, 1994 et les références citées).

Indiquons aussi que les *carbonates marins* ont des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  variant de 0 à  $-5\text{‰}$  et ceux d'eau douce de 0 à  $-10\text{‰}$  (Wickman, 1952 ; Craig, 1957).

La compilation des analyses isotopiques du carbone organique des *sédiments marins* indiquées dans la littérature montre que les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  varient entre  $-10$  et  $-30\text{‰}$ , plus de 90% des échantillons possédant des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  comprises entre  $-20$  et  $-27\text{‰}$  (**Fig.4.2**).

En représentant le rapport C/N en fonction du  $\delta^{13}\text{C}$ , on obtient quatre groupes de valeurs, caractéristiques pour la matière organique des algues marines, des algues lacustres ou des plantes  $\text{C}_3$  et  $\text{C}_4$  (**Fig.4.3**).

Toutefois quand on fait des estimations des sources de la matière organique des sédiments, il faut toujours prendre

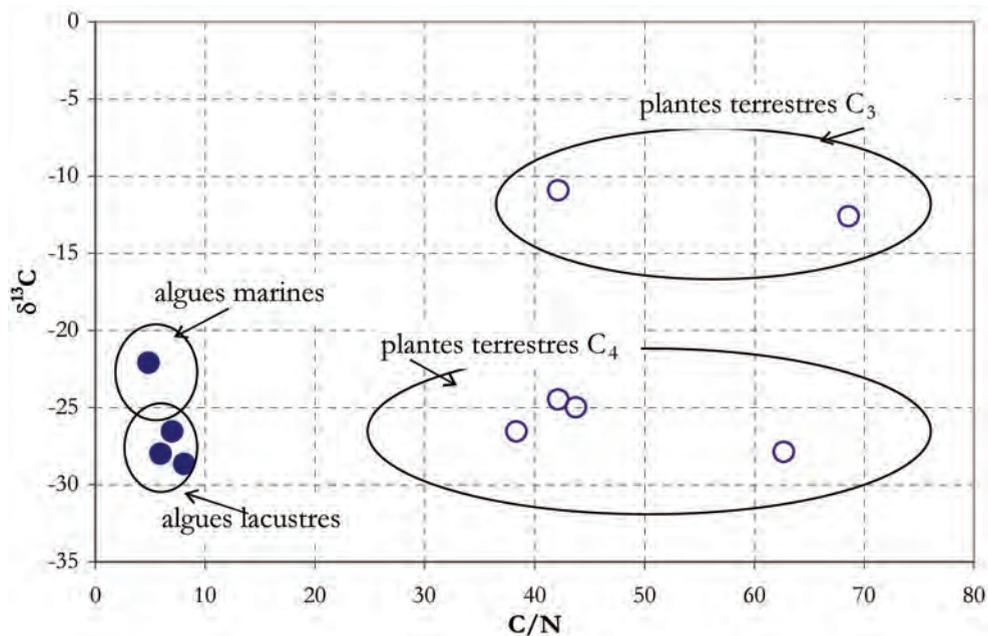


**Fig.4.2.** Composition isotopique des sédiments marins récents (compilation par Deines, 1980)

en considération l'influence possible de la diagenèse sur la qualité de la matière qui est analysé (Meyers, 1994).

#### 4.2.2. TAUX DE CARBONE ORGANIQUE ET RAPPORT $\delta^{13}\text{C}$ DANS LES SÉDIMENTS DE LA MER NOIRE

Dans la littérature, nous pouvons trouver des informations sur les taux de Carbone organique et du rapport  $\delta^{13}\text{C}$  des sédiments de la Mer Noire à partir années 1970. Mais, jusqu'à présent, il n'y avait pas de données du rapport atomique C/N pour les sédiments de la Mer Noire.



**Fig.4.3.** Sources de la matière organique distinguées en fonction des rapports C/N et  $\delta^{13}\text{C}$  (d'après Meyers, 1994).  
Cercles pleins = algues, cercles vides = plantes terrestres

Degens et Ross, 1970, 1972, et Ross et al., 1970, présentent pour la première fois des taux de carbone organique et le rapport  $\delta^{13}\text{C}$  le long de la carotte 1474 K situé au sud-est du bassin de la Mer Noire à 2117 m profondeur (expédition *Atlantis II*). Ils montrent que le carbone organique et l'azote organique augmentent lentement de haut vers le bas de la carotte et jusqu'à 25 cm pour ensuite augmenter rapidement et atteindre un maximum de 20% pour le carbone (1% pour l'azote organique) à 55 cm (pour les variations de carbone organique voir la **figure 3.7a** du chapitre antérieur). Ensuite, les valeurs diminuent abruptement jusqu'à des valeurs minimales vers 75 cm. Ces changements sont attribués par les auteurs aux importantes modifications des milieux physique et chimique de la Mer Noire. Pour la position chronologique de l'intervalle à fortes variations, on dispose de deux dates  $^{14}\text{C}$  :  $2900 \pm 140$  ans BP à environ 25 cm et  $7140 \pm 180$  ans BP à ~67 cm. Degens et Ross, 1970, montrent que l'origine de la matière organique déposée il y a 7000 ans est indiquée par un rapport  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-26\text{‰}$  (PDB), comme étant d'eau douce, tandis que le rapport de  $-21\text{‰}$  d'il y a 3000 ans indique une origine marine, en accord avec les données paléontologiques.

Deuser, 1970a, présente une combinaison des mesures de  $\delta^{13}\text{C}$  et de contenu en sulfures dans les eaux. Il les compare avec les taux de  $\text{CO}_2$  dans ces eaux pour démontrer que la contribution du soufre organique au  $\text{H}_2\text{S}$  est de 3 à 5% et augmente avec la profondeur dans la colonne d'eau. Il donne aussi des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  du carbone inorganique dissous dans l'eau de la Mer Noire à diverses profondeurs :  $-4\text{‰}$  à 500 m,  $-5,5\text{‰}$  à 1000 m,  $-6,5\text{‰}$  à 1500 m.

Deuser, 1970b montre que sur une large surface de la Mer Noire, les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  du plancton sont uniformes, autour de  $-23\text{‰}$ . Ces valeurs étant typiques pour le plancton des eaux froides, de pH d'environ 8 et des concentrations de  $\text{CO}_2$  très basses. Par rapport au plancton, les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  des diatomées sont enrichies (plus légères) de  $1,5\text{‰}$ , fait attribué à la brièveté de leur bloom par rapport au temps nécessaire pour une transformation totale du carbone de la cellule dans le zooplancton.

Dans son papier de 1972, Deuser présente des analyses des isotopes d'oxygène et de carbone sur les carbonates et des analyses d'isotopes de carbone de la matière organique le long de la même carotte 1474 K. L'interprétation de ces résultats est que la Mer Noire a été un lac d'eau douce ou saumâtre entre 17000 et 9000 ans BP. Les isotopes d'oxygène ont permis à l'auteur de détecter les premiers signaux d'augmentation de la salinité, 1500 à 2000 ans avant le début de déposition du sapropèle. Cet intervalle semble être la période entre le premier influx des eaux de la Méditerranée, après le dernier maximum glaciaire et l'installation de l'anoxie sur le fond du bassin. Il observe aussi la tendance générale d'augmentation des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  de la matière organique, du bas vers le haut du sapropèle.

Dans un papier de synthèse basé sur l'analyse d'échantillons de sédiment récoltés entre 1948 et 1968 par des spécialistes russes, Shimkus et Trimonis (1974) présentent des données de carbone organique et de la productivité des eaux de la Mer Noire, des tableaux de taux de matériel organique transporté par les fleuves dans le bassin ainsi que des cartes de distribution de la matière organique et de la productivité primaire. Ces auteurs montrent que dans le bassin de récep-

tion, le matériel organique est transporté en suspension et en solution : dans les fleuves de plaines (principalement à l'état dissous) et dans les fleuves de montagnes (principalement en suspension, jusqu'à 95%). **Le principal fournisseur de matériel organique *in situ* est le phytoplancton**, la production annuelle de matière organique à base de phytoplancton étant 10 fois plus grande que celle apportée par les fleuves et environ 50 fois plus grande que la production à base de macrophytes. Ces auteurs présentent aussi une carte de distribution de la production de matériel organique dans le bassin, qui montre que la plus grande quantité du matériel organique est produite dans les zones de côte de nord-ouest (0,5-1,0 g C/m<sup>2</sup>/jour), du Caucase et au-dessous des branches de courant cycloniques autour de Kerch et dans la partie centrale de la mer. Les régions déficientes en oxygène sont caractérisées par des productions faibles de matière organique. La production primaire maximale dans la zone du nord-ouest est évidemment liée à l'apport abondant des nutriments par le Dniepr, le Danube et d'autres fleuves.

Le développement massif du phytoplancton est lié à la croissance intense de plusieurs groupes de plantes: diatomées, dinoflagellés et coccolithophores. Les plus abondantes sont les dinoflagellés, avec une croissance maximale pendant l'été.

Dans les eaux peu profondes, le matériel organique provient aussi du phytobenthos, et, en petites quantités, du zoobenthos. Le phytobenthos est constitué des algues vertes, marrons, et rouges et aussi par des plantes à fleurs comme *Zostera*<sup>23</sup>. Parmi les algues, un rôle dominant est joué par *Phyllophora nervosa*, concentré principalement dans la zone nord-ouest, qui représente environ 90% de la biomasse totale (Zenkevich, 1963 cité dans Shimkus et Trimonis, 1974). A des profondeurs de 20-60 m, la production annuelle de *P.nervosa* est de l'ordre de 10 millions de tonnes<sup>24</sup>.

Dans les eaux profondes, la source principale de matériel organique est la production de phytoplancton suivie par l'humus terrigène. Les auteurs montrent qu'il n'y a pas de corrélation entre la production de phytoplancton et le contenu de matière organique dans les sédiments: les zones de contenu élevé en matière organique correspondent aux zones de productivité faible et vice-versa. Une influence sur cette distribution de la matière organique dans les sédiments est celle de la présence de la zone à H<sub>2</sub>S et aussi la dilution par l'apport des sédiments argileux.

*Simoneit, 1977*, analyse la matière organique soluble de 4 carottes à travers de la Mer Noire. Il montre que le conte-

nu de carbone organique des échantillons varie entre <1 et ~20%. Les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  des lipides des échantillons des unités 2 et 3 contenant des composés terrigènes sont dans l'intervalle observé pour la matière organique non-marine (y compris lacustre) : -22 à -28‰. Ceci, ainsi que la prédominance des lipides marqueurs terrigènes, indique que le 'bulk' de la matière organique soluble dans des solvants présente un apport terrigène. La conclusion est que la Mer Noire est un 'évier pour les lipides terrigènes'. Néanmoins le nombre d'échantillons analysés dans chaque carotte est très réduit (1 à 3 échantillons/carotte), le nombre total des échantillons analysés étant 8. L'auteur tire des conclusions très générales à partir de 8 échantillons (1 dans l'unité 2, et 7 dans l'unité 3, pour 4 carottes).

Pendant la même année, *Pelet et Debyser, 1977* publient une étude de la géochimie de 6 échantillons de sédiments de la Mer Noire: 4 de l'unité 2 et 2 de l'unité 3. Les échantillons proviennent de 3 des 4 carottes analysées par Simoneit. Ils montrent que leurs analyses indiquent une origine semblable de la matière organique dans les deux faciès: une origine mixte, avec une contribution marine un peu plus importante que la terrigène. Cette conclusion est opposée à celle de Simoneit. La quantité de carbone organique présente dans le faciès euxinique (l'unité à sapropèle) est 10 fois plus grande que celle du faciès appelé par les auteurs 'normal oxygéné' (l'unité 3). Des explications possibles étant un apport organique plus grand, des taux de sédimentation plus élevés ou une meilleure conservation de la MO pendant la sédimentation.

Une étude des indicateurs de la productivité dans le bassin de la Mer Noire a été réalisée par *Glenn et Arthur, 1985*; ils ont calculé les taux d'accumulation du carbone organique et du phosphore total et réduit, à partir de trois carottes sédimentaires. Une de leurs conclusions est que la productivité primaire dans le bassin a été plus grande au début du dépôt de l'unité à sapropèle, quand les eaux de la Méditerranée avaient commencé leur entrée par le Bosphore. Cette productivité a diminué probablement vers 5000 ans BP due à l'accentuation de la stratification des eaux et de l'installation de l'anoxie. De même, une amélioration de la conservation de la matière organique a été observée.

*Calvert et Fontugne, 1987* présentent et discutent les analyses de taux de carbone organique et carbonates et des  $\delta^{13}\text{C}$  sur la matière organique des carottes analysées par Calvert, Vogel et Southon (1987). Ils ont analysé principalement les unités I et II, une petite partie de l'unité III et une coulée de sédiment intercalée entre les unités I et II. Les auteurs montrent que la matière organique du sapropèle est principalement d'origine marine, tandis que l'unité I contient un mélange de matière d'origine terrestre et marine. Le sapropèle est formé, selon eux, comme le résultat d'une augmentation de la productivité planctonique pendant la transition du bassin des conditions lacustres aux conditions marines. La productivité est ensuite diminuée, et les conditions actuelles ne sont plus favorables à la formation du sapropèle.

<sup>23</sup> plantes marines, herbacées, généralement vivaces, à feuilles en forme de rubans, très longues et étroites (1 cm de large environ), de couleur vert brillant; les fleurs sont encloses dans les gaines à la base des feuilles; le nom dérive du grec *zoster*, ruban, en référence à la forme des feuilles

<sup>24</sup> de 10<sup>7</sup> tonnes dans les années 1950, la population de *P.nervosa* de la Mer Noire, a subi une sévère diminution: en 1980, la biomasse totale a diminué à 14\*10<sup>5</sup> tonnes et en 1990 à 3-5\*10<sup>5</sup> tonnes; la diminution est très importante sur le shelf nord-ouest de la Mer Noire

Les intervalles de variations des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  sont -23 à -27‰ comme l'intervalle des valeurs que l'on a obtenu dans l'étude présente. La composition isotopique du carbone semble indépendante du contenu de carbone organique. Selon les auteurs, cela est dû au fait que la diagenèse n'a pas d'influence visible sur les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$ .

Calvert, Vogel et Southon (1987) datent avec du radiocarbone les carottes 1432 et 1474 (position sur la **figure 3.6** de chapitre 3) prélevées pendant l'expédition *Atlantis II*, (respectivement de profondeurs 2238 m et 906 m). Leur but est de déterminer les flux d'enfouissement (*angl.* burial fluxes) du carbone organique des unités II et I. Le taux d'accumulation du carbone dans le sapropèle calculé par les auteurs est: deux fois plus grand que celui du faciès marin moderne d'eau profonde (unité I) et presque égal avec celui du faciès moderne d'eau peu profonde. Ces différences dans les taux d'accumulation du carbone indiquent probablement que le sapropèle a été formé à la suite d'une augmentation de la productivité dans les eaux pendant la transition à la phase marine. Ceci est en accord avec le signal isotopique marin marqué du carbone de la matière organique du sapropèle, en contraste avec la source mixte du carbone des autres faciès.

Hay *et al.* (1990), ont mesuré le flux vertical actuel des particules dans la colonne d'eau, pendant 4.5 ans, à l'aide des pièges à sédiment. Ils ont choisi deux locations de la partie sud-ouest du bassin, à 40 et 80 km de la côte. Ils ont mesuré, entre autres paramètres, la quantité de carbone organique accumulée pendant une année. Elle varie de 8,4-10,2 % à 250 m de profondeur dans la colonne d'eau, à 13,2-14,5% à 1200 m. Le flux de particules varie de moins de 1 mg/m<sup>2</sup>/jour à plus de 480 mg/m<sup>2</sup>/jour. Il varie aussi en fonction de la distance de la côte : pour le site à 80 km de la côte il a été dominé par les blooms algaires, tandis que pour le site à 40 km de la côte, il a été beaucoup plus influencé par les apports de matériel terrigène suite aux tempêtes et par les fleuves.

Calvert *et al.* (1991) estiment les taux d'accumulation du carbone organique pour trois carottes issues de l'expédition du *N/O Knorr*, en 1988. Les carottes se trouvent à des profondeurs de 198, 2087 et 2218 m dans la partie centrale-sud, centrale et centrale-ouest du bassin. Ils utilisent des dates <sup>14</sup>C AMS obtenues pour la fraction organique des sédiments récents. Les taux observés : 0,69 à 2,09 g .C m<sup>-1</sup> ans<sup>-1</sup> sont significativement plus bas que ceux estimés antérieurement à partir du comptage des lamines. Comparant avec les valeurs des milieux oxygénés actuels, les auteurs observent que la Mer Noire n'est pas un endroit d'accumulation anormale du carbone organique. Ceci suggère que les conditions d'anoxie de la colonne d'eau ne sont pas obligatoirement similaires aux conditions nécessaires pour la préservation de la matière organique dans les sédiments marins. En conséquence, les modèles de la formation des sédiments carbonatés dans les enregistrements géologiques ont probablement besoin de modifications.

Fry *et al.* (1991) ont essayé d'évaluer l'importance des bactéries chemosynthétiques pour les cycles de carbone, d'azote et du soufre, dans la Mer Noire. Pour cela, ils ont analysé la matière organique en suspension et aussi la matière organique dissoute, dans la colonne d'eau, à l'interface oxic/anoxique. Les résultats montrent une valeur de -23‰ pour le  $\delta^{13}\text{C}$  des suspensions et de la matière organique dissoute, composition isotopique similaire au phytoplancton, sans composantes distinctives pouvant suggérer une origine chemosynthétique du carbone. Ceci indique soit que la quantité de biomasse des bactéries chemosynthétiques dans les zones d'interface oxic/anoxique est réduite par rapport à la quantité de phytoplancton, soit que les bactéries chemoautotrophes ont une composition similaire à celle du phytoplancton.

Des analyses des taux de carbone organique sur les sédiments sont utilisées par Arthur *et al.*, 1994, pour calculer les taux d'accumulation du carbone organique dans les zones profondes du bassin. Ils remarquent que les taux d'accumulation dans l'unité I (3,5-4,5 g m<sup>-2</sup> ans<sup>-1</sup>) sont supérieurs aux ceux de l'unité II. Ils estiment aussi l'apport terrestre de matière organique dans les sédiments, à plus de 25%, dans l'unité I. L'estimation est faite à partir de l'antithèse entre les taux d'accumulation de carbone organique et des carbonates, corrélés avec la pyrolyse et les analyses isotopiques de la matière organique.

### 4.3. MÉTHODE

Afin d'analyser les caractéristiques de la matière organique des sédiments, nos échantillons ont d'abord été nettoyés des carbonates minéraux par un traitement de plusieurs jours à l'acide chlorhydrique faiblement concentré (0,3 N) de manière à ne pas hydrolyser la matière organique. Les sédiments séchés immédiatement après l'échantillonnage à 50°C pendant au minimum 48 heures, ont été ensuite broyés dans un mortier en agate.

La détermination des teneurs en carbone organique, azote et le rapport <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C de la matière organique a été faite au LSCE à Gif sur Yvette. On a utilisé un analyseur élémentaire couplé à un spectromètre de masse (Fison NA1500/VG-OPTIMA). L'échantillon est introduit dans l'analyseur élémentaire où il est brûlé et transformé en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et azote (N<sub>2</sub>). Les gaz obtenus sont purifiés, séparés par chromatographie gazeuse et quantifiés, fournissant ainsi les teneurs en carbone et azote de l'échantillon. Ils sont ensuite introduits dans le spectromètre de masse où leur composition isotopique est mesurée ( $\delta^{13}\text{C}$ ), avec une précision de l'ordre de 0,1 à 0,2‰.

### 4.4. RÉSULTATS

Des mesures de concentrations en carbone organique, azote et des rapports <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ont été effectués sur 118 niveaux issus de 5 carottes dont les profondeurs sous le niveau de la mer vont de 101 à 2100 mètres (pour la localisation de carottes voir le **Tableau 2.1** et la **figure 2.1**). Nous avons disposé de 98 analyses pour le carbone organique et l'azote et 94 analyses pour le  $\delta^{13}\text{C}$  (**Tableaux 4.3 – 4.7**).

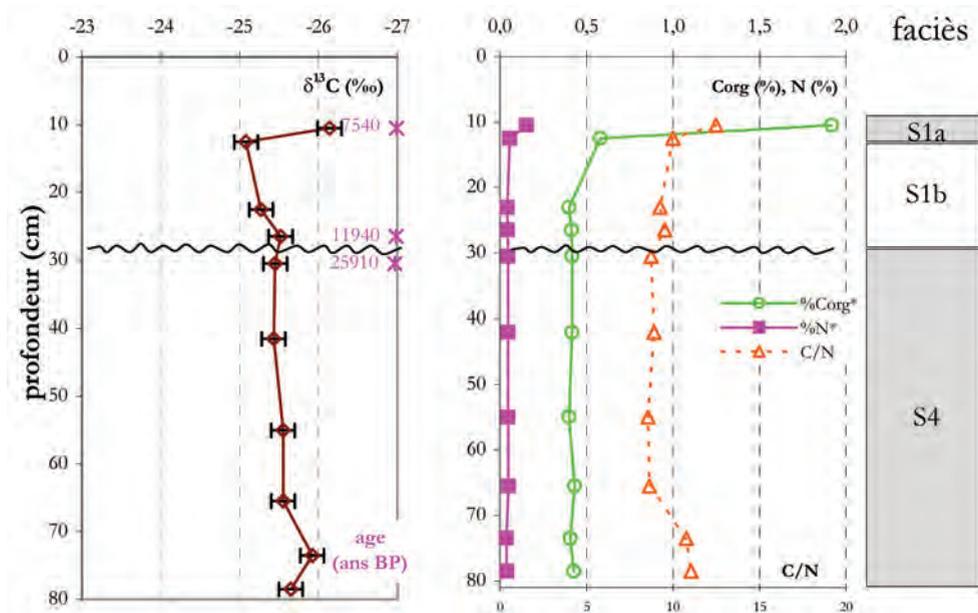


Fig.4.4. Taux de  $\delta^{13}\text{C}$ , carbone organique, azote et C/N pour la carotte BLKS 98-04 (âges conventionnels non-corrigés)

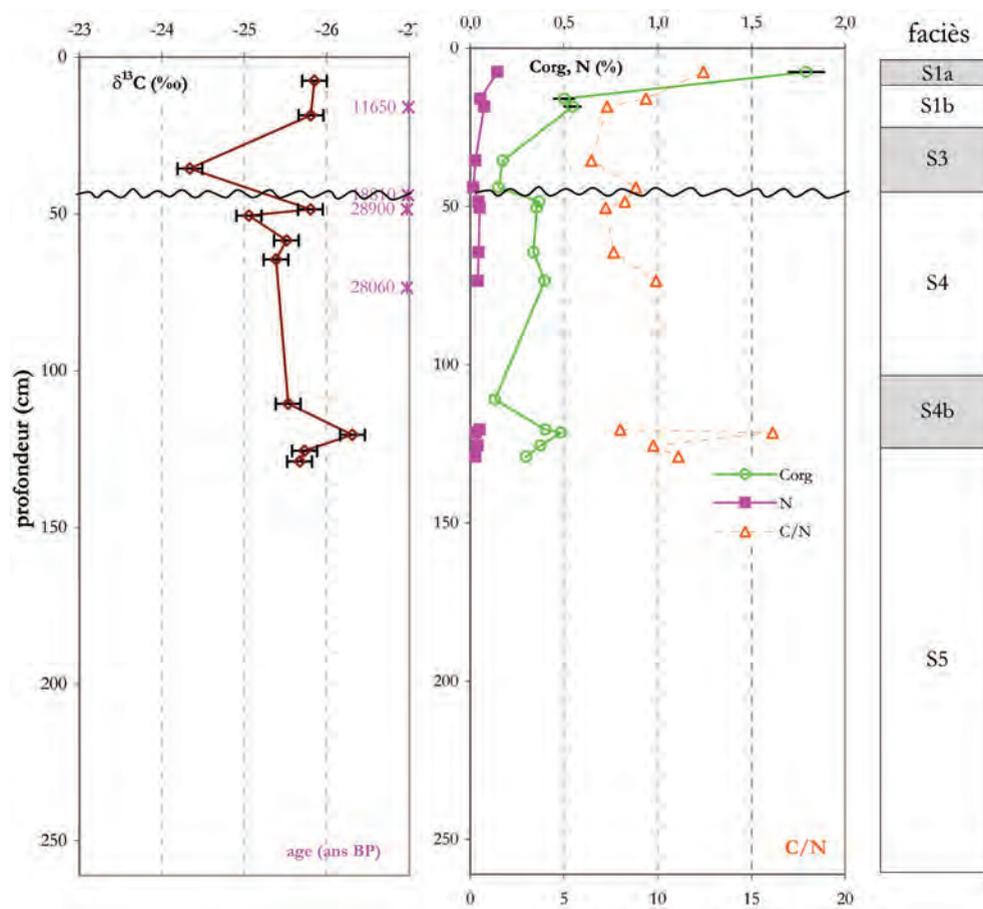
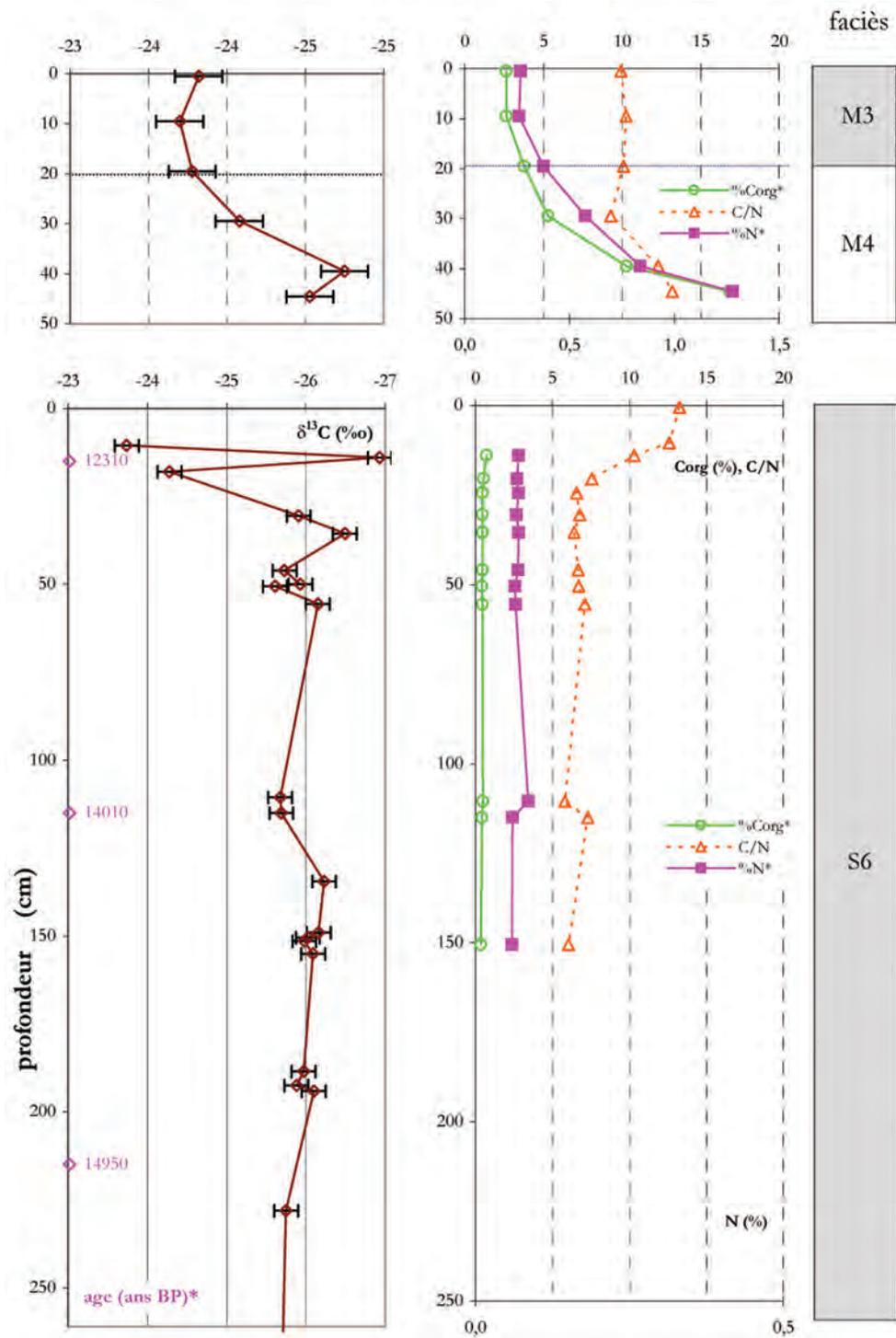


Fig.4.5. Taux de  $\delta^{13}\text{C}$ , carbone organique, azote et C/N pour la carotte BLKS 98-06 (âges conventionnels non-corrigés)



**Fig.4.6.** Taux de  $\delta^{13}\text{C}$ , carbone organique, azote et rapport C/N pour le carottier pilote BLCP 98-09 et la carotte BLKS 98-09 (\*âges  $^{14}\text{C}$  conventionnels non-corrigees, selon Major *et al.*, 2002)

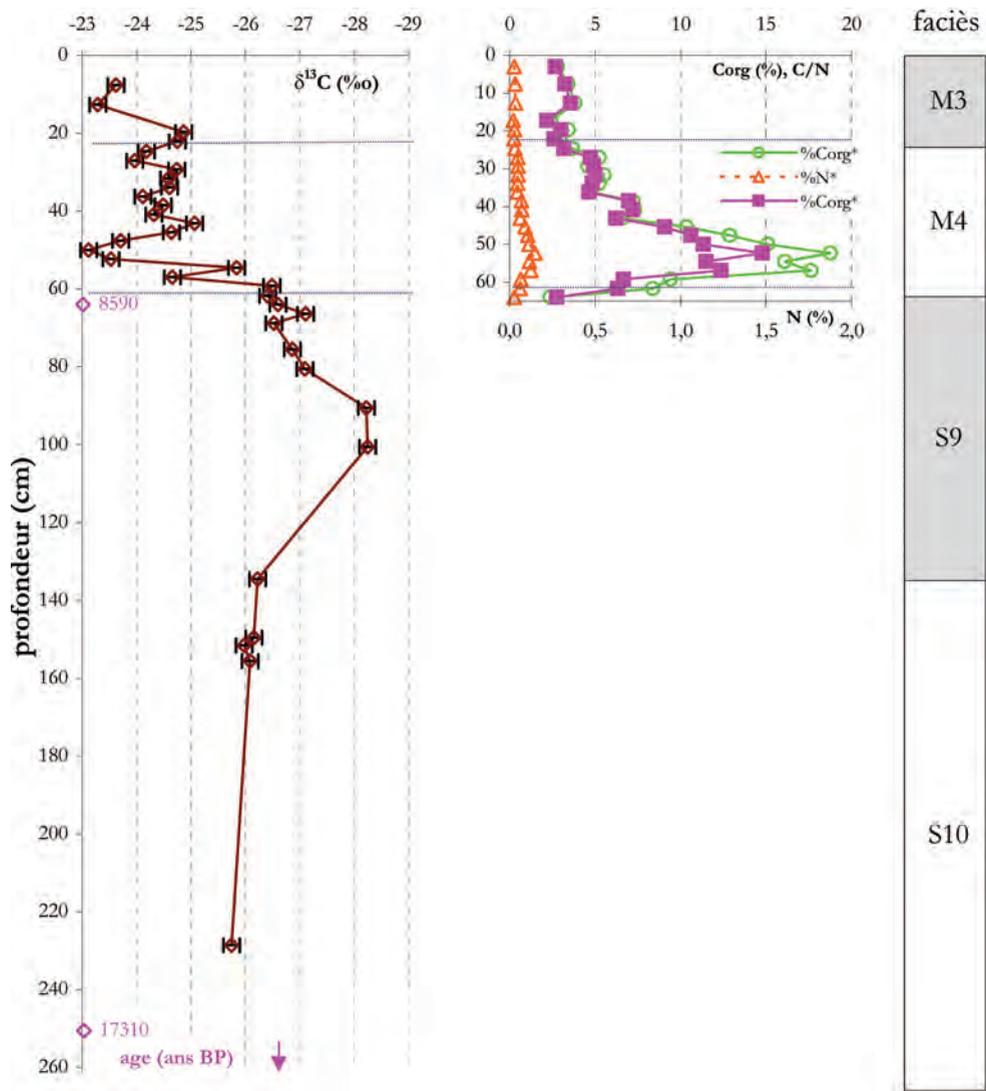


Fig.4.7. Taux de  $\delta^{13}\text{C}$ , carbone organique, azote et rapport C/N le long de la carotte BLKS 98-11 (âges conventionnels non-corrigés)

#### 4.4.1. CAROTTES PEU PROFONDES (BLKS 98-04 ET BLKS 98-06)

Pour les carottes **BLKS 98-04** et **BLKS 98-06**, le  $\delta^{13}\text{C}$  de la matière organique pour les deux carottes indique des valeurs assez constantes dans l'intervalle étroit de -26 à -25 ‰, à quelques exceptions près (**Tableaux 4.3 ; 4.4** et **Figs. 4.4 ; 4.5**).

Les taux de carbone organique et d'azote présentent la même tendance à une légère augmentation du bas vers le sommet des carottes. Cependant, leur variation est faible. Des variations plus accentuées sont observées pour le rapport C/N, surtout dans la carotte BLKS 98-06 (**Tableaux 4.3 ; 4.4** et **Figs. 4.4 ; 4.5**).

Les symboles des faciès S1 à S5 définies dans le chapitre précédent, sont aussi marqués sur les **figures 4.4** et **4.5**. Nous pouvons remarquer que les deux carottes en question ont seulement deux faciès communs : S1 (a et b) et S4, où les caractéristiques des paramètres analysés sont similaires. Nous allons décrire l'évolution de ces paramètres pour chaque faciès.

Les valeurs du **rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$**  varient peu au long des deux carottes, dans l'intervalle -26,31 à -24,34, la plupart des valeurs étant comprises entre -26 et -25. Les valeurs extrêmes sont enregistrées dans le faciès S4b (-26,31‰) et S3 (-24,34‰).

Le contenu en **carbone organique** de sédiments est en général faible (entre 0,13 et 0,58%) dans tous les faciès, à l'exception du S1a où il atteint 1,8-1,9%. Néanmoins, si dans les faciès S4 et S1b les valeurs sont relativement constantes (autour de 0,3-0,5%), les faciès S4b et S3 sont caractérisées des valeurs plus faibles, (0,13-0,17%).

L'allure de la courbe **d'azote** ressemble à celle du carbone organique, avec des valeurs faibles (entre 0,02 et 0,07%) dans tous les faciès, à l'exception du faciès S1a (avec les maxima de 0,14-0,15 %).

Le **rapport C/N** est compris entre 6,5 et 11,1 pour les faciès S5, S4, S3 et S1b, et il atteint des valeurs maximales dans les faciès S4b (16,1) et S1b (12,4 ; 12,5)

#### 4.4.2. CAROTTES PROFONDES (BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-11 ET BLKS 98-22)

Les valeurs des taux de carbone organique, azote et rapports  $\delta^{13}\text{C}$  et C/N de ces trois carottes sont présentées dans les **tableaux 4.5, 4.6** et **4.7**. La variation de ces paramètres tout comme les faciès présents sont indiqués dans les **figures 4.6, 4.7** et **4.8**.

Le long de ces trois carottes, nous avons identifié dans le chapitre précédent les faciès de pente continentale et de plaine abyssale : M3, M4, S6, S9 et S10 (**Fig.2.6b** et **c**). Les paramètres analysés varient beaucoup en fonction de ces faciès. Nous les présentons donc en tenant compte des changements de ces lithofaciès.

Dans les faciès contemporains S10 et S6 présents dans les carottes BLKS 98-11 et BLKS 98-09 les valeurs du **rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$**  sont généralement constantes et voisines de -26‰ (de -26,49 à -25,61‰). A l'exception de la partie supérieure de la carotte BLKS 98-09 où la variabilité est très grande : entre -26,93 et -23,74‰. Dans le faciès S9 les valeurs augmentent progressivement de -28,25‰ à la base jusqu'à -26,41‰ (**Figs.4.7** et **4.8**). Les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  dans le faciès M4 sont très variables, entre -26,43 et -23,12 ‰. L'intervalle de variation des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  est plus restreint pour le faciès M3, entre -25,27 et -23,74 ‰. Une augmentation des ces valeurs, du bas vers le sommet de ce faciès, a pu être observée (**Figs. 4.6, 4.7, 4.8**).

Les taux de **carbone organique** sont réduits dans les faciès S6 et S9 (entre 0,36 et 0,72% pour S6 et entre 0,06 et 0,63% pour S9), mais augmentent dans les faciès marins. Les plus grandes valeurs sont enregistrées dans la partie inférieure du faciès M4, l'intervalle de variation étant 3,69-18,76%. Le faciès M3 est caractérisé par des valeurs élevées, comprises entre 2,43 et 11,81 %. Néanmoins, elles restent toujours fortes comparées à la définition d'un sapropèle<sup>25</sup>. Dans le cas de l'unité 1, on a donc une vase sapropélique à coccolites.

L'allure des courbes **d'azote** est parfaitement similaire à celles du carbone organique. Dans le faciès S6 les valeurs sont très faibles et relativement constantes dans l'intervalle 0,06 et 0,09%. Le faciès S9 est aussi caractérisé par des valeurs faibles, comprises entre 0,06 et 0,63%. Une augmentation importante de valeurs est enregistrée dans le faciès marin M4 des trois carottes, l'intervalle de variation étant 0,32-1,48%. Les plus fortes valeurs se trouvent dans la partie base du faciès M4 à sapropèle. La vase à coccolites (faciès M3) présente des valeurs de taux d'azote comprises entre 0,22 et 1,03%.

Le **rapport C/N** est supérieur à 5,8 et inférieur à 14,25. Les plus petites valeurs sont enregistrées dans les sédiments du faciès S6, dans la carotte BLKS 98-09. Ces valeurs dépassent la valeur 10 uniquement dans la partie supérieure de ce faciès représenté par les derniers 15 cm de la carotte. Le faciès S9 présente des valeurs variables, entre 7,56 et 13,89. Comme pour les taux de carbone et azote, les plus grandes valeurs du rapport C/N sont enregistrées dans le faciès M4 à sapropèle : 9,32-14,25. M3, le faciès à coccolites, présente des valeurs relativement constantes, autour de 10 : 9,5 à 11,56.

## 4.5. DISCUSSION ET INTERPRÉTATION

Les différences lithologiques claires observées auparavant entre les carottes d'eau peu profonde (BLKS 98-04 et 06), et profonde (BLKS 98-09, 11 et 22), sont confirmées par l'analyse des propriétés de la matière organique des sédiments.

De nombreux auteurs (e.g. Cloern *et al.*, 2002 et les références citées) ont montré que, si la *matière organique* provient seulement de quelques sources ayant des signatures

<sup>25</sup> définition dans le 2-ème chapitre

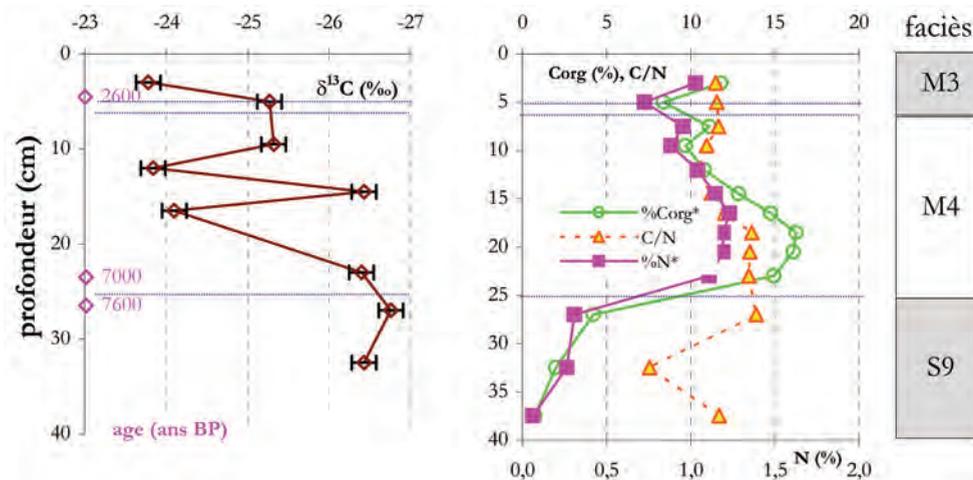


Fig.4.8. Taux de  $\delta^{13}\text{C}$ , carbone organique, azote et rapport C/N le long de la carotte BLKS 98-22 (âges conventionnels non-corrigés)

isotopiques distinctes, l'analyse des valeurs des rapports isotopiques  $\delta^{13}\text{C}$ , des taux de carbone organique, d'azote et du rapport atomique C/N considérées ensemble, peut donner des indications sur sa source probable.

Deines (1980) a effectué une compilation d'environ 1000 analyses de  $\delta^{13}\text{C}$ , dans le but d'identifier la façon dont ce paramètre varie, selon le type de plantes et selon le milieu qui ont donné la matière organique (Figs.4.1 et 4.2). L'intervalle de variation de nos données  $\delta^{13}\text{C}$  est  $-28,60 \div -23,12$  ‰ ce qui peut correspondre, à la fois aux plantes terrestres CAM ou C3, mai aussi aux plantes aquatiques comme le plancton marin ou les plantes lacustres sans plancton (Fig.4.1).

La comparaison des courbes de variation du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$  le long des carottes étudiées, montre encore une fois la différence entre les carottes d'eau peu profonde et les autres (Fig.4.9). On peut remarquer par exemple, que pour le premier groupe (BLKS 98-04 et BLKS 98-06), les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  sont confinées dans un intervalle étroit  $-26 \div -25$  ‰, tandis que le rapport C/N appartient à l'intervalle 6,46–8,01 ‰ (Fig.4.5 et Tableau 4.4). C'est des valeurs autour de 6-8, caractéristiques pour la matière organique d'origine *algair* (selon le rapport de Redfield<sup>26</sup>) (Tableau 4.1). Ces valeurs sont sensiblement uniformes avant et après la discontinuité marquée par le changement brutal de lithologie et par les âges  $^{14}\text{C}$  obtenus (Fig.4.9).

868 échantillons de plantes analysées par Cloern *et al.* (2002) ont permis aux auteurs de séparer 10 types distincts du point de vue des valeurs des rapports isotopiques  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  et du rapport atomique C/N. Nous avons éliminé de leur dessin le

<sup>26</sup> rapport qui se réfère à la composition élémentaire moyenne de la biomasse d'un phytoplancton marin se développant sans limitations par les nutriments, c'est-à-dire quand son taux de croissance est maximal dans des conditions définies de lumière, de température et de concentration en  $\text{CO}_2$ . Dans ces conditions, le rapport C : N : P (en atomes) dans la biomasse est proche de 106 : 16 : 1, soit un rapport C : N  $\sim 6,6$ .

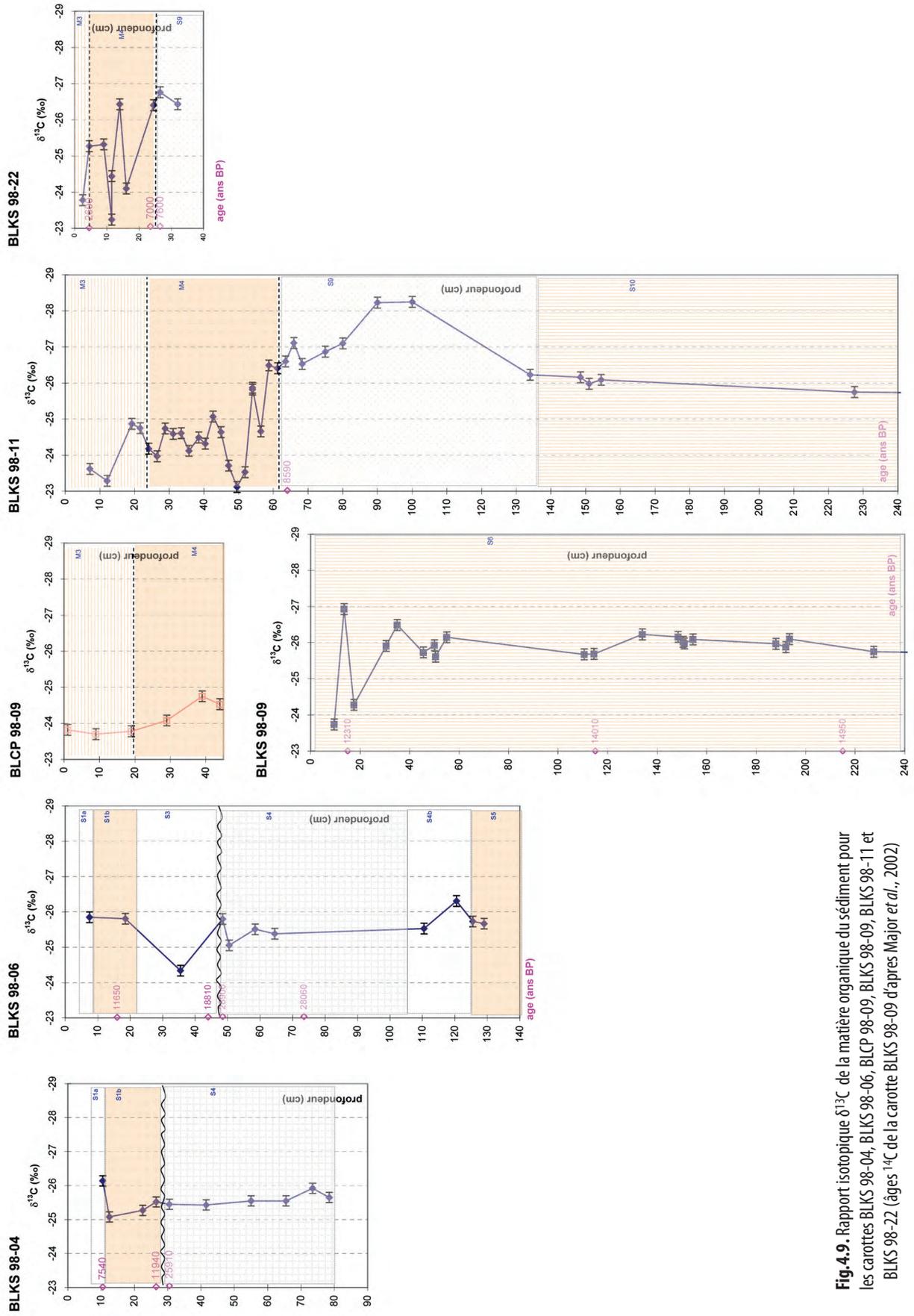
paramètre  $\delta^{15}\text{N}$ , mais nous avons figuré les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  et C/N obtenues pour les échantillons de cette étude (Fig.4.10).

Sur la figure 4.10a, les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  et C/N des carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06 correspondent au phytoplancton estuarien-marin. La représentation du rapport C/N en fonction du rapport  $\delta^{13}\text{C}$  confirme l'origine algair marine de la matière organique du sédiment (Fig.4.11a, b). Tout le long des ces deux carottes à l'exception du faciès S3 dans BLKS 98-06, donc aussi en dessous de la discontinuité, la matière organique est probablement formée dans un milieu saumâtre. Ceci peut être un contre-argument pour la présence d'un stade marin jusqu'à 25000 ans BP mais il reste à vérifier la validité d'une telle hypothèse<sup>27</sup>. Selon nos données les périodes 28000-25000 ans BP et 11900-8000 ans BP sont des périodes similaires du point de vue du type de la matière organique déposée, tandis que la période 18800~12000 ans BP a un aspect différent. 6 échantillons de sédiment prélevés en-dessous des discontinuités des deux carottes, ont été analysés dans le but de rechercher la faune caractéristique du milieu qui régnait il y a plus de 25000 ans BP. Nous n'avons pas obtenu de résultat faunistique, même en prenant soin de retrouver de fragiles coquilles d'ostracodes. Ce résultat est très surprenant.

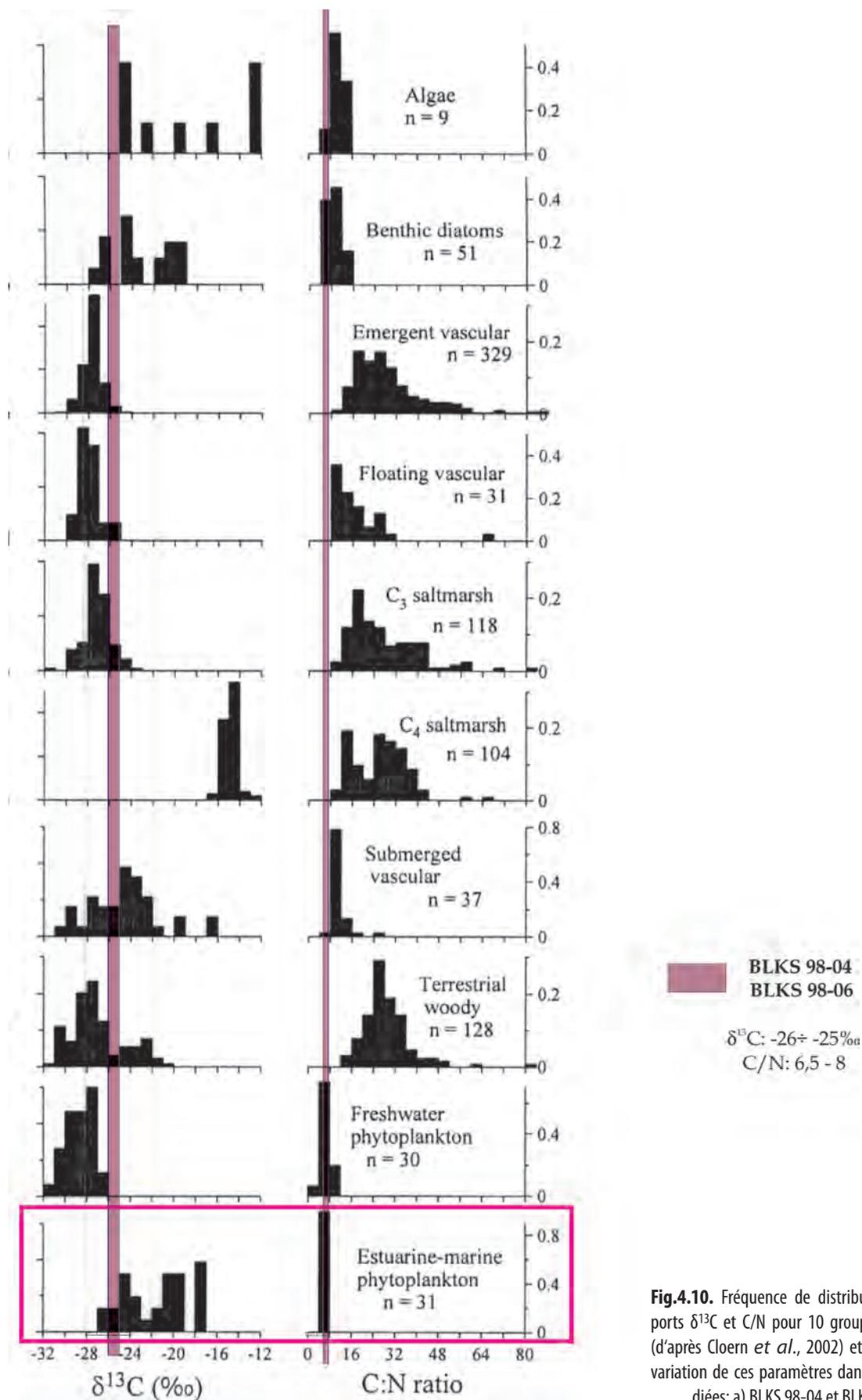
Dans les carottes profondes BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-11 et BLKS 98-22, les paramètres caractéristiques de la matière organique présentent des intervalles de variation plus larges.

La quantité de carbone organique est très faible dans les faciès similaires S6 et S10 de carottes profondes (Fig.4.12). Ce paramètre, accompagné par un rapport C/N autour de 6-7 (entre 5,8 et 7,8, avec une seule valeur de 9,5) et des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  entre -26 et -27‰ indiquent le *plancton d'eau douce*

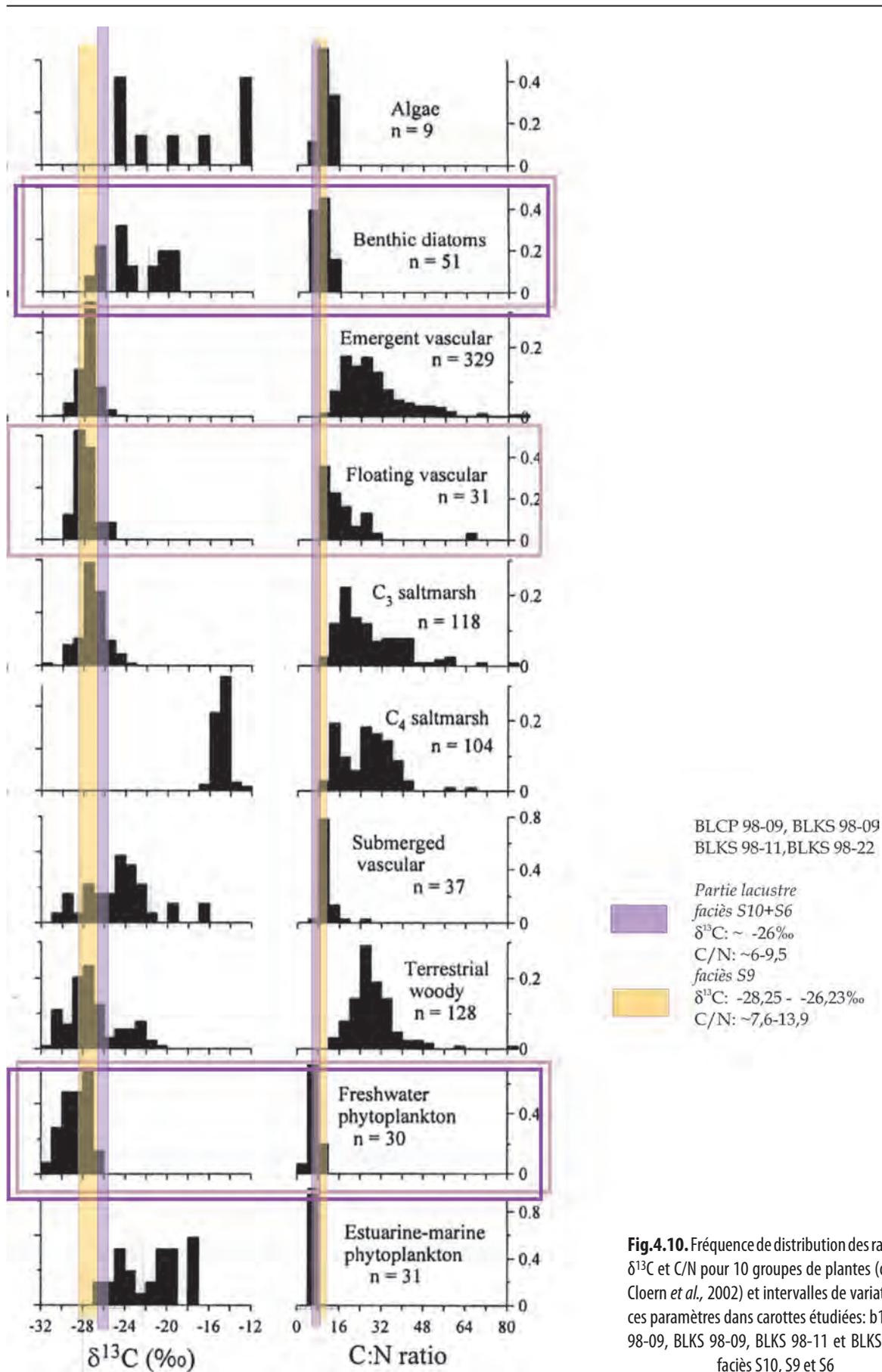
<sup>27</sup> Il s'agit de la période du controversé stade Surojien (40000 - 25000 ans BP). Il est caractérisé, dans les descriptions par une salinité des eaux similaire à celle d'aujourd'hui et par un niveau de la mer proche de l'actuel vers la fin de la période (e.g. : Scherbakov *et al.*, 1979 ; Carraivan *et al.*, 1986).



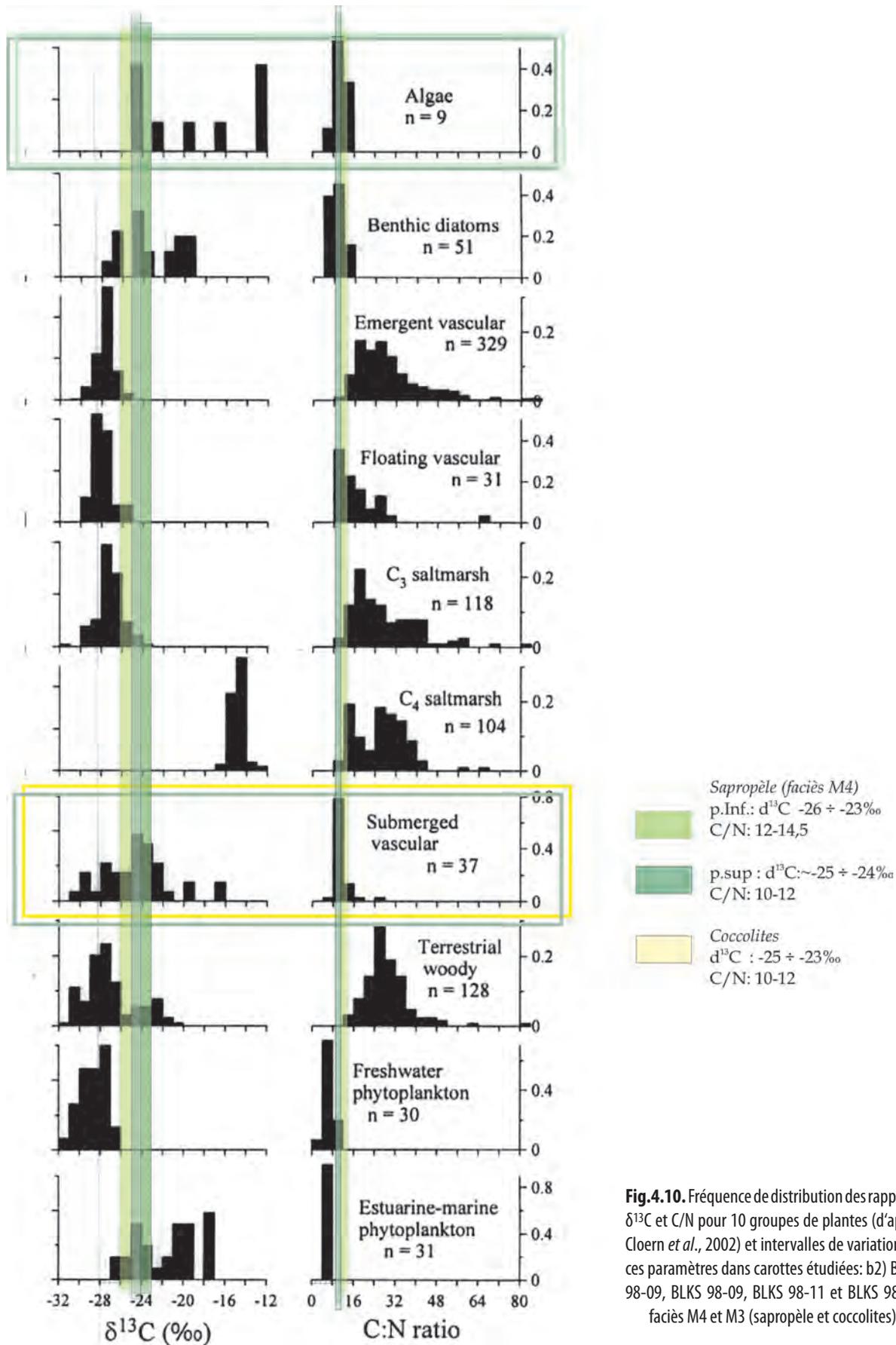
**Fig.4.9.** Rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$  de la matière organique du sédiment pour les carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06, BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-11 et BLKS 98-22 (âges  $^{14}\text{C}$  de la carotte BLKS 98-09 d'après Major *et al.*, 2002)



**Fig.4.10.** Fréquence de distribution des rapports  $\delta^{13}\text{C}$  et C/N pour 10 groupes de plantes (d'après Cloern *et al.*, 2002) et intervalles de variation de ces paramètres dans carottes étudiées: a) BLKS 98-04 et BLKS 98-06



**Fig.4.10.** Fréquence de distribution des rapports  $\delta^{13}\text{C}$  et C/N pour 10 groupes de plantes (d'après Cloern *et al.*, 2002) et intervalles de variation de ces paramètres dans carottes étudiées: b1) BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-11 et BLKS 98-22 facies S10, S9 et S6



**Fig.4.10.** Fréquence de distribution des rapports  $\delta^{13}\text{C}$  et C/N pour 10 groupes de plantes (d'après Cloern *et al.*, 2002) et intervalles de variation de ces paramètres dans carottes étudiées: b2) BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-11 et BLKS 98-22 faciès M4 et M3 (sapropèle et coccolites)

comme principal fournisseur de la matière organique présente dans le sédiment de ce faciès (Fig.4.10b1 ; Tableau 4.1). Ceci est visible aussi sur le graphique de la figure 4.11c.

Dans le faciès S9, les valeurs de carbone organique et C/N augmentent du bas vers le haut de la carotte, suggérant un passage progressif entre le faciès d'eau douce (S9) et le marin (M4, unité II). Les valeurs C/N augmentent au-delà de 10 et celles de  $\delta^{13}\text{C}$  sont plus négatives que dans le faciès antérieur (entre -26,43 et -28,25‰) (Figs.4.12 ; 4.9 ; Tableau 4.1). La combinaison de ces trois paramètres suggère une augmentation de la productivité dans les eaux de surface (traduite par l'augmentation des valeurs de carbone organique) un peu avant l'installation des conditions marines de déposition du sapropèle. Les valeurs plus négatives du  $\delta^{13}\text{C}$ , tout comme l'augmentation des valeurs C/N, peuvent indiquer, ou bien une dégradation de la matière organique, ou bien l'apport de matière organique de plantes vasculaires flottantes ou même de diatomées benthiques (Fig.4.10b1). Pourtant, étant donné la quantité très réduite de diatomées identifiées dans les sédiments de la Mer Noire (Maynard, 1974), nous pensons que le signal identifié dans la matière organique analysée appartient soit aux plantes vasculaires flottantes soit à la matière dégradée. La composante principale de cette matière organique est toujours le phytoplancton d'eau douce (Fig.4.10b1).

Une diminution importante (jusqu'à -28,25‰ du rapport  $\delta^{13}\text{C}$ ) est visible dans ce faciès S9 des carottes BLKS 98-11 et BLKS 98-22 (vase très fine carbonatée, ayant beaucoup d'ostracodes d'eau douce ; Figs. 4.7, 4.8 et Annexe 4 – détermination de la faune). Ces valeurs correspondent à celles du  $\delta^{13}\text{C}$  pour

les algues lacustres (-28,8 ÷ -26‰). Si on tient aussi compte de l'augmentation nette du nombre de tests d'ostracodes d'eau douce identifiés dans les échantillons de cet intervalle, on peut interpréter la diminution de valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  de la matière organique comme étant due à la prédominance, dans l'eau douce, du carbone minéral sous forme de  $\text{CO}_2$  dissous. Ceci atteint son maximum entre 10300 ans et ~9800 ans BP, mais perdure jusqu'à environ 8200 ans BP (Fig.4.9 et Annexe 4). Un apport plus grand d'eau douce avec du  $\text{CO}_2$  dissous par les fleuves, peut également conduire à la diminution du  $\delta^{13}\text{C}$  dans les eaux de la Mer Noire. Un autre facteur qui agit est l'existence d'une relation linéaire entre la température des eaux et le  $\delta^{13}\text{C}$  du plancton (Fontugne et Duplessy, 1981). La diminution des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  après 11800 ans peut être, dans ce cas, la réponse au refroidissement des eaux, suivie par une augmentation des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  correspondant à leur réchauffement. Pourtant, il est difficile d'expliquer les plus basses valeurs pendant la période 10300-9800 ans BP, après la fin de Younger Dryas, dans une période chaude.

Le sapropèle (unité II, faciès M4) des carottes profondes BLCP 98-09 et BLKS 98-11 présente des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  situées dans l'intervalle -25 ÷ -24‰, à l'exception de la partie inférieure du sapropèle de la carotte BLKS 98-11 (où la variation de  $\delta^{13}\text{C}$  est plus grande) entre -26 et -23‰. Des valeurs très variables du rapport  $\delta^{13}\text{C}$  sont enregistrées dans le sapropèle de la carotte BLKS 98-22, mais elles sont toujours dans l'intervalle -26 ÷ -23‰ (Fig.4.9). Le rapport atomique C/N varie dans les intervalles 10-12 pour la partie supérieure du sapropèle et à 12-14,5 pour la partie inférieure (Fig.4.12). Ces va-

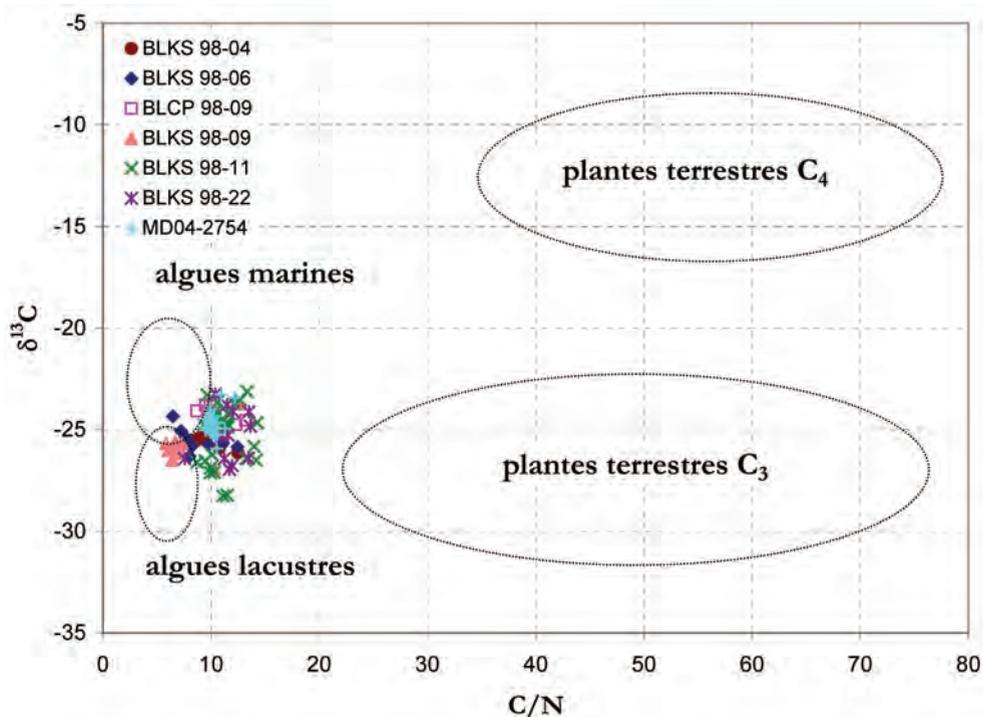
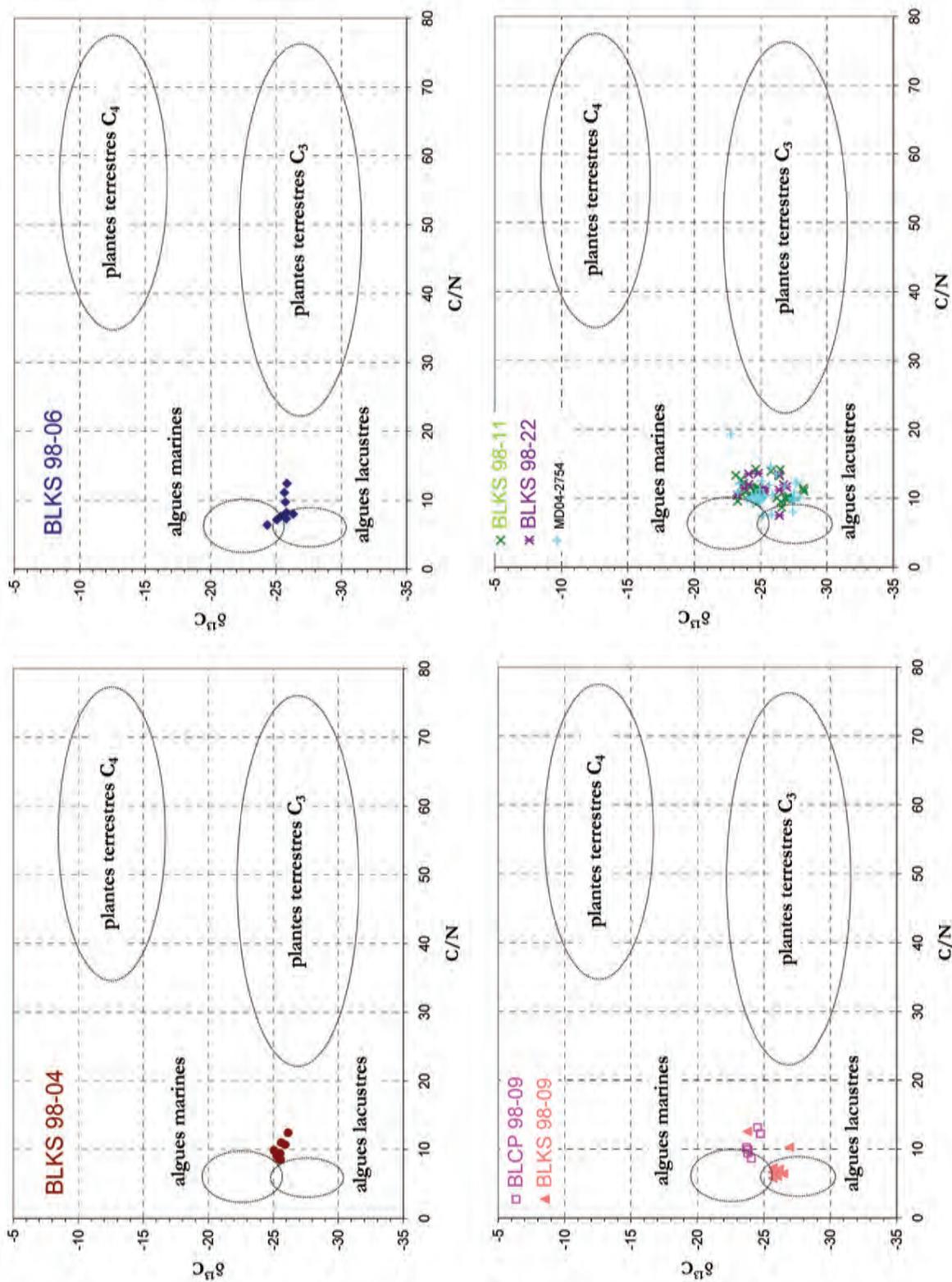
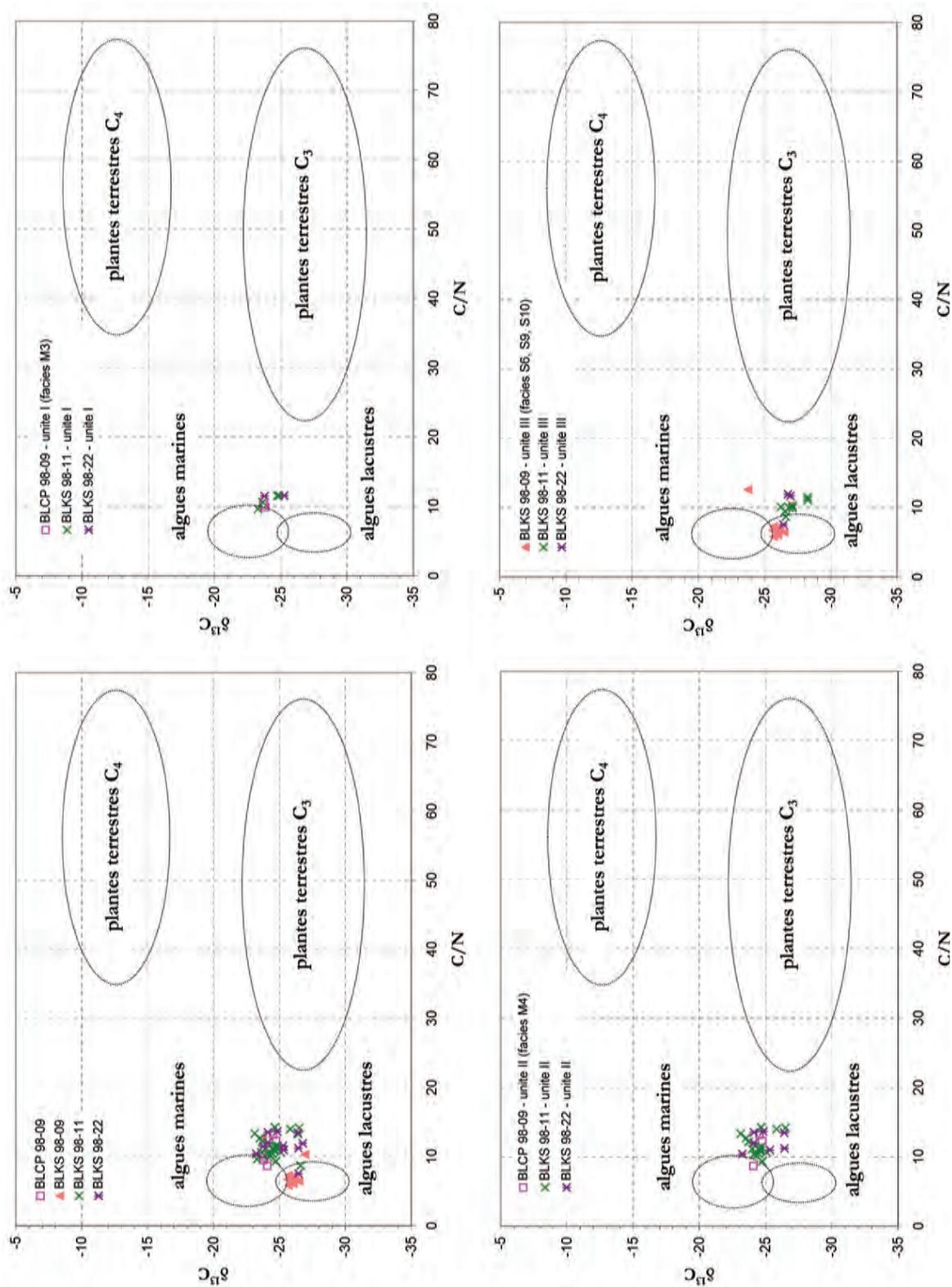


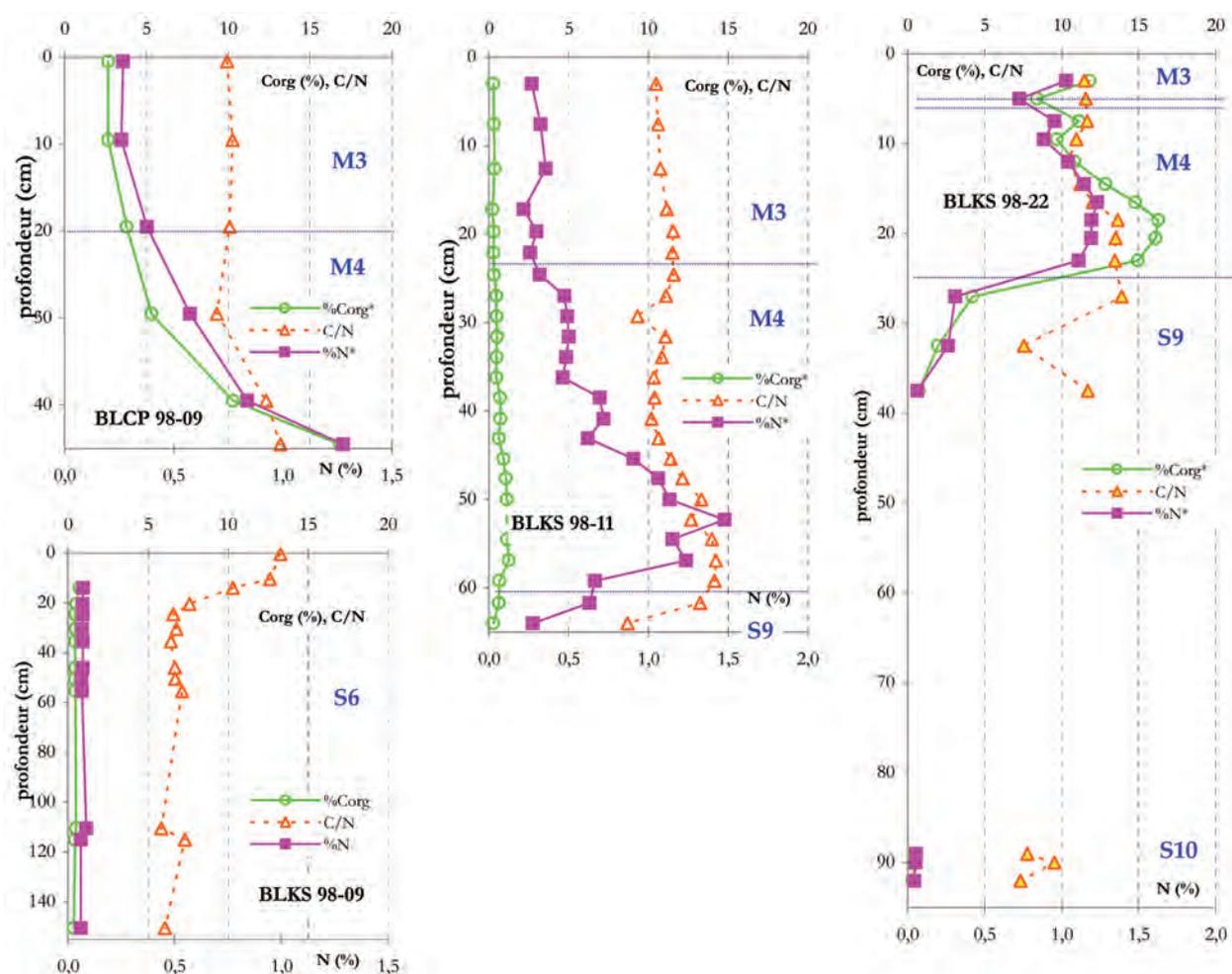
Fig.4.11. Identification de la source possible de la matière organique par la représentation du rapport C/N en fonction des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  (d'après Meyers, 1994) pour les carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06, BLKS 98-09 et BLKS 98-11 et BLKS 98-22; a) toutes les analyses



**Fig. 4.11.** Identification de la source possible de la matière organique par la représentation du rapport C/N en fonction des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  (d'après Meyers, 1994) pour les carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06, BLKS 98-09 et BLKS 98-11 et BLKS 98-22; b) analyses pour chaque carotte



**Fig. 4.11.** Identification de la source possible de la matière organique par la représentation du rapport C/N en fonction des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  (d'après Meyers, 1994) pour les carottes BLKS 98-04, BLKS 98-06, BLKS 98-09 et BLKS 98-11 et BLKS 98-22; c) analyses pour toutes les carottes profondes et ensuite sur chaque unité sédimentaire



**Fig.4.12.** Taux de carbone organique, d'azote et rapport C/N de la matière organique du sédiment pour le sommet des carottes BLCP 98-09, BLKS 98-09, BLKS 98-11 et BLKS 98-22 (les faciès sont indiqués en bleu)

leurs, reportées sur le graphique de Cloern *et al.* (2002), montrent qu'il s'agit d'une matière organique d'origine algale marine, contenant éventuellement un signal caractéristique de diatomées (Tableau 4.1 et Fig.4.10b2). Ceci est concordant avec la présence de diatomées dans la vase sapropélique holocène déjà mise en évidence par Stoffers et Müller (1978), pour des carottes du Leg 42B – DSDP.

Calvert et Fontugne (1987) pensent que les variations des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  dans le sapropèle reflètent plutôt une fluctuation du fractionnement isotopique du carbone par le phytoplancton de la Mer Noire et non pas la présence d'une fraction de carbone terrigène parce que celui-ci est très probablement piégé près du continent.

Nous pensons que l'influence terrigène ne peut pas être exclue, pouvant être représentée par la matière organique du pollen transporté par les fleuves ou par les vents. Des niveaux à pollen ou du pollen disséminé ont été identifiés dans le sapropèle par plusieurs auteurs (Degens *et al.*, 1970 ; Ross et Degens, 1974 ; Traverse, 1974 ; Hay *et al.*, 1991 ; Atanassova, 1995).

La façon dont les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  varient le long de nos carottes est très similaire à celle décrite par Deuser (1972) pour la carotte 1474 et également aux résultats de Calvert et Fontugne (1987), et Arthur et Dean (1998), pour les carottes 1470 et 1432 et GC59.

La variation importante des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  à la base du sapropèle est attribuée par Calvert et Fontugne (1987) au mélange du sapropèle avec le sédiment de l'unité III. Néanmoins, la présence de deux épisodes dans la formation du sapropèle est très bien visible dans nos données et elle a été aussi mentionnée par d'autres auteurs (*e.g.* Glenn et Arthur, 1985 ; Arthur et Dean, 1998). En conséquence, on pense que les valeurs très basses de  $\delta^{13}\text{C}$  à la base du sapropèle sont plutôt dues au passage progressif de conditions lacustres aux conditions marines. Ce passage est suivi par un pic de productivité important (les plus hautes valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  du sapropèle :  $\sim -23\text{‰}$ ) – du aux mélange des eaux et aux grandes quantités de nutriments apportées par l'eau salée et ensuite des valeurs moins variables entre  $-25$  et  $-24\text{‰}$ , suite à l'installation de la stratification des eaux dans le bassin.

---

L'unité I à coccolites (faciès M3) des carottes BLCP 98-09, BLKS 98-11 et BLKS 98-22 présente des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  entre  $-24$  et  $-23\text{‰}$ , avec quelques points plus négatifs (vers  $-25\text{‰}$ ), et un rapport C/N entre 10 et 12. Ce sont des valeurs proches de celles du plancton actuel de la Mer Noire ( $-23\text{‰}$  selon Deuser, 1970b) (**Tableau 4.1** et **Fig.4.10b2**). Des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  plus négatives, et un rapport C/N plus grand que 10, peuvent représenter l'influence d'une certaine quantité de plantes vasculaires submergées (voir la **Fig.4.10b2**) ou un apport de matière organique terrestre. L'influence terrigène sur les sédiments de l'unité I a été mentionnée auparavant par Calvert et Fontugne (1987). Compte tenu de la distance de cette carotte par rapport à la côte, qui empêchait l'arrivée de la matière organique continentale transportée par l'eau, nous pouvons supposer que l'influence terrestre est donnée par le pollen présent en grandes quantités dans les sédiments holocènes de la Mer Noire (e.g. Traverse, 1974 ; Atanassova, 1995). Un autre processus qui peut conduire à l'augmentation des valeurs du rapport C/N au-delà de 10 peut être la dégradation de la matière organique.

#### 4.6. CONCLUSION

L'analyse de la matière organique de sédiments nous a montré encore une fois la différence nette entre les carottes récoltées dans des zones peu profondes du bassin et ceux des zones profondes. Cette analyse nous a aussi permis de déceler les diverses sources de cette MO, en relation avec la salinité de l'eau dans laquelle elle s'est formée.

En général, dans toutes les carottes analysées, la matière organique provient principalement des algues, mais elle contient aussi une faible influence terrigène, des plantes vasculaires aquatiques ou même une légère dégradation.

Dans les carottes de plate-forme continentale, la matière organique est formée à base de plancton de type 'estuarien-marine', donc d'eau saumâtre. Ceci est valable surtout pour les intervalles de temps 28000-25000 ans et  $\sim$ 12000-8000 ans. L'intervalle 18800-12000 ans n'est pas bien défini par ces analyses, mais il est différent des autres. Ses caractéristiques restent à être précisées.

Pour les carottes d'eau profonde, situées sur la pente continentale ou dans la plaine abyssale, le type de la matière organique est différent selon le faciès examiné. Dans les faciès S6, S9 et S10, la source principale de la matière organique est le phytoplancton d'eau douce. Il s'agit de la période de temps  $\sim$ 15000 à 7600 ans BP. La matière organique du faciès S9 semble contenir aussi un signal de plantes vasculaires.

Les faciès M4 et M3 (les unités II et I) contiennent une matière organique dont l'origine sont les algues marines, avec des influences de matériel terrestre constitué probablement par du pollen.

Remarquons que l'intervalle de temps 12000-8000 ans BP ne semble pas avoir les mêmes caractéristiques sur la pente continentale et dans le bassin profond.

**Tableau 4.1.** Rapports atomiques C/N et valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  organique représentatifs pour différentes sources de matière organique dans les sédiments aquatiques : algues marines, algues lacustres, plantes  $\text{C}_3$  et plantes  $\text{C}_4$  (modifié d'après Meyers, 1994, Deuser, 1970a et Cloern *et al.*, 2002)

Source de la matière organique	Localisation	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs. PDB)	Référence
<i>Plantes <math>\text{C}_3</math></i>				
Feuilles de saule	Lac Walker, Nevada, E.-U.	38	-26.7	[1]
Feuilles de saule ( <i>Salix lasiandra</i> )	Système estuarien du Golfe de San Francisco	28.6	-28.3	[7]
Feuilles de peuplier	Lac Walker, Nevada, E.-U.	62	-27.9	[1]
Feuilles de peuplier ( <i>Populus fremontii</i> )	Système estuarien du Golfe de San Francisco	24.3	-29.0	[7]
Aiguilles de pin	Lac Walker, Nevada, E.-U.	42	-24.8	[1]
Aiguilles d'épicéa	Michigan	43	-25.1	[2]
Feuilles de mangroves	Penang, Malaysia	-	-27.1	[3]
Feuilles de palmier	Lac Bosumtwi, Ghana	91	-25.5	[4]
Troscart maritime ( <i>Triglochin maritime</i> )	Système estuarien du Golfe de San Francisco	22.1	-28.3	[7]
<i>Plantes <math>\text{C}_4</math></i>				
Herbes marines	Lac Walker, Nevada, E.-U.	160	-14.1	[1]
Distichlis à épis ( <i>Distichlis spicata</i> )		31.4	-15.0	[7]
Soude commune (Tumbleweed, <i>Salsola kali</i> )	Lac Walker, Nevada, E.-U.	68	-12.5	[1]
Spartine (Cordgrass, <i>Spartina foliosa</i> )	Système estuarien du Golfe de San Francisco	22	-14.8	[7]
Millet sauvage (Wild millet, <i>Milium effusum</i> )	Lac Bosumtwi, Ghana	156	-10.8	[4]
<i>Algues lacustres</i>				
Plancton (mixte)	Lac Walker, Nevada, E.-U.	8	-28.8	[1]
Plancton (mixte)	Lac Pyramid, Nevada, E.-U.	6	-28.3	[2]
Plancton (mixte)	Lac Michigan, Amérique de Nord	7	-26.8	[2]
Phytoplancton d'eau douce	Système estuarien du Golfe de San Francisco	6.6	-28.6	[7]
<i>Algues marines</i>				
Diatomées (mixte)	Golfe de Narragansett, Rhode Island, E.-U.	-	-20.3	[5]
Diatomées benthiques	Système estuarien du Golfe de San Francisco	6.1-9.7	-20.0 ÷ -24.0	[7]
Nannoplancton (mixte)	Golfe de Narragansett, Rhode Island, E.-U.	-	-22.2	[5]
Plancton (mixte)	Penang, Malaysia	-	-21.0	[3]
Plancton (mixte)	Golfe Dabob, Washington, E.-U.	5	-22.4	[6]
Plancton	Mer Noire		-23	[8]
Phytoplancton estuarien-marin	Système estuarien du Golfe de San Francisco	6	-21.5	[7]

- = non déterminé

Références : [1] Meyers (1990) ; [2] = Meyers (données non publiées, 1992) ; [3] = Rodelli *et al.*, (1994) ; [4] = Talbot et Johannesson (1992) ; [5] = Gearing *et al.* (1984) ; [6] = Prah *et al.* (1980) ; [7] = Cloern *et al.*, (2002) ; [8] = Deuser (1970a).

**Tableau 4.2.** Valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  du carbone provenant de diverses sources (matière organique, carbonates,  $\text{CO}_2$ ) (compilation d'après Deines, 1980 ; Meyers, 1994 et Deuser, 1970a)

Matériel		$\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs. PDB)	Observations
Carbone organique (Corg)	Plantes terrestres - $\text{C}_3$	-27‰	Feuilles
Corg	<b>Plantes - <math>\text{C}_4</math></b>	-14	Feuilles
Corg	<b>Plantes – CAM</b>	-9 ÷ -38	Feuilles
Corg	algues <b>lacustres</b>	-26 ÷ -28,8	
	algues <b>marines</b>	-20 ÷ -24	
Corg	sédiments continentaux <b>récents – Sol</b>	-14,8 ÷ -30	En fonction de la couverture des plantes
Corg	<b>sédiments continentaux récents – tourbe</b>	-26 ÷ -28,8	
Corg	sédiments lacustres <b>récents</b>	-8 ÷ -38	
Corg	sédiments <b>récents</b> de rivières	-26	
Corg	sédiments marins <b>récents</b>	-10 ÷ -30	la plupart de valeurs entre -20 et -27‰
$\text{CO}_2$	<b>Atmosphérique</b>	-7	
$\text{CO}_2$	<b>dissous dans l'eau marine</b>	~ 0	
$\text{CO}_2$	<b>dissous dans l'eau de la Mer Noire</b>	0 ÷ -6,5	Diminuant avec la profondeur : ~0 en surface, -6,5 à 1500 m de profondeur (Deuser, 1970b)
Carbonates	Marins	0 ÷ -5	
Carbonates	lacustres ( <b>eau douce</b> )	0 ÷ -10	
Carbonates	solides	+4,2	

**Tableau 4.3.** Analyses du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$ , du taux de carbone organique, de l'azote et du rapport C/N, pour la carotte **BLKS 98-04**. La précision sur les mesures de  $\delta^{13}\text{C}$  est de 0,15‰

niveau (cm)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$	%Corg*	$\Delta$ %C	%N*	$\Delta$ %N	C/N	$\Delta$ C/N
10-11	-26,14	1,92	0,081	0,15	0,025	12,5	0,94
12-13	-25,08	0,58	0,066	0,06	0,009	10,0	1,03
22-24	-25,27	0,40	0,030	0,04	0,004	9,2	0,99
26-27	-25,52	0,41	0,031	0,04	0,004	9,5	1,04
30-31	-25,45	0,42	0,026	0,05	0,004	8,7	0,95
41-43	-25,43	0,42	0,026	0,05	0,004	8,9	0,97
54,5-55,5	-25,55	0,40	0,025	0,05	0,004	8,6	0,93
65-66	-25,55	0,43	0,026	0,05	0,004	8,6	0,94
73-74	-25,92	0,41	0,026	0,04	0,003	10,8	1,17
78-79	-25,65	0,43	0,027	0,04	0,003	11,1	1,20

**Tableau 4.4.** Analyses du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$ , du taux de carbone organique, de l'azote et du rapport C/N, pour la carotte **BLKS 98-06**. La précision sur les mesures de  $\delta^{13}\text{C}$  est de 0,15‰

niveau (cm)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{Corg}}$	%Corg	$\Delta$ %C	%N	$\Delta$ %N	C/N	$\Delta$ C/N
7-8	-25,85	1,79	0,093	0,14	0,018	12,4	1,06
15,5-16,5		0,50	0,053	0,05	0,007	9,4	1,01
18-20	-25,81	0,55	0,04	0,07	0,01	7,3	0,55
35-37	-24,34	0,17	0,01	0,03	0,00	6,5	0,49
43,5-44,5		0,15	0,010	0,02	0,001	8,8	0,96
48-49	-25,80	0,37	0,023	0,04	0,003	8,2	0,90
50-52	-25,05	0,36	0,02	0,05	0,00	7,2	0,55
58-59	-25,51						
64-65	-25,38	0,34	0,02	0,04	0,00	7,6	0,58
73-74		0,40	0,026	0,04	0,003	9,9	1,08
110,5-111,5	-25,53	0,13	0,008				
120-121	-26,31	0,40	0,02	0,05	0,00	8,0	0,60
121-122		0,48	0,029	0,03	0,002	16,1	1,76
125-126	-25,73	0,37	0,027	0,04	0,003	9,8	1,06
128,5-129,5	-25,67	0,30	0,019	0,03	0,002	11,1	1,21

**Tableau 4.5.** Analyses du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$ , du taux de carbone organique, de l'azote et du rapport C/N, pour les carottes **BLCP 98-09** et **BLKS 98-09**. La précision sur les mesures de  $\delta^{13}\text{C}$  est de 0,15‰

carotte	niveau (cm)	$\delta^{13}\text{Corg}$	%Corg*	$\Delta\%C$	%N*	$\Delta\%N$	C/N	$\Delta\text{C/N}$
<b>BLCP 98-09</b>	0-1	-23,82	2,66	0,19	0,27	0,10	9,9	1,51
BLCP 98-09	9-10	-23,70	2,67	0,15	0,26	0,09	10,3	1,51
BLCP 98-09	19-20	-23,78	3,76	0,13	0,40	0,05	9,5	1,11
BLCP 98-09	29-30	-24,08	5,31	0,23	0,54	0,10	9,9	1,57
BLCP 98-09	39-40	-24,75	10,30	0,22	0,84	0,16	12,3	1,75
BLCP 98-09	44-45	-24,53	16,85	0,30	1,28	0,12	13,2	1,02
<b>BLKS 98-09</b>	0-2			0,29		0,022	13,3	1,2
BLKS 98-09	10-12	-23,74		0,6		0,05	12,6	1,0
BLKS 98-09	13,5-14,5	-26,93	0,72	0,058	0,07	0,007	10,3	1,10
BLKS 98-09	17,5-18,5	-24,28						
BLKS 98-09	20-22		0,52	0,03	0,07	0,004	7,6	0,7
BLKS 98-09	24-25		0,46	0,030	0,07	0,005	6,6	0,72
BLKS 98-09	30-32	-25,91	<b>0,45</b>	0,02	<b>0,07</b>	0,003	6,8	0,5
BLKS 98-09	35-36	-26,49	0,45	0,029	0,07	0,005	6,4	0,70
BLKS 98-09	45,5-46,5	-25,73	0,46	0,029	0,07	0,005	6,7	0,73
BLKS 98-09	50-52	-25,61	0,43	0,02	0,06	0,003	6,7	0,5
BLKS 98-09	55-56	-26,15	0,46	0,028	0,07	0,005	7,1	0,78
BLKS 98-09	110-112	-25,68	<b>0,50</b>	0,02	<b>0,09</b>	0,004	5,8	0,4
BLKS 98-09	114,5-115,5	-25,69	0,44	0,027	0,06	0,004	7,3	0,80
BLKS 98-09	134-135	-26,23						
BLKS 98-09	148,5-149,5	-26,16						
BLKS 98-09	150-152	-26,02	<b>0,36</b>	0,02	<b>0,06</b>	0,003	6,1	0,5
BLKS 98-09	154,5-155,5	-26,09						
BLKS 98-09	188-189	-25,97						
BLKS 98-09	192-193	-25,88						
BLKS 98-09	193,5-194,5	-26,10						
BLKS 98-09	227,5-228,5	-25,75						
BLKS 98-09	667,5-668,5	-25,30						
BLKS 98-09	824-825	-25,15						
BLKS 98-09	834-835	-25,31						

\* d'après André, 1999

**Tableau 4.6.** Analyses du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$ , du taux de carbone organique, de l'azote et du rapport C/N, pour la carotte **BLKS 98-11**. La précision sur les mesures de  $\delta^{13}\text{C}$  est de 0,15‰

niveau (cm)	$\delta^{13}\text{Corg}$	%Corg	$\Delta\%C$	%N	$\Delta\%N$	C/N	$\Delta\text{C/N}$
2,5-3,5		2,81	0,26	0,27	0,108	10,5	1,64
7,1-8,1	-23,62	3,43	0,21	0,32	0,107	10,6	1,61
9,8-10,8		3,29	0,22	0,32	0,190	10,3	2,68
12,1-13,1	-23,29	3,83	0,16	0,40	0,091	9,6	1,04
14,5-15,5		3,27	0,10	0,32	0,194	10,2	2,44
16,7-17,7		2,43	0,27	0,22	0,097	11,2	1,79
19,2-20,2	-24,87	3,45	0,25	0,30	0,064	11,6	1,97
21,6-22,6	-24,75	2,96	0,21	0,26	0,054	11,5	1,95
24,1-25,1	-24,18	3,69	0,25	0,32	0,076	11,6	1,89
26,5-27,5	-23,97	5,27	0,31	0,47	0,081	11,1	1,90
28,8-29,8	-24,74	4,58	0,11	0,49	0,062	9,3	1,02
31,1-32,26	-24,59	5,54	0,27	0,50	0,087	11,1	1,81
33,4-34,4	-24,61	5,26	0,24	0,48	0,085	10,9	1,75
35,7-36,7	-24,12	4,79	0,22	0,46	0,081	10,3	1,66
38-39	-24,49	7,23	0,17	0,70	0,125	10,4	1,49

niveau ( cm)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$	%Corg	$\Delta\%C$	%N	$\Delta\%N$	C/N	$\Delta\text{C/N}$
40,4-41,4	-24,32	7,34	0,13	0,72	0,124	10,2	1,41
42,6-43,6	-25,07	6,61	0,24	0,62	0,107	10,6	1,64
44,9-45,9	-24,64	10,36	0,19	0,91	0,159	11,4	1,61
47,1-48,1	-23,71	12,89	0,25	1,06	0,103	12,1	0,95
49,5-50,5	-23,12	15,11	0,27	1,13	0,109	13,3	1,03
51,8-52,8	-23,53	18,76	0,19	1,48	0,133	12,7	0,89
54-55	-25,82	16,11	0,16	1,15	0,104	14,0	1,01
56,4-57,4	-24,66	17,63	0,18	1,24	0,114	14,2	1,03
58,7-59,7	-26,49	9,43	0,19	0,67	0,079	14,1	1,08
61,2-62,2	-26,41	8,38	0,11	0,63	0,080	13,3	1,33
63,5-64,5	-26,6	2,39	0,10	0,28	0,036	8,7	1,06
65,9-66,9	-27,11	2,18	0,14	0,22	0,064	9,9	2,82
68,3-69,3	-26,53	1,84	0,11	0,19	0,058	9,4	2,65
75-76	-26,87	1,58	0,11	0,16	0,053	10,0	2,83
80-81	-27,1	1,48	0,11	0,14	0,052	10,3	2,92
85-86		0,92	0,11	0,09	0,046	10,4	2,99
90-91	-28,23	1,01	0,12	0,09	0,048	11,5	3,26
95-96		0,83	0,12	0,08	0,051	10,2	2,92
100-101	-28,25	0,94	0,12	0,09	0,049	11,1	3,15
105-106		0,74	0,11	0,07	0,047	10,4	2,97
110-111		0,71	0,11	0,07	0,049	10,3	2,91
115-116		0,62	0,10	0,06	0,047	9,9	2,81
120-121		0,61	0,10	0,06	0,046	10,2	2,91
125-126		0,53	0,10	0,05	0,045	9,9	2,83
130-131		0,49	0,10	0,05	0,044	10,1	2,89
134-135	-26,23						
149-150	-26,16						
151-152	-25,98						
155-156	-26,09						
228-229	-25,75						
668-669	-25,3						

**Tableau 4.7.** Analyses du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$ , du taux de carbone organique, de l'azote et du rapport C/N, pour la carotte **BLKS 98-22**. La précision sur les mesures de  $\delta^{13}\text{C}$  est de 0,15‰

niveau ( cm)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$	%Corg	$\Delta\%C$	%N	$\Delta\%N$	C/N	$\Delta\text{C/N}$
2,5-3,5	-23,78	11,81	0,15	1,03	0,12	11,47	0,82
4,5-5,5	-25,27	8,40	0,12	0,73	0,10	11,56	1,13
7-8		11,11	0,20	0,95	0,10	11,65	0,90
9-10	-25,32	9,69	0,17	0,88	0,09	10,96	0,84
11,5-12,5	-23,24	10,83	0,25	1,04	0,10	10,40	0,84
14-15	-26,43	12,85	0,19	1,15	0,11	11,21	0,84
16-17	-24,10	14,77	0,15	1,23	0,12	12,00	0,86
18-19	-24,82	16,27	0,16	1,19	0,11	13,64	0,98
20-21	-24,12	16,10	0,15	1,19	0,10	13,51	0,97
22,5-23,5	-26,40	14,94	0,14	1,11	0,09	13,46	0,97
26,5-27,5	-26,76	4,22	0,17	0,31	0,03	13,89	1,40
32-33	-26,43	1,99	0,09	0,26	0,03	7,56	0,98
37-38	-26,95	0,73	0,06	0,06	0,01	11,69	1,60
88,5-89,5		0,41	0,023	0,05	0,004	7,8	0,85
89,5-90,5		0,49	0,030	0,05	0,004	9,5	1,04
91,5-92,5		0,31	0,020	0,04	0,003	7,3	0,80
92,5-93,5		0,40	0,03	0,04	0,012	9,5	2,74

---

## CHAPITRE 5

# ARGILES ET MINÉRALOGIE

### 5.1. INTRODUCTION

Pour mieux tracer les zones sources du sédiment et comprendre les changements environnementaux des derniers 30 000 ans dans le bassin Nord-Ouest de la Mer Noire nous avons réalisé une étude minéralogique, en particulier du cortège argileux. Compte tenu des faciès différents apparaissant selon la profondeur dans le bassin, nous avons choisi deux carottes de référence: BLKS 98-06 située sur la plate-forme continentale à 135 m, et BLKS 98-22 située dans la plaine abyssale, à 2100 m de profondeur.

Les méthodes utilisées sont la diffraction des rayons X (DRX), la spectroscopie infrarouge à transformé de Fourier et la microscopie optique. Les analyses DRX ont permis d'identifier et de quantifier les minéraux argileux. Les analyses de la minéralogie par infrarouge (IR), effectuées sur quelques niveaux, nous ont fourni les taux de kaolinite, quartz, calcite et feldspaths. L'avantage de cette méthode est une meilleure précision des quantités de certains minéraux par rapport aux valeurs obtenus par DRX. Les valeurs des concentrations des minéraux déterminés par IR sur le sédiment brut sont corrigées de la dilution par les carbonates. Nous avons aussi effectué des analyses par la microscopie optique afin d'identifier les minéraux lourds dans les sédiments de la plate-forme continentale (carottes **BLKS 98-04** et **BLKS 98-06**, la première se trouvant à 101 m de profondeur). La détermination des minéraux lourds a été effectuée par Costina Fulga de GeoEcoMar Constanța.

La méthode de préparation et d'analyse des échantillons ainsi que le traitement des diffractogrammes sont présentés dans l'**annexe 5**.

### 5.2. RÉSULTATS MINÉRALOGIQUES

Les minéraux argileux détectés dans les deux carottes sont la smectite, l'illite, la kaolinite et la chlorite. Les deux premières espèces sont largement dominantes.

#### BLKS 98-06

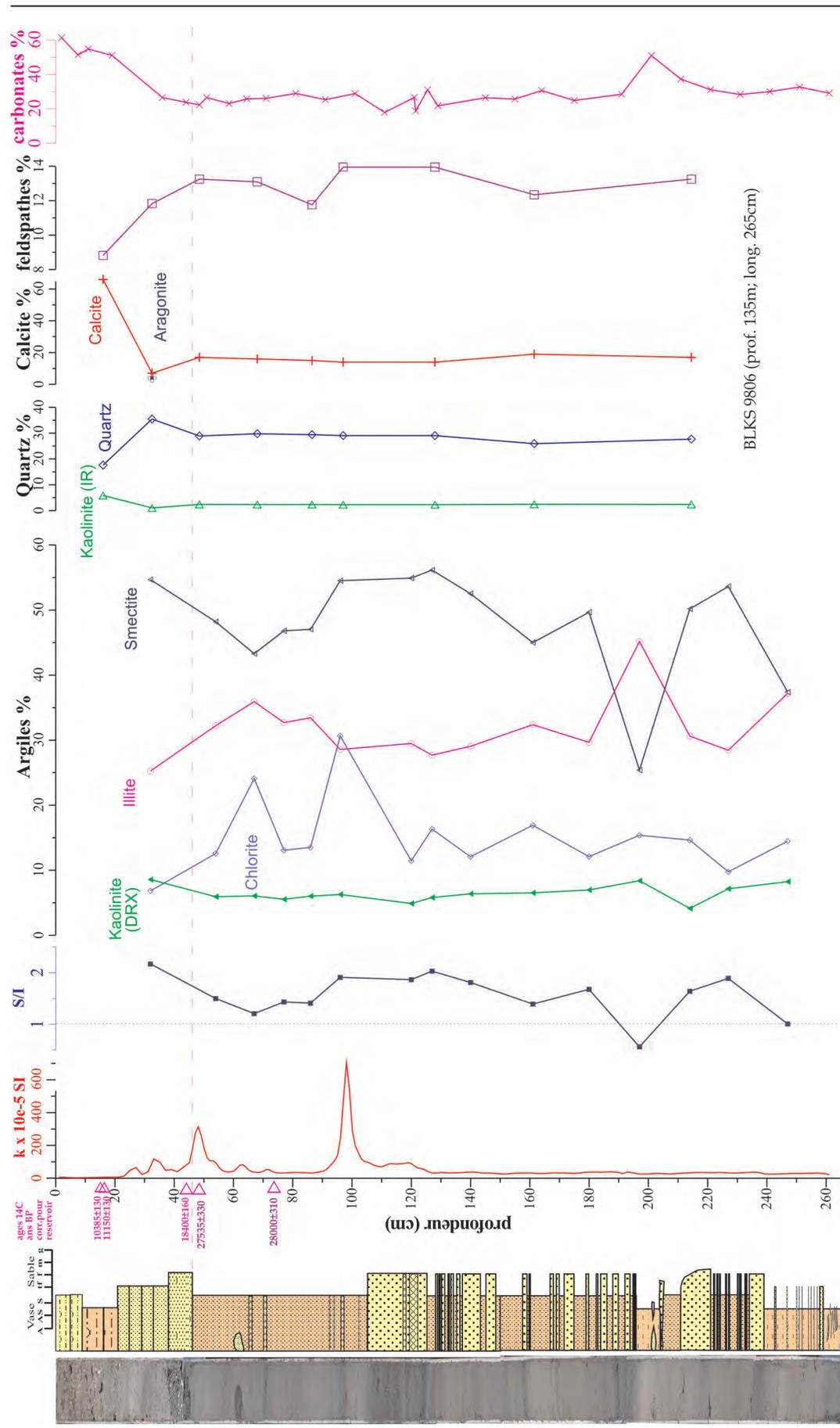
Cette carotte de plate-forme présente une discontinuité de sédimentation à 46 cm de profondeur. Les sédiments en dessous de cette discontinuité sont plus âgés que 27500 ans. La séquence au-dessus commence vers 18000 ans BP. On remarque que le minéral argileux qui prédomine est la **smectite** avec des valeurs comprises entre 25 et 56%, la plupart d'entre elles se situent dans l'intervalle 45-55%; le taux le plus faible: 25,4% est enregistrée à 197 cm (**Fig.5.1, Tableau 5.1**).

Les taux d'**illite** sont, eux aussi, assez constants, dans un intervalle de 25-37%, avec un seul pic à 197 cm (45,2%). La teneur de l'illite varie anti-parallèlement avec la smectite, les deux minéraux sont complémentaires donc leur corrélation est négative (**Fig.5.2**).

Le rapport **smectite/illite** (S/I) est toujours supérieur à 1, excepté le point situé à 197 cm (**Fig.5.1**). La valeur de ce rapport montre la dominance de la smectite tout au long de la carotte. Les taux les plus variables sont ceux de la chlorite. Ils s'inscrivent dans l'intervalle 6,8-30,6 %, avec des pics forts de 30,6 et 24 %, respectivement à 96 et 67 cm.

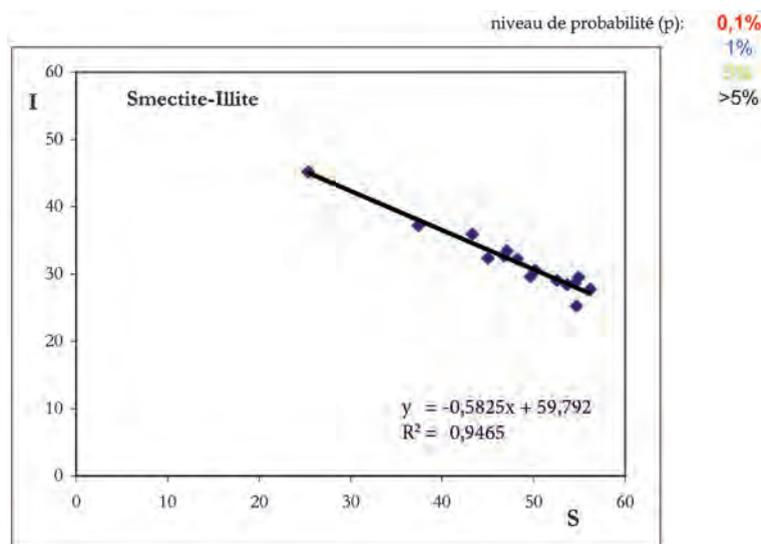
Les taux de **kaolinite** sont faibles : entre 4,1 et 8,6 %, avec un pic de 8,4 % à 197 cm. C'est la profondeur correspondante au pic d'illite et au minimum de la smectite. La courbe de la kaolinite, déterminée par IR, présente la même allure que celle obtenue par DRX. L'intervalle de valeurs (1-5,9%) est légèrement différent de celui obtenu par DRX (4,1-8,6%), mais la différence est comprise dans la marge d'erreur de 5% des quantifications des résultats par DRX. En plus les analyses ont été effectués sur les fractions différents : les échantillons pour le DRX sont limitées à la fraction < 2 µm et décarbonatée.

Excepté une faible diminution du pourcentage de calcite et de feldspaths, du bas de la carotte vers le sommet et, par conséquent, une augmentation corrélatrice de la quantité de quartz, les courbes des minéraux déterminés par IR ne varient pas beaucoup (**Fig.5.1**). Les plus grandes variations de ces



**Fig. 5.1.** Variation de la susceptibilité magnétique des sédiments, en parallèle avec le rapport smectite/illite (S/I), les types d'argiles, les minéraux argileux déterminés par IR, les carbonates et la lithologie de la carotte BLKS 98-06. Les valeurs de concentrations des minéraux déterminés par IR sur le sédiment total sont corrigées en fonction de la concentration en carbonates

BLKS 98-06	Coefficient de corrélation R						No. niveaux
	I/S	I/K	I/Ch	S/K	S/Ch	K/Ch	
0-256 cm	<b>-0,97286</b>	0,290938007	0,187446	<b>-0,44793</b>	-0,09567	-0,19516	15



**Fig.5.2.** Coefficients de corrélation entre les argiles de la carotte BLKS 98-06, et représentation graphique de l'anti-corrélation entre la smectite et l'illite

paramètres sont enregistrées pour les deux derniers points d'analyse, dans la partie supérieure de la carotte.

Le pourcentage de **quartz** est inclus dans l'intervalle 17,6-35,5%. Il est à peu près constant : autour de 30%. Le maximum de 35,5% est enregistré à 32,5 cm, tandis que le minimum de 17,6 % se situe à 16 cm.

La quantité de **calcite** varie entre 7 et 66%. Cependant elle reste relativement constante (autour de 15%) pour la majeure partie de la séquence, avec un minimum de 7% à 32,5 cm et un maximum de 66% à 16 cm de profondeur.

L'intervalle de variation des **feldspaths** est étroit, entre 8,8 et 13,9%. Le maximum est atteint à 129 et 101 cm, et la valeur minimale à 11cm. La tendance générale est de diminuer de la base vers le sommet de la carotte.

La courbe des taux de **carbonates** obtenue par décarbonatation a la même allure que celle de la calcite. L'intervalle de variation est 17,9–61,3%, le minimum étant localisé à 111 cm, et le maximum à 2 cm de profondeur.

Trois niveaux de sédiment plus âgé que 27 000 ans, situés tous en dessous de la discontinuité déjà mentionnée (à 55,5 ; 66,5 et 80,5cm de profondeur) ont été analysés, afin de déterminer leur contenu minéralogique et surtout les types de minéraux lourds présents. Les résultats de ces investigations au microscope optique montrent la dominance des amphiboles, des grenats et des pyroxènes (**Fig.5.3** et **Tab.5.2**). Sur la **figure 5.3** et le **tableau 5.2** sont également présentés

les résultats des trois niveaux analysés dans la carotte **BLKS 98-04**. Ces niveaux ont été choisis en dessous d'une discontinuité également présente, parce qu'il s'agit de niveaux de lithologie et d'âges similaires. On peut constater que les associations de minéraux lourds sont identiques dans les carottes **BLKS 98-04** et **BLKS 98-06** et sont bien issues de la même " province minéralogique ".

#### BLKS 98-22

Cette carotte se trouve dans une levée du dernier système chenal-levée du Danube (Popescu *et al.*, 2001 ; Popescu, 2002). Elle présente la succession lithologique spécifique des carottes profondes de la Mer Noire avec : l'unité I (vase à coccolites) au sommet, précédée dans le temps par l'unité II (vase à sapropèle) et l'unité III (argiles et silts à bandes colorées). Du fait de sa position bathymétrique, en dessous des dépôts hémipélagiques (unités I et II), la partie inférieure de cette carotte contient plusieurs successions turbiditiques au-delà de 140 cm de profondeur (Popescu, 2002).

La distribution des différents types d'argiles est beaucoup plus variable que dans la carotte peu profonde **BLKS 98-06**, mais on constate toujours la prédominance de la smectite et de l'illite par rapport à la quantité de chlorite et de kaolinite. Les pourcentages des argiles varient peu de la base jusqu'à 375 cm. De 375 cm vers le sommet, la variation des argiles devient importante : de 10 à 20 % entre 375 et 110 cm, et jusqu'à 35% de différence entre les pics, pour la smectite et l'illite, au-dessus de 110 cm.

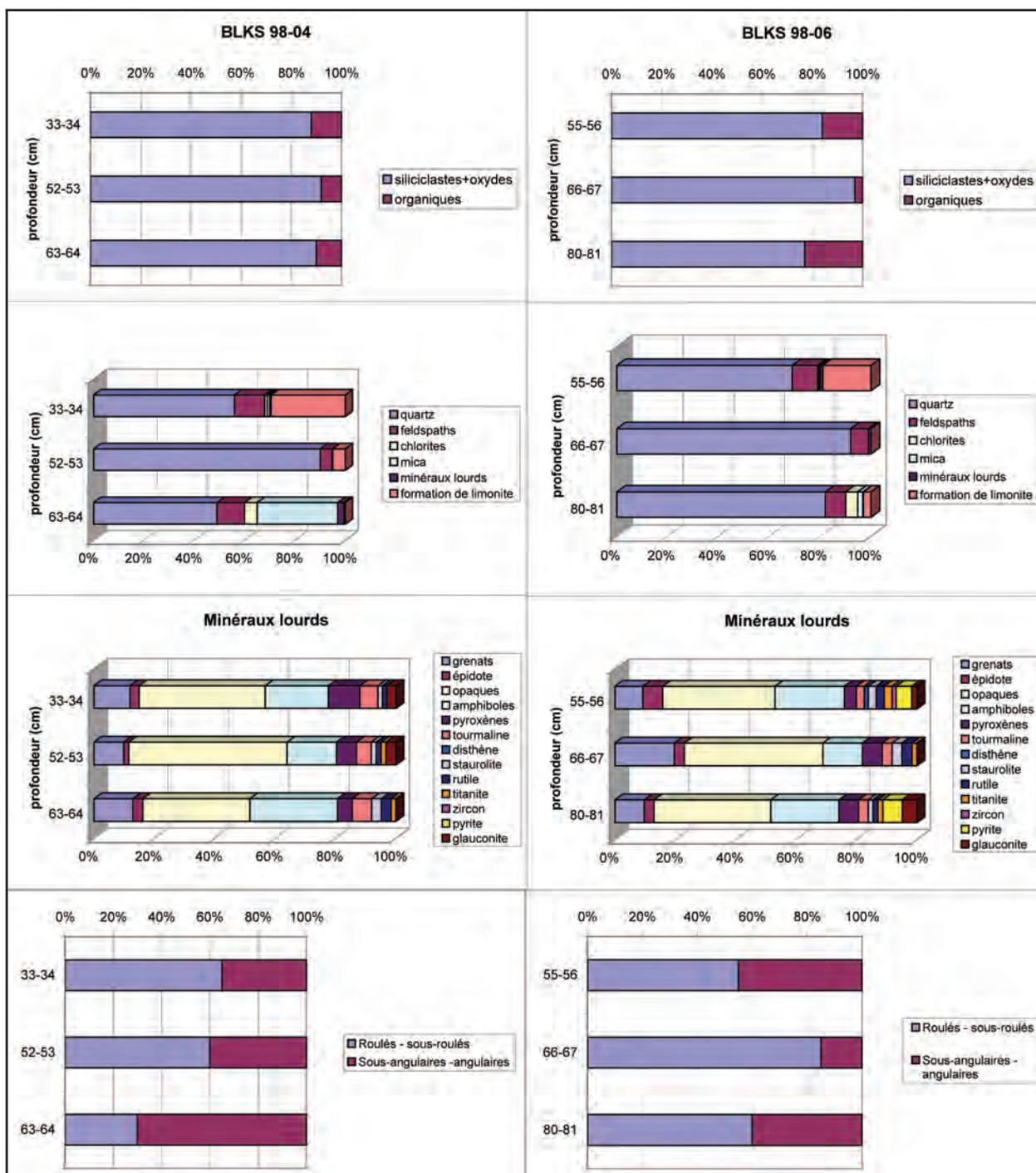


Fig.5.3. Contenu de minéraux lourds dans les sédiments de quelques niveaux des carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06

La **smectite** est le minéral argileux prédominant dans la partie inférieure, entre 700 et 110 cm. Les taux de smectite augmentent de 40 à 62 % du bas de la carotte jusqu'à 350 cm. Entre 350 et 110 cm, ce minéral présente de nombreuses variations entre 41 et 59 %, l'amplitude des 6 pics atteignant 5 à 18 %. Au-dessus de 110 cm, la largeur des pics devient encore plus grande, et la smectite varie entre 12 et 54 %. Elle diminue jusqu'à 12-13 % respectivement à 91 et 49 cm, et jusqu'à 25-35 % aux minima de 42, 15, 12, 10, 8 et 3 cm de profondeur. A ces niveaux l'illite enregistre des valeurs maximales (Fig.5.4).

L'**illite** se trouve en des quantités plus faibles que la smectite, de la base jusqu'à 110 cm, avec des valeurs se situant entre 22 et 38 %. Elle diminue lentement de 35 % à la base jusqu'à 23% à 335 cm. Entre 335 et 110 cm la courbe de variation de cette argile présente de nombreux pics, correspondants aux minima de la smectite. Ses valeurs varient alors entre 22 et 38 %. A partir de 110 cm, l'illite enregistre des variations encore plus fortes, avec des valeurs maximales de 55-58% à 98-91 cm et 54-65 % à 60-49 cm. Un minimum de 32-28% à 34-27 cm correspond à un pic de smectite de 48-54%. Vers le sommet, aux minima de smectite de 42, 15, 12, 10, 8 et 3 cm, correspondent des pics d'illite de 41, 41, 51, 40, 49 et 47% (Fig.5.4).

Tout au long de la carotte la variation d'illite est antagoniste à celle de la smectite. La variation de l'illite suit étroitement celle de la kaolinite dans la partie base de la carotte (27-706 cm), au-dessous de la limite des unités holocènes I et II, où  $R = 0,58$  ( $p=0,1\%$ ) (Fig.5.5).

Le rapport **smectite/illite** (S/I) est supérieur à 1, de la base jusqu'à 110 cm. Ensuite, vers le sommet de la carotte, la courbe de ce rapport enregistre des variations, avec des valeurs qui deviennent même parfois inférieures à 1.

Les intervalles de variation de la chlorite et de la kaolinite sont étroits: la chlorite varie entre 7 et 18% et la kaolinite entre 4 et 17%. De la base de la carotte jusqu'à 350 cm, la chlorite varie peu, dans l'intervalle 9-16%. A partir de 350 cm, vers le sommet, elle présente des variations rapides, mais l'amplitude des pics reste confinée dans l'intervalle étroit : 7-18%. De la base et jusqu'à 42 cm, la chlorite est plus abondante que la kaolinite à quelques exceptions près: les points à 240, 91 et 60 cm. Dans la partie supérieure à 42 cm, la chlorite présente de nombreux maxima et minima, en alternance avec des variations de kaolinite. Pour cette partie supérieure les valeurs de la chlorite se situent entre 8 et 14%. Pour l'intervalle 27-706 cm, cette argile est anti-corrélée avec la smectite  $R = -0,32$  ( $p=1\%$ ). Un meilleur coefficient de corrélation est observé pour l'intervalle 27-140 cm :  $R = 0,62$  ( $p=1\%$ ) (Fig.5.5).

La **kaolinite** diminue légèrement de 9% au bas de la carotte (706 cm) jusqu'à 4% à 350 cm. Ensuite, vers le sommet, la courbe de kaolinite présente de nombreux pics, avec des amplitudes de 5-10 %. Malgré la fréquence de ces pics, il y a une tendance générale d'augmentation des valeurs: de 4% à 350 cm jusqu'à 10-15% au sommet de la carotte. Sur l'inter-

valle 27-706 cm, la kaolinite est corrélée avec l'illite ( $R=0,58$  ;  $p=0,1\%$ ) et anti-corrélée avec la smectite ( $R=-0,69$  ;  $p=0,1\%$ ) (Fig.5.5).

Les quantités de kaolinite, quartz, calcite et feldspaths des sédiments ont été obtenues lors d'analyses de la minéralogie par IR (Fig.5.4).

La quantité de **quartz** varie beaucoup dans l'intervalle 5-35%. La valeur maximale de 35 % est enregistrée à 335,8 cm et celle qui est minimale à 21,5 cm dans la colonne sédimentaire. Les plus fortes valeurs de quartz (de 28 à 35%) sont caractéristiques de l'intervalle de profondeur 335,8-240,5 cm. Des valeurs légèrement plus basses, entre 13 et 29% correspondent à l'intervalle suivant: 240,5-27,5cm (l'unité III). Ici, il y a deux minima à 225,5 et 76,5 cm et deux maxima, à 98,5 et 49,5cm. Dans l'unité II à sapropèle (25-6,5 cm), les valeurs sont encore plus petites, mais elles augmentent de 5 % à la base du sapropèle, jusqu'à 9 % près de sa limite supérieure. L'unité I à coccolites (6,5-0 cm) présente des valeurs du quartz autour de 10 %.

La variation de la quantité de **calcite** présente, en général, la même allure que celle du quartz. L'intervalle de variation est aussi très large : entre 2 et 32%. La valeur minimale de 2% se trouve dans le niveau à sapropèle à 21,5 cm, tandis que la valeur maximale de 32% se trouve dans l'unité III, à 49,5 cm. Dans l'intervalle de profondeurs 335,8-225,5 cm, la calcite présente des valeurs très variables, entre 6 et 26%. De 225,5 à 27,5 cm l'amplitude des pics de calcite est encore plus grande, s'étalant entre 5 et 32%, avec des minima à 110,5 et 76,5cm et des valeurs maximales à 181,5 ; 98,5 et 49,5cm. Les plus petites valeurs (2 ; 6 ; 7 ; 9%) s'enregistrent dans l'unité II à sapropèle, entre 25 et 6,5 cm. Dans l'unité I à coccolites, les valeurs continuent à augmenter de 15 à 23% vers le sommet.

Les **feldspaths** varient entre 1 et 17 %, avec des variations qui suivent très bien l'allure de la courbe de variation du quartz. En effet, nous avons observé une très bonne corrélation entre les deux types de minéraux ( $R=0,91$  ;  $p=0,1\%$ ).

## 5.3. DISCUSSION

### 5.3.1 ORIGINE DES MINÉRAUX ARGILEUX DES SÉDIMENTS

#### a) Apports du bassin versant de la Mer Noire

La géologie des zones traversées par les fleuves atteignant la côte nord-ouest de la Mer Noire est très variée. Elle est dominée par des roches sédimentaires, métamorphiques et magmatiques, tandis que dans la zone de sud du bassin, les roches volcaniques, pyroclastiques et faiblement métamorphisées sont prédominantes (Stoffers et Müller, 1972). Selon beaucoup de chercheurs, l'illite est le minéral qui prédomine dans les dépôts de la plate-forme russe et dans les sols traversés par les cours d'eau du nord et nord-ouest, alors que l'altération du verre volcanique des roches effusives et pyroclastiques traversées par les rivières anatoliennes a comme conséquence la dominance smectitique des sédi-

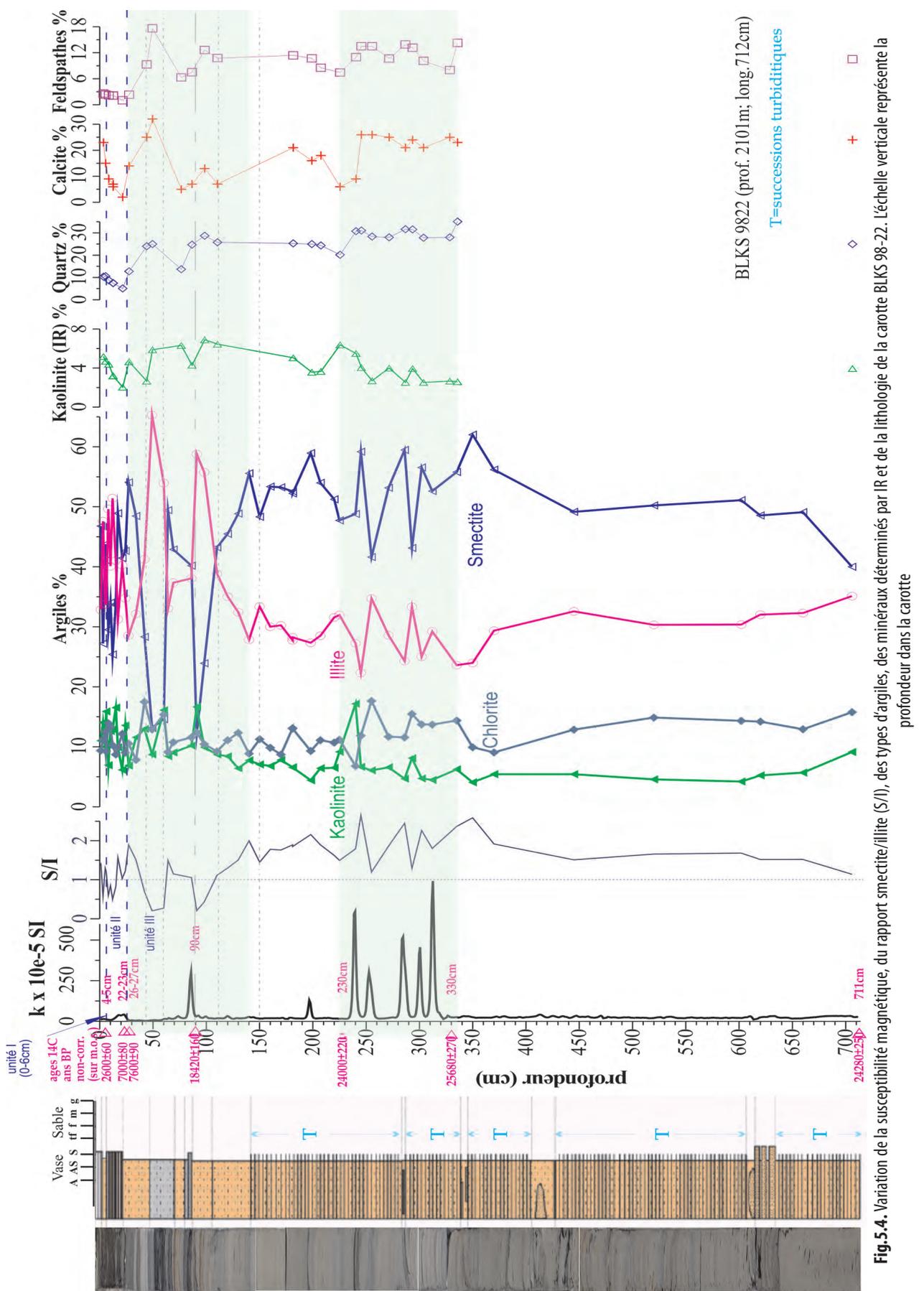
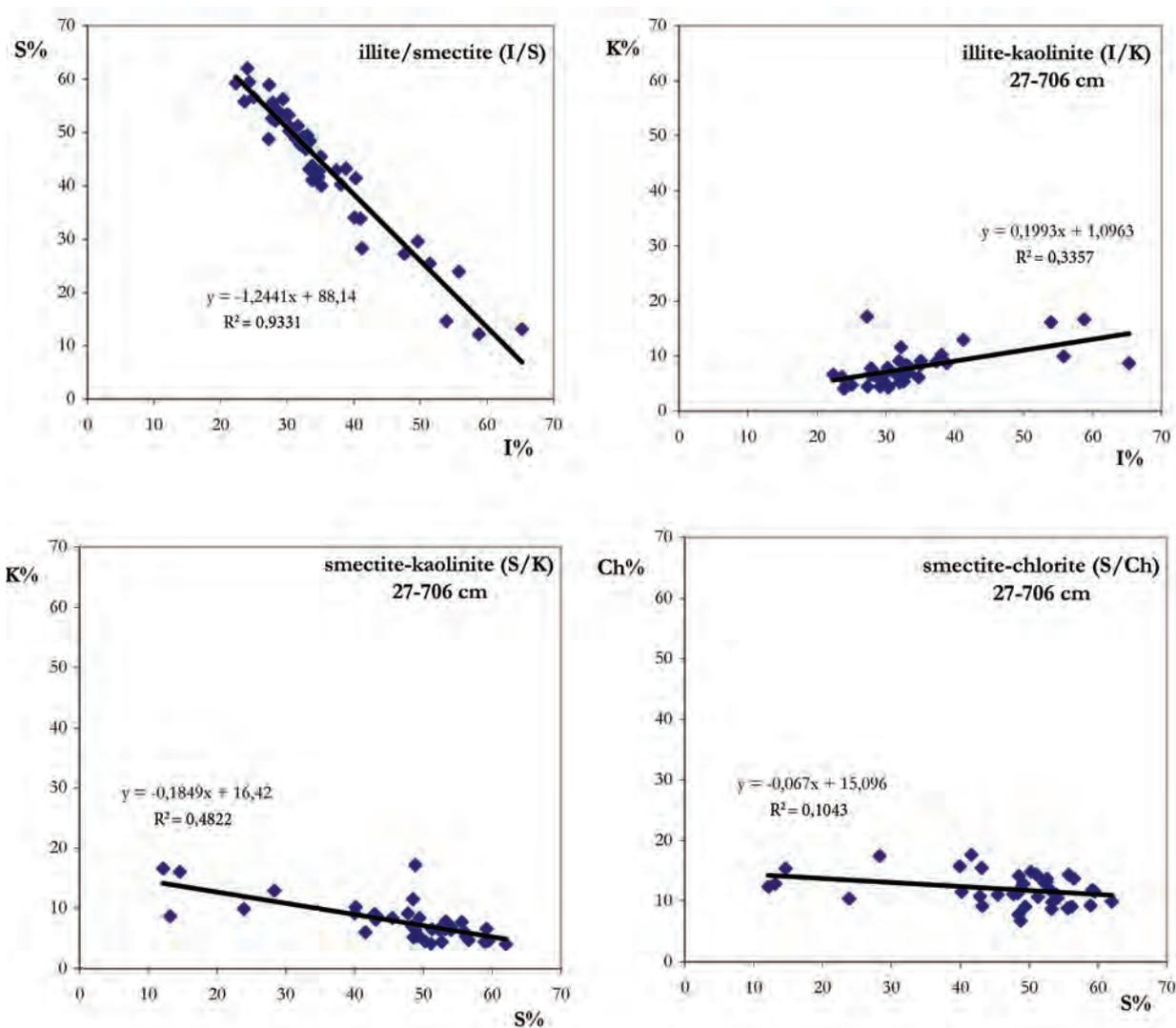


Fig. 5.4. Variation de la susceptibilité magnétique, du rapport smectite/illite (S/I), des types d'argiles, des minéraux déterminés par IR et de la lithologie de la carotte BLKS 98-22. L'échelle verticale représente la profondeur dans la carotte

BLKS 98-22 intervalle ( cm)	Coefficient de corrélation R						No. niveaux	niveau de probabilité (p):
	I/S	I/K	I/Ch	S/K	S/Ch	K/Ch		
0-706 cm	<b>-0,96597</b>	<b>0,526616</b>	0,146025	<b>-0,66245</b>	<b>-0,24076</b>	<b>-0,24769</b>	51	<b>0,1%</b>
0-24 cm	<b>-0,95045</b>	-0,06319	0,393807	-0,21038	-0,3063	<b>-0,65186</b>	11	<b>1%</b>
27-140 cm	<b>-0,96588</b>	<b>0,561776</b>	<b>0,457494</b>	<b>-0,72293</b>	<b>-0,62448</b>	<b>0,505664</b>	14	<b>5%</b>
150-706 cm	<b>-0,87363</b>	0,125607	<b>0,353338</b>	<b>-0,39531</b>	<b>-0,52256</b>	<b>-0,3582</b>	26	<b>&gt;5%</b>
27-706 cm	<b>-0,96637</b>	<b>0,579381</b>	0,183096	<b>-0,69438</b>	<b>-0,32301</b>	-0,098339	40	



**Fig.5.5.** Coefficients de corrélation entre les argiles de la carotte BLKS 98-22, représentation graphique des anti-corrélations illite-smectite, smectite-kaolinite, smectite-chlorite et de la corrélation illite-kaolinite. NB : les corrélations S-K, S-Ch et I-K sont restreintes à l'intervalle 27-706

ments transportés (Rateev, 1952 ; 1964, Butuzova, 1960, Tagyeva et Tikhomirova, 1962, Stoffers et Müller, 1972 ; Rădan, 1999). Selon l'interprétation la plus courante, du fait de cette différence, la minéralogie des sédiments de surface change d'une zone à l'autre, avec une prédominance de l'illite dans la moitié Nord, et de la smectite dans la moitié sud de la mer. Cependant, il faut signaler que des études sur la minéralogie des dépôts pléistocènes des plaines du Nord-Ouest et du Nord de la Mer Noire, montrent que dans les paléosols et les lœss la composante principale est la smectite, suivie par l'illite, avec des proportions variables selon l'âge du dépôt (Pe-rederij, 2001 et les références citées).

La kaolinite est plus fréquente devant les embouchures des fleuves et dans la moitié septentrionale du bassin; la chlorite, qui est ferrifère, apparaît sporadiquement dans le quart nord-est, surtout du fait des contributions septentrionales (Fig.5.6).

Les sédiments de fleuves anatoliens comme le Sakarya, Filyos, Kizil Irmak, Yeşil Irmak, Melet, Aksu, Harşit, Halziden et Gorun (Figs.5.6 et 5.7) sont très riches en smectite. Leur apport est redistribué dans la zone Ouest de la mer par: (i) un courant de profondeur, de direction opposée au courant

cyclonique des eaux de surface, (ii) les courants de turbidité et (iii) diffusion dans la couche néphéloïde (Stoffers et Müller, 1972 ; Müller et Stoffers, 1974 ; Rădan, 1999).

Dans la Mer d'Azov, l'illite est prédominante dans les associations minéralogiques des suspensions du Kuban et des sédiments marins, suivie par la smectite. Le Don fait exception avec des sédiments en suspension contenant davantage de smectite (Aleksina *et al.*, 1972).

L'étude des minéraux argileux transportés par l'eau dans le secteur roumain du Danube a mis en évidence la dominance de l'illite puis de la smectite (Rădan in Mihăilescu *et al.*, 1972 ; Rădan, 1999). L'étude détaillée des sédiments superficiels de la zone Nord-Ouest, entre la baie de Varna, la presqu'île de Crimée et le parallèle de 43°, a mis en évidence la dominance illitique-smectitique de la fraction argileuse (Rădan, 1999). Le rapport moyen smectite/illite est de 0,36. Les concentrations maximales d'illite se trouvent devant les embouchures des fleuves Dniestr et Dniepr et les concentrations maximales de la smectite dans les zones influencées par les apports danubiens (mais toujours sur un fond illitique dominant) (Fig.5.8).

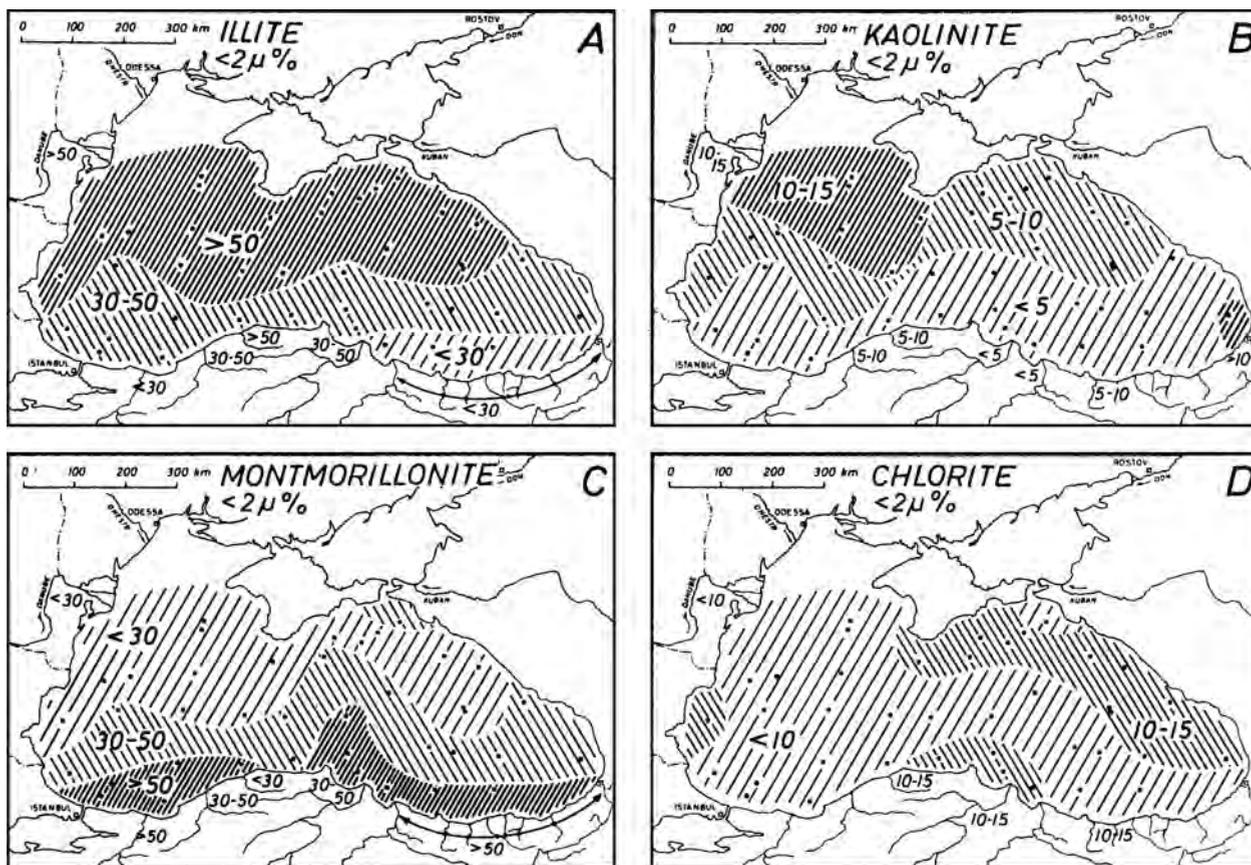


Fig.5.6. Distribution des minéraux argileux dans les sédiments de surface de la Mer Noire (d'après Stoffers et Müller, 1972)

Sur cette figure, Rădan (1999) montre la tendance générale à l'augmentation des quantités d'illite, kaolinite et chlorite du delta du Danube vers le large, mais la diminution de la quantité de smectite. Cette distribution semble en désaccord avec la tendance générale d'augmentation de la quantité de la smectite vers le sud, tendance mise en évidence à l'échelle du bassin (Fig.5.7). L'auteur explique que la non-concordance est seulement apparente, les valeurs du rapport smectite/illite ne dépassant pas le domaine de variation (<0,3-0,5) marqué sur la carte générale (Fig.5.7).

Pour expliquer les quantités élevées de la smectite devant les embouchures du Danube, l'auteur mentionne la construction, en 1970, du barrage de 'Portile de Fier I' (Les Portes de Fer I), et en 1983 du barrage 'Portile de Fier II', à environ 1000 Km des embouchures du Danube. Ces deux constructions ont provoqué la diminution d'environ 50 % de l'apport sédimentaire du Danube dans la Mer Noire, la plupart de sédiments fins étant piégés. Ceci a entraîné aussi un changement de la minéralogie des argiles qui arrivent par le Danube.

Remarquons que certains échantillons utilisés pour la réalisation de la carte, ont été prélevés dans la zone de plates-formes de forage pétrolière. Il y a une contamination des teneurs en smectite par la bentonite, laquelle entre dans la composition des boues de forage. Cette carte est donc vala-

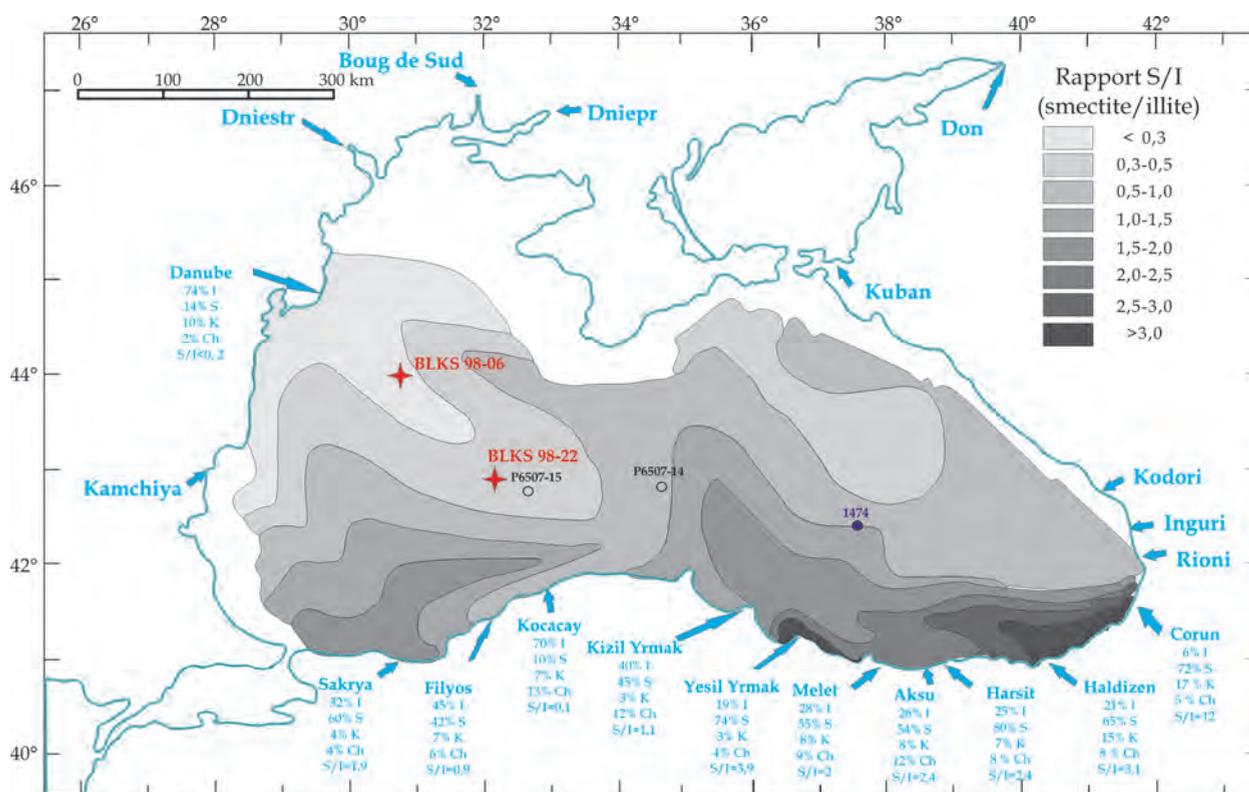
ble uniquement pour la période très récente. Elle ne peut pas être considérée comme indicatrice de l'apport des minéraux argileux par le Danube dans le passé.

#### b) Cas des carottes marines étudiées

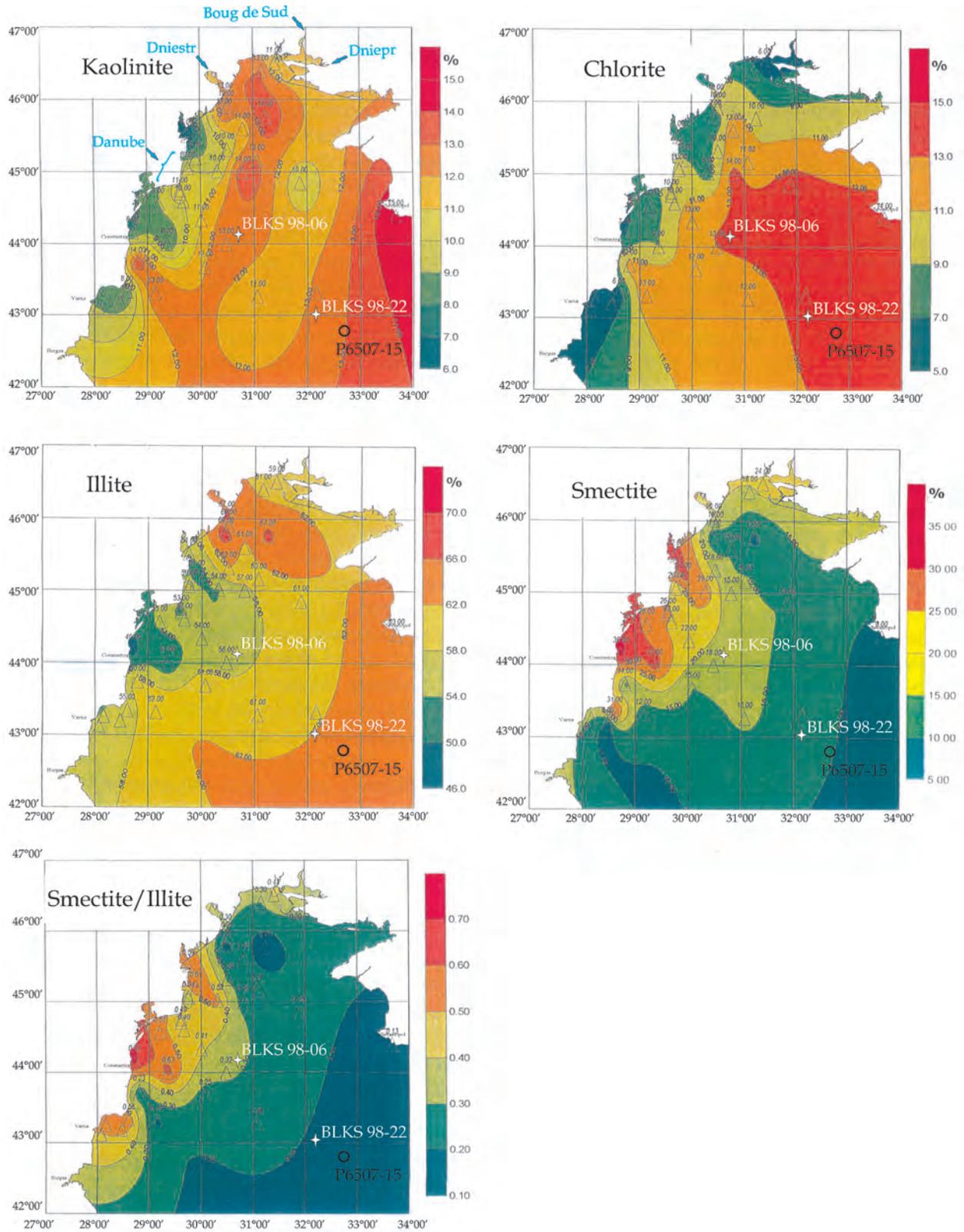
La carotte **BLKS 98-06** se trouve sur la large plate forme continentale du nord-ouest du bassin, dans la zone d'influence des apports du Dniepr, du Dniestr et du Danube. Dans cette zone, la rupture de pente se trouve a environ 160-165 m de profondeur.

On remarque que la smectite est le minéral prédominant tout au long de la carotte. Elle représente ~50 % du total des minéraux argileux (Fig.5.1). Cette valeur est beaucoup plus grande que la valeur moyenne estimée par Müller et Stoffers (1974), inférieure à 30% pour les sédiments de surface de cette même zone (Fig.5.5). L'apport de minéraux argileux dans la Mer Noire a donc changé dans le temps. Etant donné que le Danube et les fleuves du nord et du nord-ouest de la mer apportent à présent une majorité d'illite, on est en droit de se demander quelle est l'origine de la smectite de la carotte **BLKS 98-06**.

On admet couramment d'après Stoffers et Müller (1972) et Rădan et Jipa (1975), que la diminution de la proportion de smectite vers l'actuel dans le sédiment, est une indication



**Fig.5.7.** Variation du rapport smectite/illite dans les sédiments superficiels de la Mer Noire et contenu en minéraux argileux dans les suspensions de quelques fleuves (d'après Rădan et Jipa, 1975). Les étoiles représentent les carottes de notre étude, les cercles vides des carottes de la mission Odysseus 65, et le cercle plein - une carotte de la mission Atlantis II, 1969



**Fig.5.8.** Distribution des minéraux argileux dans les sédiments superficiels du Nord-Ouest de la Mer Noire (d'après Rădan, 1999) et localisation des carottes étudiées. Les étoiles représentent les carottes étudiées ici, les triangles: les points d'échantillonnage pour la réalisation de la carte, le cercle vide: la carotte P6507-14. A noter les échelles différents pour les pourcentages d'argiles

d'un affaiblissement de l'influence anatolienne. Lorsque les sources de sédiment du nord étaient bloquées ou relativement bloquées par le permafrost, alors l'illite arrivait difficilement. Mais, après avoir daté de la matière organique du sédiment dans les carottes **BLKS 98-06** et **BLKS 98-22**, on a remarqué que la smectite prédomine aussi avant 27 500 ans BP, et avant 24 000 ans BP respectivement selon ces deux carottes marines, lors de l'interglaciaire Valdai moyen. Faut-il envisager que l'Anatolie fournissait beaucoup de smectite même avant le dernier maximum glaciaire ? Une autre explication serait celle de la modification des bassins versants de fleuves du nord et nord-ouest favorisant un apport de smectite.

Analysons ces deux hypothèses.

#### **Hypothèse classique – la smectite arrive du Sud (H1):**

Stoffers et Müller (1972), ont proposé l'hypothèse d'une origine anatolienne des sédiments riches en smectite et une provenance septentrionale des sédiments riches en illite qui arrivent dans le bassin de la Mer Noire.

Examinons la probabilité d'une arrivée de la smectite anatolienne au nord-ouest du bassin, à 135 m et 2100 m de profondeur (profondeur d'eau aux emplacements des carottes **BLKS 98-06** et **BLKS 98-22**).

##### *i) apport par les eaux de surface*

Pour la validité de ce que nous proposons ci-dessous, on admettra le postulat selon lequel les courants de surface sont inchangés depuis 28 000 ans.

Pour atteindre l'emplacement des carottes **BLKS 98-06** et **22**, la smectite qui serait apportée par les rivières méridionales devra respecter plusieurs conditions : être entraînée dans le courant principal nommé Rim (Oguz *et al.*, 1993 ; Oguz et Besiktepe, 1999) et non pas dans un des courants anticycloniques marginaux ou par les courants intérieurs tels que les gyres "occidental" et "oriental" (Fig.1.4 du 1-er chapitre). Une fois devant la côte roumaine, les particules doivent être "arrachées" du Rim par l'anticyclone Kali-Akra, qui pourra les déposer ensuite dans la zone sud-est des embouchures du Danube. Pour se déposer à l'emplacement de la carotte **BLKS 98-06**, les particules ne doivent pas descendre pendant leur transport, à des profondeurs plus grandes que 135 m.

Il est évident que seulement une très faible quantité du sédiment argileux transporté par les fleuves du sud pourra atteindre le nord-ouest du bassin, la majeure partie étant déposée à leurs embouchures ou entraînée dans les courants anticycloniques adjacents au Rim. Ceci parce que, tout d'abord, un temps de transport des sédiments en suspension si long, de l'ordre de centaines de jours est très peu probable. Un facteur encore plus important tient à la faible salinité dans le bassin, sachant que les argiles apportées par les fleuves dans un bassin d'eau salé ont tendance à flocculer.

Un apport de sédiments à smectite de l'Anatolie par les courants de surface au nord-ouest du bassin sur la plate-

forme continentale est donc très peu probable. Il en résulte que les sédiments à smectite de la carotte **BLKS 98-06** ne sont sans doute pas apportés de l'Anatolie par les eaux de surface.

##### *ii) apport par les courants de fond*

Une arrivée des sédiments par le fond du bassin, transportés par les courants de turbidité, est possible. Les fleuves qui débouchent sur la côte sud de la Mer Noire ont une très haute énergie due au relief montagneux de l'Anatolie. Ces cours d'eau peuvent donc provoquer des courants de turbidité capables de parcourir de longues distances sur le fond du bassin. Mais on ne dispose pas d'informations sur les distances parcourues par ces courants sur la côte anatolienne. Il est pourtant bien clair que la smectite de la carotte **BLKS 98-06** ne peut pas être d'une telle origine puisqu'elle se trouve sur la plate-forme continentale du nord-ouest à 135 m de profondeur.

En ce qui concerne les sédiments de la carotte **BLKS 98-22**, un apport par les eaux de surface de sédiments à smectite est très peu probable. Du fait de son emplacement dans la plaine abyssale elle pourra se trouver, éventuellement, dans la zone d'influence de courants de turbidité provoqués par les fleuves anatoliens. Cependant, comme cette carotte est dans une levée du dernier système chenal-levée du Danube, elle se trouve dans la plupart de temps sous l'influence de celui-ci, comme on le démontrera plus loin.

#### **Hypothèse 2 – la smectite arrive du Nord (H2):**

Une origine Nord et Nord-Occidentale des argiles de la carotte **BLKS 98-06**, doit être cherchée dans **la charge sédimentaire des fleuves et dans la remobilisation de paléosols et de loëss.**

##### **H2 - a)**

Effectivement, l'étude de Perederij (2001) sur les argiles des paléosols et des loëss pléistocènes des plaines d'Ukraine montre que les principaux minéraux argileux de ces sédiments sont les smectites et l'illite. La dominance de l'une ou de l'autre est fonction de l'âge des sédiments et est liée à la variation des conditions paléoclimatiques. Le drainage de dépôts du Pléistocène d'Ukraine avec des hautes teneurs en smectite pourrait être à l'origine de ce que l'on observe dans les sédiments. Lors les périodes de fortes précipitations ou de fonte de calottes de glace, le Dniepr pouvait transporter davantage de smectite, à la suite du lessivage ou d'érosion des sols et des loëss.

Un argument supplémentaire est fourni par la minéralogie de quelques niveaux de sédiments, plus âgés que 25 000 ans, dans les carottes **BLKS 98-04** et **BLKS 98-06** (**Fig.5.3** et **Tableau 5.2**). Les analyses au microscope optique montrent que les minéraux lourds prédominants sont les amphiboles, les grenats et les pyroxènes. Cela correspond à la sous-province d'Odessa, définie par Fulga (1996) (**Fig.5.9**), et concerne les sédiments de surface influencés principalement par

les apports du Dniepr et du Dniestr. Ainsi lors de certaines périodes du passé (notamment dans la période 27 000-25 000 ans BP) l'apport sédimentaire des deux fleuves était plus important que celui du Danube. Leur charge argileuse était dominée par la smectite.

**H2 – b)**

Un autre possible pourvoyeur de smectite pourrait être le Don, qui en transporte encore de nos jours. La connexion entre la Mer d'Azov et la Mer Noire est supposée avoir été plus facile dans le passé, quand le bassin de la mer d'Azov était moins rempli de sédiments. Une influence faible du Danube dans le passé et un apport plus important de sédiments par le Don, avant le remplissage de la Mer d'Azov, pourraient aussi conduire à un apport important de smectite entre 27500 ans et l'actuel.

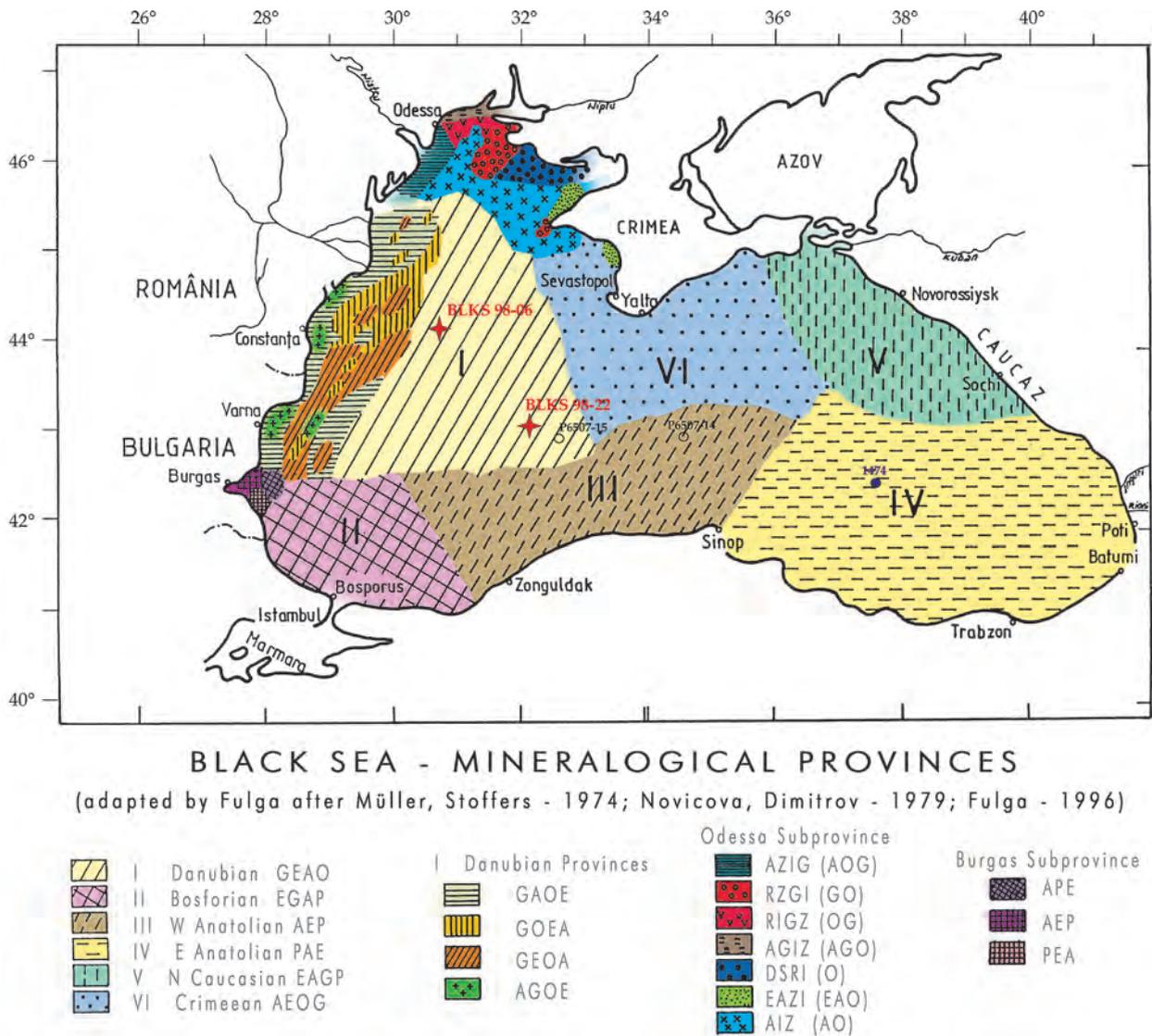
Dans la carotte BLKS 98-22, la quantité de smectite varie relativement peu de la base jusqu'à 350 cm, pour présenter

ensuite des variations importantes (Fig.5.4). On peut observer que la quantité de smectite a une légère tendance à la diminution entre 350 et 110 cm, mais elle prédomine toujours par rapport à l'illite. A partir de 110 cm vers le sommet, la smectite présente des minima très importants, correspondant à des maxima d'illite. On remarque des pics d'environ 47-55 % à 22700, 21200, 14300, 8000 et 5000 ans BP et de fortes diminutions de la quantité de smectite (jusqu'à 10% du total des argiles) à 18 400 - 18 000 ans et entre 13 100 et 11 100 ans (Fig.5.10).

Sur cette figure, l'échelle verticale est une échelle des temps. On peut distinguer les variations suivantes dans la distribution des argiles :

1. Une prédominance de la smectite entre 24000 et 19000 ans BP (Fig.5.10).

Des études récentes, ont montré que la carotte BLKS 98-22 se trouve dans la levée gauche d'un chenal du dernier sys-



**Fig.5.9.** Provinces minéralogiques de la Mer Noire (Fulga, 2005)

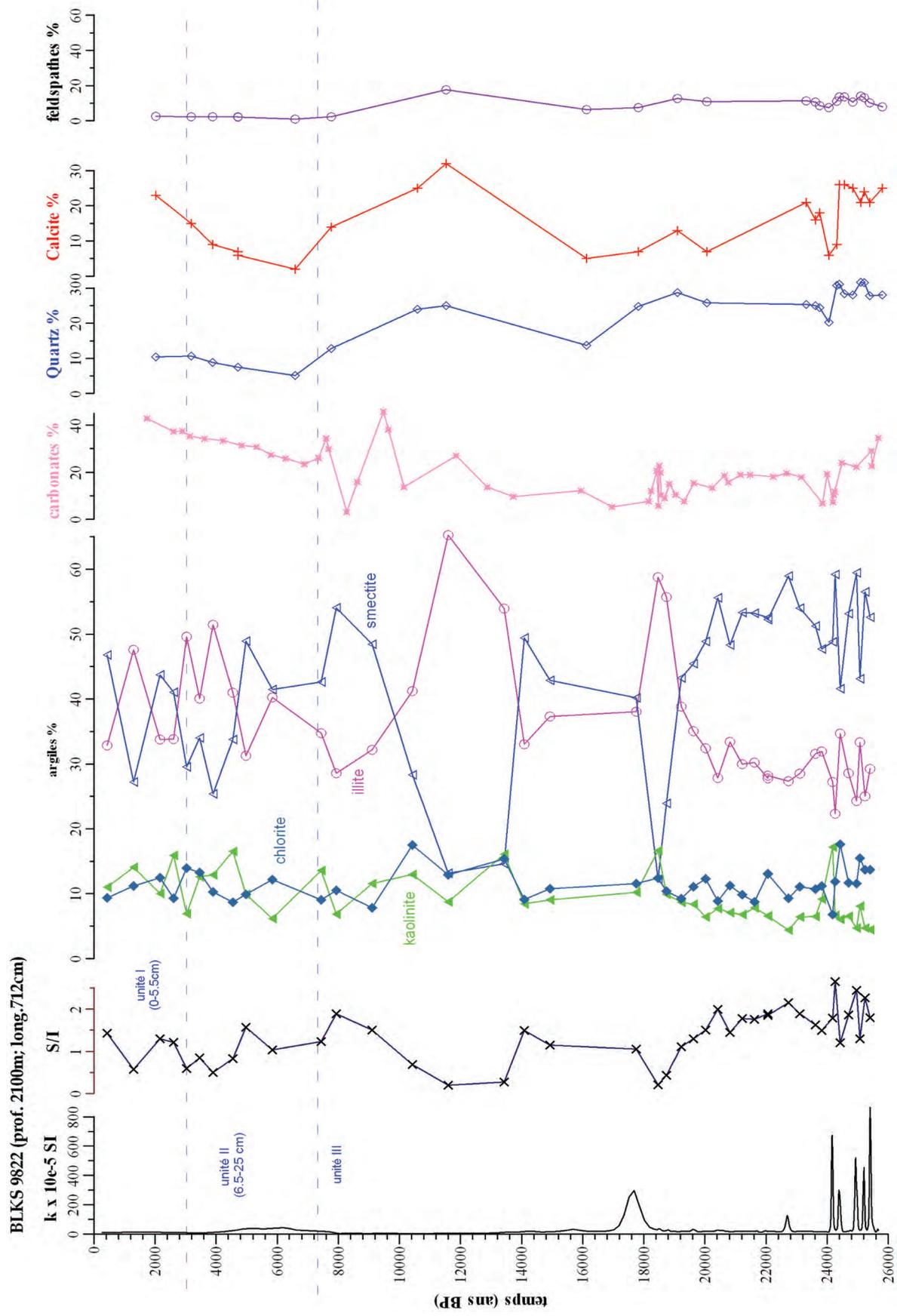


Fig.5.10. Variations de la teneur de différentes argiles, du rapport smectite/illite, de la minéralogie par IR de la carotte BLKS 98-22, en fonction de l'âge

tème chenal-levée du Danube (Popescu *et al.*, 2001 ; Popescu, 2002). Ceci signifie qu'une partie de ses sédiments a été déposée pendant les phases d'activité de ce système. De la base jusqu'à 140 cm on trouve surtout des silts organisés, avec stratification parallèle, représentant des cycles turbiditiques (Popescu, 2002). Il s'agit bien de sédiments d'âge supérieur à 19000 ans, apportés par le système chenal-levée dépendant du Danube. L'hypothèse d'un apport anatolien de smectite par les eaux de surface est donc exclue, au moins pour les sédiments de 24000 à 19000 ans BP. Les sédiments à smectite viennent en ce cas du Nord-Ouest du bassin, via le canyon sous-marin du Danube (le canyon Viteaz).

Un changement important du rapport smectite/illite à lieu à 19000 ans, âge qui correspond dans la carotte à une profondeur de 110 cm selon l'échelle chronologique adoptée ici (Figs.5.4 et 5.10). Ce rapport, jusqu'ici toujours au-dessus de 1, commence à diminuer vers des valeurs plus petites. L'illite prend la place de la smectite.

2. Entre 19000 et 18000 ans BP, il y a une forte augmentation de la quantité de l'illite (qui atteint 55%) et, corrélativement, une forte diminution de la quantité de smectite (Fig.5.10). Cette période correspond au Dernier Maximum Glaciaire (DMG).

L'origine de ces sédiments doit être cherchée au nord et nord-ouest du bassin, dans l'apport sédimentaire des fleuves alimentés alors par des lacs proglaciaires. Pourtant, la ligne du permafrost discontinu descendait très près de la marge nord de la Mer Noire et celle du permafrost continu n'était pas trop éloignée vers le nord (Fig.1.10 du premier chapitre). Le sol étant gelé, les apports de sédiments par les rivières du nord du bassin, devaient avoir beaucoup diminués. Le seul fleuve important qui traversait des zones de permafrost moins étendues était le Danube. La charge sédimentaire actuelle de ce fleuve étant dominée par l'illite, on peut penser que ce pic d'illite représente une phase de sédimentation dominée par ce fleuve.

3. Entre 18000 et 13600 ans BP, les quantités de smectite et d'illite sont relativement égales, mais la résolution de nos analyses pour cette période n'est pas suffisante pour en tirer des conclusions.

4. Un deuxième pic d'illite (valeurs maximales à 50-62%) se trouve dans l'intervalle 13 600 – 10 600 ans BP (Fig.5.10). Cette période correspond, dans les enregistrements de pollens à terre, aux épisodes Bølling (13-12 ka BP), Older Dryas (12-11,8 ka BP), Allerød (11,8-11 ka BP) et Younger Dryas (11-10 ka BP) (Mangerud *et al.*, 1974).

L'origine de ce deuxième pic d'illite est difficile à trouver. Une augmentation des apports de rivières du nord du bassin, ou une contribution très importante du Danube, sont des hypothèses à retenir.

L'augmentation des apports d'illite issus de ces cours d'eau septentrionaux peut être reliée à la fonte de la calotte glaciaire accentuant les débits.

Aujourd'hui c'est le Danube qui domine les apports aqueux et sédimentaires dans la Mer Noire. Cependant, il est difficile d'expliquer ce pourquoi il aurait apporté plus de sédiments à illite dans cette période passée.

Vers l'actuel, les valeurs de l'illite et de la smectite varient entre 30 et 50 %. Les changements du type de minéral argileux dominant sont plus fréquents. L'amplitude de ces variations est moindre que celles des périodes antérieures et elle se maintient aux alentours de 20%.

### c) Comparaison de nos données à celles de la littérature

Il y a peu d'articles traitant de l'origine des argiles dans les sédiments de la Mer Noire. Les plus cités sont ceux de Stoffers et Müller (1972), Müller et Stoffers (1974) et Rådan et Jipa (1975). Ils évoquent une origine septentrionale des sédiments ayant beaucoup d'illite et une origine anatolienne des sédiments contenant une plus grande quantité de smectite. Les auteurs ont fait remarquer aussi une augmentation de la quantité de smectite avec la profondeur dans les carottes qu'ils ont étudiées : ils ont lié les pics de cette argile aux changements climatiques survenus lors des refroidissements du Dernier Maximum Glaciaire et du Dryas Récent (Younger Dryas, YD). Il s'agit d'études sur des carottes profondes, situées à plus de 2000 mètres de profondeur, dans les parties occidentale et orientale de la Mer Noire.

Nous avons pu observer que pour les carottes étudiées ici, il n'y a pas de corrélation entre les périodes froides et la présence des pics de smectite, mais plutôt l'inverse, surtout lors du DMG. Comment comprendre cette différence entre nos résultats et ceux de la littérature ?

Une des premières études détaillées de la minéralogie des argiles le long de carottes de la Mer Noire, a été réalisé par Stoffers et Müller (1972). Il s'agit de matériel prélevé sur presque toute la surface du bassin, durant l'expédition „*Atlantis II*” de 1969. Dans la plupart des carottes, ils ont remarqué une diminution de la quantité de smectite avec la profondeur. Cette diminution n'est pas constante, mais reste soumise à des fluctuations. Les pics de smectite sont attribués à des changements climatiques, comme le DMG ou le YD. Afin d'illustrer ces fluctuations, ils ont choisi deux carottes de la partie orientale du bassin: **1474** à 2114 m et **1436** à 2158m de profondeur. Nous allons comparer la carotte **BLKS 98-22** à la carotte **1474** seulement, parce qu'elle présente l'avantage de bénéficier d'une chronologie.

Dans la **figure 5.11**, l'échelle d'âge située à droite par rapport à la courbe de smectite de la carotte **1474**, est l'échelle obtenue en appliquant des taux de sédimentation constants entre chaque niveau datée. La première remarque qui s'impose est que si on fait ainsi le calcul des taux de sédimentation pour les intervalles datés de la carotte **1474**, les âges de 10000-11000 ans BP et 18000 ans BP ainsi obtenus ne correspondent pas aux pics de smectite attribués par les auteurs au YD et au DMG. Une comparaison des variations de la smectite et des taux de carbonates des carottes **BLKS 98-22** et **1474**

(Fig.5.7), est présentée dans la **figure 5.11**. Les corrélations entre les deux carottes conduit à proposer ce qui suit:

- 8000-8300 ans BP : au pic (1) de 27 cm dans BLKS 98-22 (~54% smectite) correspond le pic à 110 cm (~60%) dans 1474 ;
- 10000-14000 ans BP : le " creux " de smectite (2) situé entre 50 et 60 cm dans la carotte BLKS 98-22, correspond au pic situé entre 220 et 300 cm dans 1474.
- ~14000 ans BP : le pic (3) de 64 cm dans BLKS 98-22 (50% de smectite) correspond au point à 320 cm dans 1474 (~60% de smectite);
- 16800 ans BP: (4) le niveau 80 cm (48% de smectite) dans BLKS 98-22, correspondant approximatif au niveau de même âge dans la carotte 1474 (48% smectite), à 580 cm ;
- 18400 ans BP : (5) au niveau 90 cm dans BLKS 98-22, représenté par un " creux " dans la courbe de la smectite peut correspondre le " creux " de 690 cm dans la carotte 1474, donc du même âge ;
- 20000-21000 ans BP : (6) à l'intervalle 130-160 cm dans BLKS 98-22 correspond l'intervalle 810-920 cm dans la carotte 1474.

A la suite de cette corrélation, nous pouvons remarquer que la seule période où les deux courbes de smectite sont anti-corrélées, est située entre 10000 et 14000 ans BP (2 sur la **Fig.5.11**). Pour BLKS 98-22 cette période est représentée par une chute de la concentration en smectite jusqu'à 3-5%, tandis que dans la carotte 1474 elle est représenté par un pic de smectite, atteignant jusqu'à 70-80%. Cette différence peut être due à la localisation des carottes, une dans la partie ouest et la deuxième dans la partie est du bassin ou encore à un sérieux problème de chronologie que nous n'avons pas décelé.

Pour les autres intervalles, la corrélation entre ces deux courbes est bonne. On peut donc penser que, pour la carotte 1474, les auteurs ont attribué les pics de smectite aux périodes froides sans s'assurer que la chronologie pouvait contredire cette attribution. Le DMG est représenté dans les deux carottes par des diminutions de la quantité de smectite du sédiment. Ce résultat est contraire à l'opinion " classique " qui lie le DMG à une augmentation de la smectite.

L'analyse de Rădan et Jipa (1975) effectuée pour la zone abyssale de la Mer Noire (carotte P6507-15, prélevé pendant l'expédition " *Odyseus 65* "), confirme l'augmentation de la smectite avec la profondeur dans la carotte, à l'inverse de l'illite. Le site étudié est proche de celui de la carotte BLKS 98-22, analysée pour les types d'argiles (**Fig.5.7**).

Du point de vue de la sédimentologie, des similitudes entre ces deux carottes sont évidentes. On retrouve la succession des unités sédimentaires spécifiques pour le bassin profond (unités I, II et III décrites par ailleurs). Les carottes sont à moins de 40 km l'un de l'autre.

Comme il s'agit d'un système relié au canyon Viteaz, la source de ces sédiments riches en smectite se trouve sûrement au Nord-Ouest ou au Nord du bassin.

Pourtant, il est difficile à comparer les résultats de Rădan et Jipa (1975) avec les nôtres du fait d'un pas d'échantillonnage plus large, et du fait d'une chronologie peu contrainte. Ils ont corrélié les pics à smectite avec ceux de la carotte 1474 (Müller et Stoffers, 1974, datée par Degens et Ross, 1972). Ensuite ils ont attribué un âge de 18000 ans (DMG) au pic à 898 cm et un âge de 11000 ans (YD) au pic de 365 cm.

La **figure 5.12** présente la comparaison entre les teneurs de smectite et de carbonates le long de ces deux carottes. Nous pouvons remarquer que les courbes de smectite sont bien similaires. En faisant abstraction des dates attribuées par les auteurs de l'article, la corrélation entre les pics de smectite peut se faire de la manière suivante :

- au pic (1 sur la **Fig.5.12**) dans l'unité III, juste au-dessous de la limite inférieure du sapropèle, à 27cm dans BLKS 98-22, correspond le pic de 107 cm dans P6507-15 ; les valeurs atteintes par la smectite dans ces pics sont respectivement 54% et 47% ;
- au " creux " (2) de 49-60 cm dans BLKS 98-22 (13-15% de smectite), correspond le " creux " entre 169 et 273 cm dans P6507-14 (22-32% de smectite) ;
- au pic (3) situé à 64 cm dans la carotte BLKS 98-22 (49% de smectite) correspond celui de 365 cm dans la carotte P6507-15 (53% de smectite);
- au " creux " (4) de 91 cm dans BLKS 98-22 (12% de smectite) peut correspondre celui de 427-553 cm dans P6507-14 (29-30% de smectite) ;
- au pic (5) à 140 cm dans BLKS 98-22 (56% de smectite), correspond le pic de 603 cm dans la P6507-15 (60% de smectite);
- au pic (6) de 198 cm dans BLKS 98-22 (59% de smectite) correspond le pic de 729 cm dans P6507-15 (59% de smectite).

Cette corrélation fait correspondre un âge de 11000 ans BP au niveau 157 cm dans la carotte P6507-14. De même manière, au " creux " (2) de smectite situé entre 169 et 273 cm on peut attribuer un âge de 12000-13000 ans BP ; au pic (3) d'âge 14000 ans BP correspond le "creux " (4) - âgé de ~18000 ans.

Il y a d'autres possibilités de corrélation entre les deux courbes mais des taux de sédimentation très différents rendent la corrélation difficile. Sur la **figure 5.12**, nous avons marqué avec des lettres une deuxième possibilité de corrélation entre les pics de deux courbes. Dans ce cas, les âges 11000 et 18000 ans seraient déplacés encore plus haut dans la carotte P6507-14.

On peut remarquer, que les valeurs des pics se ressemblent ici beaucoup plus que dans le cas de la comparaison entre BLKS 98-22 et 1474 dont, rappelons-le, les sites sont voisins.

Si on prend en considération les corrélations présentées ci-dessus, les âges de 11000 et 18000 ans BP se déplacent vers le haut de la carotte P6507-15.

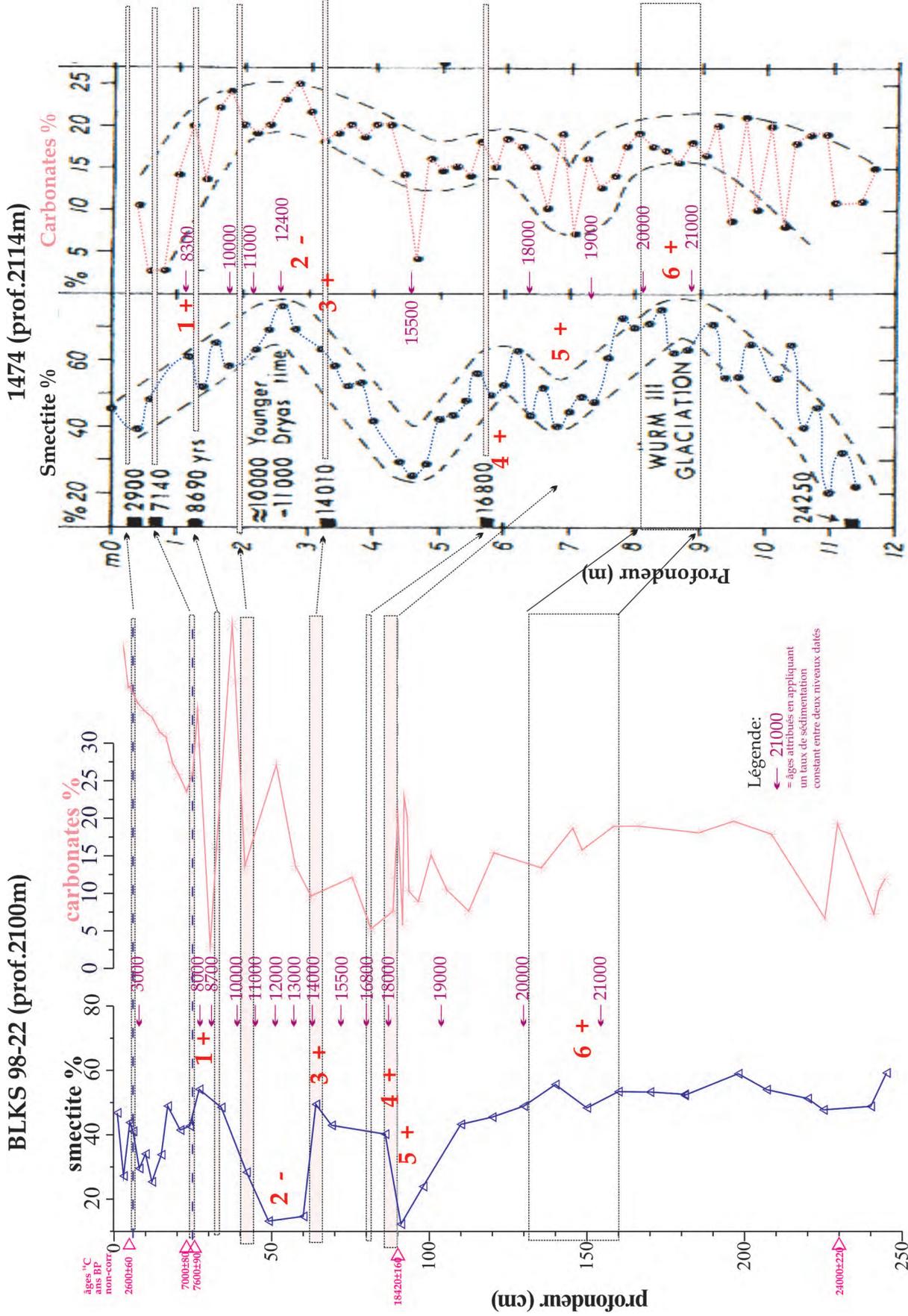


Fig.5.11. Corrélation des courbes de smectite des carottes BLKS 98-22 (cette étude) et 1474 (Stoffers et Müller, 1972)

La corrélation entre deux carottes proches comme BLKS 98-22 et P6507-15 est meilleure que celle établie entre deux carottes très éloignées, comme BLKS 98-22 et 1474 ou P6507-15 et 1474. En conséquence, nous pensons que les périodes froides sont plutôt représentées, dans la partie Nord-Ouest de la Mer Noire, par des diminutions importantes de la quantité de smectite arrivant dans le bassin.

En prenant en compte les données de la littérature, Major *et al.* (2002), parlent aussi d'une origine méridionale (anatolienne) des argiles à smectite qui prédominent de 25 000 à 15 000 ans BP et de 11 000 à 10 000 ans BP, tandis que les sédiments d'âge 15 000 – 13 400 ans, avec beaucoup de illite, sont considérés comme venant du nord. Ce point de vue sera discuté ci-après. Nous bénéficions d'analyses dans les carottes BLKS 98-09 et BLKS 98-10, à 240 et 378 m de profondeur, situées sur le talus Nord-Ouest pour illustrer notre propos. Nous avons également procédé à la mesure de quelques paramètres magnétiques.

La **figure 5.13** présente la corrélation entre les carottes BLKS 98-22, BLKS 98-09 et 10. Certains pics et certains creux peuvent être corrélés, mais une différence majeure est à souligner : les taux de smectite qui sont beaucoup plus élevés dans BLKS 98-22. Cette différence est due à l'emplacement des carottes BLKS 98-09 et 10 sur le piémont continental, mais aussi, aux méthodes d'analyse et de quantification des argiles utilisées. La différence entre les matériaux datés (des coquilles pour la carotte BLKS 98-10 et de la matière organique du sédiment pour la carotte BLKS 98-22), peut jouer aussi un rôle. Une autre différence importante est la prédominance de l'illite pour la période 15000 - 13400 ans BP, dans la carotte BLKS 98-10 (Major *et al.*, 2002), alors que dans BLKS 98-22, la période où l'illite est prédominante est 13 600 – 10600 ans BP. Un tel décalage peut-être dû à la position des deux sites dans le bassin : une sur le piémont continental bien au nord du canyon Viteaz, et le deuxième dans la plaine abyssale près du chenal représentant la première phase d'avulsion du système chenal-levée du Danube. Même s'il est évident que la source d'illite se trouve au nord-ouest du bassin pour les deux cas, nous pensons que les conditions hydrologiques qui favorisaient l'alimentation en illite du piémont continental, entre 15000 et 13400 BP, ont connu un changement. Celui-ci aurait déplacé le dépot centre vers l'intérieur du bassin, favorisant l'apport accru d'illite vers le site de BLKS 98-22 entre 13600 et 10600 ans BP.

Tekiroglu *et al.* (2001) ont étudié, pour la minéralogie des argiles, des carottes profondes (de 1900 à 2100 m de profondeur), situées dans la moitié orientale de la Mer Noire. Ils ont trouvé une situation opposée à celle décrite par Stoffers et Müller (1972), Jipa et Rădan (1975) et Major *et al.* (2002) : une augmentation de la quantité de smectite vers l'actuel. On observe aussi une diminution de l'illite et de la quantité de sable.

### 5.3.2. SIGNIFICATION CLIMATIQUE DES CHANGEMENTS MINÉRALOGIQUES

Autour de 27500 ans BP et entre 24000 et 19000 ans BP, la smectite arrivait dans le bassin en quantités plus grandes que l'illite. Comme nous l'avons montré auparavant, la smectite était issue du nord et du nord-ouest du bassin. L'explication de ce phénomène peut-être le lessivage des paléosols et des loëss de l'Ukraine, riches en smectite. Ce lessivage pourrait être dû aux périodes de fortes précipitations. Malheureusement, nous ne disposons pas de données sur les précipitations pour vérifier cette hypothèse.

Une étude paléo-environnementale, dans une zone relativement proche de la Mer Noire, couvre la période 34000-12000 ans BP : bassin des Carpates, en Hongrie (Sümeği et Krolopp, 2002). L'analyse des changements de types de mollusques, indicateurs de certaines conditions de température, humidité et végétation comparés aux profils de pollens analysés précédemment dans la zone de ce bassin, montre des variations importantes des conditions climatiques dans la période qui nous intéresse, ~27500 et 24000-19000 ans BP. On en déduit qu'autour de 27500 ans BP, le climat d'été du bassin de Carpates était chaud, similaire à celui d'aujourd'hui. Autour de 24000-22000 ans BP, le refroidissement du climat dans le bassin a initié la formation du loëss. Cette période a été froide et sèche, avec la prédominance d'une végétation de steppe. Un nouveau réchauffement a suivi, autour de 20000-19000 ans BP, juste avant le refroidissement du DMG.

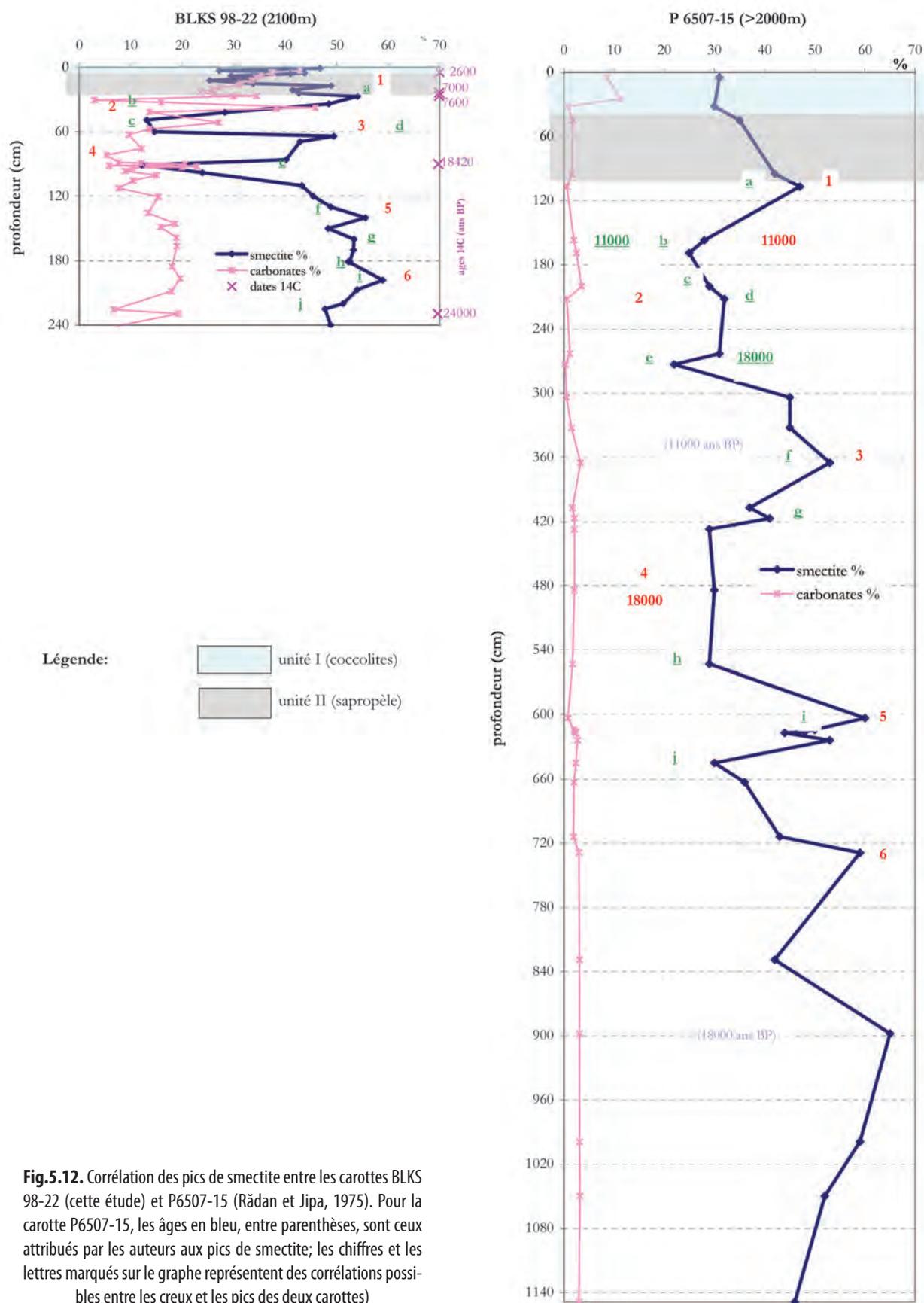
Si nous considérons que les variations du climat dans la zone de la Mer Noire sont similaires à celles du bassin de Carpates, nous pouvons observer que la prédominance de la smectite jusqu'à 19000 ans BP n'est pas le résultat d'un climat constant. Cette dominance perdure, malgré l'alternance de périodes chaudes et froides, probablement due à une source très riche en smectite au nord et nord-ouest du bassin. Cependant, les périodes chaudes sont majoritaires dans ces intervalles de temps, ce qui nous permet de lier l'importance de cette argile avec des périodes à climat chaud.

Un changement drastique intervient à 19000 ans BP, quand la quantité de smectite diminue fortement, l'illite devenant prépondérante.

Les périodes où l'illite prédomine dans le cortège argileux sont 19000-18000 ans BP et 13600-10600 ans. Les causes de ces deux 'événements' semblent être différentes.

Pour la période 19000-18000 ans BP il s'agit très probablement du Dernier Maximum Glaciaire, quand le niveau de la Mer Noire était plus bas qu'actuellement et que le Danube apportait davantage de sédiment que les autres rivières du nord du bassin. En effet, le fleuve traversait une zone moins étendue de permafrost.

Pour la période 13600-10600 ans BP l'interprétation des causes d'un apport accru d'illite est plus difficile. Dans les enregistrements polliniques de l'Europe de Nord et du Nord-Ouest, cette période comprend une période froide *Oldest*



**Fig.5.12.** Corrélation des pics de smectite entre les carottes BLKS 98-22 (cette étude) et P6507-15 (Rädan et Jipa, 1975). Pour la carotte P6507-15, les âges en bleu, entre parenthèses, sont ceux attribués par les auteurs aux pics de smectite; les chiffres et les lettres marqués sur le graphe représentent des corrélations possibles entre les creux et les pics des deux carottes)

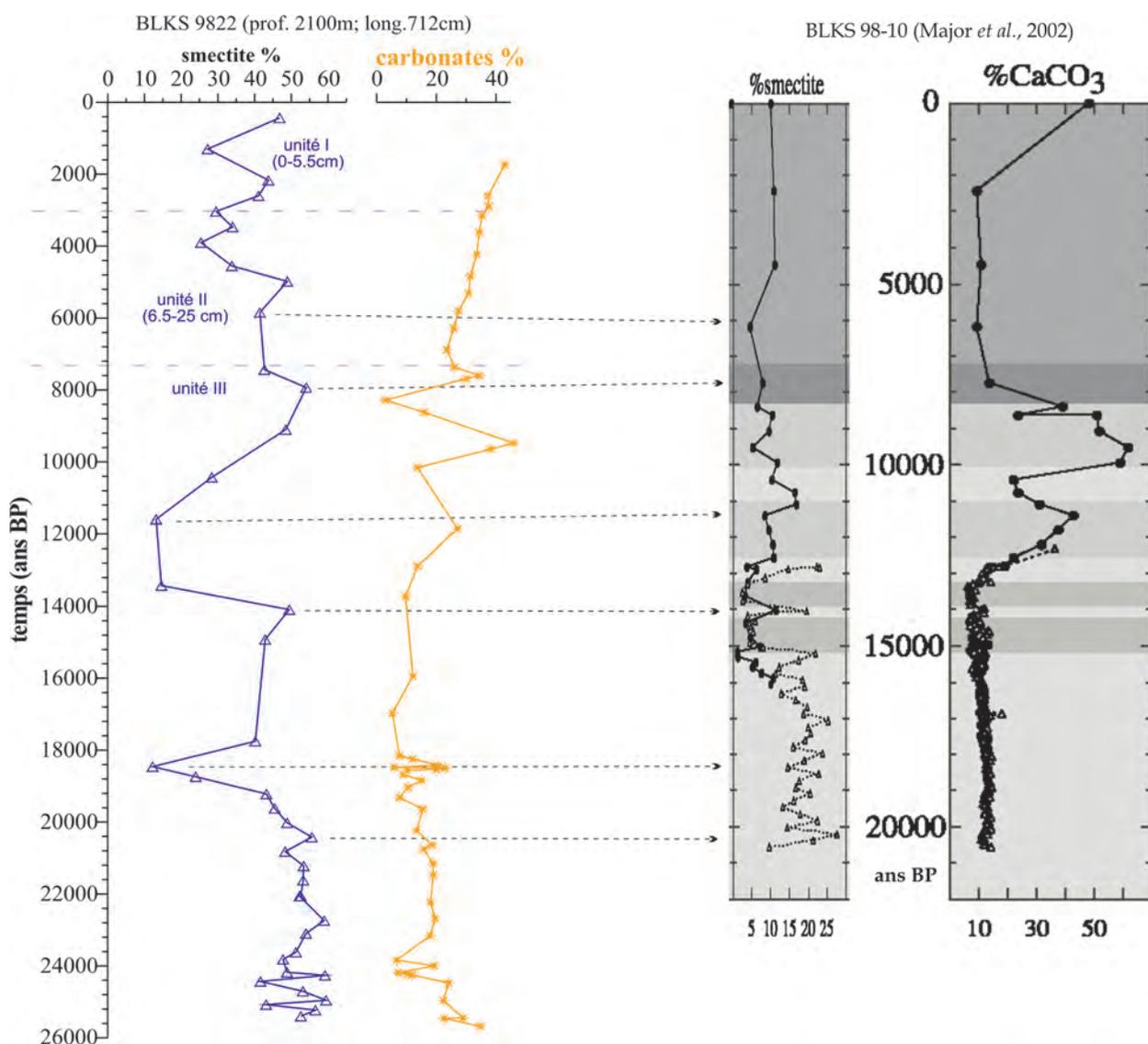
*Dryas* : 14000-13000 ans BP, suivie par les intervalles de réchauffement *Bølling* : 13000-12000 ans BP et *Allerød* : 11800-11000 ans BP séparées par *Older (Earlier) Dryas* : 12000-11800 ans BP et finie par le refroidissement *Younger Dryas* : 11000-10000 ans BP (Mangerud *et al.*, 1974 ; Welten, 1982 ; Amman and Lotter, 1989). Même si les limites exactes de ces unités chrono stratigraphiques peuvent varier légèrement d'une zone à l'autre, les auteurs sont d'accord sur le fait que avant 13000 ans BP le climat de l'Europe du N-O enregistrait une phase froide (*Pleniglacial*) suivie par une période de réchauffement entre 13000 et 11000 ans BP (*Late Glacial Interstadial*), pour revenir à des conditions froides entre 11000 et 10000 ans BP (*Younger Dryas* ou *Late Dryas*) (Lowe et Gray, 1980 ; Walker, 1995).

Plus près de la Mer Noire, l'analyse de mollusques sensibles aux changements du climat dans le bassin de Carpates, montrent qu'autour de 13000-12000 ans BP (~15000 cal. ans

BP), le climat subissait un radoucissement (Sümegi et Krolopp, 2002).

Dans plusieurs sites des Carpates, les analyses de pollens montrent que, par exemple entre 12500 ans BP et 11100 ans BP, le climat enregistrait des alternances de courtes périodes chaudes et sèches avec des périodes moins chaudes et humides (Wohlfarth *et al.*, 2001 ; Farcas *et al.*, 1999). Le *Younger Dryas*, a été observé, lui aussi, sur les diagrammes de pollens, avec l'augmentation du nombre de grains d'*Artemisia* (Pop *et al.*, 1971 ; Farcas *et al.*, 1999).

Nous ne pouvons dire davantage que lorsqu'il y a plus d'illite au nord-ouest, cela correspond à des alternances de périodes froides et chaudes et sèches. En effet, compte tenu de la faible résolution des intervalles de sédiments analysés on ne peut établir de corrélation nette entre abondance d'illite et type probable du climat correspondant.



**Fig.5.13.** Corrélation des pics de smectite des carottes BLKS 98-22 (cette étude) et BLKS 98-10 (Major *et al.*, 2002)

## 5.4. CONCLUSION

L'origine des argiles qui arrivent au Nord-Ouest de la Mer Noire a beaucoup changé dans le temps, en relation avec les variations climatiques des derniers 27500 ans.

L'hypothèse classique d'une origine septentrionale de sédiments à illite prédominante et d'une origine anatolienne de sédiments à smectite n'est pas valable d'après les résultats des carottes étudiées ici.

Dans les sédiments analysés, la smectite est prédominante autour de 27500 ans BP et entre 24000 et 19000 ans BP. Son origine a pu changer pendant ces intervalles de temps, en fonction du climat, mais nous pensons que l'arrivée abondante de smectite est plutôt liée à la prépondérance des périodes chaudes. Malgré l'hypothèse avancée antérieurement sur une origine méridionale de cette argile, il est évident que, au moins pour la zone nord-ouest, « le fournisseur » de smectite se trouvait au nord et au nord-ouest du bassin.

Autour de 27500 ans BP, elle arrivait très probablement par le Dniepr, à la suite du lessivage des sols et loëss de l'Ukraine.

Entre 24000 et 19000 ans BP, la smectite arrivait dans le bassin lors du lessivage de sols et de loëss l'Ukraine, ou par le Don (si la connexion entre la Mer D'Azov et la Mer Noire existait).

Contrairement aux opinions antérieures, la période froide 19000-18000 ans BP est caractérisée par un pic d'illite, et non pas par un pic de smectite. L'augmentation d'illite reflète principalement l'apport du Danube. Ceci est probable dans les conditions d'un permafrost discontinu qui descendait près de la côte nord de la Mer Noire et qui bloquait les apports sédimentaires des autres rivières de cette zone.

La dominance illitique de la période 13600 à 11600 ans BP est plus difficile à expliquer. Une autre impulsion du Da-

nube, ou un apport massif par les rivières du nord, faisant suite au réchauffement Bølling-Allerød, peuvent constituer des hypothèses de travail.

Une analyse plus détaillée, permettant d'obtenir une meilleure résolution temporelle pourrait sans doute informer davantage sur la relation entre les changements de la minéralogie d'argiles et le climat, dans le bassin de la Mer Noire. Mais il serait utile de disposer de données sur les types d'argiles transportées par les rivières du nord du bassin (Dniepr, Boug de Sud, Dniestr et Don) si on veut pouvoir déceler comment ont changé les apports sédimentaires dans le temps.

**Tableau 5.1.** Pourcentage de divers types d'argiles, indice de cristallinité de l'illite (Ic) et rapport smectite /illite (S/I) dans les sédiments de la carotte **BLKS 98-06**

Niveau (cm)	Smectite %	Kaolinite %	Illite %	Chlorite %	Ic	S/I
32	54,68	8,56	25,24	6,83	0,5	2,2
54	48,22	5,93	32,22	12,58	0,6	1,5
67	43,31	6,04	35,93	24,08	0,6	1,2
77	46,82	5,53	32,69	13,08	0,6	1,4
86	47,06	6,01	33,43	13,51	0,6	1,4
96	54,52	6,26	28,56	30,64	0,7	1,9
120	54,92	4,88	29,48	11,45	0,7	1,9
127	56,17	5,79	27,69	16,32	0,6	2,0
140	52,55	6,38	29,06	12,07	0,6	1,8
161	45,01	6,51	32,37	16,92	0,5	1,4
180	49,66	6,96	29,66	12,09	0,6	1,7
197	25,39	8,38	45,18	15,37	0,6	0,6
214	50,19	4,13	30,62	14,64	0,5	1,6
227	53,64	7,14	28,43	9,75	0,6	1,9
247	37,39	8,24	37,19	14,45	0,6	1,0

**Tableau 5.2.** Minéraux lourds dans les sédiments de quelques niveaux des carottes **BLKS 98-04** et **BLKS 98-06**

Carotte	BLKS 98-04				BLKS 98-06			
	Profondeur d'échantillon (cm)	33-34	52-53		63-64	55-56	66-67	80-81
<b>Minéraux :</b>								
quartz		56,0	90,0	49,0		69,0	92,0	82,0
feldspaths		12,0	4,7	11,0		10,0	7,0	8,0
chlorites		1,0	0,0	5,0		0,5	0,0	4,8
mica		1,0	0,0	32,0	muscovite, biotite	0,5	0,0	2,0
minéraux lourds		0,5	0,2	2,5		1,0	1,0	0,2
formation de limonite		29,5	5,0	0,5		19,0	0,0	3,0
Grenats (G)		11,9	9,8	12,9		9,2	19,7	9,7
Epidote (E)		3,0	1,6	3,2		6,6	3,3	3,2
Opaques (O)		41,8	52,5	35,5		37,2	45,9	38,7
Amphiboles (A)		20,9	16,4	29,0		23,0	13,1	22,6

Carotte	BLKS 98-04				BLKS 98-06			
	Profondeur d'échantillon (cm)	33-34	52-53		63-64	55-56	66-67	80-81
Pyroxènes (P)		10,4	6,6	4,8		3,9	6,6	6,5
Tourmaline (T)		6,0	4,9	6,5		2,6	3,3	3,2
Disthène (D)		0,0	0,0	0,0		1,3	0,0	0,0
Staurolite (S)		1,5	1,6	3,2		2,6	3,3	1,6
Rutile (R)		1,5	1,6	3,2		2,6	3,3	1,6
Titanite		0,0	1,6	1,6		2,6	1,6	1,6
Zircon (Z)		0,0	0,0	0,0		1,3	0,0	0,0
pyrite		0,0	0,0	0,0		5,2	0,0	6,5
glauconite		3,0	3,3	0,0		1,7	0,0	4,8
<b>Grains :</b>								
Roulés – sub-roulés		65,0	60,0	30,0		55,0	85,0	60,0
Sub-angulaires -angulaires		35,0	40,0	70,0		45,0	15,0	40,0
<b>associations minérales</b>		OAGP	OAGP	OAGT		OAGE	OGAP	OAGP

**Tableau 5.3.** Pourcentage de divers types d'argiles, indice de cristallinité de l'illite (Ic) et rapport smectite /illite (S/I) dans les sédiments de la carotte **BLKS 98-22**

Niveau (cm)	Smectite %	Kaolinite %	Illite %	Chlorite %	Ic	S/I
1	46,80	11,00	32,84	9,36	0,6	1,4
3	27,20	14,04	47,60	11,17	0,4	0,6
5	43,76	10,00	33,75	12,48	0,5	1,3
6	41,06	15,89	33,79	9,26	0,6	1,2
8	29,51	6,92	49,63	13,93	0,4	0,6
10	34,00	12,62	40,09	13,28	0,6	0,8
12	25,38	12,92	51,44	10,26	0,4	0,5
15	33,78	16,52	40,99	8,70	0,6	0,8
17	48,92	9,92	31,24	9,92	0,7	1,6
21	41,45	6,15	40,27	12,14	0,5	1,0
24	42,65	13,56	34,77	9,03	0,6	1,2
27	54,07	6,86	28,54	10,52	0,5	1,9
34	48,47	11,57	32,14	7,82	0,7	1,5
42	28,32	12,97	41,24	17,47	0,6	0,7
49	13,14	8,71	65,26	12,89	0,8	0,2
60	14,61	16,09	53,94	15,36	0,9	0,3
64	49,43	8,42	33,02	9,12	0,7	1,5
69	42,89	9,03	37,33	10,75	0,8	1,1
86	40,18	10,19	38,07	11,56	0,6	1,1
91	12,19	16,64	58,79	12,38	0,8	0,2
98	23,92	9,91	55,75	10,42	0,9	0,4
110	43,22	8,70	38,84	9,23	0,7	1,1
120	45,47	8,41	35,04	11,08	0,7	1,3
130	48,86	6,40	32,42	12,32	0,7	1,5
140	55,59	7,73	27,83	8,85	0,7	2,0
150	48,33	7,06	33,37	11,25	0,7	1,4
160	53,37	6,80	30,00	9,83	0,7	1,8
170	53,25	7,81	30,24	8,71	0,7	1,8
181	52,56	6,58	27,75	13,10	0,5	1,9
181	52,23	6,54	28,22	13,02	0,5	1,9

Niveau (cm)	Smectite %	Kaolinite %	Illite %	Chlorite %	Ic	S/I
198	58,94	4,42	27,33	9,30	0,6	2,2
207	54,00	6,41	28,51	11,08	0,6	1,9
220	51,26	6,50	31,56	10,69	0,7	1,6
225	47,73	9,15	31,95	11,17	0,5	1,5
240	48,81	17,16	27,23	6,79	0,5	1,8
245	59,18	6,64	22,32	11,85	0,5	2,7
255	41,60	6,06	34,72	17,62	0,5	1,2
271	53,17	6,56	28,58	11,69	0,6	1,9
286	59,48	4,68	24,28	11,57	0,5	2,4
293	43,12	8,10	33,32	15,46	0,6	1,3
302	56,55	4,72	25,00	13,73	0,5	2,3
312	52,63	4,46	29,21	13,70	0,6	1,8
335	55,79	6,24	23,59	14,38	0,5	2,4
350	62,02	4,08	23,98	9,92	0,6	2,6
370	56,19	5,42	29,34	9,06	0,6	1,9
445	49,17	5,42	32,56	12,85	0,6	1,5
520	50,24	4,57	30,32	14,87	0,6	1,7
602	51,11	4,20	30,37	14,32	0,6	1,7
620	48,57	5,22	32,02	14,19	0,6	1,5
660	49,12	5,68	32,29	12,91	0,6	1,5
706	39,99	9,13	35,11	15,77	0,5	1,1

---

# CHAPITRE 6

## MAGNÉTISME ENVIRONNEMENTAL

### 6.1. INTRODUCTION

Le magnétisme environnemental est une des méthodes d'investigation des conditions climatiques et environnementales du passé et du présent. Efficace et complémentaire des méthodes géochimiques et biologiques, elle est très puissante car sensible à la présence, même en très faibles quantités, de minéraux magnétiques dans les sédiments.

En effet l'occurrence de ces minéraux, leur concentration, leur taille et leur morphologie dépendent : (\*) des conditions de sédimentation (sources, intensité d'érosion, mode et direction de transport etc.), (\*\*) des conditions diagénétiques (par ex. dans certaines conditions anaérobies, certains oxydes de fer détritiques peuvent être dissous tandis que d'autres minéraux de fer comme les sulfures et les carbonates, peuvent apparaître), (\*\*\*) de l'activité bactérienne (certaines bactéries „magnétotactiques“ fabriquent les minéraux de fer: magnétite, greigite).

L'analyse des propriétés magnétiques des sédiments à travers les paramètres tels que : la susceptibilité magnétique ( $\chi$ ,  $\kappa$ ) l'aimantation rémanente naturelle (ARN), l'aimantation rémanente anhystérétique (ARA), les paramètres de l'hystérésis ( $M_s$ ,  $M_{rs}$ ,  $H_c$ ,  $H_{cr}$ ), la température de Curie ( $T_c$ ), permet d'identifier les minéraux porteurs d'aimantation (oxydes et certains sulfures de fer), leur concentration et leur taille.

Ainsi en identifiant les minéraux magnétiques présents, leur taille et leur concentration nous pouvons essayer de comprendre quelles étaient les conditions qui ont permis leur mise en place et ainsi reconstruire les conditions environnementales (plus généralement climatiques) et leurs variations dans le temps et l'espace.

L'emploi du magnétisme pour l'étude des sédiments quaternaires a débuté en 1926 quand Gustav Ising a mesuré la susceptibilité magnétique et la rémanence naturelle de sédiments varvés de Suède. Dans son étude, publiée en 1942, il a montré que les propriétés magnétiques de ces sédiments varient en fonction de la distance par rapport à la source (par

exemple la marge de la calotte glaciaire). Il a identifié une périodicité annuelle pour certaines de propriétés: les lamines déposées pendant le printemps avaient des paramètres magnétiques plusieurs fois plus élevés que celles déposées en hiver, indiquant ainsi la présence de minéraux magnétiques plus importante que dans les lamines printanières. En 1967 John Mackeret a mesuré les propriétés magnétiques de sédiments lacustres. Son travail a contribué au renouvellement de l'intérêt pour la détermination de l'origine des minéraux de ce type des dépôts lacustres et des sols.

Pourtant, le développement de magnétisme environnemental et son utilisation très courante ont commencé dans les années 80 du XX-ème siècle. Il permet l'exploration des sédiments marins, continentaux aquatiques et non aquatiques d'âge très ancien à l'actuel.

Dans cette thèse je présente les résultats de l'étude des propriétés magnétiques de 7 carottes sédimentaires de la Mer Noire ainsi que l'interprétation de ces données. Un rappel de quelques notions du magnétisme est présenté dans **l'annexe 5**.

### 6.2 PARAMÈTRES MAGNÉTIQUES MESURÉS

Les propriétés magnétiques des sédiments marins ne dépendent pas uniquement de la nature des minéraux magnétiques primaires d'origine détritique, biogène ou de précipitation de la colonne d'eau, mais aussi des conditions diagénétiques qui déterminent l'altération des phases magnétiques primaires et la formation authigène des minéraux magnétiques secondaires.

Les principaux minéraux porteurs d'aimantation rémanente dans les sédiments marins sont : la **magnétite** ( $Fe_3O_4$ ), la **titanomagnétite**, l'**hématite** ( $\alpha-Fe_2O_3$ ), la **maghémite** ( $\gamma-Fe_2O_3$ ), la **goethite** ( $\alpha-FeOOH$ ) et des sulfures de fer comme la **pyrrhotite** ( $Fe_{1-x}S$ ) et la **greigite** ( $Fe_3S_4$ ). Parmi ces minéraux, la magnétite, la maghémite, l'hématite, la titanomagnétite et la goethite peuvent être des porteurs de

l'aimantation primaire. Les minéraux authigènes, formés pendant la diagenèse précoce sont la pyrrhotite et la greigite mais aussi l'hématite ainsi que la magnétite, la maghémite et la goéthite, qui peut être un produit d'oxydation, surtout des sulfures de fer. Plus de détails sur les minéraux magnétiques sont données dans l'**annexe 5**.

Il y a des dizaines de paramètres magnétiques, leurs différents rapports peuvent être utilisés pour caractériser et identifier les minéraux magnétiques. Toutefois, la mesure de certains paramètres essentiels peut permettre une bonne caractérisation de la population des minéraux magnétiques contenus dans nos échantillons de sédiments.

#### L'AIMANTATION RÉMANENTE NATURELLE (ARN)<sup>28</sup>

Les roches et les sols peuvent acquérir une aimantation rémanente par induction dans le champ magnétique terrestre à la suite de divers processus naturels. Cette rémanence n'est pas aussi forte que celles qui peuvent être acquises au laboratoire par des champs forts, mais elle peut être aussi stable. L'ARN est l'aimantation rémanente présente dans un échantillon avant traitement au laboratoire et elle correspond à la somme des différentes aimantations naturelles acquises dans le temps par les grains magnétiques, tels que :

- *l'aimantation thermorémanente (ATR)*<sup>29</sup> – acquise par un minéral magnétique pendant son refroidissement, d'une température plus forte que sa température de Curie, dans un champ magnétique terrestre;
- *l'aimantation rémanente chimique (ARC)*<sup>30</sup> – acquise par un minéral formé par des changements chimiques, à des températures plus basses que sa température de Curie ;
- *l'aimantation rémanente détritique (ARD)*<sup>31</sup> – obtenue par l'alignement des particules magnétiques (possédant déjà une aimantation thermorémanente ou chimique) avec le champ magnétique, pendant qu'elles se déposent dans l'eau;
- *l'aimantation rémanente post-dépositionnelle (ARpD)*<sup>32</sup> – acquise par les sédiments après la déposition, par des effets mécaniques, induisant des déplacements des particules magnétiques dans le sédiment;
- *l'aimantation rémanente visqueuse (ARV)*<sup>33</sup> – est le résultat de la ré-aimantation des grains magnétiques des roches due aux changements du champ magnétique terrestre.

L'intensité de **l'aimantation Rémanente Naturelle (ARN)** (A/m) dépend de la nature des particules magnétiques, de leur concentration, de leur taille et de leur histoire d'aimantation.

Les aimantations thermorémanente (ATR) et détritique (ARD) forment les aimantations primaires, acquises par les

roches pendant leur formation. Les aimantations post-dépositionnelles et visqueuses (ARpD et ARV) forment l'aimantation secondaire, acquise subséquentement à la formation des roches ; elle peut altérer ou couvrir l'aimantation primaire. L'aimantation chimique peut être aussi bien primaire que secondaire. Au laboratoire, nous essayons d'enlever la composante secondaire de l'aimantation rémanente, par l'application d'un champ alternatif, afin d'isoler l'aimantation primaire.

**L'aimantation Rémanente Anhystrétique (ARA)**<sup>34</sup> (A/m) est une rémanence artificielle produite dans le laboratoire en plaçant l'échantillon dans un champ alternatif fort (dans notre étude 100 mT) qui diminue doucement jusqu'à zéro en présence d'un champ continu faible (ici de 60  $\mu$ T). L'ARA est très utile parce qu'elle présente des caractéristiques similaires à l'aimantation rémanente thermique. Ses caractéristiques peuvent être utilisées pour la détermination de la taille des grains, de la concentration et de la composition des minéraux magnétiques présents. Elle est proportionnelle à la concentration des grains magnétiques dans l'échantillon et elle est plus forte et plus stable pour des grains de taille mono-domaine que pour les multi-domaines.

**Le champ coercitif de rémanence Hcr** (mT) et **le champ coercitif Hc** (mT) peuvent être très utiles pour la détermination de la minéralogie magnétique et de la taille des grains. Ils sont aussi employés pour caractériser les mélanges des minéraux magnétiques. La coercivité de rémanence Hcr varie pour la magnétite de <10 mT (pour les grains multi-domaines) à presque 100 mT (pour les grains petits allongés). Peters et Dekkers, 2003, montrent que les valeurs élevées de la Hcr, au-delà de 100 mT, indiquent la présence de l'hématite et, en particulier, de la goéthite.

**L'aimantation de saturation Ms** dépend de la nature du minéral présent dans la roche et de sa concentration ; elle ne dépend pas de la taille des grains.

**L'aimantation rémanente Mrs** dépend de la taille des grains, de la nature du minéral et de leurs concentrations dans la roche. Elle est plus haute pour les grains monodomaines que pour ceux multidomaines.

**La forme de la courbe d'hystérésis** est une indication de type des grains présents dans les échantillons ainsi que de leur taille, due aux valeurs caractéristiques des paramètres d'hystérésis de chaque minéral.

**Les rapports Mrs/Ms et Hcr/Hc** sont des paramètres sensibles aux changements de la taille des grains dans un assemblage monominéral.

La représentation graphique des paramètres d'hystérésis est un bon outil pour l'identification des minéraux magnétiques ou de leurs caractéristiques, telles que la taille ou le caractère mono ou multidomaine. La représentation du Hcr/Hc

<sup>28</sup> angl. Natural Remanent Magnetisation (NRM)

<sup>29</sup> angl. ThermoRemanent Magnetisation (TRM)

<sup>30</sup> angl. Chemical Remanent Magnetisation (CRM)

<sup>31</sup> angl. Depositional Remanent Magnetisation (DRM)

<sup>32</sup> angl. Post Depositional Remanent Magnetisation (pDRM)

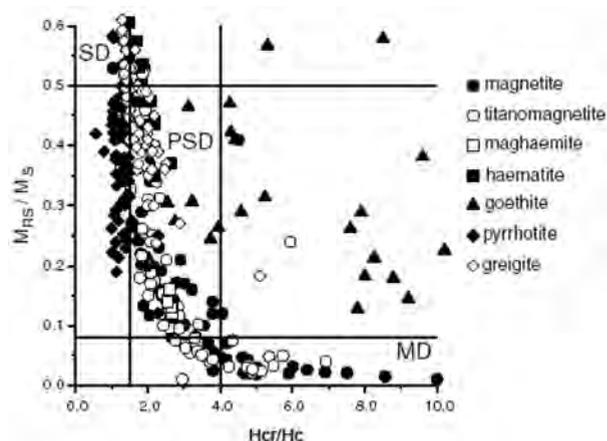
<sup>33</sup> angl. Viscous Remanent Magnetisation (VRM)

<sup>34</sup> angl. Anhystreric Remanent Magnetisation (ARM)

en fonction de  $M_{rs}/M_s$  (**diagramme de Day-Fuller-Schmidt**, Day *et al.*, 1977) offre des informations sur les domaines et, implicitement, sur la taille des grains de la magnétite. De plus, Peters et Dekkers (2003) ont montré que, à l'exception de la goéthite, les autres minéraux magnétiques, y compris l'hématite et la greigite, respectent la même tendance. La **figure 6.1** présente la distribution des tailles des grains magnétiques de magnétite, titanomagnétite, maghémite, hématite, goéthite, pyrrhotite et greigite selon ces auteurs. Une même tendance générale est suivie par la (titano)magnétite, la maghémite, l'hématite et la greigite. La pyrrhotite est légèrement décalée vers la gauche par rapport à la tendance générale, tandis que la goéthite est éparpillé à droite de la tendance.

**La température de Curie  $T_c$**  (°C) est la température au-dessus de laquelle l'aimantation spontanée des minéraux disparaît. Elle sépare la phase paramagnétique désordonnée, pour  $T > T_c$ , de la phase ferromagnétique ordonnée, pour  $T < T_c$ . La  $T_c$  est caractéristique pour chaque espèce minérale (voir le **Tableau 6.1**). L'équivalent de la température de Curie pour les corps antiferromagnétiques est appelé **température de Néel  $T_N$** . Dans ces corps, en dessous de cette température, les spins sont ordonnés en un arrangement antiparallèle, d'où un moment résultant nul.

Dans le **Tableau 6.1** sont présentées les valeurs de quelques paramètres magnétiques des minéraux magnétiques,



**Fig.6.1.** Diagramme de Day *et al.* (1977) pour les principaux minéraux magnétiques, selon les données de  $H_{cr}/H_c$  et  $M_{rs}/M_s$  trouvées dans la littérature (compilation par Peters et Dekkers, 2003)

compilés d'après Thompson et Oldfield (1986), Roberts (1995), Maher *et al.* (1999) et Peters et Dekkers (2003). Nous pouvons observer que, pour le paramètre aimantation de saturation sur unité de masse ( $M_s$ /masse), il y a beaucoup de différences entre les valeurs reportées par Peters et Dekkers (indiqués entre parenthèses courbes) et ceux des auteurs antérieurs.

**Tableau 6.1.** Paramètres magnétiques à la température ambiante, pour les minéraux magnétiques les plus importants (compilation d'après Thompson et Oldfield (1986), Roberts (1995), Maher *et al.* (1999) et Peters et Dekkers (2003))

Minéral	Formule chimique	$T_c$ (°C)	$H_c$ mT	$H_{cr}$ mT	$H_{cr}/H_c$	$M_s$ /masse ( $A\ m^2\ Kg^{-1}$ )	$M_{rs}$ /masse ( $A\ m^2\ Kg^{-1}$ )	$M_r/M_{rs}$
Magnétite	$Fe_3O_4$	575-585	9,8 [0,1-34,3]	24,4 [8-69,5]	9,1 [1,4-65]	92 (62,2) [50,3-89,5]	1-10 (5,3) [0,3-33,1]	0,12 [0,0005-0,4]
Titanomagnétite		200	20,8 [2,0-158]	41,4 [8,5-213]	3,2 [1,2-6,9]	24 (16) [11,2-21,9]	5,2 [0,5-19,9]	0,19 [0,01-0,53]
Maghémite	$\gamma Fe_2O_3$	~740	7,2 [6,4-9]	20,8 [16,9-31]	2,62 [2,54-2,67]	85 (63,6) [61,5-65,6]	6,8 [3,6-10,2]	0,13 [0,12-0,16]
Haematite	$\alpha Fe_2O_3$	675	268,00 [4-520]	318,00 [30-821]	1,76 [1,28-2,19]	0.5 (0,28) [0,093-0,47]	0,18 [0,003-0,35]	0,58 [0,43-0,85]
Goéthite	$\alpha FeO.OH$	150	217,0 [25-890]	1972,0 [500-4100]	19,1 [2,5-66,7]	0.5 (0,22) [0,02-0,59]	0,052 [0,015-0,12]	0,32 [0,06-1]
Pyrrhotite	~ $Fe_7S_8$	300	36,9 [9,8-97,2]	45,3 [10-124,5]	1,27 [0,55-2,29]	17 (13,3) [3,5-21,0]	5,0 [1,6-9,3]	0,36 [0,02-0,58]
Greigite	$Fe_3S_4$	322-350	42,6 [10-71,3]	67,1 [37-94,8]	~1,5 [1,21-5,09]	20 (14,1) [3,1-29,2]	5,4 [0,8-12,3]	~0,45 [0,18-0,69]

Note : Entre parenthèses courbes ( ) sont présentées les valeurs de Peters et Dekkers (2003) qui ne sont pas en accord avec les valeurs antérieures de la littérature. Entre les parenthèses droites [ ] sont marquées les intervalles de variation de ces paramètres selon Peters et Dekkers (2003).

## 6.3. MÉTHODE

### 6.3.1. ECHANTILLONNAGE

Les carottes prélevées dans le cadre de la mission BlaSON 1 ont été découpées à bord du navire de recherche en tronçons de 1,5 m et analysées sur le banc de mesure de l'IFREMER pour la densité, la susceptibilité magnétique et la vitesse du son dans les sédiments. Ils ont été ensuite stockés dans une chambre froide jusqu'à leur ouverture.

A terre, les carottes ont été découpées longitudinalement, photographiées et décrites du point de vue sédimentologique. Une moitié de la carotte est conservée en tant qu'«archive» et l'échantillonnage se fait dans l'autre moitié «travail». Afin d'éviter l'altération du signal magnétique du à l'oxydation du sédiment, le prélèvement des U-channels et des échantillons discrets a été fait immédiatement après l'ouverture de chacune des carottes.

L'échantillonnage pour la mesure des paramètres magnétiques comporte :

- le prélèvement des U-channels : des tubes non-magnétiques en plastique transparent rigide, de section carrée avec les dimensions de 2 x 2 cm et longs jusqu'à 150 cm, fermés par un couvercle longitudinal. Ils sont placés perpendiculairement à la surface du sédiment, dans la partie médiane de la carotte et enfoncés lentement et délicatement afin de minimiser la déformation de ce sédiment. Ils sont ensuite retirés, fermés et placés dans un endroit froid et humide ;
- le prélèvement des échantillons discrets, à l'aide de cubes en plastique de 2 x 2 x 2 cm. Les boîtes sont ensuite fermées et placées dans des sacs en plastique hermétiques dans un réfrigérateur, afin d'éviter le séchage du sédiment.

### 6.3.2. MESURES DES PARAMÈTRES MAGNÉTIQUES

Deux types de mesures ont été faits, dans plusieurs laboratoires:

- Des mesures en continu sur les U-channels: (i) **la susceptibilité magnétique** en champ faible  $\kappa$  et (ii) **les aimantations rémanentes naturelle ARN et anhystérique ARA**, à l'aide des équipements du Laboratoire de Géophysique de l'Institut de Physique du Globe de Paris ;
- Des mesures sur les échantillons discrets: (i) **paramètres d'hystérésis** au Laboratoire de Magnétisme Environnemental de LSCE - Gif-sur-Yvette, (ii) **comportement thermomagnétique** au moyen de la balance de Curie de l'Université de Paris XI, Orsay, (iii) **diffraction des rayons X**, avec un diffractomètre Philips au LSCE – Gif-sur-Yvette.

La **susceptibilité magnétique en champ faible** ( $\kappa$ ) est mesurée sur les U-channels, tous les 1 ou 2 cm, à l'aide d'un susceptibilitémètre MS-2 Bartington. Une source de courant alternatif produit un champ alternatif faible (0,1 mT). Lorsqu'un U-channel est introduit dans la zone d'influence de ce champ,

la composante de la susceptibilité magnétique dirigée selon l'axe du champ est indirectement mesurée par la variation de fréquence du champ alternatif. La précision de mesure est d'environ  $10^{-5}$  S.I.

Les **aimantations rémanentes naturelle ARN et anhystérique ARA** sont mesurées à l'aide du magnétomètre cryogénique horizontal à SQUID<sup>35</sup>, 2G-Enterprises 755-R de l'IPG Paris (Fig.6.2). Il s'agit d'un instrument spécialement conçu pour des mesures de haute résolution, sur des échantillons discrets ou en continu, sur les U-channels. Les mesures sur les U-channels sont faites habituellement tous les 1 ou 2 centimètres. Avec ces intervalles, des caractéristiques magnétiques peuvent être détectées avec une résolution spatiale de 3-5 cm et sans déconvolution.

Le magnétomètre a 3 bobines de désaimantation : une axiale et deux transversales, montées sur la voie d'accès. Chaque bobine est capable d'appliquer des champs alternatifs jusqu'à 120 mT. Un champ continu de 0,2 mT au maximum peut être appliqué dans la bobine de démagnétisation axiale, pour les études d'ARA et de la saturation ARI (*angl.* IRM (SIRM)) (Verosub et Roberts, 1996). Un susceptibilitémètre MS-2 Bartington est monté en ligne avec le reste de l'équipement pour la mesure automatique de la susceptibilité magnétique.

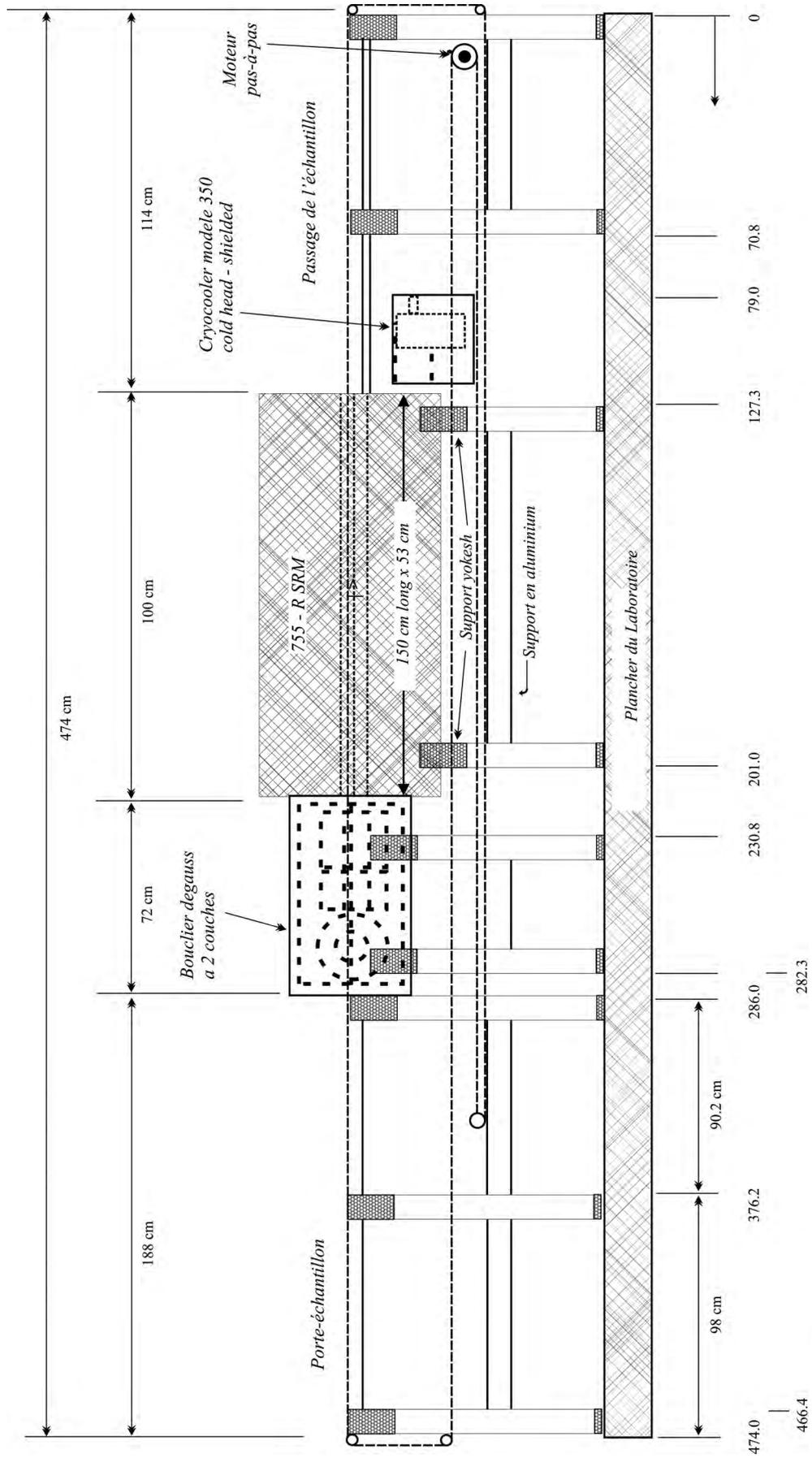
Le principe de fonctionnement de cet appareil repose sur les propriétés supraconductrices d'alliages métalliques refroidis au-dessous de leur température critique. Un anneau est porté à l'état supraconducteur en présence d'un champ, dirigé selon son axe. Lorsque ce champ varie, l'anneau est parcouru par un courant électrique qui annule la variation du flux magnétique. En introduisant les sédiments aimantés dans un tel circuit, on y provoque une variation du flux magnétique qui est traduite par une variation du courant capté par les SQUIDS.

Le magnétomètre est pré-refroidi à l'azote liquide et maintenu à la température critique par l'hélium liquide. L'introduction des U-channels dans l'espace de mesure est réalisée par un système électro-mécanique commandé, tout comme l'acquisition des données et le calcul, par un ordinateur. La sensibilité de l'appareil est de  $10^{-6}$  A/m (d'après Collinson, 1983 et Thouveny, 1991).

La **désaimantation** (ARN, ARA, ARI) des U-channels est faite à l'aide des champs magnétiques alternatifs produits par trois bobines de désaimantation: une axiale (z) et deux transversales (x, y). Elles sont montées sur la voie d'accès et isolées par un blindage en  $\mu$ -métal. Chaque bobine est capable d'appliquer des champs alternatifs jusqu'à 120 mT. Le champ magnétique alternatif ne diminue pas proprement-dit, mais on obtient sa décroissance par l'éloignement des U-channels du système de bobines.

Les paliers de désaimantation choisis pour l'ARN, se situent tout les 5 ou 10 mT, entre 0 et 60 mT.

<sup>35</sup> Superconducting QUantum Interference Device



NOTES:  
 1. Les échantillons sont chargés dans la partie gauche du porte-échantillon  
 2. L'échantillon peut avoir une longueur maximale de 150 cm

Fig.6.2. Schéma du magnétomètre cryogénique à SQUID 2G Enterprises 755-R de l'IPG Paris

Un champ continu faible, de maximum de 0,2 mT, peut être rajouté sur la bobine de désaimantation axiale (z), pour l'acquisition de l'ARA. Cette **acquisition de l'ARA** a été réalisée en faisant subir aux U-channels désaimantés, un champ continu de 0,06 mT (60000 gamma) et un champ alternatif de 100 mT décroissant jusqu'à zéro selon l'axe z (l'obtention de la décroissance du champ alternatif est décrite plus haut). Ensuite, l'ARA ainsi que les paliers de 20 et 40 mT de désaimantation ont été mesurés.

Tout le système du magnétomètre est contrôlé par un ordinateur, permettant une mesure des désaimantations de l'ARN et l'ARA automatiques. De même manière automatique sont faites les mesures de la susceptibilité magnétique grâce au susceptibilimètre MS-2 Bartington monté en ligne avec le reste de l'équipement.

**Les paramètres d'hystérésis** tels que: Ms/masse, Mrs/masse, Hc, Hcr des échantillons discrets (~2,5-30 mg de sédiment total sec) ont été mesurés à l'aide du magnétomètre à gradient de champ alternatif Micromag AGFM 2900 du LSCE Gif-sur-Yvette. L'échantillon plastifié, pour éviter la pollution du porte-échantillon, est placé sur une sonde et maintenu par l'ajout de graisse. La sonde est ensuite mise au centre d'un électro-aimant. Le champ alternatif provenant du magnétomètre produit une force périodique dans l'échantillon placé dans le champ continu de l'électro-aimant. Cette force est proportionnelle au gradient de ce champ, au moment magnétique de l'échantillon et à l'intensité du champ appliqué. La déflexion de l'échantillon qui en résulte est transmise par la prolongation du support vers un élément piézo-électrique, elle est ensuite amplifiée. Connaissant le gradient de champ alternatif et l'intensité du champ appliqué on retrouve le moment magnétique de l'échantillon. L'intensité maximale du champ appliqué est de 0,5-1 T et les mesures ont été corrigées pour tenir compte de l'influence des minéraux paramagnétiques et diamagnétiques (>0,375 T).

**Le comportement thermomagnétique** des échantillons de sédiment total ou des extraits magnétiques a été étudié à l'aide d'une balance de Curie à l'Université de Paris XI, Orsay (Fig.6.3). Elle permet l'identification des minéraux magnétiques selon leur température de Curie spécifique et, aussi, de mettre en évidence la stabilité et d'éventuelles transformations subies par les minéraux au cours de l'expérience (transformations chimiques avec la température). Moins d'un gramme de sédiment est nécessaire pour une telle analyse. Le sédiment sec rendu en poudre est introduit dans un porte-échantillon suspendu de manière à pouvoir se déplacer que dans une seule direction, et ensuite placé au centre d'un électro-aimant qui produit un champ uniforme (jusqu'à 0,375 T). Dans un four qui le chauffe jusqu'au 650°C à 20°C/minute et dans une atmosphère d'air ou d'argon, l'échantillon subit une force proportionnelle à la fois à son moment magnétique et au champ appliqué. Un courant de contre réaction crée par une bobine maintient le porte-échantillon en place; il est proportionnel à la force subie par l'échantillon aimanté. En mesurant ce courant, on peut calculer la force. L'enregis-

trement permet d'obtenir la variation de courant en fonction de la température au cours des phases de chauffe et de refroidissement.

L'identification des minéraux présents dans certains de nos échantillons a été faite par la **diffraction des rayons X**. Le sédiment total ou des extraits magnétiques obtenus à partir de suspensions aqueuses, ont été analysés à l'aide d'un diffractomètre Philips (à radiation Cu $\alpha$ ) appartenant au LSCE Gif-sur-Yvette.

Toutes ces mesures permettent d'identifier les minéraux magnétiques, leur concentration et leur taille dans différentes parties des sédiments pour ensuite essayer d'en déduire les conditions environnementales qui ont permis leur mise en place.

#### 6.4. RÉSULTATS ET DÉBUT D'INTERPRÉTATION

L'étude des propriétés magnétiques des sédiments a été réalisée sur 7 carottes de différentes profondeurs, 6 de la mission BlaSON1 et une provenant de la mission ASSEMBLAGE (Tableau 6.2). Une partie des analyses, a été réalisée par André F. durant son stage de D.E.A. (1999). Pour la clarté de l'exposé, nous avons inclus dans la discussion, les données de la carotte MD04-2754 (mission ASSEMBLAGE, analysée par Tudryn A. et Collette G.) Les analyses ont été effectuées dans le but d'identifier les minéraux magnétiques présents dans le sédiment, leur concentration et leur taille.

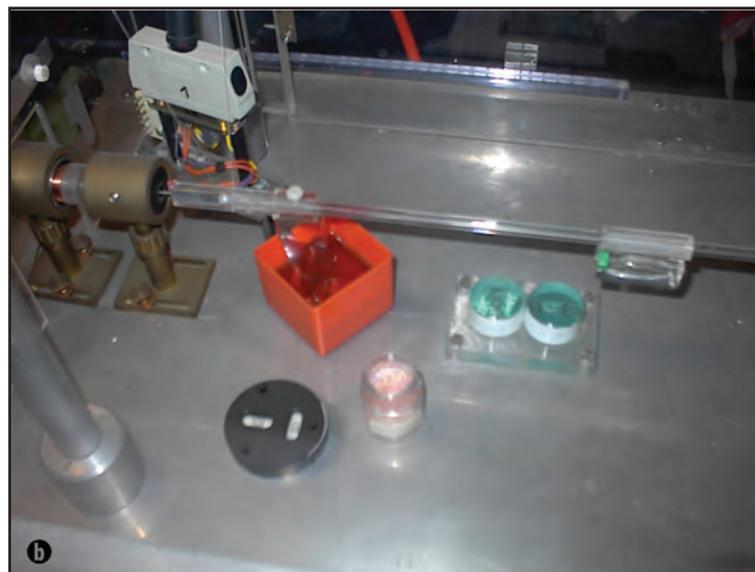
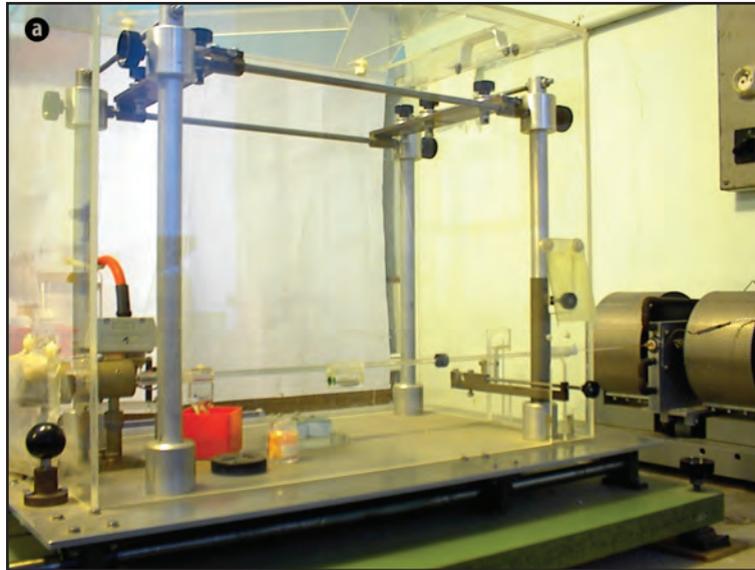
**Tableau 6.2.** Carottes analysées pour les paramètres magnétiques

Carotte no.	Profondeur de l'eau (m)	Longueur de la carotte (cm)	No. sections
BLKS9804	101	81	1
BLKS9806	135	265	3
BLC9809	240	48	1
BLKS9809	240	844	7
BLKS9810	378	755,5	6
BLKS9811	500	757	6
BLKS9822	2100	712	6
MD04-2754	453	32	22

Les mesures de la susceptibilité magnétique, de l'ARN et de l'ARA ont été réalisées sur des U-channels, donc en continu. D'autres paramètres :

- (i) **paramètres d'hystérésis** tels que: Ms/masse, Mrs/masse, Hc, Hcr (37 échantillons)
- (ii) **comportement thermomagnétique** de 49 niveaux (80 mesures)
- (iii) **diffraction des rayons X** – 6 niveaux (17 spectres sur des sous-échantillons représentant des extraits magnétiques et des restes non-magnétiques du sédiment).

ont été mesurés sur des échantillons discrets (de 2,5 à 30 mg sédiment sec) et représentent des informations ponctuelles.



**Fig.6.3.** Balance de Curie de l'Université de Paris-Sud XI, Orsay. A. Vue d'ensemble; B. Détail

#### CAROTTE BLKS 98-04

(profondeur d'eau : 101 m; longueur de la carotte : 81 cm)

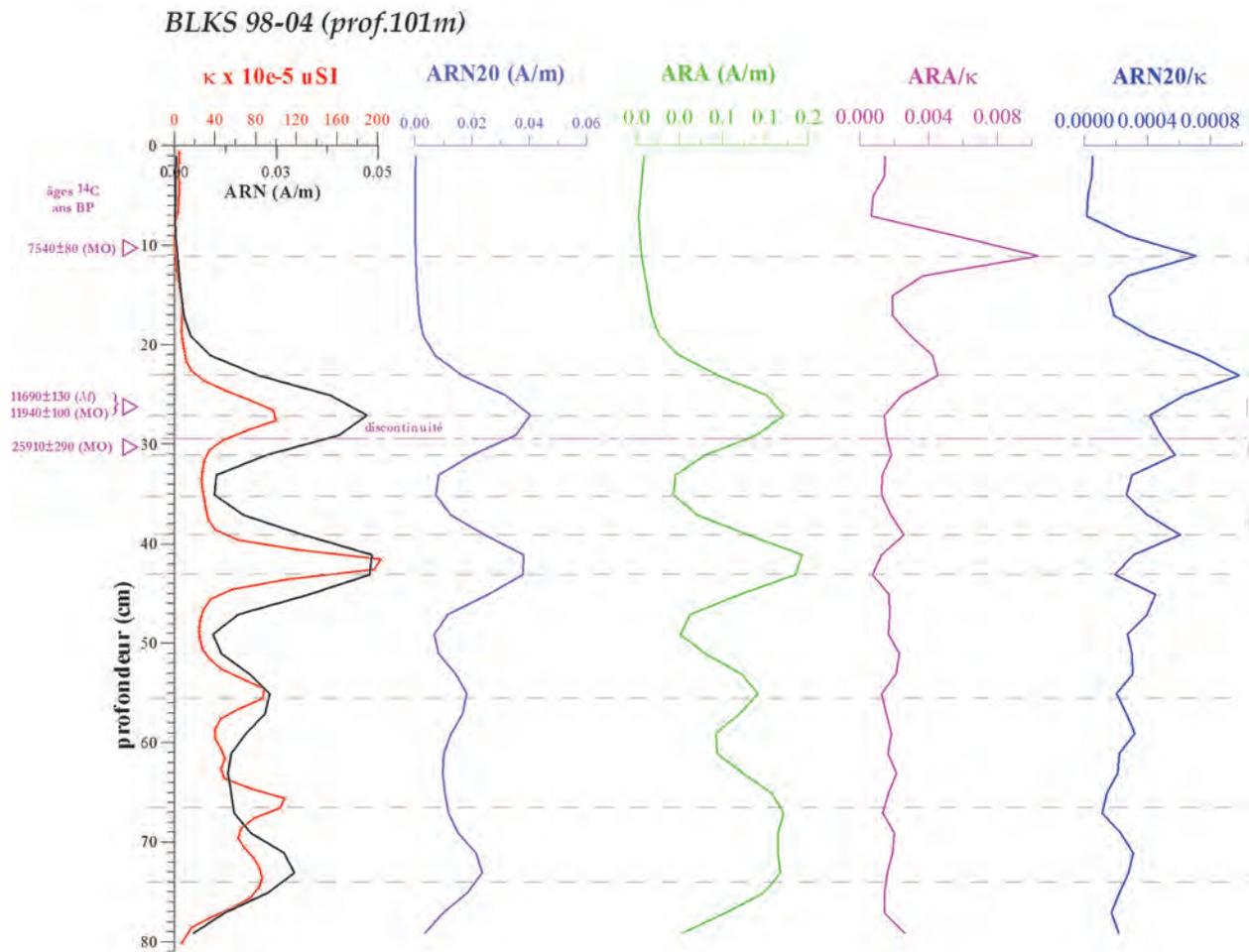
Une synthèse des paramètres magnétiques mesurés est présentée sur les **figures 6.4** et **6.5**.

Les valeurs de la **susceptibilité magnétique en champ faible** ( $\kappa$ ), de l'**ARN<sub>20mT</sub>** (après la désaimantation à 20 mT) et de l'**ARA** présentent des valeurs fortes et variables dans la partie inférieure de la carotte : depuis sa base jusqu'à environ 18 cm. Les variations de trois paramètres s'opèrent aux mêmes profondeurs, à l'exception de ce qui concerne le niveau 66 cm. Le dernier pic important se trouve au-dessus de la discontinuité située à 29-30 cm. Après ce dernier pic, entre 18 cm et la surface, les valeurs des trois paramètres deviennent faibles et constants. Nous pouvons donc constater un changement majeur de la concentration en grains magnéti-

ques dans le sédiment autour de 18 cm de profondeur : en dessous, la concentration est importante et changeante, au-dessus, elle est faible et constante. La disparition du pic d'ARN et ARN<sub>20mT</sub> au niveau 66 cm peut refléter un changement de la taille des grains magnétiques présents à ce niveau par rapport aux autres niveaux caractérisés par des pics de  $\kappa$ , ARN et ARA.

Les valeurs de la susceptibilité magnétique sont comprises entre 0,1 et  $203,6 \times 10^{-5}$  S.I., celles de l'ARN<sub>20mT</sub> varient entre  $4,9 \times 10^{-5}$  et 0,04 A/m et l'ARA varie entre  $2,26 \times 10^{-3}$  et 0,15 A/m.

L'**ARA/ $\kappa$**  et l'**ARN<sub>20mT</sub>/ $\kappa$**  (**Fig.6.4**) présentent des variations importantes entre 45 et 5 cm de profondeur ( $0,0007 - 0,01$  pour l'ARA/ $\kappa$  et  $1,5 \times 10^{-5} - 0,001$  pour l'ARN<sub>20mT</sub>/ $\kappa$ ). Ces paramètres sont utiles à l'estimation de la taille de grains



**Fig. 6.4.** Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-04 ( $\kappa$ , ARN, ARN20, ARA, ARA/ $\kappa$ , ARN20/ $\kappa$ ); âges  $^{14}\text{C}$  conventionnels non-corrigés; MO - matière organique, M - *Micromelania* (= *Turricaspia*)

magnétiques dans un assemblage de grains monominéraux. Pour cette carotte, leurs variations sont en général antiparallèles à celles de la susceptibilité magnétique, c'est-à-dire que la plupart des pics de l'ARA/ $\kappa$  et ARN<sub>20mT</sub>/ $\kappa$  correspondent aux creux de la susceptibilité magnétique d'ARN<sub>20mT</sub> et d'ARA. Une exception concerne le niveau 35 cm, pour lequel les variations de ces paramètres semblent être en phase avec les variations de la susceptibilité, ARN<sub>20mT</sub> et ARA.

Dans le cas de population de grains monominéraux du point de vue du magnétisme, la partie inférieure de la carotte, serait caractéristique de grains de taille relativement grande et homogène. A partir d'environ 45 cm et jusqu'au dernier pic de ARA/ $\kappa$ , la taille de grains serait plus variable, avec des niveaux de petits grains (ex. 31 cm, 23 cm, 11 cm) et des niveaux de grains relativement plus grands (43 cm, 27 cm).

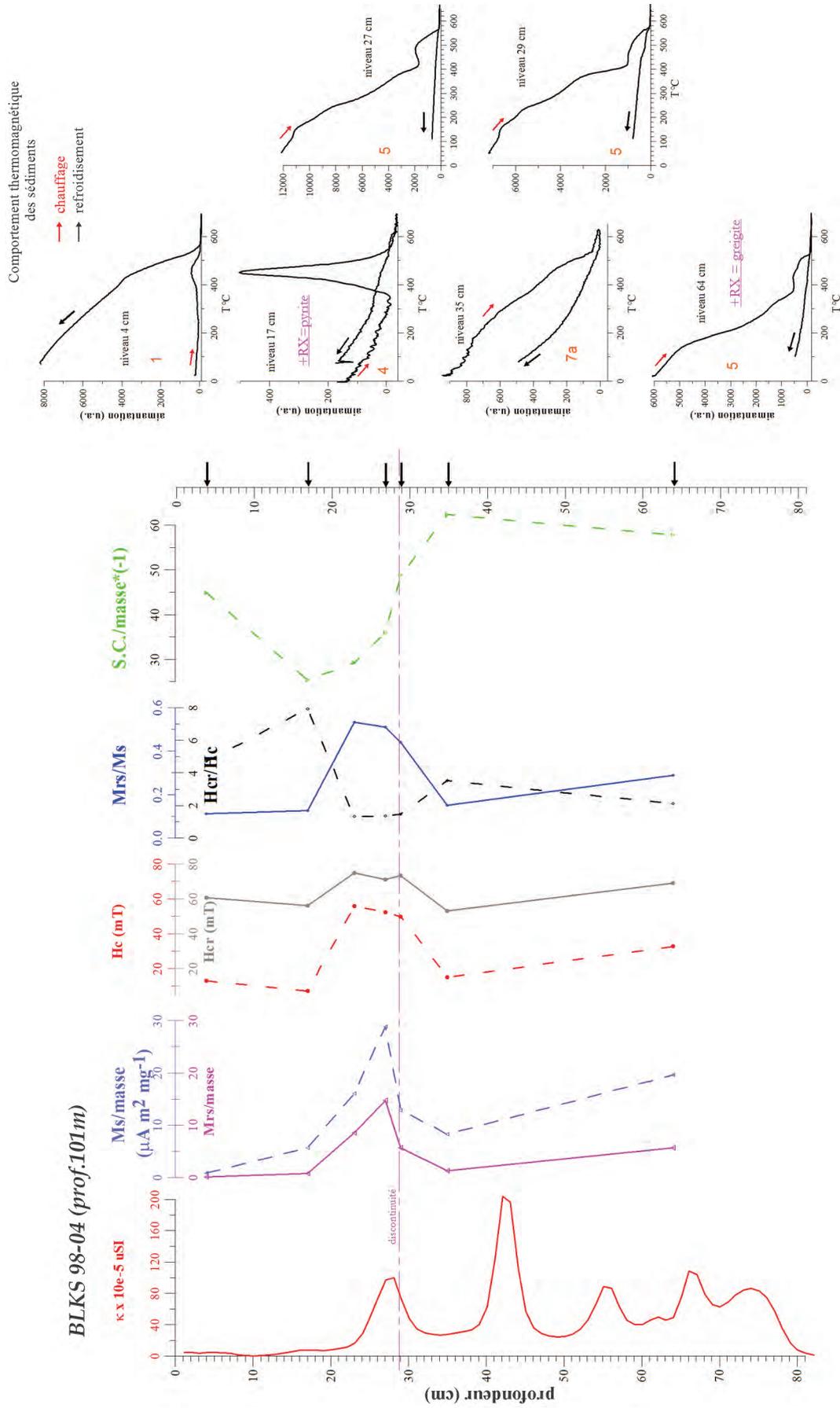
Les **paramètres d'hystérésis**<sup>36</sup> ne sont que ponctuels par rapport à ceux décrits plus haut. Néanmoins nous pou-

<sup>36</sup> Mesures effectuées, pour cette carotte, par Fabien André (1999)

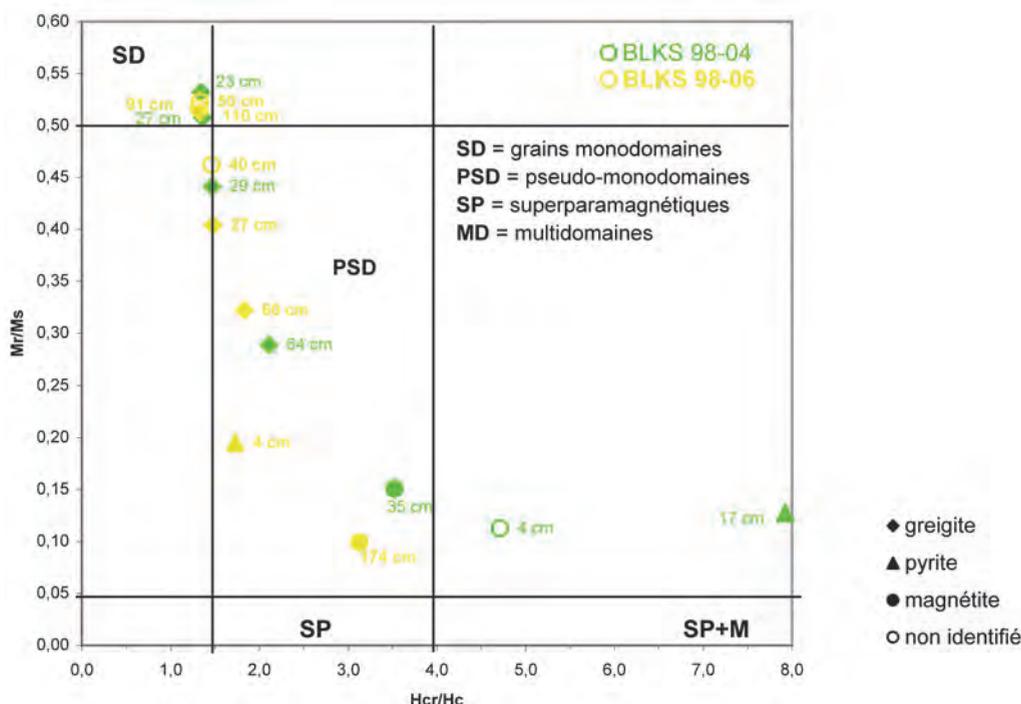
vons constater que les variations de Ms/masse, qui reflètent les variations de la concentration de grains magnétiques, et de Mrs/masse, confirment la présence d'une grande concentration de grains magnétiques autour de la discontinuité. Les valeurs des Hc et Hcr, qui suggèrent dans l'ensemble la présence des grains magnétiques de faible coercivité, comme par exemple la magnétite, la maghémite ou la greigite, sont plus fortes autour de la discontinuité. Les rapports Mrs/Ms et Hcr/Hc (Figs. 6.4 et 6.5) présentent un comportement antiparallèle, avec, toujours autour de cette discontinuité, des valeurs suggérant la présence de grains de petite taille.

La **figure 6.6** est une représentation du Hcr/Hc en fonction de Mrs/Ms pour les carottes d'eau peu profonde BLKS 98-04 et BLKS 98-06, sur un diagramme de Day. Nous pouvons remarquer que pour la plupart des échantillons, les grains magnétiques sont monodomaines ou pseudo-monodomaines. Ils sont plus petits autour de la discontinuité.

Observons en plus, en comparant le diagramme de Day aux courbes d'ARA/ $\kappa$  et d'ARN20/ $\kappa$ , que les pics des ces der-



**Fig.6.5.** Paramètres d'hystérésis et comportement thermomagnétique des échantillons discrets de la carotte BLKS 98-04



**Fig.6.6.** Représentation des rapports Hcr/Hc en fonction de Mrs/Ms sur un diagramme de Day, pour les échantillons des carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06. Les échantillons de la carotte 04 sont représentés en vert, ceux de la carotte 06 en jaune

niers ne seraient pas toujours liés à la taille des grains. Par exemple, pour les échantillons 23 et 27 cm contenant de la greigite monodomaine, comme nous le montrerons par la suite, les courbes d'ARA/ $\kappa$  et d'ARN20/ $\kappa$  présentent un pic à 23 cm et un creux à 27 cm. Ceci pourrait signifier des tailles différentes pour les grains de ces deux niveaux. Pour les niveaux 35 et 64 cm, le diagramme de Day confirme le contenu en grains magnétiques de taille plus grande.

Les valeurs des paramètres d'hystérésis varient dans les intervalles suivants : Ms/masse entre 0,8 et 28,87  $\mu\text{Am}^2 \text{mg}^{-1}$ , Mrs/masse entre 0,09 et 14,74  $\mu\text{Am}^2 \text{mg}^{-1}$ , Hc entre 7,08 et 855,8 mT, Hcr : 53,2-74,8 mT, Hcr/Hc : 1,3-7,9, Mrs/Ms : 0,1-0,5 et S.C./masse : 25,38-62,35  $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1} \text{T}^{-1}$  <sup>37</sup> (Tableau 6.3a).

Les **comportements thermomagnétiques** des échantillons du sédiment varient et indiquent ainsi les variations de la minéralogie magnétique (Fig.6.5).

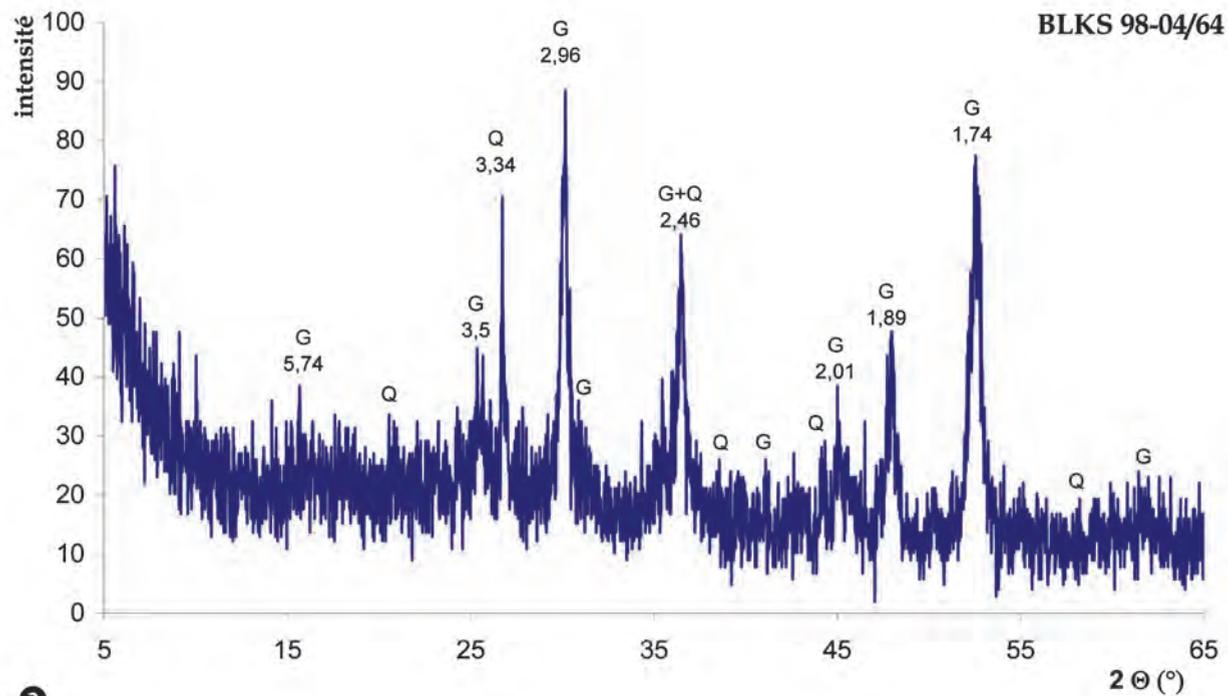
Dans la partie inférieure de la carotte, là où on observe la concentration en grains magnétiques forte mais variable, les niveaux riches en grains magnétiques tels que 64 cm, 29 cm et 27 cm, présentent le comportement suivant : une forte aimantation au départ, qui diminue progressivement avec la température jusqu'à des valeurs très faibles autour de 400°C, ensuite une légère ré-aimantation qui s'annule autour de 580°C. Au refroidissement on observe une faible ré-aimantation. Ce comportement est typique de la greigite qui s'oxyde progressivement pendant la chauffe et se transforme en magnétite autour de 500°C. Cette

magnétite, qui atteint sa température de Curie vers 580°C, peut ensuite persister ou s'oxyder vers la maghémite et enfin l'hématite. Durant le refroidissement celle-ci présentera une faible ré-aimantation par rapport à l'aimantation de la greigite du départ de l'expérience. L'existence de la greigite dans ces niveaux a été confirmée par la diffraction des rayons X (DRX) dans l'échantillon à 64 cm (Fig.6.7a). La coercivité relativement forte des niveaux 23, 27, 29 et 64, tout comme les valeurs des rapports Mrs/Ms et Hcr/Hc (Roberts, 1995) sont aussi indicatrices de la présence de la greigite de petite taille (un peu plus grande pour le niveau 64 cm).

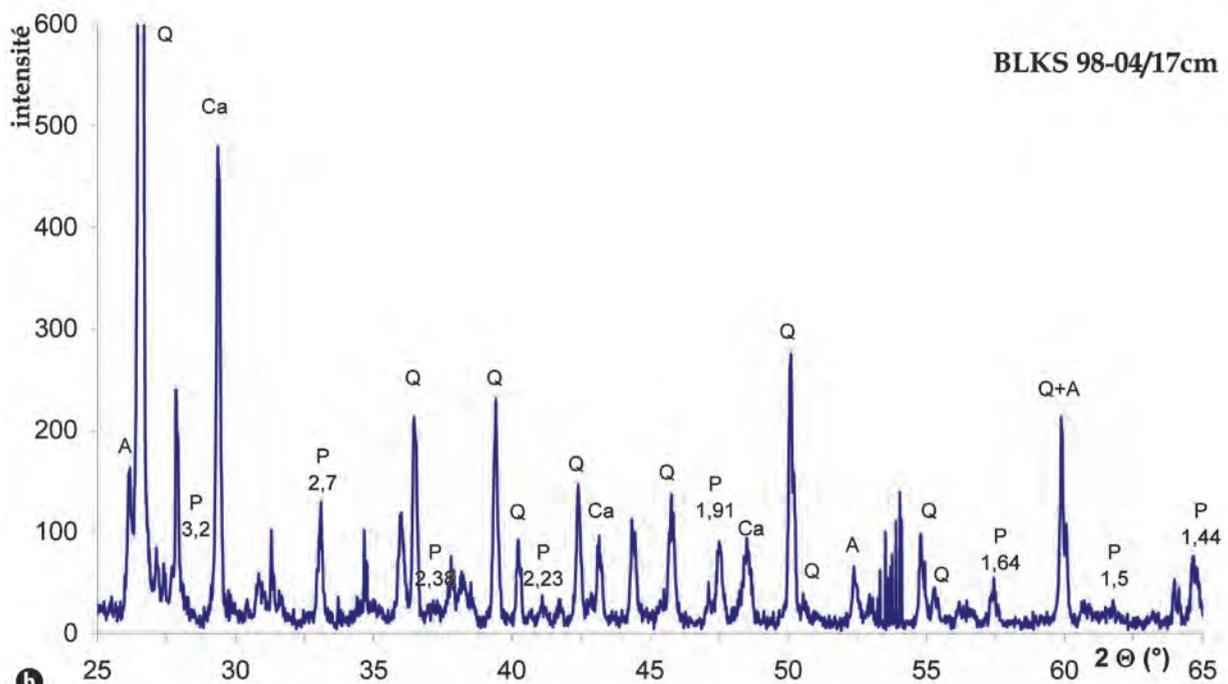
Toujours dans la partie inférieure de la carotte, mais dans les niveaux pauvres en grains magnétiques comme le niveau 35 cm, le comportement thermomagnétique présente une certaine aimantation au départ, qui diminue progressivement jusqu'à s'annuler vers 580 °C (Fig.6.5). Ce comportement indique la présence de la magnétite dans le sédiment.

Dans la partie supérieure de la carotte, caractérisée par une présence faible de grains magnétiques (donc au-dessus de 18 cm), on a observé deux comportements thermomagnétiques. Les deux niveaux (17 et 4 cm), présentent des valeurs d'aimantation très faibles au départ et la désaimantation progressive indique plutôt des grains paramagnétiques. A environ 400°C commence une ré-aimantation qui atteint le maximum vers 450-480°C et s'annule vers 580°C. Pendant le refroidissement, le niveau 17 cm présente une très faible ré-aimantation alors que celle du niveau 4 cm est extrêmement forte. L'allure de la courbe de chauffe dans les deux échan-

<sup>37</sup> ( $10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg})/\text{T}$



**a**



**b**

**Fig.6.7.** DRX pour deux niveaux de la carotte BLKS 98-04 : a) greigite (G) et quartz (Q) au niveau 64 cm et b) pyrite (P), quartz, calcite (Ca) et aragonite (A) au niveau 17 cm

tillons suggère l'apparition de la magnétite à partir de 400°C, qui atteint ensuite sa température de Curie. Subséquemment, dans le niveau 17 cm, la ré-aimantation faible lors du refroidissement, suggère l'oxydation de la magnétite vers l'hématite. Dans l'échantillon 4 cm une forte ré-aimantation durant le refroidissement indique, au contraire, la persistance d'une grande quantité de la magnétite fabriquée durant l'expérience. Le comportement observé pendant la chauffe dans les deux échantillons peut être attribué à la présence de la pyrite : elle est paramagnétique et s'oxyde vers la magnétite autour de 450-480°C ; ensuite l'oxydation peut continuer jusqu'à l'hématite. La présence de la *pyrite* dans le niveau 17 cm a été mise en évidence par l'analyse DRX (André, 1999) (Fig.6.7b). Dans le niveau 4 cm, une très forte ré-aimantation pendant le refroidissement suggère qu'il pourrait y avoir encore un autre minéral, lequel se transforme en magnétite durant l'expérience, mais que nous n'avons pas identifié.

La carotte BLKS98-04 présente de grandes variations de la minéralogie magnétique et de la concentration en grains magnétiques. Entre la base de la carotte et au-delà de la discontinuité, jusqu'à 18 cm de profondeur, le sédiment contient de grandes quantités de greigite, un minéral caractéristique de la diagenèse précoce dans un milieu anaérobie et sulfato-ré-

ducteur. Dans les parties de ce sédiment, où la concentration en grains magnétiques est faible, on observe la magnétite en petites concentration, qui est vraisemblablement d'origine détritique. Le sommet de la carotte est dépourvu de grains magnétiques, c'est la pyrite qui est présente. Elle indique aussi un milieu anaérobie sulfato-réducteur.

#### CAROTTE BLKS 98-06

(profondeur d'eau: 135 m; longueur de la carotte : 265 cm)

Les valeurs faibles, relativement constantes des  $k$ , ARN et ARA enregistrées en bas de la carotte BLKS 98-06 (Fig.6.8) s'amplifient brusquement vers 130 cm de profondeur, où les variations deviennent plus fortes, avec le plus grand pic à 96 cm. Les valeurs fortes et variables de ces paramètres dépassent la discontinuité située à 46 cm dans la carotte. Les derniers 20-22 cm sont caractérisés par des valeurs très faibles. Les valeurs de la **susceptibilité magnétique** varient dans des intervalles de 1,7 et  $700 \times 10^{-5}$  u.S.I., de l'ARN entre 0,0003 et 1,9 A/m et de l'ARA entre 0,004 et 0,8 A/m .

Les **paramètres d'hystérésis**, mesurés sur huit niveaux (André, 1999), ont des valeurs dispersées, mais les pics et les creux de la  $M_s$ /masse et de la  $M_{rs}$ /masse, correspondent à ceux de la susceptibilité magnétique (Fig.6.9).

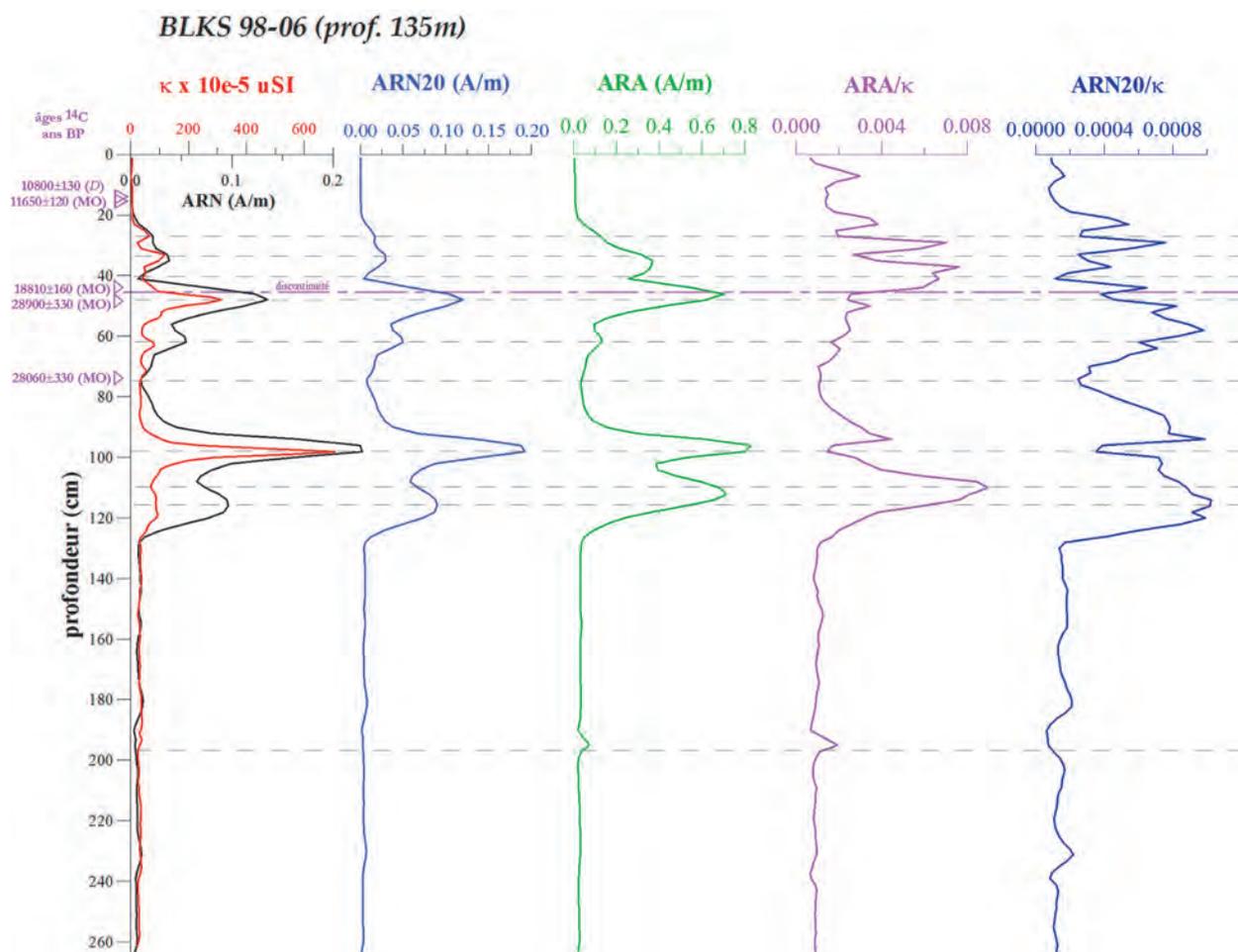


Fig.6.8. Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-06 ( $\kappa$ , ARN, ARN20, ARA, ARA/ $\kappa$ , ARN20/ $\kappa$ ); D - *Dreissena*, MO - matière organique



Les valeurs des Hc et Hcr, sont caractéristiques des minéraux magnétiques de faible coercivité, comme la magnétite, la maghémite ou la greigite. Les rapports Mrs/Ms et Hcr/Hc suggèrent la présence des grains de petite taille là, où la concentration en grains magnétiques est grande (Fig.6.6).

Une comparaison des informations sur la taille des grains données par le diagramme de Day et celles offertes par les courbes ARA/ $\kappa$  et ARN20/ $\kappa$  (Fig.6.8), montre, globalement, une cohérence. De petites différences, tout comme dans la carotte BLKS 98-04, sont néanmoins observées : dans le niveau 50 cm, ARA/ $\kappa$  semble indiquer une taille relativement grande des grains, mais ARN20/ $\kappa$  et le diagramme Mrs/Ms – Hcr/Hc des grains petits. En conséquence, ARA/ $\kappa$  et ARN20/ $\kappa$  ne nous donnent pas des informations absolues sur la taille des grains, mais plutôt sur les zones contenant des minéraux d'une certaine taille.

Les intervalles de variation pour les paramètres d'hystérésis sont : 1,2–344  $\mu\text{m}^2 \text{mg}^{-1}$  pour Ms/masse ; 0,2–139  $\mu\text{m}^2 \text{mg}^{-1}$  pour Mrs/masse ; 11,2–50 mT pour Hc ; 31–66 mT pour Hcr ; 0,1–0,5 pour Mrs/Ms ; 1,3–3,1 pour le Hcr/Hc ; 2,2–58,3  $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1} \text{T}^{-1}$  pour la S.C./masse (Tableau 6.3b).

En ce qui concerne le **comportement thermomagnétique** des échantillons provenant de la zone de susceptibilité élevée, tels que 60 cm, 50 cm et 27 cm (Fig.6.9), ils présentent le comportement décrit déjà pour la greigite de la carotte BLKS 98-04 (niveaux 64, 29 et 27) : une forte aimantation au départ, qui diminue progressivement avec la température jusqu'à des valeurs très faibles autour de 380–400°C, ensuite une légère ré-aimantation qui s'annule autour de 560–580°C. Au refroidissement on n'observe qu'une faible ré-aimantation. L'existence de la *greigite* dans ces niveaux de la carotte BLKS9806, a été confirmée par la DRX dans l'échantillon de 27 cm (Fig.6.10a). Aussi les valeurs fortes du champ coercitif à ces niveaux : entre 33.8 et 50 mT pour le Hc et entre 49.3–66.4 mT pour le Hcr (Roberts, 1995, Roberts & Turner, 1993; Reynolds *et al.*, 1994), par les rapports Mrs/Ms entre 0,322 et 0,523, et Hc/Hcr entre 1,33 et 1,83 (Roberts, 1995) sont typiques pour la greigite. Comme les niveaux 40, 91 et 110 cm ont des paramètres d'hystérésis similaires, on pense qu'ils contiennent aussi de la greigite (Tableau 6.3b).

Dans la partie inférieure de la carotte, dans les niveaux pauvres en grains magnétiques comme le niveau 174 cm, le comportement thermomagnétique présente une faible aimantation au départ, qui diminue ensuite progressivement jusqu'à s'annuler vers 580 °C (Fig.6.9). Ce comportement indique la présence des petites quantités de la *magnétite* dans le sédiment.

La partie supérieure de la carotte, au-dessus de 22 cm, est caractérisée par la présence d'une quantité réduite de grains magnétiques. A 4 cm de profondeur, nous avons observé un comportement thermomagnétique similaire à celui du niveau 4 cm de la carotte BLKS 98-04 : les valeurs d'aimantation sont au départ très faibles et la désaimantation très progressive indiquant plutôt les grains paramagnétiques (Fig.6.9). Ensuite, à environ 400°C commence une ré-aimantation qui

atteint le maximum vers 450–480°C et s'annule vers 580°C. Au refroidissement, le sédiment présente une ré-aimantation extrêmement forte. L'allure de la courbe de chauffe peut être attribuée à la présence de la pyrite, qui est paramagnétique et qui s'oxyde en magnétite autour de 450–480°C. La pyrite, dans le niveau 4 cm, a été mise en évidence par l'analyse DRX du sédiment décarbonaté (André, 1999) (Fig.6.10b).

La carotte BLKS98-06, tout comme BLKS 98-04, présente de grandes variations de la minéralogie magnétique et de la concentration de grains magnétiques. Entre la base de la carotte et environs 130 cm de profondeur la concentration est faible et est représentée par la magnétite. Entre 130 cm et jusqu'à 22 cm de profondeur, incluant la zone de la discontinuité, le sédiment contient des grandes quantités de greigite, qui est un minéral caractéristique de la diagenèse précoce dans un milieu anaérobie et sulfato-réducteur. Le sommet de la carotte est dépourvu de grains magnétiques mais il contient de la pyrite qui indique, comme la greigite, un milieu anaérobie sulfato- réducteur. Il faut remarquer la similitude de ces deux carottes d'eau peu profonde en ce qui concerne la minéralogie magnétique et la répartition de ces minéraux le long des colonnes sédimentaires.

#### CAROTTE BLKS 98-09

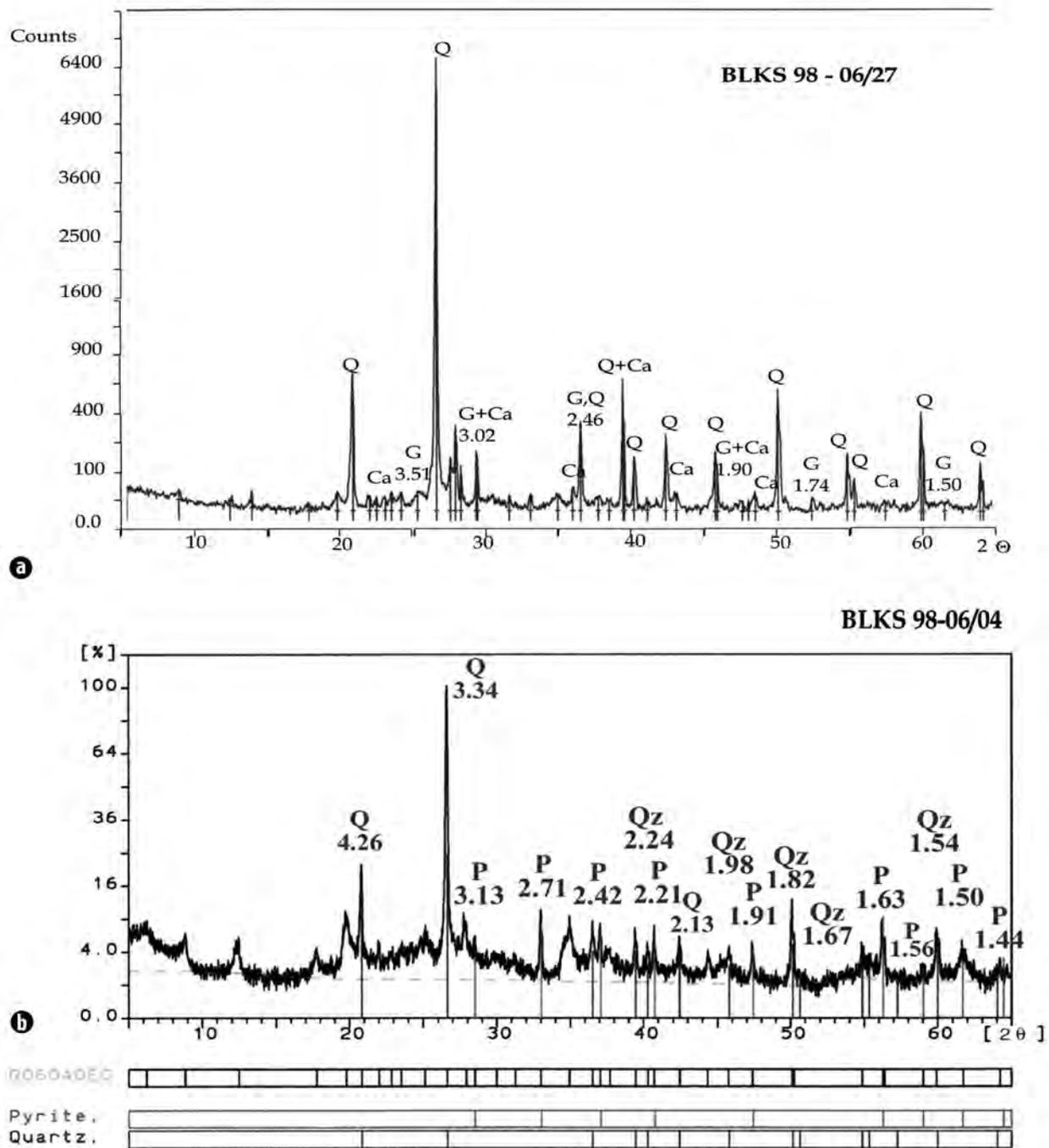
(profondeur d'eau: 240 m; longueur de la carotte : 843 cm)

Les valeurs de la **susceptibilité magnétique** de l'ARN20 et de l'ARN20/ $\kappa$  sont faibles et relativement constantes du bas de la carotte jusqu'à 120 cm de profondeur, et un peu plus grandes et variables, vers le sommet. De 120 cm et jusqu'au sommet de la carotte, les courbes enregistrent 4 pics vers 109, 58, 47, 34 cm. Les courbes de  $\kappa$  et d'ARN20 enregistrent un 5<sup>ème</sup> pic vers 18 cm. L'intervalle de variation de la susceptibilité est : 0,567–53,181  $\times 10^{-5}$  uSI, celui de l'ARN20 est : 0,01193–0,04595 A/m et celui de l'ARN 20mT est : 8,4 $\times 10^{-5}$  – 1,59 $\times 10^{-3}$  A/m (Fig.6.11).

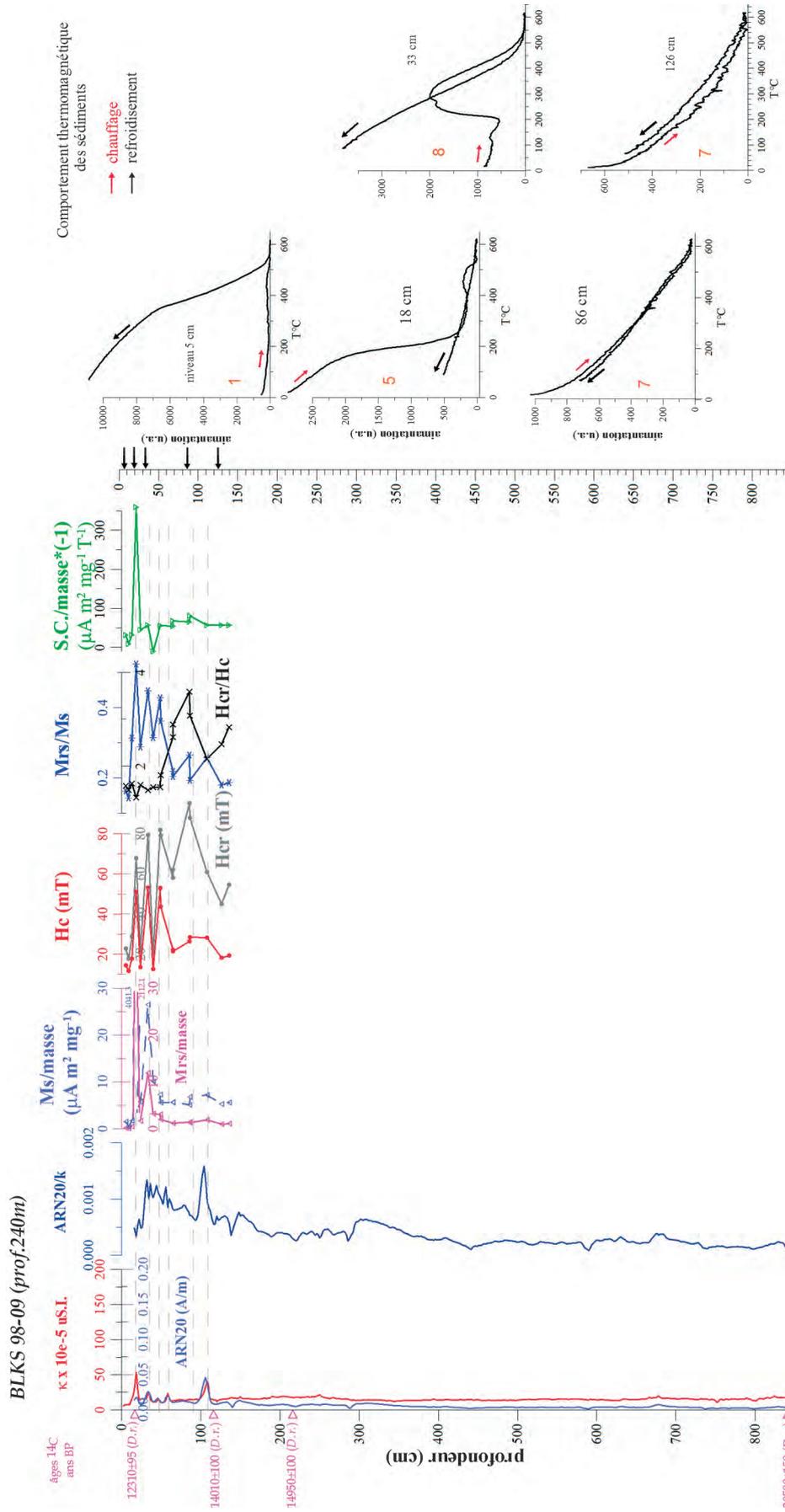
En regardant ces paramètres, nous pouvons donc observer un changement de la concentration des minéraux magnétiques vers 120 cm de profondeur.

L'analyse des paramètres **d'hystérésis**<sup>38</sup> montre que : Ms/masse, Mrs/masse présentent des valeurs relativement constantes sur l'intervalle de profondeur 136–50 cm. Entre 50 cm et la surface, ces paramètres enregistrent des variations en accord avec la susceptibilité magnétique et l'ARN20mT. On note cependant deux pics forts aux niveaux 33 et 18 cm et des valeurs faibles pour les autres niveaux analysés. Les Ms/masse et Mrs/masse au niveau 18 cm sont respectivement: 4041,5 et 2112,09  $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$ , ce qui suggère ici (ponctuellement) la concentration très élevée des grains magnétiques. Hormis ces valeurs exceptionnelles du niveau 18 cm, les intervalles des variations sont : 0,07–11,88  $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$  pour Mrs/masse et 0,46–26,54  $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$  pour Ms/masse. (Fig.6.11 et Tableau 6.4a).

<sup>38</sup> analysés par F.André, 2000, tout comme le comportement thermomagnétique de 5 échantillons



**Fig.6.10.** DRX pour deux niveaux de la carotte BLKS 98-06: a) greigite (G), quartz (Q) et calcite (Ca) au niveau 27 cm dans le sédiment total et b) pyrite (P) et quartz dans le sédiment décarbonaté du niveau 4 cm



**Fig. 6.11.** Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-09: κ ARN20, ARN20/κ, Ms/masse, Mrs/Ms, Hc, Hcr, Mrs/Ms, S.C./masse et comportement thermomagnétique des échantillons; âges <sup>14</sup>C conventionnels non-corrigés selon Major et al., 2002; D.r. - *Dreissena rostriformis*

Les Hc et Hcr varient en phase avec des pics de k et ARN20mT. Le Mrs/Ms et le Hcr/Hc varient d'une manière antiparallèle. Les valeurs de ces 4 paramètres suggèrent la présence de la greigite dans les niveaux 18, 33 et 49 cm (**Tableau 6.4a**).

Dans le **Tableau 6.4a** les niveaux 49,1, 65,1 et 86,1 cm représentent les analyses des grains oxydés trouvés dans les niveaux 49, 65 et 86 cm. La comparaison montre les changements des valeurs des paramètres magnétiques tels que Hc, Hcr, Mrs/masse et Ms/masse dus à l'oxydation.

Le **comportement thermomagnétique** des sédiments (**Fig.6.11**) a été analysé pour quelques niveaux dans l'intervalle 130-0 cm. Il est caractérisé par des variations des paramètres magnétiques.

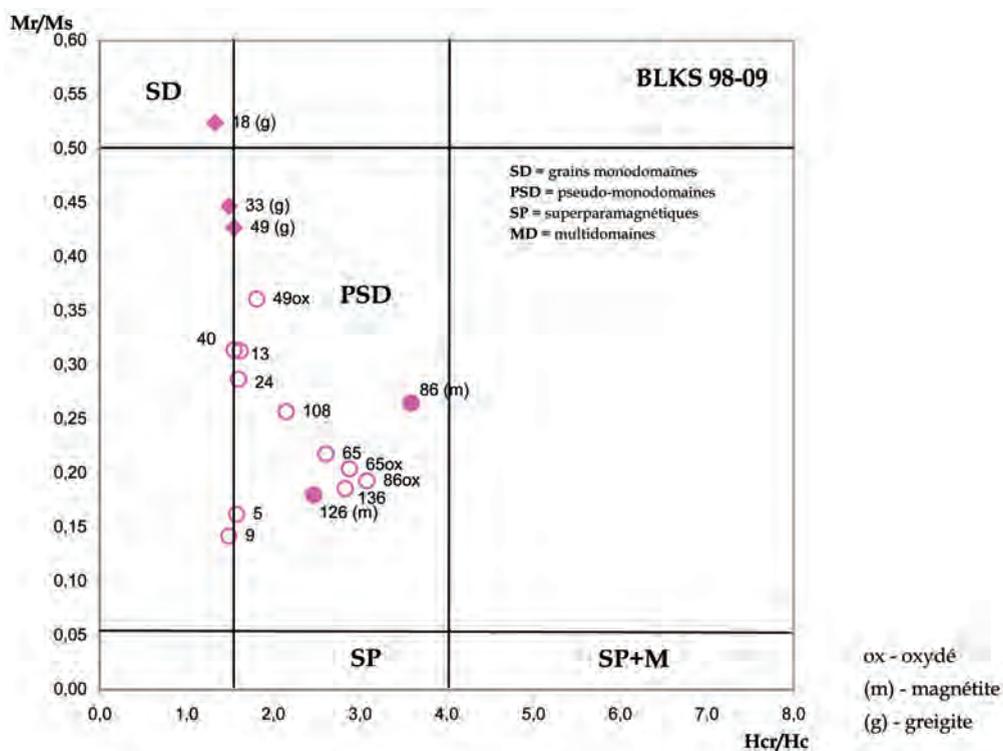
Le sommet et la partie inférieure de la carotte, sont caractérisés par la présence d'une quantité réduite de grains magnétiques.

Dans les niveaux inférieurs, pauvres en grains magnétiques comme 126 et 86 cm, le comportement thermomagnétique présente une certaine aimantation au départ, qui diminue progressivement jusqu'à s'annuler vers 580°C. La courbe de refroidissement est presque identique à celle du chauffage; nous avons ici les minéraux paramagnétiques avec une petite quantité de *magnétite*.

La courbe thermomagnétique du niveau 33 cm montre que l'échantillon était faiblement aimanté au départ, qu'il se

désaimante un peu jusqu'à environ 200°C pour se ré-aimanter en deux temps entre 200 et 300°C (avec des maxima à 250°C et à 300°C). Cette aimantation, acquise durant l'expérience, s'annule vers 580°C et, pendant le refroidissement, le sédiment se ré-aimante fortement à partir de 550 – 500 °C. La ré-aimantation durant la chauffe, qui commence autour de 200°C, pourrait suggérer la présence de pyrrhotite hexagonale dans le sédiment. En effet ce minéral se transforme autour de 200°C en pyrrhotite monoclinique qui est ferrimagnétique. Il en résulte une ré-aimantation, qui s'annule ensuite vers 300°C, température de Curie de la pyrrhotite monoclinique (e.g. Schwarz, 1975). Cependant, sur notre échantillon nous observons, après une légère baisse d'intensité d'aimantation, reflétant sûrement le passage vers la température de Curie de la pyrrhotite, une faible, mais évidente ré-aimantation à 300 °C. Ceci suggère une composition plus complexe de ce niveau : un minéral non magnétique, que nous n'avons pas pu identifier, en se transformant en un minéral magnétique durant l'expérience, masque le comportement magnétique du ou des autres minéraux magnétiques présents en faible quantité dans l'échantillon d'origine. Les valeurs des paramètres d'hystérésis obtenus pour ce niveau suggèrent la présence de sulfure de fer (greigite et/ou pyrrhotite) (**Fig.6.11** et **Tableau 6.4a**), identifié déjà dans cette carotte.

Le comportement thermomagnétique de l'échantillon à 18 cm est similaire à celui des niveaux 64, 29 et 27 cm de la carotte BLKS 98-04, attribuable à la présence de la *greigite*, fait indiqué par les valeurs du champ coercitif et les rapports



**Fig.6.12.** Représentation des rapports Hcr/Hc en fonction de Mrs/Ms sur un diagramme de Day, pour les échantillons de la carotte BLKS 98-09 ; ox = oxydé, (m) = magnétite, (g) = greigite

Mrs/Ms et Hc/Hcr (Roberts, 1995, Roberts & Turner, 1993; Reynolds *et al.*, 1994) (**Tableau 6.4a**) et confirmé par les DRX des niveaux 64 et 27 des carottes 04 et 06 déjà décrites.

Le comportement thermomagnétique du niveau 5 cm est similaire à celui du niveau 4 cm de la carotte BLKS 98-04, indiquant plutôt les grains paramagnétiques, très probablement de la pyrite ou de la sidérite (**Fig.6.11**).

Sur la **figure 6.12** est représenté le rapport Hcr/Hc en fonction de Mrs/Ms sur un diagramme de Day. Nous pouvons observer que la plupart des grains magnétiques de cette carotte semblent avoir une taille relativement grande, pseudo-monodomaine. Seuls les niveaux à 18 cm ainsi que à 33 et 49 cm, ont des tailles plus petites.

Les sédiments de la carotte BLKS 98-09, dans sa partie inférieure entre la base et 50 cm, sont caractérisés par la présence de faibles quantités de magnétite, dans la matrice paramagnétique. Entre 50-18 cm, on observe l'apparition des quantités plus ou moins importantes de sulfures de fer, tels que la greigite et/ou la pyrrhotite. Le sommet de la carotte serait marqué par la présence de pyrite.

#### CAROTTE BLKS 98-10

(profondeur de l'eau: 378 m; longueur de la carotte : 754 cm)

Les courbes de la **susceptibilité magnétique  $\kappa$**  présente, de la base jusqu'à 280 cm, des valeurs faibles et relativement constantes suivies par un intervalle de fortes variations entre 280 et 100 cm. Ensuite on observe des valeurs faibles et relativement constantes jusqu'au sommet. De la base de la carotte jusqu'au 280 cm, les valeurs varient très peu alors que dans l'intervalle 280-100 cm  $\kappa$  présente 7 pics à 272, 228, 163, 161, 149, 125 et 107 cm. La partie supérieure de la carotte (100-0 cm), est caractérisée par des valeurs faibles et constantes de  $\kappa$ , avec un seul pic, peu élevé, à 31-35 cm (**Fig.6.13**). L'intervalle de variation de ce paramètre est  $0,17-154,33 \times 10^{-5}$  uSI.

Les courbes ARA et ARA/ $\kappa$  ne sont pas complets du fait d'un mauvais fonctionnement accidentel de l'appareil de mesure. Malheureusement, la reprise de la mesure de la section 169,5-320 cm n'as pas été possible.

La courbe d'ARA suit de près l'allure de la susceptibilité magnétique. Tout comme celle-ci, l'ARA présente trois intervalles distincts avec des valeurs faibles et constantes de la base de la carotte jusqu'à 280 cm, des fortes variations entre 280 et 100 cm et de nouveau des valeurs faibles et constantes de 100 cm jusqu'au sommet de la carotte. Le long du tronçon 280-100 cm, avec de grandes variations, se trouvent 3 pics, vers 159, 125 et 107 cm. De 100 cm jusqu'au sommet de la carotte les valeurs d'ARA sont de nouveau faibles et constantes, à l'exception d'une augmentation vers 33 cm et d'une remontée des valeurs de ce paramètre dans les derniers 8 cm. Comme dans le cas de , les valeurs d'ARA de cette partie de carotte sont plus faibles par rapport à celles de 754-280cm. L'intervalle de variation de l'ARA est  $0,000429-0,3046$  A/m.

La courbe **ARA/ $\kappa$**  présente des valeurs généralement faibles mais des valeurs plus fortes sur les derniers 43 cm de la carotte. Les valeurs fortes de ce paramètre dans cet intervalle peuvent indiquer la présence de grains magnétiques de petite taille, en faibles quantités. D'un autre côté, dans cette carotte, la limite sapropèle - sédiment lacustre n'est pas claire: elle est située à 35,5 ou à 40 - 42,5 cm (voir dans l'**annexe 1** – la description lithologique de cette carotte). Le changement brusque du comportement du paramètre ARA/ $\kappa$  est une indication du changement de la taille des grains magnétiques et, du point de vue de la lithologie, ceci est un argument qui peut-être retenu pour fixer cette limite à 40 ou 42,5 cm. Une preuve supplémentaire sera apportée par l'allure similaire, à la limite unité III/unité II, des courbes des paramètres magnétiques des carottes suivantes : BLKS 98-11 et BLKS 98-22.

Le **comportement thermomagnétique** du sédiment montre des changements importants de la minéralogie magnétique du bas vers le haut de la carotte (**Fig.6.13**).

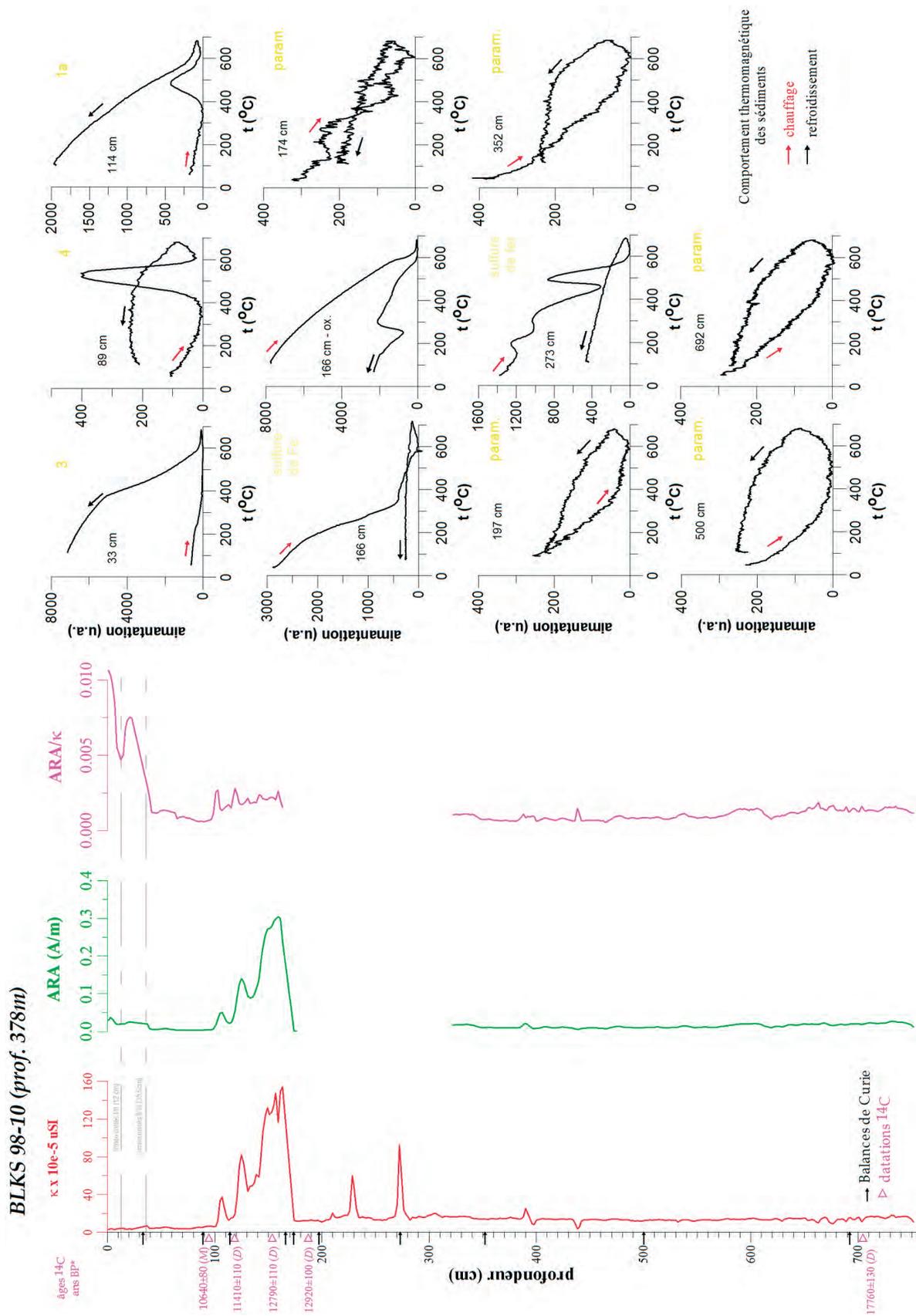
Les niveaux 692, 500, 352, 197 et 174 cm, couvrant les valeurs faibles de la susceptibilité magnétique depuis la base jusqu'à 174 cm de profondeur de la carotte, présentent une trop faible aimantation durant l'expérience à la balance de Curie pour identifier clairement les minéraux magnétiques, sauf peut être des quantités vraiment minimales de magnétite. Les allures des courbes ne permettent pas non plus d'identifier de sulfures de fer paramagnétiques, comme la pyrite.

Le niveau 273 cm présente des changements de l'aimantation attribués à la *greigite*. Cependant, la forme de la courbe de chauffe suggère que ce sédiment contient, en plus, d'autres composantes minérales de fer. En particulier, la ré-aimantation enregistré autour de 200°C montre très probablement de faibles quantités de *pyrrhotite* hexagonale (qui se transforme en *pyrrhotite* monoclinique vers 200°C - comportement décrit à l'occasion du niveau 33 de la carotte BLKS 98-09).

La courbe thermomagnétique du niveau 166 cm est typique de la présence de la *greigite*, qui s'est transformée durant l'expérience en hématite. Le même niveau, mais contenant le sédiment oxydé au départ montre un comportement plus complexe.

Aux niveaux 114 et 89 cm, une faible aimantation des échantillons au départ du chauffage indique une très faible concentration en grains magnétiques. Ensuite on observe une désaimantation progressive jusqu'à 400°C et une ré-aimantation entre 400 et 500°C suivie par une désaimantation vers 580°C. Ce type de comportement a été déjà décrit auparavant dans d'autres carottes. Il a été attribué à la *pyrite* et confirmé par l'analyse DRX des échantillons à 17 cm de la carotte BLKS 98-04 et 4 et 27 cm de la carotte BLKS 98-06.

Le niveau 33 cm (situé dans le sapropèle) présente, comme à 89 et 114 cm, une faible aimantation au départ de l'expérience témoignant de la faible concentration en grains magnétiques. Durant le refroidissement une très forte re-



**Fig. 6.13.** Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-10 :  $\kappa$ , ARA, ARA/ $\kappa$  et comportement thermomagnétique des échantillons discrets, âges  $^{14}\text{C}$  conventionnels non-corrigés selon Major et al., 2002; D - Dreissena, M - Micromelania (= Iurricaspia)

aimantation à partir de 580 °C indique la transformation d'une partie du matériel présent dans l'échantillon en magnétite. Néanmoins, si on ne s'intéresse qu'à la courbe de chauffe, on constate, qu'en dépit de petite quantité de matériel magnétique, son comportement est très semblable à celui du niveau 166, qui indique la présence de greigite.

La carotte BLKS 98-10 présente des changements importants de la minéralogie magnétique. Depuis la base de la carotte jusqu'à 174 cm, le sédiment contient peu de minéraux magnétiques ; la fraction paramagnétique, avec éventuellement de très faibles quantités de magnétite est dominante. Dans deux niveaux, caractérisés par les pics de susceptibilité magnétique, les sulfures de fer (greigite) ont été identifiés. Entre 174 et 100 cm, la concentration des sulfures de fer augmente beaucoup, fait reflété aussi par la présence des pics importants sur la courbe de  $\kappa$ , du à la greigite. Dans cet intervalle, les creux de la susceptibilité magnétique sont caractérisés par la présence de pyrite. De 100 cm jusqu'au sommet de la carotte, le sédiment en contient avec aussi de faibles quantités de greigite dans le sapropèle. Le changement brusque d'allure de la courbe ARA / $\kappa$  à partir de 43 cm suggère l'existence de quantités faibles de grains magnétiques de petite taille dans le sédiment.

#### CAROTTE BLKS 98-11

(profondeur de l'eau: 500 m; longueur de la carotte : 757 cm)

La **susceptibilité magnétique** de l'ARN<sub>20mT</sub> et de l'ARA sont relativement faibles et constantes de la base de la carotte, jusqu'au niveau 250 cm (Fig.6.14). Entre 250 cm et 150 cm de profondeur, il y a un intervalle de fortes variations des trois paramètres, avec six pics à : 242, 228, 220, 210, 188 et 160cm. Un épisode « calme », s'enregistre entre 150 cm et la limite des unités III (unité lacustre) et II (sapropèle) de 61 cm, avec des valeurs très faibles et constantes, près de zéro. La base de l'unité II est marquée par une forte augmentation importante de  $\kappa$  et encore plus de l'ARN<sub>20mT</sub>, tandis que l'ARA reste faible; le pic occupe la moitié inférieure du sapropèle. Au dessus, les deux paramètres deviennent faibles et le restent, avec l'ARA, jusqu'au sommet de la carotte constituée de l'unité I (unité marine à coccolites). L'intervalle de variation de la susceptibilité magnétique est  $-0.44 \div 268.99 \times 10^{-5}$  uSI. L'intervalle de variation des valeurs de l'ARN<sub>20mT</sub>, est 0.000477-0.2115 A/m et les valeurs d'ARA varient entre 0,00001996 et 0,4861 A/m.

L'ARA présente presque le même type de comportement que la susceptibilité magnétique et l'ARN<sub>20mT</sub>, à la différence près que le pic dans l'unité à sapropèle est extrêmement faible. Il est nécessaire de disposer d'un fort agrandissement de l'échelle pour pouvoir le mettre en évidence.

ARA / $\kappa$  et ARN<sub>20mT</sub>/ $\kappa$  varient peu de la base de la carotte jusqu'à 255 cm L'intervalle de profondeur suivant, 255-138 cm, est caractérisé par des variations fortes et rapides. Mais, pour le troisième intervalle, de 138 cm au sommet de la carotte pour l'ARA/ $\kappa$  et jusqu'à environ 72 cm pour l'ARN<sub>20</sub>/ $\kappa$ , on observe des valeurs très faibles et très peu variables. L'ARN<sub>20</sub>/ $\kappa$  redevient fort et changeant pour les derniers 72 cm. L'ARA/ $\kappa$

et ARN<sub>20</sub>/ $\kappa$  varient en phase du bas de la carotte jusqu'à 72 cm. En général, elles varient anti-parallèlement avec la susceptibilité magnétique et ARN<sub>20mT</sub>. Ceci est une indication, si la population de grains magnétiques est mono minérale, de la taille relativement petite des grains magnétiques dans l'intervalle 250-150 cm. L'intervalle 72 cm – sommet est plus délicat à interpréter car les deux paramètres ARA/ $\kappa$  et ARN<sub>20</sub>/ $\kappa$  ne sont pas en phase.

Du fait que la partie inférieure de la carotte présente des paramètres magnétiques ayant des valeurs faibles et relativement constantes, les paramètres d'hystérésis ont été analysés seulement pour les derniers 279 cm, là où on observe de grandes variations des paramètres magnétiques déjà décrits. L'intervalle de variation de **Hc** pour tous les échantillons analysés est 4,76-55,7 mT et pour **Hcr** : 10-80,9 mT. Les valeurs des autres paramètres d'hystérésis sont comprises entre: 0,101 et 0,856 pour **Mrs/Ms** ; entre 1,052 et 3,635 pour **Hcr/Hc** et entre 0,129 et 80  $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$  pour **Mrs/masse** et 0,307 à 162,828  $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$  pour la **Ms/masse** (Tableau 6.4b et Fig.6.15). L'allure des courbes Ms/masse et Mrs/masse ressemble beaucoup à celles de la susceptibilité magnétique et de l'aimantation rémanente naturelle (ARN<sub>20mT</sub>), avec les plus forts pics dans l'intervalle 200-250 cm. Le champ coercitif et la coercivité de rémanence ont des valeurs fortes pour l'intervalle 261-142 cm : 23,3<Hc<55,7 mT ; 50,3<Hcr<80,9 mT. Ces valeurs sont en général spécifiques pour la pyrrhotite et la greigite (voir le Tableau 6.1).

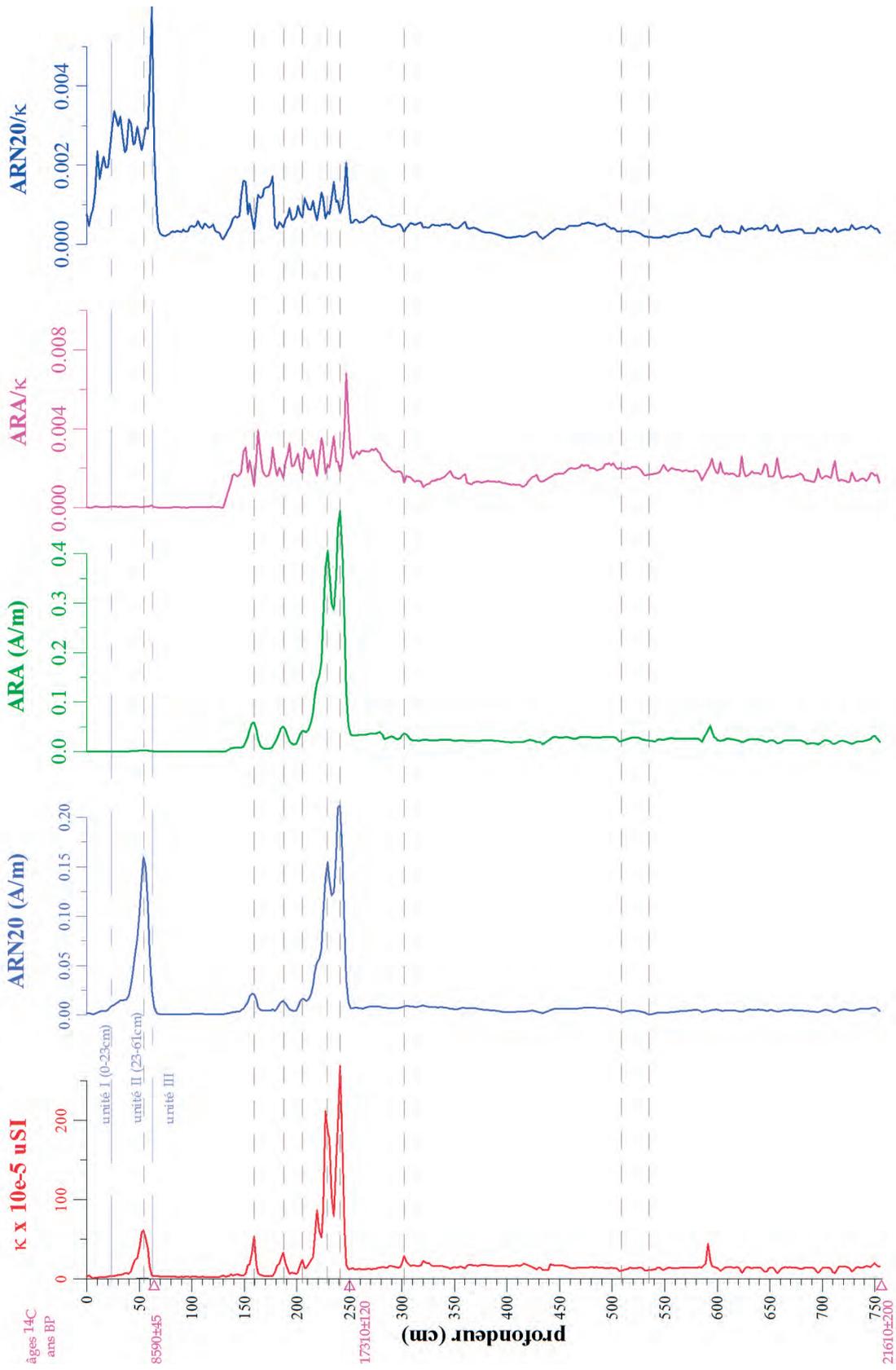
La représentation graphique de Hcr/Hc en fonction de Mrs/Ms (le diagramme de Day-Fuller-Schmidt, 1977), montre que les échantillons provenant de la zone 250 –150 cm, où la susceptibilité magnétique est grande, ont une taille relativement petite, allant vers le monodomaine (SD), tandis que dans d'autres parties de la carotte, les grains ont la taille plus grande, pseudo-momodomaine (PSD) (Fig.6.16). Cette représentation confirme les informations obtenues lors de l'analyse des courbes d'ARN<sub>20</sub>/ $\kappa$  et d'ARA/ $\kappa$ .

Les expériences à la **balance de Curie** montrent des comportements bien différents selon les échantillons, en fonction de leur profondeur dans la carotte. Une synthèse de courbes de variation d'aimantation des sédiments pendant le chauffage et le refroidissement à la balance de Curie, est présentée dans les figures 6.17 a et b.

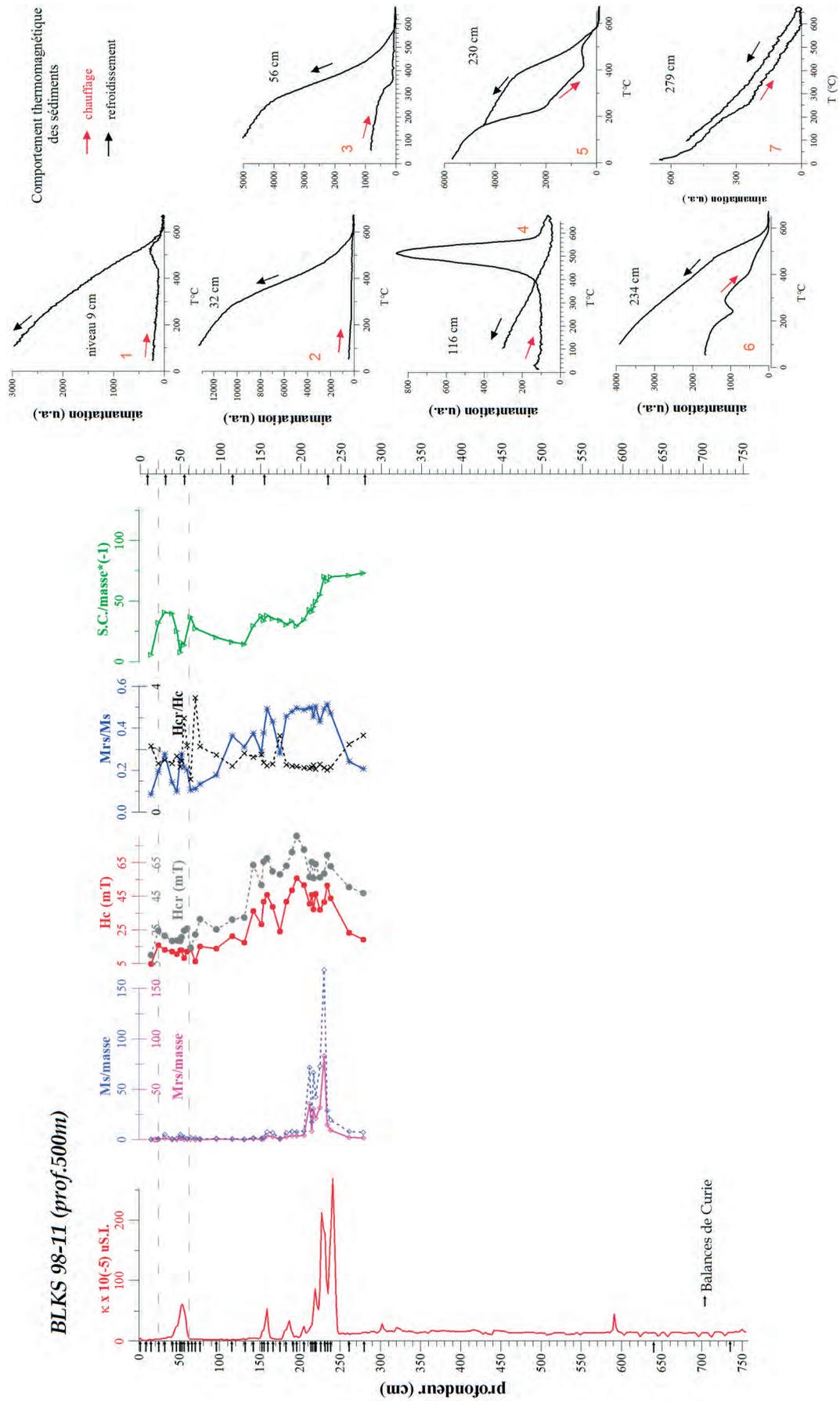
Cette carotte a été analysée en détail, du moins du point de vue des analyses thermomagnétiques. En conséquence, elle sera utilisée pour identifier et nommer les principaux types de comportement thermomagnétique, afin de pouvoir comparer les 6 carottes analysées. Les types de comportement ont identifiés ci-après. Cependant, certains comportements intermédiaires sont difficiles à classer. Nous ne décrivons que les plus typiques.

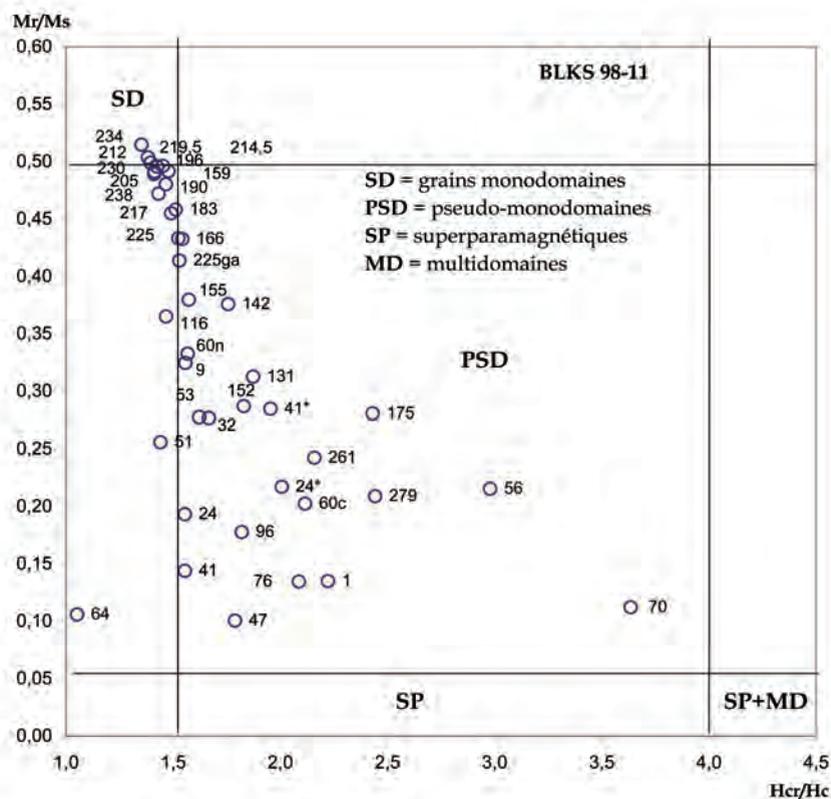
- (1) le comportement des sédiments de niveaux 1 à 24 cm, de 64 à 76 cm, 152, 155, 166 196 et 205 cm: l'échantillon faiblement aimanté au départ, se désaimante peu pendant le chauffage, mais il présente une ré-aimantation

**BLKS 98-11 (prof.500m)**



**Fig.6.14.** Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-11:  $\kappa$ , ARN20, ARA, ARA/ $\kappa$ , ARN20/ $\kappa$ ; âges  $^{14}\text{C}$  conventionnels non-corrigés





**Fig.6.16.** Représentation de Hcr /Hc en fonction de Mr/Ms (diagramme de Day-Fuller-Schmidt) pour les échantillons de la carotte BLKS 98-11; \*échantillon chauffé : une fois (41) ou deux fois (24) ; n - analyse de la partie noire de l'échantillon ; c - analyse de la partie claire de l'échantillon ; ga - grain aimanté

plus ou moins importante à partir d'environ 400°C. La désaimantation est reprise vers 520-530°C et elle s'annule vers 580°C. Pendant le refroidissement, le sédiment présente une forte ré-aimantation. La diffraction des rayons X sur le sédiment total a mis en évidence la présence de la *pyrite*, en plus de quartz, et de calcite dans l'échantillon du niveau 9 cm (**Fig.6.18a**). Ce comportement thermomagnétique, très similaire à celui des niveaux : 4 cm/BLKS 98-04 (**Fig.6.5**), 4 cm/BLKS 98-06 (**Fig.6.9**), 5 cm/BLKS 98-09 (**Fig.6.11**) et 114 cm/BLKS 98-10 (**Fig.6.13**) est connu (Tudryn & Tucholka, 2004). Il est dû à l'oxydation de la pyrite vers la magnétite durant la chauffe. Les courbes de refroidissement témoignent de l'apparition de grandes quantités de magnétite ou de maghémite (1 et 15 cm), lorsque l'oxydation ne s'est pas arrêtée au stade de la magnétite durant l'expérience. La ré-aimantation forte (plus forte que celle supposée d'après la taille de la bosse de ré-aimantation durant la chauffe, exemple à 155 cm) de certains échantillons (24, 64, 70 et 76 cm) pendant le refroidissement peut suggérer, que l'oxydation de la pyrite a continué encore au-delà de la température de Curie de la magnétite. Il se peut aussi, qu'en plus de la pyrite, il y a dans le sédiment un matériel non-magnétique, mais qui se transforme, comme la pyrite, en magnétite pendant le

chauffage. Ce matériau n'a pas été identifié par DRX ; il s'agit peut être d'un précipité amorphe d'un *monosulfure de fer* (phase initiale dans la diagénèse précoce des sulfures de fer). Nous allons diviser ainsi ce comportement 1 en 3 catégories détaillées sur la base d'information rapporté par la courbe de refroidissement: 1a – échantillons ayant une ré-aimantation en rapport avec la magnétite créée autour de 500°C (9, 152, 155, 166, 196 et 205 cm), 1b – échantillons ayant une ré-aimantation plus forte (24, 64, 70 et 76 cm), et 1c – les échantillons ayant la température de ré-aimantation inférieure à la température de Curie de la magnétite (1 et 15 cm).

- (2) le deuxième type de comportement est celui des sédiments de 32 à 50 cm (**Fig.6.17a**): partant d'une aimantation très faible, les échantillons se désaimantent progressivement jusqu'à environ 350 °C, ensuite ils continuent encore plus lentement jusqu'à ~600°C, pour se ré-aimanter très fortement pendant le refroidissement. Cette forte ré-aimantation indique l'apparition de la magnétite durant l'expérience. Le matériau transformé n'a pas été identifié clairement. L'odeur de soufre se dégageant du four durant l'expérience indique la présence de sulfure de fer. La forme de courbe de désaimantation, malgré une très faible concentration en grains magnétiques, ressemble à

- celle de la greigite de la carotte BLKS98-10, au niveau 166 cm. Il s'agit peut être d'un mélange d'une faible quantité de greigite avec, comme suggéré plus haut (très forte ré-aimantation durant le refroidissement), un *précipité amorphe de monosulfure de fer*;
- (3) le troisième type de comportement est celui des niveaux 53, 56 et 60 cm. Les échantillons sont faiblement aimantés au départ, et presque entièrement désaimantés vers 350°C. L'analyse par DRX du sédiment total du niveau 56 cm (**Fig.6.18b**) indique la présence d'une association de minéraux tels que : le quartz, la calcite, le muscovite et la pyrite. Le spectre DRX de l'extrait magnétique au même niveau n'est pas exploitable à cause d'une faible quantité des grains magnétiques présents dans l'échantillon et de sa « dilution » dans la matière organique. Le comportement thermomagnétique, qui ne montre pas la présence de pyrite, indique juste la présence d'une très faible quantité de minéral magnétique qui se désaimante vers 340-360°C. Parmi ceux ayant cette caractéristique se trouve la greigite (300-350°C) et la pyrrhotite monoclinique (305-325°C). Un argument en faveur de la greigite est apporté grâce à l'analyse de l'extrait magnétique du niveau 241 cm dans BLKS 98-22. En effet cet extrait magnétique, identifié aux DRX comme étant la greigite (**Fig.6.23a** et Strechie *et al.*, 2002) présente le comportement thermomagnétique similaire à celui décrit dans ce paragraphe. Notons donc que dans ce niveau, le comportement thermomagnétique n'est typique ni de la greigite (car on n'observe pas la ré-aimantation autour de 450-500°C due à l'oxydation de la greigite en magnétite durant expérience), ni de la pyrite, (pourtant identifiée aux DRX).
- (4) un quatrième type de comportement est observé pour les échantillons de 96 à 142 cm et de 175 à 190 cm. Partant d'une aimantation faible, pendant le chauffage, l'échantillon se désaimante encore jusqu'à 400°C. Ensuite a lieu une ré-aimantation du sédiment suivie d'une désaimantation à partir de 500°C et jusqu'à 600°C. La ré-aimantation pendant le refroidissement est très faible (**Fig.6.17a et b**). La courbe de chauffe dans ces échantillons est la même que celle du type (1), identifiée comme celle de la pyrite. Elle diffère de la courbe de refroidissement, où la faible ré-aimantation témoigne de l'oxydation de la magnétite vers l'hématite. L'analyse du spectre DRX du sédiment total du niveau 116-117 cm avant l'expérience de la balance de Curie confirme qu'il s'agit d'un échantillon contenant de la pyrite (**Fig.6.18c**). Ce type de comportement, se trouvant aussi au niveau 17 cm de la carotte BLKS 98-04 (**Fig.6.5**, DRX: **Fig.6.7b**) a été décrit par Tudryn et Tucholka (2004) pour la pyrite framboïdale<sup>39</sup> ou altérée;
- (5) Le comportement des échantillons à 159 cm et entre 212 et 230 cm (**Figs.6.17a et b**), est typique pour la greigite : une aimantation importante au départ, qui diminue jusqu'à environ 350°C. Ensuite, du fait de l'oxydation de la greigite en magnétite, on observe une ré-aimantation, qui après 500°C, atteint zéro à environ 580°C. La courbe de refroidissement reflète la présence de la magnétite formée durant l'expérience. Si la magnétite s'oxyde, cette courbe présentera le comportement typique de la maghémite ou de l'hématite. Dans le cas d'un mélange de greigite et de pyrite, la courbe de chauffe va être modifiée : l'intensité d'aimantation au départ et la ré-aimantation vers 500°C seront fonctions de la quantité de chacun de deux minéraux. Les niveaux 190 et 205 cm présentent un tel mélange, mais d'autres aussi, marqués d'avantage par la pyrite. Ils ont été décrits dans le comportement 1 (152 et 196 cm). Il est similaire avec les comportements des échantillons 27, 29 et 64 cm de BLKS 98-04 (**Fig.6.5**), 27, 50 et 60 cm de BLKS 98-06 (**Fig.6.9**) et 18 cm de BLKS 98-09 (**Fig.6.11**). Ce comportement a été identifié aussi par DRX comme étant spécifique de la présence de la greigite dans le sédiment. L'analyse du spectre DRX de l'échantillon 166-167 cm montre un signal oblitéré par une grande quantité de quartz présente dans le sédiment. Malgré cela, sur le spectre sont visibles les pics d'un feldspath (albite) et, peut-être, de la pyrrhotite (**Fig.6.18d**). Les paramètres d'hystérésis tels que le Hc entre 23,9 et 55,7 mT, Hcr entre 50,3 et 80,9, Mrs/Ms entre 0,38 et 0,5 et Hcr/Hc entre 1,4 et 1,57 sont caractéristiques de la greigite ou de la pyrrhotite (**Tableau 6.4b**). En particulier, les valeurs Mrs/Ms ~ 0,5 et Hcr/Hc ~ 1,5 sont indicatrices de la présence de la greigite (Roberts, 1995). En conséquence, les échantillons caractérisés par ce comportement contiennent de la pyrite, de la greigite et possiblement des petites quantités de pyrrhotite ;
- En ce qui concerne les comportements 1a et 5, un regard sur les paramètres d'hystérésis de ces niveaux (**Tableau 6.4b**) nous donne des informations importantes : tout d'abord, les valeurs des rapports Hcr/Hc et Mrs/Ms sont respectivement autour de 1,5 et 0,5. Selon Roberts (1995), ceci est typique de la présence de greigite sédimentaire. De plus, les valeurs de Hcr dans l'intervalle 44,8-94,8 mT sont en accord avec les valeurs rapportées pour la greigite et la pyrrhotite par Roberts et Turner (1993), Reynolds *et al.* (1994), Roberts, (1995), Peters et Dekkers (2003). Hc a des valeurs comprises entre 11,4 si 71,3 mT, en accord avec ceux trouvés par Snowball (1991) et Roberts (1995) pour des échantillons de greigite naturelle et synthétique.
- (6) Trois échantillons : 234, 238 cm et 261 cm présentent un comportement attribué à la greigite avec cependant une modification : sur la courbe de chauffe on observe une petite ré-aimantation autour de 220°C et jusqu'à environ 275°C. Ceci suggère la présence d'une petite quantité de pyrrhotite hexagonale. En effet il est connu le fait que ce minéral se caractérise, au chauffage, par une aimantation autour de 200-220°C du à la transition gamma (ce qui correspond au passage de la forme antiferromagnétique de basse température à la forme ferrimagnétique (Rochette *et al.*, 1990 ; van Velzen, 1994). Le point de Curie

<sup>39</sup> Framboïde n.m. [de framboise, et du gr. eidos, aspect ; angl. framboïd] = minuscule amas minéral en forme de framboise.

de la forme monoclinique est compris entre 305 et 325°C. En conséquence nous pensons que ces niveaux contiennent un mélange de greigite et pyrite, mais en quantités variables, avec plus de pyrite dans les niveaux à comportement (1a) et plus de greigite dans les niveaux à comportement (5) et (6). Une certaine quantité de pyrrhotite peut être présente dans les échantillons à comportements (5) et (6), fait soutenu par l'aimantation de 200-220°C visible sur certains courbes de la balance de Curie.

- (7) Le comportement thermomagnétique des échantillons à 279, 640 et 736 cm est caractérisé par une faible aimantation au départ et une désaimantation progressive pendant le chauffage suggérant la présence des *minéraux paramagnétiques*. Cependant, une annulation claire d'aimantation vers 580°C montre une faible quantité de *magnétite*, en accord avec les valeurs des paramètres d'hystérésis (**Tableau 6.4b**) pouvant être attribuées à la magnétite PSD. La courbe de ré-aimantation pendant le refroidissement est similaire à celle de désaimantation.

#### CAROTTE BLKS 98-22

(profondeur de l'eau: 2100 m; longueur carotte : 712 cm)

Les valeurs faibles et relativement constantes de  $\kappa$ , **ARN**, **ARN20mT** et **ARA** enregistrées le long de la carotte, sont interrompues par des grands pics groupés autour de 323-235 cm (313, 301, 285, 253 et 240) et des pics isolés de moindre amplitude à 197, 86 et 24 cm (**Fig.6.19**). Tous ces pics représentent des niveaux avec des concentrations élevées des minéraux magnétiques et correspondent, du point de vue lithologique, aux niveaux de sédiments noirs. Le dernier pic, dans la partie supérieure de la carotte coïncide avec l'installation du niveau à sapropèle de l'unité II et se trouve dans sa partie inférieure (voir l'**annexe 1** avec les descriptions lithologiques).  $\kappa$  varie dans l'intervalle  $2,76 \div 863,22 \times 10e-5$  uSI, l'ARN de 0,000134 à 0,5959 A/m, l'**ARN**<sub>20mT</sub> de 0,00006349 à 0,5599 A/m et enfin l'**ARA** est enregistrée entre 0,001031 et 0,8869 A/m.

Les courbes de rapports **ARA**/ $\kappa$  et **ARN**<sub>20mT</sub>/ $\kappa$  (**Fig.6.19**) présentent des valeurs très faibles et peu de variations de la base de la carotte jusqu'à 334 cm avec des intervalles des valeurs fortes et changeantes entre 334 et 230 cm, autour de 200 cm, à 75-110 cm et les derniers 30 cm de la carotte. Les deux paramètres varient en phase tout au long de la carotte, anti-parallèlement avec  $\kappa$ , ARN, ARN20 et ARA jusqu'à 30 cm et parallèlement les 30 derniers cm de la séquence. Ceci est une indication, toujours, si la population de grains magnétiques est mono minérale, sur relativement petite taille des grains magnétiques dans les intervalles avec des valeurs fortes et changeantes. A l'intérieur de ces intervalles, les creux des rapports ARA/ $\kappa$  et ARN<sub>20mT</sub>/ $\kappa$  correspondant aux pics des  $\kappa$ , ARN20mT et ARA suggérant la taille de grains magnétiques plus grande ici que dans des pics des ARA/ $\kappa$  et ARN<sub>20mT</sub>/ $\kappa$ . Les 30 derniers cm présenteraient les petits grains magnétiques aux pics de tous les paramètres. Le rapport ARA/ $\kappa$  varie entre  $1,78E-4$  et  $1,29E-2$  et ARN<sub>20mT</sub>/ $\kappa$  entre  $1,68E-5$  et  $4,01E-03$ .

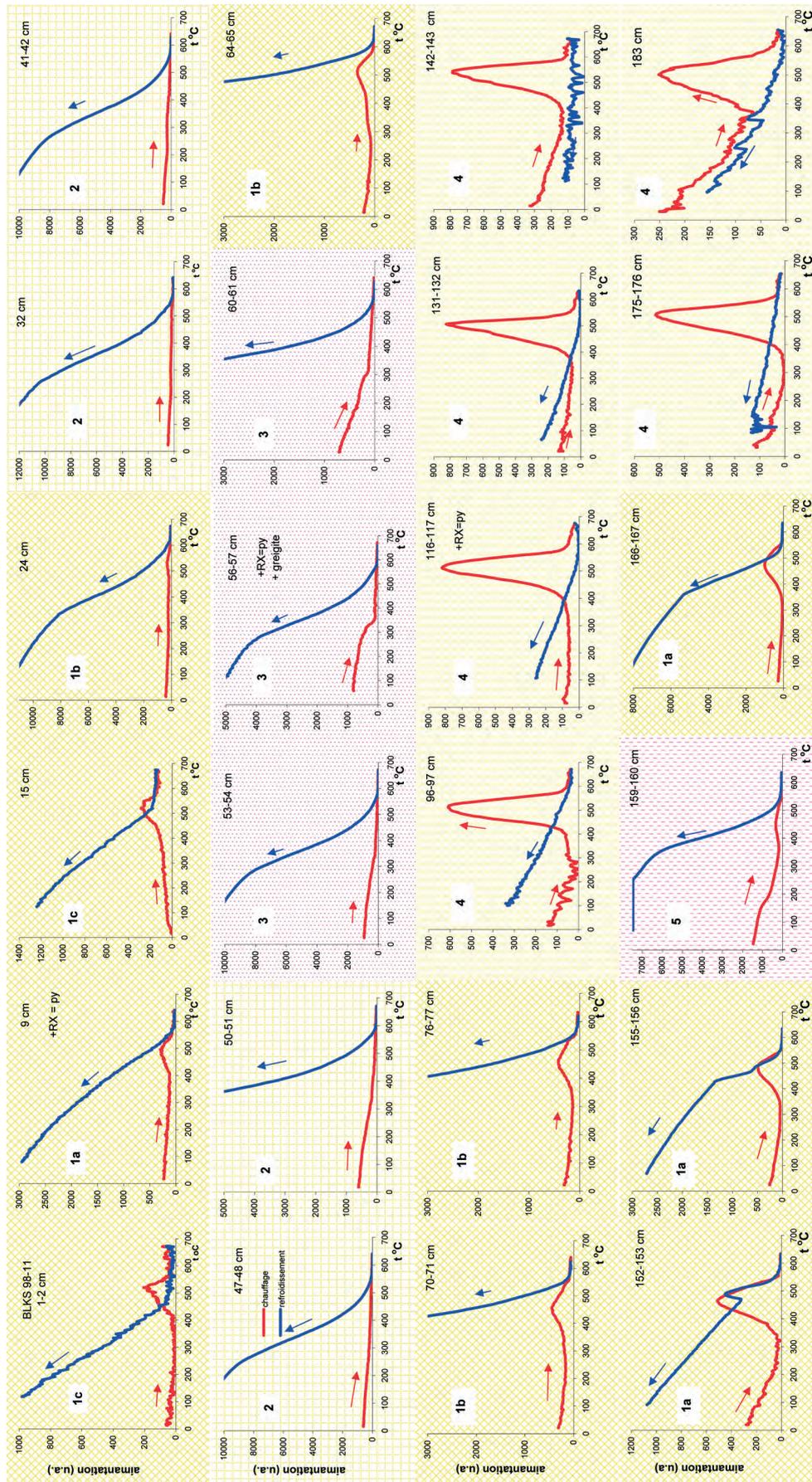
L'investigation des **paramètres d'hystérésis** a été réalisée sur les derniers 4 mètres de la carotte. La plupart des valeurs du rapport **Ms/masse**, qui reflète la concentration de grains magnétiques, sont faibles et relativement constantes entre 1,52 et 35  $\mu A m^2/mg$ . Pourtant, l'intervalle de variation est très large (entre 1,52 et 7317,07  $\mu A m^2/mg$ ), quelques échantillons présentant des valeurs très fortes. Ces niveaux: 321, 303, 286, 241, 86 et 21 cm correspondent, en général, aux niveaux lithologiques de couleur noire (**Tableau 6.4c** et **Fig.6.20**), marqués également par fortes valeurs de  $\kappa$ , ARN20 et ARA, à l'exception du niveau 321 cm. Le niveau 21 cm fait partie de l'unité à sapropèle, tandis que les niveaux de la partie inférieure de la carotte (286, 303 et 321 cm) sont plus sableux que le sédiment autour. Le **Mrs/masse** est parfaitement similaire à Ms/masse, avec l'intervalle de variation entre 0,35 et 3926,04  $\mu A m^2/mg$ .

Les paramètres **Hc** et **Hcr** varient dans les intervalles 12,2-66,6 mT et 21,7-85,6 mT respectivement, avec des pics à : 321, 303, 286, 241, 89, 86, 49 et 38 cm. Les pics correspondent en général aux pics de  $\kappa$ , Ms/masse et Mrs/masse. Les valeurs des Hc et Hcr suggèrent dans l'ensemble la présence de grains magnétiques de faible coercivité, comme la magnétite, la maghémite ou la greigite.

Les rapports **Mrs/Ms** et **Hcr/Hc** varient anti-parallèlement, avec des valeurs situées dans les intervalles 0,121-0,592 et 1,247-3,308 respectivement. Pour le Mrs/Ms les valeurs forts sont enregistrés à : 321, 303, 286, 241, 86, 49 et 38 cm, ces pics correspondant aux creux du Hcr/Hc. Les pics de Hcr/Hc sont enregistrés à 403, 363, 317, 300, 284, 271, 255, 233, 159, 76 et 41cm.

Sur le diagramme de Day (**Fig.6.21**) les rapports Mrs/Ms et Hcr/Hc mettent en évidence la distribution des tailles des grains magnétiques présents dans le sédiment. En général, ce diagramme confirme les informations obtenues de l'analyse des courbes de  $\kappa$ , ARN, ARA/ $\kappa$  et ARN20/ $\kappa$  notamment : i) la présence des grains de petite taille au niveaux caractérisés des pics sur la courbe de  $\kappa$  et des creux sur la courbe ARA/ $\kappa$  et ARN20/ $\kappa$ , tels que 303, 286, 241 ou 86 cm situées dans la zone monodomaine (SD) sur le diagramme ; ii) la présence des grains de taille plus grande dans les niveaux caractérisés par des pics sur la courbe de  $\kappa$  et aussi sur ceux de ARA/ $\kappa$  et ARN20/ $\kappa$ , tels que 243, 233, 21, 6, 5, 3, 2 situées dans la zone pseudo-monodomaine (PSD) sur le diagramme. Il y a aussi des niveaux pour lesquelles le 'modèle' décrit plus haut n'est pas valable, probablement du au fait que la population des grains magnétiques existante dans les sédiments n'est pas monominérale.

Les expériences à la **Balance de Curie** (**Fig.6.22**) montrent des comportements similaires à ceux observées sur des diverses sections des carottes antérieures. Comme la carotte BLKS 98-11 présente le plus grand nombre des comportements différents, nous allons l'utiliser comme référence. Par conséquent, nous allons définir les comportements des échantillons de la carotte BLKS 98-22, par comparaison avec



**Fig.6.17.** Comportement des sédiments de la carotte BLKS 98-11 pendant les expériences à la Balance de Curie; sédiment total chauffé à l'air jusqu'à 650°C pour un cycle de 50 minutes (25' de chauffe, 25' de refroidissement), dans un champ de 0,3-0,375T. a) niveaux 1 - 183 cm

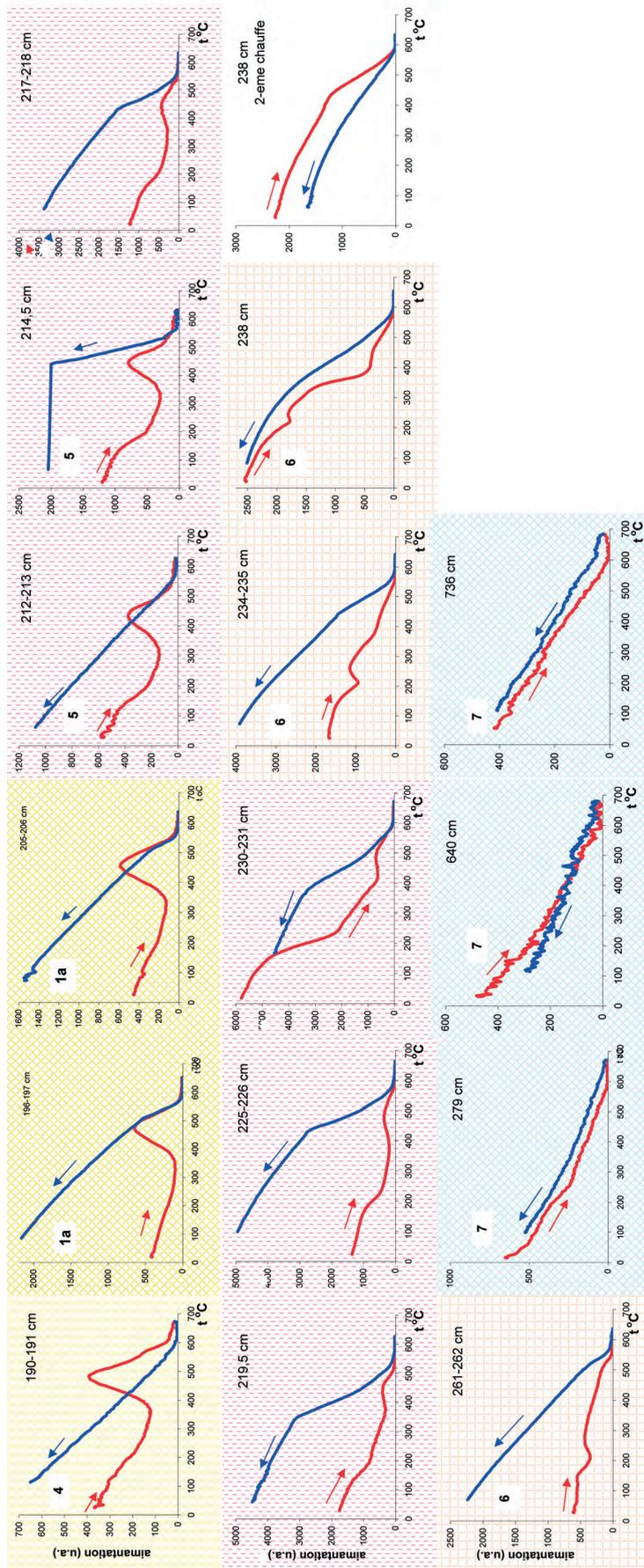
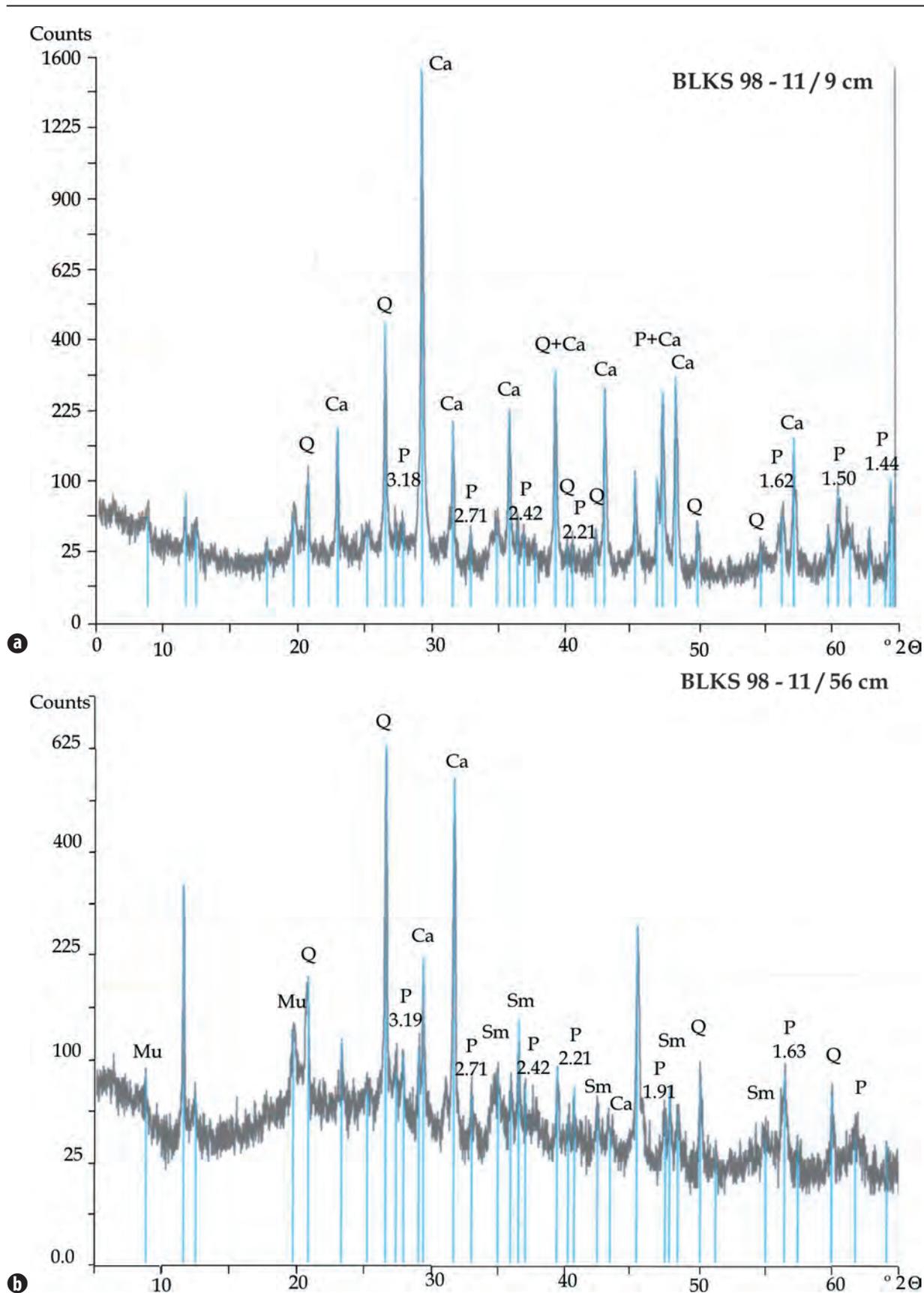
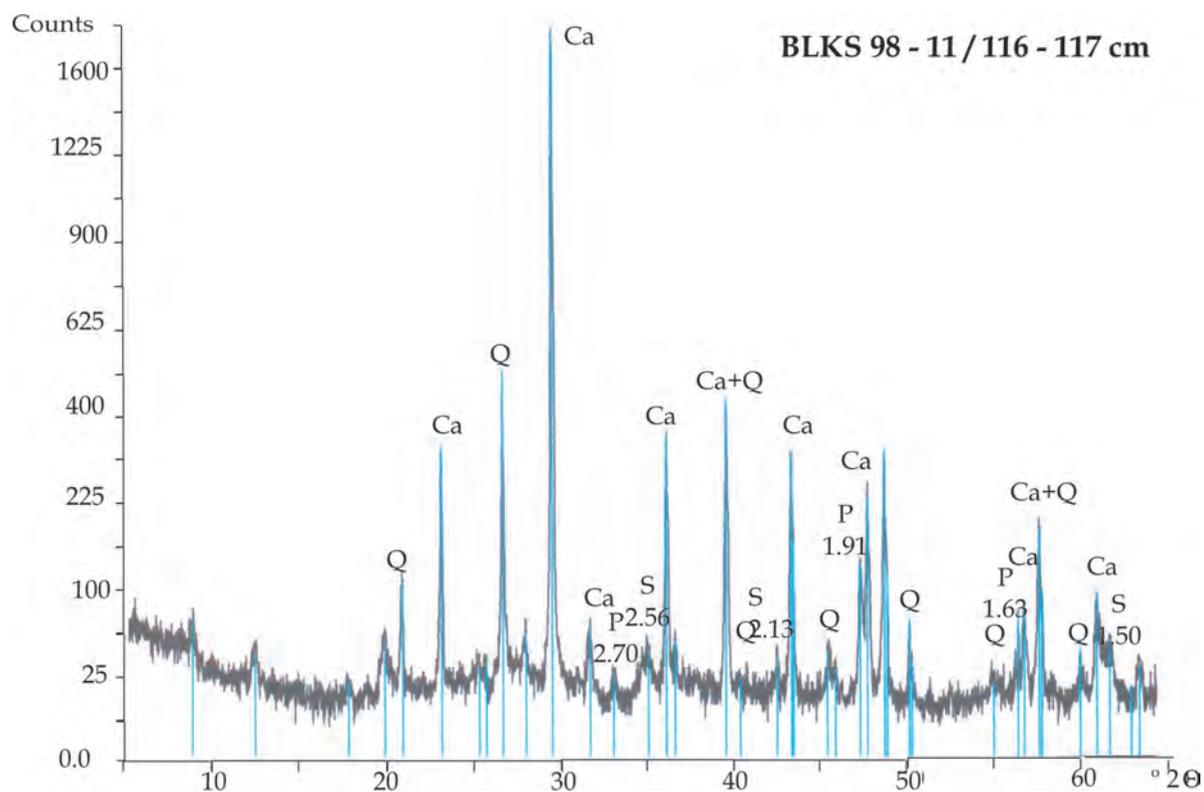


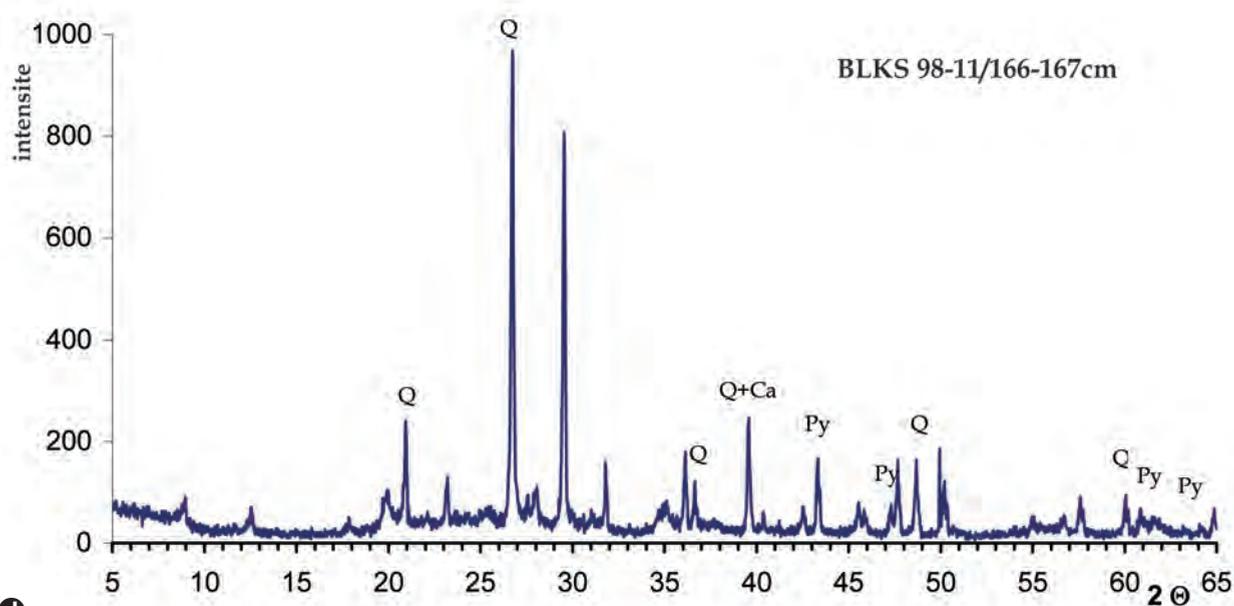
Fig.6.17. Comportement des sédiments de la carotte BLKS 98-11 pendant les expériences à la Balance de Curie. b) niveaux 190 - 736 cm



**Fig.6.18.** Spectres DRX sur le sédiment total de la carotte BLKS 98-11 au niveaux: a) **9 cm** - contenant de la calcite (Ca), du quartz (Q) et de la pyrite (P) ; b) **56 cm** - contenant de la pyrite (P) de la muscovite (Mu) et de la calcite (Ca) ;

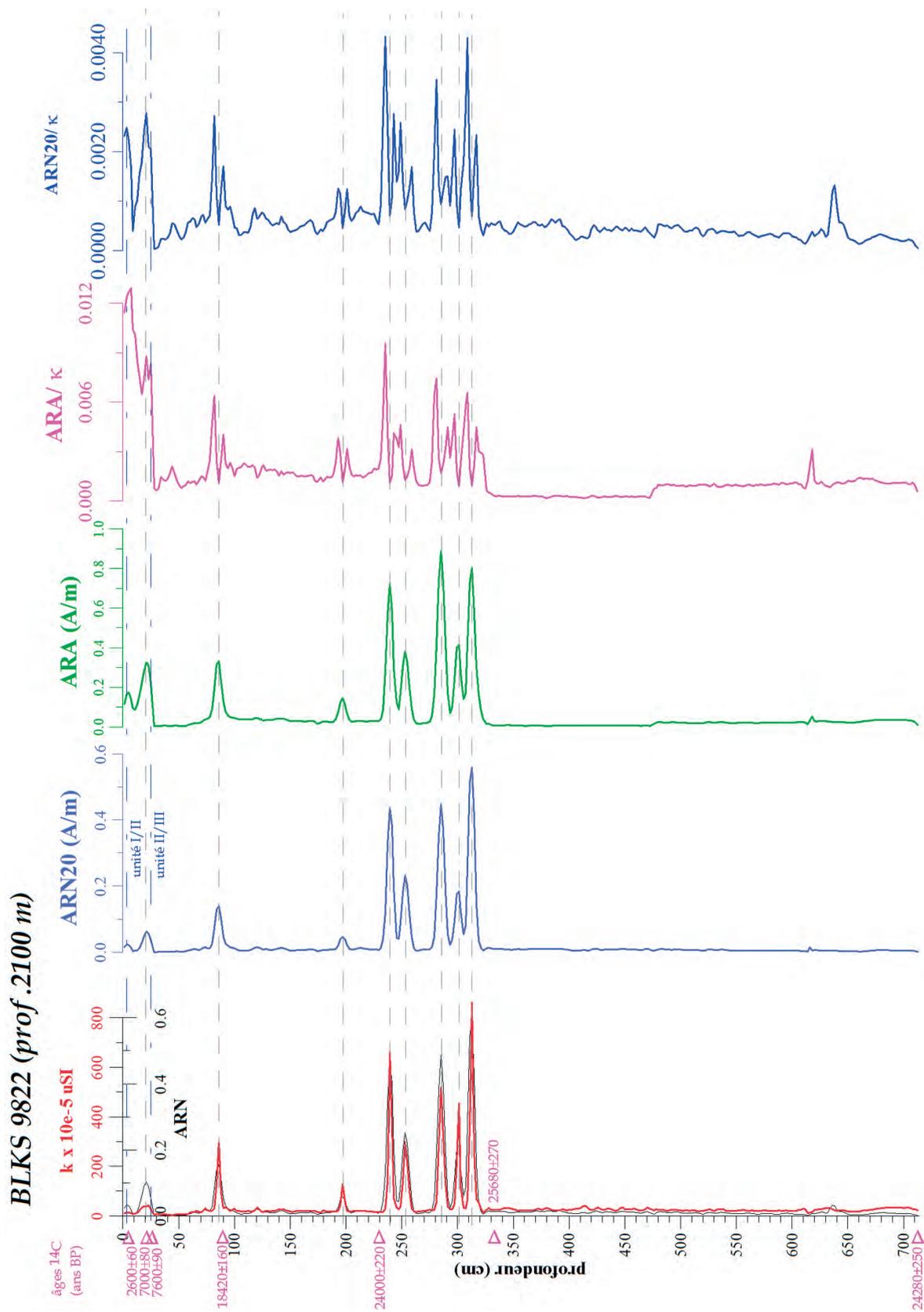


c

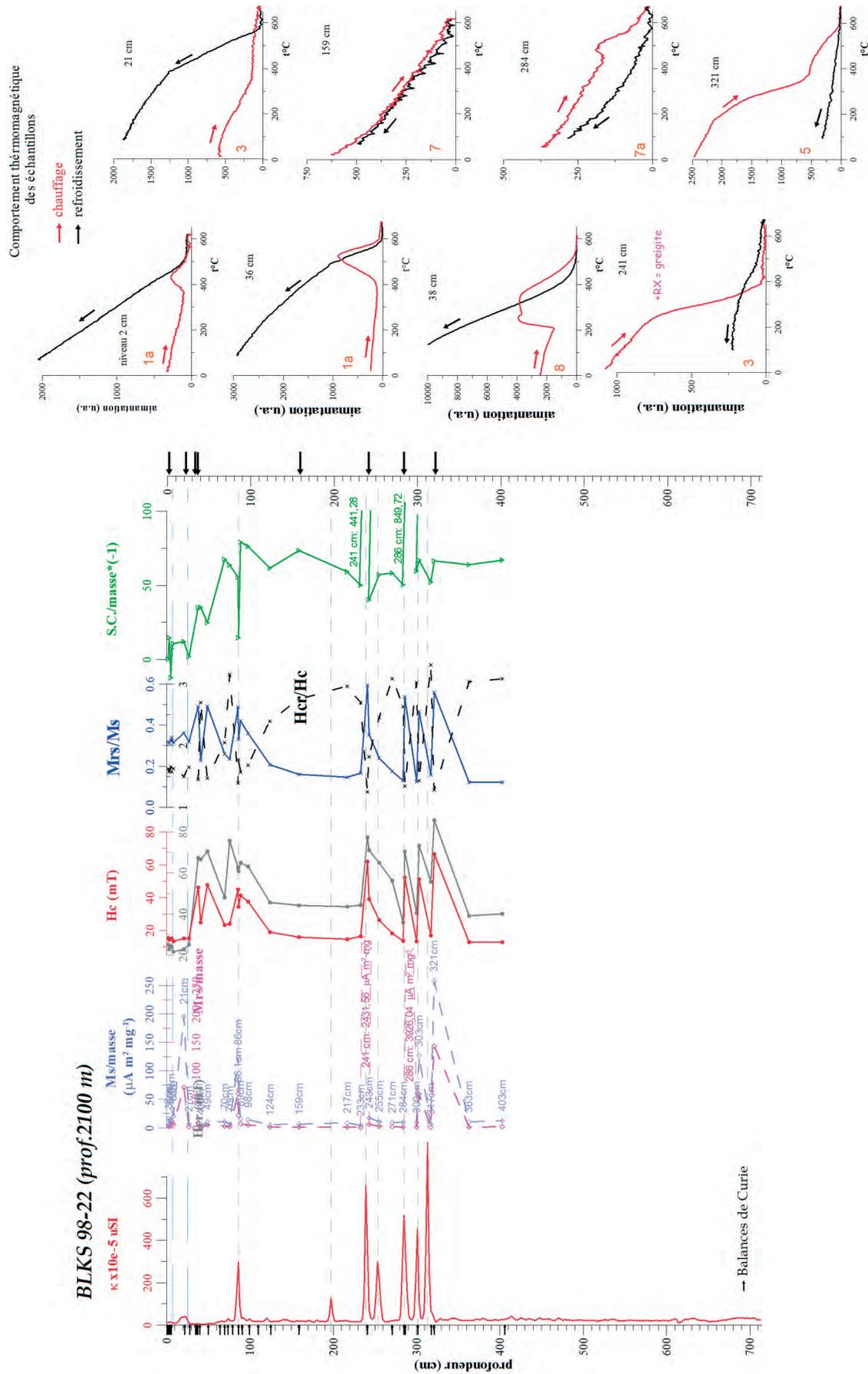


d

**Fig.6.18.** Spectres DRX sur le sédiment total de la carotte BLKS 98-11 au niveaux: c) **116 cm** - contenant de la calcite (Ca), du quartz (Q), de la pyrite (P), et peut-être de la sidérite (S) ; d) **166-167 cm** - contenant du quartz (Q), de l'albite (Ab), et peut-être de la pyrrhotite hexagonale (Py)



**Fig.6.19.** Paramètres magnétiques de la carotte BLKS 98-22:  $k$ , ARN, ARN<sub>20mT/k</sub>, ARA, ARA/ $k$ , ARN20mT/k; âges  $^{14}\text{C}$  conventionnels non-corrigés



**Fig. 6.20.** Paramètres d'hystérésis et comportement thermomagnétique des échantillons discrets de la carotte BLKS 98-22; sur l'axe Oy, de gauche, sont marquées toutes les niveaux analysés à la Balance de Curie et sur l'axe Ox, à droite, sont marqués seulement les niveaux présentés sur cette figure

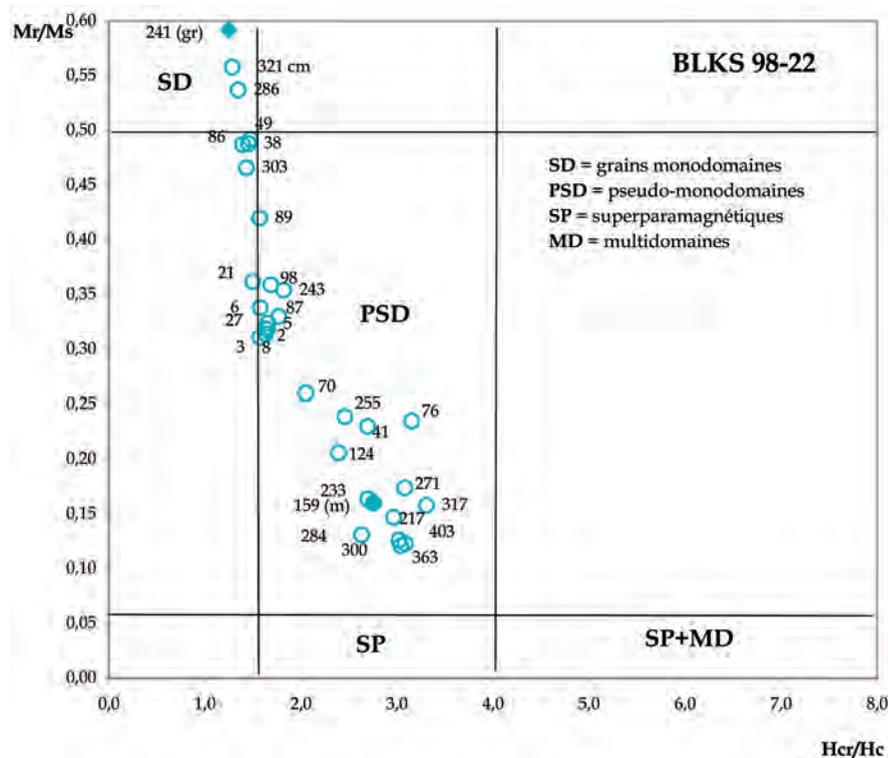


Fig.6.21. Représentation de  $H_{cr}/H_c$  en fonction de  $M_r/M_s$  (diagramme de Day-Fuller-Schmidt) pour les échantillons de la carotte BLKS 98-22

les comportements des sédiments de la carotte BLKS 98-11. Nous avons pu identifier les courbes similaires aux comportements (1), (3), (5) et (7) de BLKS 98-11, mais aussi un comportement identifié antérieurement dans les carottes BLKS 98-04, 06 et 09 et noté ici par (8):

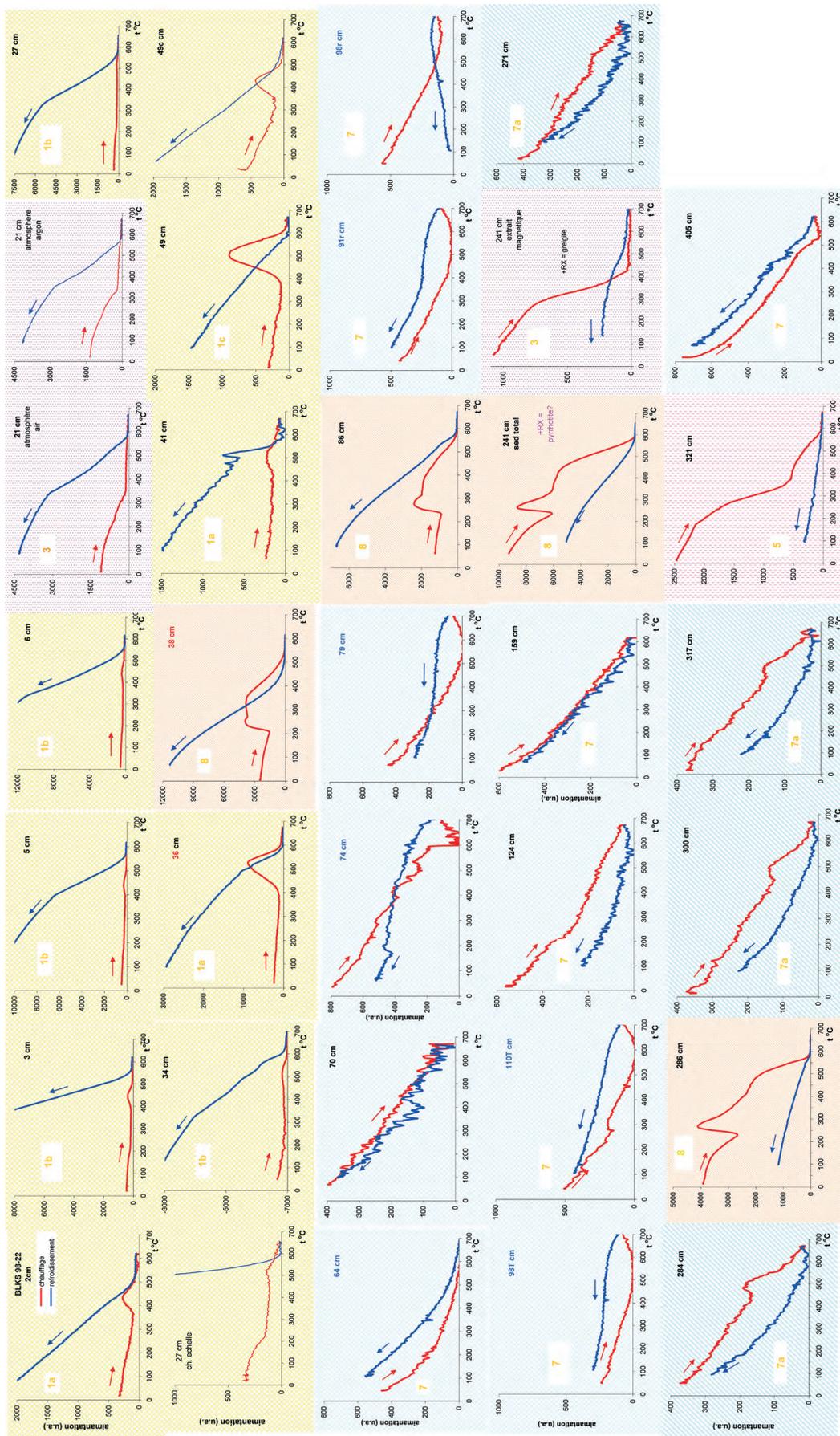
- (1) le comportement des échantillons 2, 3, 5, 6, 27, 34, 36, 41 et 49 cm, divisé en 1a – pour les niveaux 2, 36 et 41 cm ; 1b – niveaux 3, 5, 6, 27, 34, et 1c – niveau 49 cm. Ces niveaux contiennent de la *pyrite* et aussi des petites quantités des *sulfures de fer amorphes* qui s'oxydent pendant le chauffage jusqu'à la *magnétite* ;
- (3) le comportement des niveaux 21 et 241 - extrait magnétique, similaire à celui du niveau 56 cm de la carotte BLKS98-11 (Fig.6.17a). Il contient de la *pyrite* et de la *greigite*, fait prouvé par l'analyse de l'extrait magnétique du niveau 241 cm (Fig.6.23a et Strehie et al., 2002) ;
- (5) le comportement de l'échantillon 321 cm est typique pour la *greigite*. Il est similaire au comportement de niveaux 27, 29 et 64 cm de BLKS 98-04 (Fig.6.4), 27, 50 et 60 cm de BLKS 98-06 (Fig.6.9), 18 cm de BLKS 98-09 (Fig.6.11) et aussi avec le comportement 5 des échantillons 159 et 212 à 230 de la carotte BLKS 98-11 (Fig.6.17). Ce comportement a été identifié aussi par DRX comme étant typique de la présence de la *greigite* dans le sédiment. Les échantillons caractérisés par ce comportement contiennent de la *greigite*, de la *pyrite* et possiblement des petites quantités de la *pyrrhotite*.
- (7) Le comportement des échantillons 64, 70, 74, 79, 91, 98, 110, 159 et 405 cm, caractérisé par une très faible aimantation,

est similaire à celui des échantillons 279, 640 et 736 cm de la carotte BLKS 98-11. La présence dans les sédiments des *minéraux paramagnétiques* et peut-être de petites quantités de la *magnétite* est soutenue par les valeurs des paramètres d'hystérésis.

- (7a) le comportement des échantillons 124, 271, 284, 300 et 317 cm ressemble beaucoup au comportement (7) à la différence que sur la courbe de chauffage est visible une ré-aimantation autour de 450-500°C, ce qui suggère la présence d'un minéral qui passe en *magnétite* à cette température. Une autre différence est la température de désaimantation totale des échantillons, un peu plus grande que 600°C qui peut suggérer la présence dans le sédiment d'une faible quantité de *hématite*. Aussi, il est possible que cette *hématite* est le résultat final des transformations chimiques subies par les composants de échantillons durant l'expérience de chauffe. Les paramètres d'hystérésis sont caractéristiques de la *titano-magnétite*, la *magnétite*, la *maghémite* ou même la *pyrrhotite*.

Un comportement spécifique aux échantillons de cette carotte, non-identifié dans la carotte 11 mais observé dans les autres carottes étudiées antérieurement se manifeste pour les niveaux plus bas que 200 cm:

- (8) La forme des courbes d'aimantation - désaimantation des échantillons 38, 86, 241 et 286 cm est particulière : la courbe de chauffe présente une ré-aimantation autour de 230°C et la désaimantation recommence vers 275°C. La désaimantation finale se produit vers 580°C. Le com-



**Fig. 6.22.** Comportement des sédiments de la carotte BLKS 98-22 pendant les expériences à la Balance de Curie. Sédiment total chauffé à 650°C pour un cycle de 50 minutes (25° de chauffe, 25° de refroidissement) dans un champ de 0,375T

portement observé entre 200 et 300 °C suggère la présence de la *pyrrhotite* dans le sédiment. Ce minéral, dans sa forme hexagonale, non magnétique, présente une transition gamma à environ 200-220°C, qui mène vers la forme magnétique, et la température de Curie d'environ 275-295°C (e.g. Rochette et al., 1990). Elle a été identifiée par la DRX dans l'échantillon 241 (Fig.6.23a). Pendant le refroidissement, l'échantillon se ré-aimante d'une manière continue, jusqu'à des valeurs plus faibles que celle de l'aimantation initiale. Les courbes décrites sont celles du sédiment total.

Pour le niveau 241 cm, nous avons aussi étudié le comportement magnétique de l'extrait magnétique du sédiment et la courbe obtenue est différente de celle du sédiment total : il manque l'épisode de ré-aimantation pendant le chauffage et la désaimantation se produit vers 435°C. L'analyse par la DRX de cet extrait a mis en évidence la présence de la *greigite* (Fig.6.23b). C'est le type de comportement observé aussi dans le niveau 21, niveau analysé également sous atmosphère d'argon, afin de limiter le processus d'oxydation pendant le chauffage, mais la courbe résultante est presque identique avec celle obtenue en air. Il a été décrit dans la carotte BLKS 98-11, comme le **comportement 3**.

## 6.5. DISCUSSION

### 6.5.1. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Nous allons présenter par la suite une brève revue chronologique de la littérature sur les études des sulfures de fer dans les sédiments de la Mer Noire, car leur présence dans les sédiments aquatiques peut être en relation avec leur comportement magnétique d'une part et sert d'un marqueur de certaines conditions de l'environnement de l'autre part. En effet les sulfures de fer dans le sédiment indiquent une diagenèse précoce dans des conditions d'anaérobiose, dépendant de la présence de la matière organique dans la zone de sulphato-réduction bactérienne. La greigite ferrimagnétique est un minéral intermédiaire qui se forme d'un précipité amorphe FeS et se transforme en pyrite (FeS<sub>2</sub>). Sa présence dans le sédiment suggère ainsi que le rapport S/Fe est insuffisant pour la formation de la pyrite, donc il y a un manque de S par rapport au Fe, dans le milieu. Cela peut avoir plusieurs causes: une quantité insuffisante de matière organique dans le milieu, qui ne permet pas la continuation de la dégradation jusqu'à la formation de la pyrite; une quantité insuffisante de S dans le milieu sédimentaire ou bien trop de Fe dans l'environnement.

La littérature débute aux années cinquante du siècle dernier avec les papiers des auteurs russes.

Volkov (1954) (cité par Berner, 1970a) a comparé le **sédiment noir** de la Mer Noire avec celui de couleur grise et il a montré que le premier contient des concentrations plus basses de la pyrite, et de soufre réduit, des concentrations élevées de monosulfures de fer et **très peu de H<sub>2</sub>S dissous dans les eaux interstitielles**. Il a suggéré que ce sédiment noir est le résultat d'une sulphato-réduction bactérienne li-

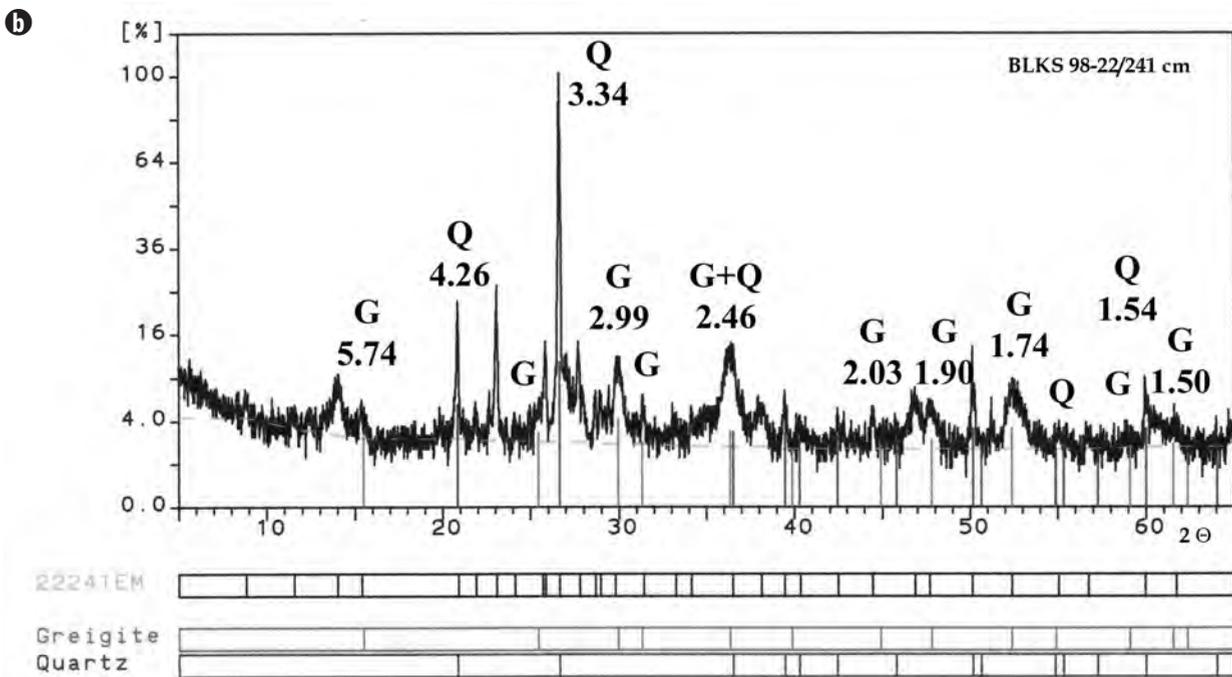
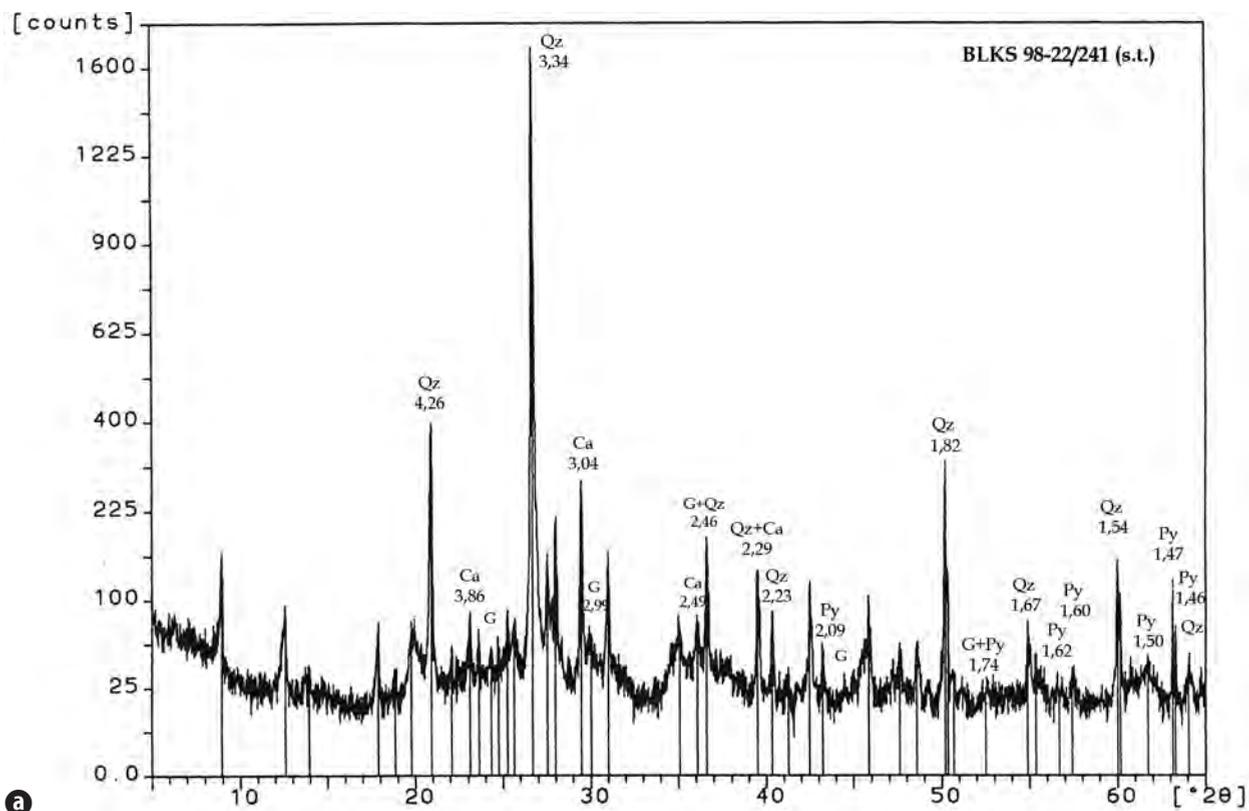
mitée pendant la diagenèse avec la formation d'une quantité insuffisante de H<sub>2</sub>S ce qui ne permet pas la transformation totale de la FeS noire en pyrite (FeS<sub>2</sub>).

Berner (1970a) montre que la **couleur noire** des sédiments de surface de la Mer Noire **est due aux monosulfures de fer** fin granulaire comme la **mackinawite** et la **greigite**. Il précise aussi le fait que les monosulfures de fer sont instables thermo-dynamiquement par rapport à la pyrite, surtout dans cet environnement riche en H<sub>2</sub>S. La pyrite donne la couleur grise aux sédiments et en conséquence, la couleur noire des sédiments disparaît avec la profondeur à cause des transformations diagénétiques des monosulfures de fer en pyrite. Pourtant, la couleur noire persiste dans certaines situations, surtout dans des sédiments d'eau très profonde où les monosulfures de fer persistent.

Une production limitée de H<sub>2</sub>S dans les sédiments anaérobies et dans les eaux de fond est liée par l'auteur à la faible concentration de sulfate dissous dans la colonne d'eau. Comme aujourd'hui l'eau salée de la Mer Noire contient des quantités importantes de sulfates, l'auteur suggère l'existence d'une **liaison entre les périodes glaciaires ou de niveau bas de la Mer, avec diminution de la salinité des eaux, et la déposition des niveaux noirs, riches en monosulfures de fer**.

Après une analyse plus détaillée de sédiments de carottes prélevées par l'expédition Atlantis II-49 de 1969, Berner (1974) reprend l'idée de la **persistance des monosulfures de fer** dans le sédiment Pléistocène de la Mer Noire **due à l'insuffisance du soufre élémentaire** pendant la diagenèse précoce. Cette insuffisance du soufre élémentaire est **due à l'épuisement de H<sub>2</sub>S des eaux interstitiels** du sédiment à cause des hauts taux de sédimentation combinée à un faible concentration en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dans les eaux de fond. A son tour, cette faible concentration en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> est probablement due à la diminution de la salinité des eaux de la Mer Noire pendant la dernière glaciation Pléistocène. La diminution de la salinité a été produite par manque d'apports d'eau de mer en conséquence de la baisse du niveau de la mer en dessous du niveau de Bosphore. Il considère **qu'une partie du matériel noir est formée par la migration post-dépositionnelle du Fe<sup>2+</sup> et H<sub>2</sub>S dans le sédiment** et que **l'alternation des sédiments noir et gris pendant les épisodes d'eau douce a été due au taux de déposition variable** et non pas aux fluctuations de salinité comme il avait supposé en 1970.

Pour l'unité I, Calvert et Karlin (1991) ont étudié le **rapport entre le soufre sédimentaire et le carbone organique** afin de l'utiliser comme critère de diagnose pour la reconnaissance des environnements anoxiques dans l'enregistrement sédimentaire. Pour les sédiments des zones peu profondes avec de l'eau oxygénée ou peu oxygénée la concentration de soufre de la pyrite est comprise entre 0,1 et 2,5% de poids et il ne se corrèle pas avec le contenu de carbone organique. Dans les carottes du bassin profond anoxique les concentrations de soufre de pyrite sont comprises dans l'intervalle 1-2,5%



**Fig.6.23.** Spectres DRX pour le niveau à 241 cm de la carotte BLKS 98-22 : a) sédiment total contenant de la pyrrhote hexagonale (Py), de la greigite, du quartz et de la calcite (Ca); b) extrait magnétique du sédiment, contenant de la greigite (G) et du quartz (Q).

et il existe une corrélation linéaire avec le carbone organique. Dans ces sédiments le rapport S/C est autour de 0,31 un peu plus petit que la valeur de 0,36 considérée caractéristique pour le « normal<sup>40</sup> » du sédiment marin oxygène. Les sédiments anoxiques de l'unité I de la Mer Noire sont donc, appauvris en S par rapport au C organique.

**Le degré de pyritization** des sédiments est un autre paramètre utilisé dans la littérature pour quantifier les conditions de sédimentation anoxique. Les valeurs de ce paramètre montrent que **la formation de la pyrite est limitée par le fer**. Cette limitation par le fer est probablement caractéristique pour les bassins anoxiques dans lesquelles la pyrite peut se former dans la colonne d'eau et les oxyhydroxydes ne s'accumulent pas dans les sédiments de surface.

Dans une étude ultérieure, à l'aide du rapport isotopique du soufre ( $\delta^{34}\text{S}$ ) de **la pyrite**, Calvert *et al.* (1996) montrent que dans les sédiments de la Mer Noire elle est **formée** dans des conditions différentes, selon le type de sédiment ou elle se trouve :

- la pyrite qui se trouve dans les unités I et II (coccolites et sapropèle) est formée **par précipitation dans la colonne d'eau** juste en dessous de l'interface oxygène/anoxie ;
- dans le niveau représentant une coulée de sédiments et situé entre les unités I et II, la pyrite a une origine probablement similaire à celle des unités 1 et 2 ;
- la pyrite de la partie supérieure des sédiments lacustres a été **formée** dans les conditions d'un système fermé **par la réaction entre l'excès de Fer réductible des eaux douces et les sulfates ou les sulfures qui diffusent du sapropèle vers le bas** ;
- la pyrite des niveaux inférieurs des sédiments lacustres représente une phase **formée à partir de sulfates des eaux du bassin lacustre** Pléistocène supérieur.

Wilkin *et al.* (1997) dans leur **étude des framboïdes de pyrite des sédiments** de la Mer Noire, montrent la relation entre leur taille et la variation des conditions de formation. **Le changement de l'environnement de déposition des framboïdes d'une colonne d'eau oxygène vers la déposition dans une colonne d'eau anoxique contenant des sulfures est reflété par l'augmentation de la taille des framboïdes.** Les auteurs signalent que dans les sédiments Holocènes des unités I et II, les framboïdes de pyrite ont des tailles très uniformes avec un diamètre moyen d'environ 5  $\mu\text{m}$ . Ces propriétés indiquent la nucléation et l'accroissement dans une colonne d'eau anoxique et sulfureuse suivie par le transport jusqu'à l'interface sédiment-eau, l'arrêt de l'accroissement de la pyrite dû à l'épuisement du Fer réactif et l'enterrement sub-

séquent. Par contraste, **les sédiments pauvres en carbone organique de l'unité III lacustre** contiennent des framboïdes des tailles plus grandes avec un diamètre moyen de 10  $\mu\text{m}$ . Dans cette unité, plus de 95 % des framboïdes ont des dimensions < 25  $\mu\text{m}$ , 40 % sont comprises dans l'intervalle 7 – 25  $\mu\text{m}$  et se trouvent aussi des framboïdes jusqu'à 50  $\mu\text{m}$  de diamètre. Cette distribution des tailles suggère **la nucléation et l'accroissement dans les eaux interstitielles anoxiques.** L'existence d'une relation entre la taille des framboïdes et l'environnement de formation représente une confirmation de l'idée que l'initiation de la déposition du sapropèle de l'unité II coïncide avec le développement de l'anoxie dans la colonne d'eau de la Mer Noire.

Une carte de variation de **la susceptibilité magnétique des sédiments superficiels** de la partie Nord-Ouest de la Mer Noire est réalisée par Rădan *et al.* (1998) (**Fig.6.24**). Les auteurs montrent que les valeurs de la SM sont comprises dans l'intervalle  $1,2 \times 10^{-6}$  -  $448,1 \times 10^{-6}$  uSI. Les variations de la SM correspondent avec la zone influencée par le Danube, particulièrement avec le front du delta et avec le prodelta. Les contours des lignes de SM égale suggèrent aussi le contour de la zone d'influx de sédiments de Danube affectés par le drift N-S et l'éventail profond du Danube.

Très importante pour nous, est l'étude de Cutter *et Kluckhohn* (1999) sur **le cycle de carbone, azote et soufre sous forme de particules et celui des espèces de soufre (monosulfure de fer, greigite, pyrite et soufre organique).** Les auteurs partent de l'idée que la pyrite sédimentaire peut servir d'indicateur des conditions de milieu pendant sa formation et les relations entre la pyrite, le fer et le carbone organique peuvent indiquer les conditions paléo redox dans la colonne d'eau sous laquelle les sédiments se sont accumulés [*i.e.*, conditions « marines normales » (angl. normal marine) : sédiments anoxiques sous une colonne d'eau oxygène ou des conditions « euxiniques » : sédiments anoxiques sous une colonne d'eau anoxique].

Le carbone organique, l'azote et le soufre sous forme de particules sont produits dans les eaux de surface suite à la photosynthèse et se régénèrent par la respiration oxygène. Quand ce matériel organique arrive dans un environnement anoxique marine, la régénération est couplée à la sulfato-réduction.

Utilisant des méthodes analytiques capables de détecter des concentrations extrêmement faibles de sulfures de fer dans les particules en suspension, les auteurs ont tracé des **profils de variation avec la profondeur pour la monosulfure de fer (FeS), la greigite (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>) et la pyrite des eaux anoxiques** du Fjord Framvaren et de la Mer Noire. Pour la Mer Noire, les profils de C, N, et S sous forme des particules en suspension sont typiques pour les eaux océaniques avec des maxima dans les eaux de surface et des concentrations décroissantes avec la profondeur – dans les eaux anoxiques en dessous. **La greigite a un maximum à 70 m sous l'interface oxygène/anoxique tandis que la pyrite a un maximum tout près de cette interface.** La somme de ces sulfures de fer représente seulement 11% du

<sup>40</sup> Pour les sédiments oxygénés il y a une relation linéaire entre le soufre total ou soufre de pyrite et le carbone organique, la valeur considéré typique étant S/C~0,36. Cette relation entre le S et C organique est appelé "normal" des sédiments marines (angl. « normal » marine sediments) accumulés sous les masses d'eau oxygénés (Berner, 1970b, 1982; Goldhaber and Kaplan, 1974; Berner and Raiswell, 1983 cités par Calvert and Karlin, 1991). Pourtant, Raiswell *et al.* (1988) montrent que le rapport S/C ne permet pas la distinction entre les roches formées dans des milieux anoxiques et ceux formés dans un milieu oxygène



souffre n'est pas originaire de H<sub>2</sub>S pauvre en <sup>34</sup>S de la colonne d'eau ou de la partie supérieure des sédiments, mais du HS<sup>-</sup> dissous. Des valeurs positives similaires ont été signalées pour la pyrite de la partie supérieure des sédiments lacustres de l'unité III dans la partie centrale de la Mer Noire (Calvert *et al.*, 1996). Des valeurs positives similaires ont été signalées pour la pyrite de la partie supérieure des sédiments lacustres de l'unité III dans la partie centrale de la Mer Noire (Calvert *et al.*, 1996). **Les auteurs proposent comme explication de cette signature isotopique de la pyrite une incursion limitée d'eau marine suivie par l'épuisement de sulfures d'eau de mer par la sulfato-réduction bactérienne dans les sédiments lacustres.** Le H<sub>2</sub>S produit a réagi avec l'excès des minéraux contenant du fer réactif des sédiments d'eau douce ayant comme résultat la formation de la pyrite enrichie en <sup>34</sup>S. Un autre argument en faveur de cette théorie est la taille de framboïdes de pyrite (entre 7 et 25 µm, mais aussi jusqu'à 50 µm) ce qui correspond bien aux dimensions signalés par Wilkin *et al.* (1997) pour les framboïdes de la partie supérieure de sédiments lacustres de l'unité III sur la plateforme et la pente continentale.

Un autre essai d'expliquer l'origine et la chimie des niveaux riches en sulfures de fer et les processus de pyritization dans les sédiments Pléistocènes de la Mer Noire est réalisé par Neretin *et al.* (2004). Ils montrent que ces processus sont conditionnés par les sulfures formés pendant l'oxydation anaérobie. Un front de sulfidation est formé par les gradients opposés de sulfures et de fer dissous. Les processus de sulfidation sont contrôlés par le flux de diffusion d'en haut et par le contenu en fer réactif solide. Ils ont identifié deux processus de formation de la pyrite limité par diffusion :

- le premier se réfère à la **précipitation de la pyrite avec l'accumulation des précurseurs de composition FeS<sub>n</sub>** (n= 1,10-1,29), **incluant la greigite** ; le soufre élémentaire et les polysulfures formés de H<sub>2</sub>S par une dissolution réductrice des minéraux contenant du Fe(III) sont des intermédiaires pour convertir les sulfures de fer en pyrite ;
- le deuxième processus se réfère à la **précipitation 'directe'** de la pyrite du à l'exposition prolongée des minéraux avec du fer aux sulfates dissous.

La sulfato-réduction a profondeur coordonnée par le méthane a comme résultat la formation de la pyrite avec un δ<sup>34</sup>S jusqu'à +15‰. La composition isotopique du S de FeS<sub>2</sub> est différente à cause de contributions des différentes sources de soufre formées à des moments différents. Un modèle de calcul de l'avancement du front de sulfidation a montré que le processus a commencé au moment de transition Pléistocène / Holocène entre 11600 et 6360 ans BP. Très importantes pour notre étude sont leurs **mesures de la susceptibilité magnétique et d'ARN** le long d'une carotte gravitationnelle. Ceci d'un côté parce que leur profil de susceptibilité magnétique ressemble beaucoup à celui de la carotte BLKS 98-11 de cette étude et d'un autre côté parce que les pics de SM et ARN sont dues à la présence des **micronodules magnétiques constitués de greigite** et de pyrite. Les auteurs ont

**identifiées des zones affectées par la diagenèse à l'aide du rapport isotopique δ<sup>34</sup>S de la pyrite.** Ils ont constaté de cette manière que l'augmentation de la quantité du <sup>34</sup>S dans la partie supérieure des argiles limniques est l'indication claire d'une empreinte diagénétique.

Jørgensen *et al.* (2004) présentent les principaux processus de minéralisation de la matière organique des sédiments de la Mer Noire, ayant entre autres la formation des niveaux à sulfures de fer amorphes à la greigite ou à la pyrite comme résultat.

Pour les sédiments situés sous la colonne d'eau à H<sub>2</sub>S, ces processus sont (i) la **sulfato-réduction** pour les premiers 2-4 m et (ii) la **genèse du méthane** en dessous de la zone à sulfates. Les ions présents dans l'eau de mer traversent les dépôts marins modernes (coccolites et sapropèle) et ils pénètrent dans les sédiments lacustres de l'unité III. Les taux de sulfato-réduction dans le sédiment sont maximaux dans la zone de transition SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - CH<sub>4</sub> où la concentration de H<sub>2</sub>S atteint son maximum. A cause d'un excès de Fe réactif dans les sédiments lacustres profondes, la plupart du H<sub>2</sub>S formé a partir de méthane est diffusé vers le bas, vers un front de sulfidation ou il entre en réaction avec le Fe (III) et le Fe<sup>2+</sup> qui diffuse du bas vers le haut. La transition H<sub>2</sub>S – Fe<sup>2+</sup> est marquée par un niveau noir avec des sulfures de fer amorphes au dessus de laquelle se trouvent deux horizons distinctes de greigite et pyrite. Le modèle de diffusion des isotopes de soufre réalisé par les auteurs explique la formation de la pyrite 'lourde' du point de vue isotopique dans un sédiment ouvert à la diffusion, à partir de la sulfato-réduction influencé par le méthane combinée à la diffusion du H<sub>2</sub>S vers le bas.

Le **front de sulfidation** duquel les auteurs parlent se situe à 2-4 mètres sous l'interface eau-sédiment et il est représenté par une bande noire distincte dans le sédiment de la pente continentale ou par des couches fines noires riches en sulfures de fer – dans le bassin profond (Volkov, 1961, 1984 cité par Jørgensen *et al.*, 2004 ; Berner, 1974).

Très intéressant aussi est le calcul des périodes de temps nécessaires pour la réponse de l'eau des pores aux changements environnementaux dans la Mer Noire. Les auteurs ont calculé que le SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> des pores se forme en environs 500 ans, le H<sub>2</sub>S en 10 ans, tandis que le FeS de la bande noire a eu besoin d'environ 3000 ans pour se former.

#### 6.5.2. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

La **figure 6.25** regroupe la susceptibilité magnétique des sédiments de toutes les carottes étudiées. L'analyse de cette figure nous montre certains caractères communs pour toutes les carottes, mais aussi des caractères différents selon la profondeur d'eau. Nous allons donc d'abord discuter les similitudes entre elles et ensuite, vu des différences lithologiques, des taux de sédimentation et d'autres paramètres, nous discuterons les carottes d'eau peu profonde (BLKS 98-04 et BLKS 98-06), les carottes situées sur la pente continentale (BLKS 98-09, BLKS 98-10, BLKS 98-11) et dans le bassin profond (BLKS 98-22).

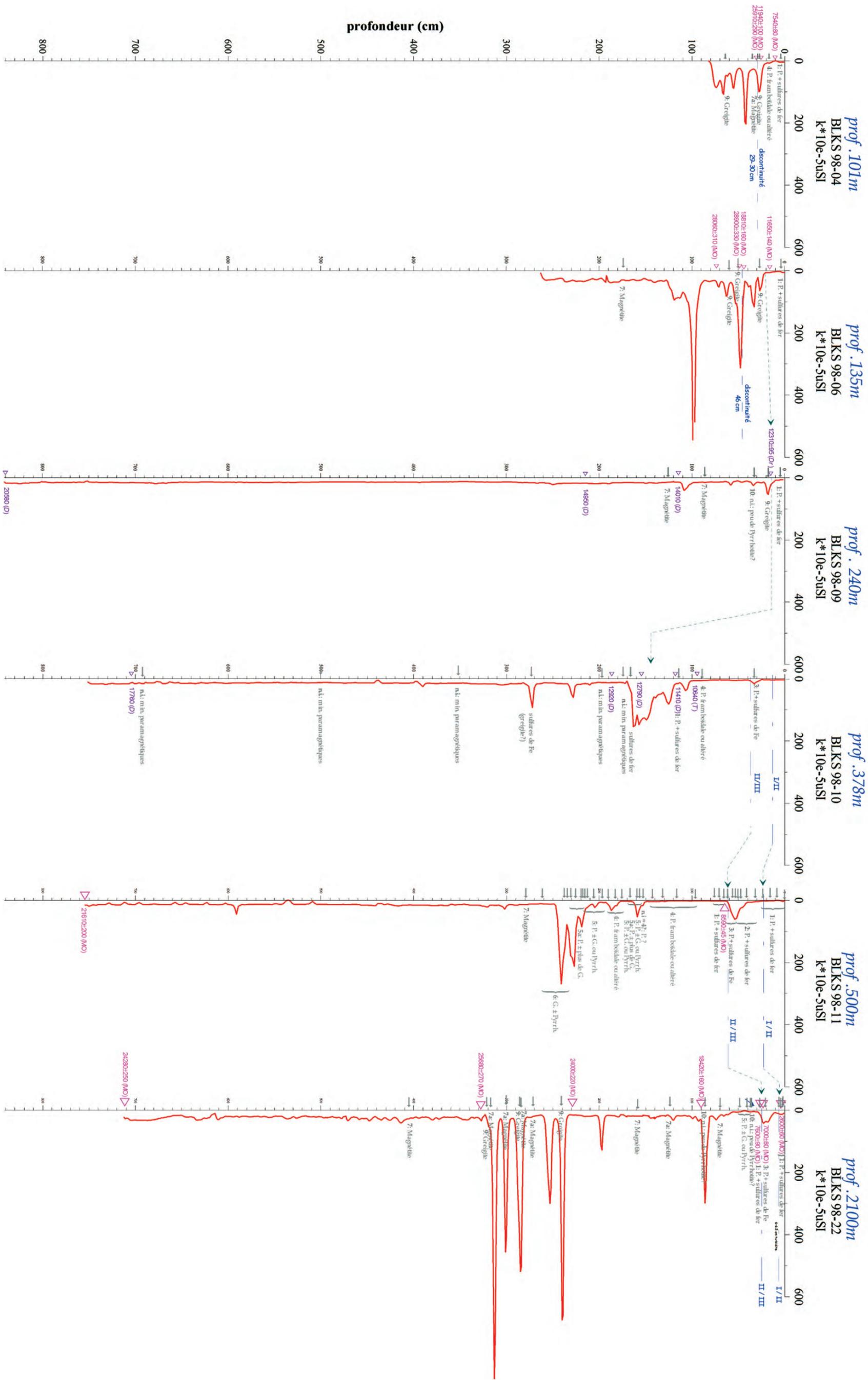


Fig. 6.25. Courbes de la susceptibilité magnétique des carottes étudiées et leur minéralogie magnétique. Âges <sup>14</sup>C conventionnels non-corrigés. Les âges des carottes BLKS 98-09 et BLKS 98-10 d'après Major et al., 2002

Les variations de la susceptibilité magnétique sont représentatives des changements de la concentration et de la minéralogie magnétique, qui s'opèrent dans toutes les carottes étudiées et qui ont été enregistré par d'autres paramètres magnétiques également.

Les susceptibilités faibles dans les parties inférieures des carottes (à l'exception de la BLKS 98-04, qui est trop courte) sont dues à la concentration très faible de minéraux magnétiques. Ces minéraux magnétiques sont dilués dans la matrice paramagnétique, dont les composants n'ont pas été identifiés durant les expériences de la balance de Curie. Le minéral magnétique présent ici en si petite concentration est la magnétite. Sa taille relativement grande et variable d'après le diagramme Day (PSD)(Fig.6.26) suggère qu'elle est d'origine détritique.

Les parties caractérisées par des valeurs fortes mais changeantes de susceptibilité, sont marquées par la greigite, peut être aussi d'autres monosulfures de fer, dont la présence n'a

pas été clairement démontrée. Cette greigite, habituellement de taille SD d'après le diagramme Day, est présente en concentrations variables, ce qui explique des fortes variations de la susceptibilité. Aussi, comme en témoignent les expériences à la balance de Curie, elle est souvent accompagnée de la pyrite, en concentrations variables également. Dans certaines carottes, dans les creux de susceptibilité magnétique (04 et 22), a été observée la magnétite, toujours en faible concentration.

Les susceptibilités faibles qui suivent en montant vers le haut des carottes, sont dues à la pyrite. Certains niveaux contiennent probablement aussi, des formes amorphes de sulfures de fer. Dans la partie inférieure du sapropèle des carottes qui le contiennent, la pyrite est « renforcée » par une très faible concentration en greigite, qui se manifeste par une légère augmentation de la susceptibilité magnétique.

On constate donc un changement majeur de minéralogie magnétique, qui reflète un changement majeur des condi-

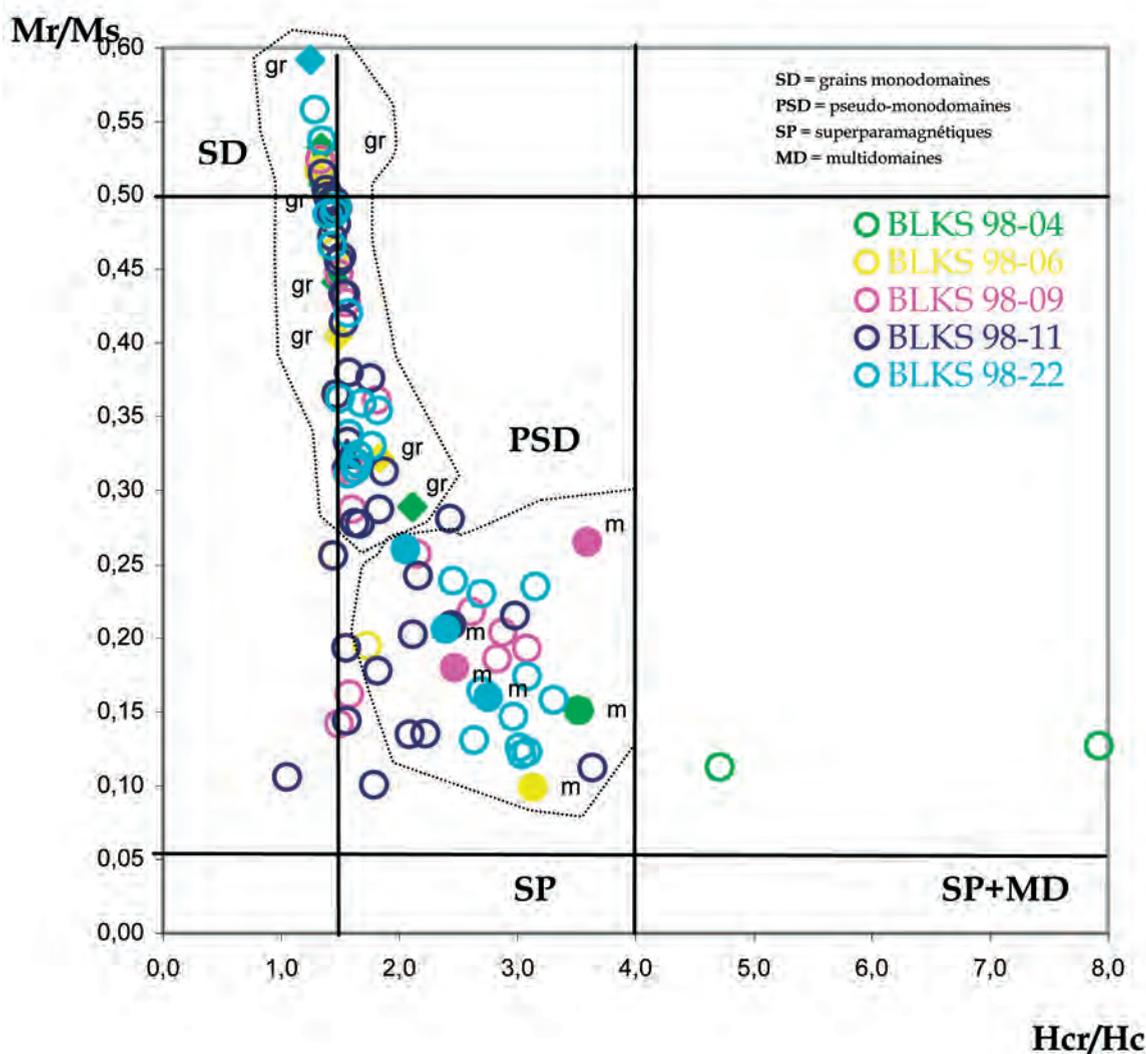


Fig.6.26. Rapport  $H_{cr}/H_c$  vs.  $M_r/M_s$  (diagramme de Day-Fuller-Schmidt) de tous les échantillons analysés dans les carottes BLKS 98-04, 06, 09, 11 et 22

tions dans le sédiment et plus largement dans l'environnement du bassin de la mer Noire. Les parties inférieures des carottes sont marquées par les oxydes de fer, sûrement d'origine détritique. Les parties plus récentes sont marquées par les sulfures de fer, minéraux diagénétiques qui indiquent des milieux anaérobies. Les sulfures de fer oblitèrent le signal détritique partiellement, dans les zones où on observe encore dans les creux de susceptibilité magnétiques de faibles quantités de magnétite et totalement, lorsque la magnétite n'est plus visible. Dans ce cas la magnétite peut être « diluée » dans la grande quantité de greigite dont le signal magnétique domine, elle peut aussi être dissoute, ainsi le fer est « récupéré » pour former des monosulfures de fer ou/et la pyrite.

#### CAROTTES D'EAU PEU PROFONDE

Les deux carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06 sont prélevées sur la plate-forme continentale, à des profondeurs des eaux de 101 et 135 m respectivement. Ces colonnes sédimentaires enregistrent dans leur lithologie les dernières variations de niveaux de la Mer Noire entre autres, par la présence des discontinuités de sédimentation. Ces discontinuités, mises en évidence par les datations  $^{14}\text{C}$  dans les carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06, sont visibles aussi à l'œil, par un changement drastique de lithologie (Fig.6.27 et Annexe 1).

Afin de pouvoir comparer les deux carottes BLKS 98-04 et BLKS 98-06, nous avons représenté uniquement les derniers 80 cm de la deuxième. Remarquons tout d'abord que, le long de deux carottes, les courbes de la susceptibilité magnétique et d'ARA présentent deux types de comportements :

- d'en bas jusqu'à environ 20 cm de profondeur dans les carottes (en rose sur la Fig.6.27), des valeurs fortes avec des pics importants. Comme nous avons montré auparavant, la greigite est le minéral dominant dans les sédiments qui présentent des pics de susceptibilité magnétique, tandis que dans les creux se trouve de la magnétite; nous allons nommer cette zone selon sa minéralogie magnétique « la zone greigite-magnétite » ;
- les derniers 20 cm des deux carottes sont caractérisés par la présence de la pyrite, le minéral non-magnétique identifié par DRX; nous allons appeler cet intervalle « la zone à pyrite ». L'âge de début de cette zone se trouve autour de 10000 ans BP dans la carotte 4, et autour de 12900 ans dans la carotte 6.

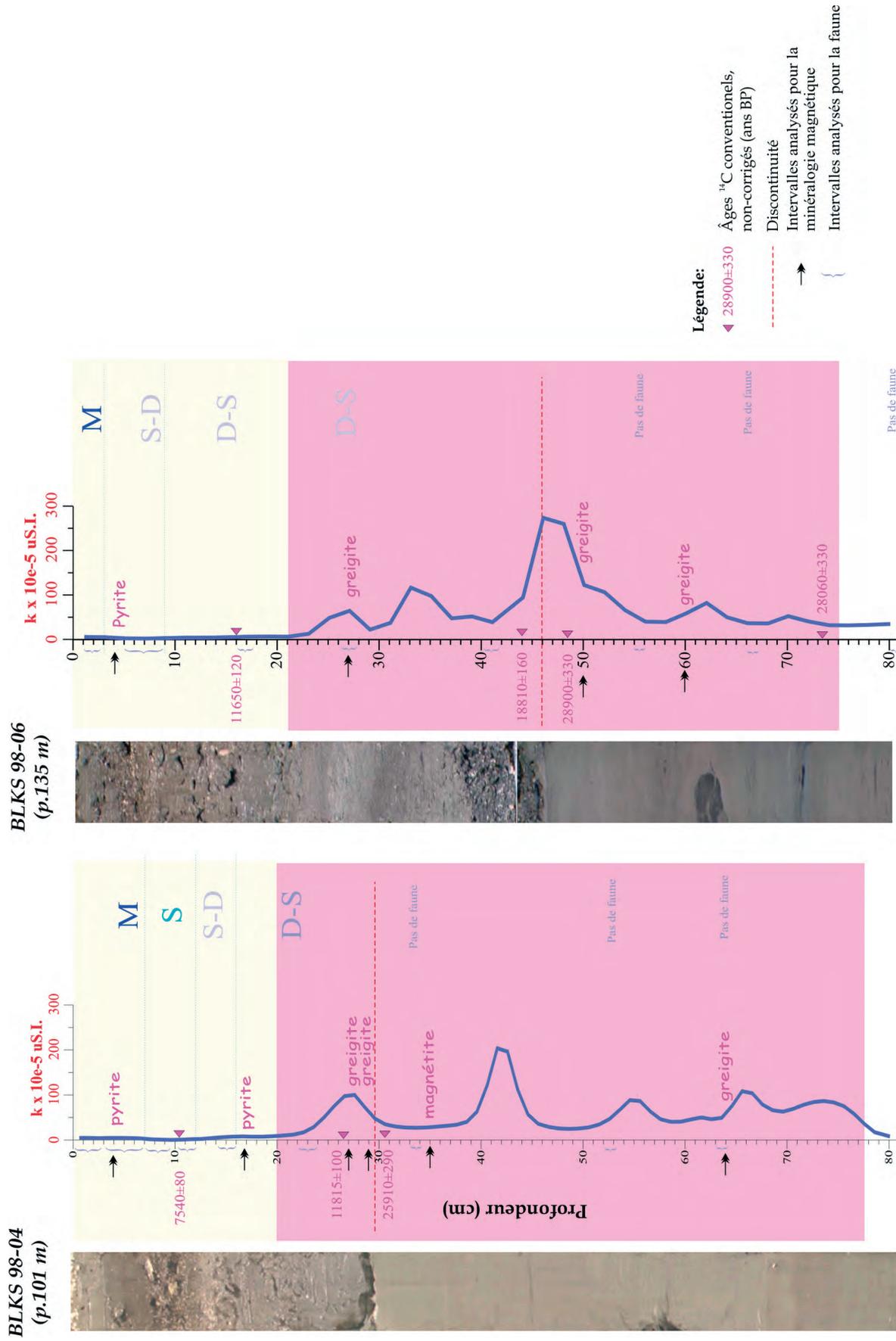
Une observation importante est que la zone greigite-magnétite s'étend de part et d'autre des discontinuités présentes dans nos carottes. Ce fait suggère une formation post-sédimentaire de greigite par la diagenèse précoce **après** le dépôt des sédiments sur la discontinuité et non pas sa formation dans la colonne d'eau ou sur la surface de sédiment, ce qui impliquerait la colonne d'eau anoxique de moins en partie. La petite taille des grains de greigite présents dans le sédiment est un autre argument pour son origine diagenétique.

Les déterminations de la faune de ces deux carottes (Annexe 4) ont mis en évidence:

- la prédominance des espèces d'eau saumâtre ou saumâtre à douce dans les niveaux situés au-dessus de la discontinuité et un changement graduel des espèces vers le sommet de la carotte, ou les espèces marines apparaissent ;
- l'absence de la faune dans les niveaux analysés en bas de la discontinuité, à l'exception de quelques débris non identifiables et très rares. Ceci reflète sûrement un environnement qui n'était pas propice à la vie, et pourrait suggérer par exemple une colonne d'eau anoxique.

En regroupant les informations sur la faune avec les données magnétiques et les datations, nous pouvons dire que dans la zone de sédiment caractérisée par la présence des sulfures de fer :

- **les sédiments situés en bas des discontinuités :**
  - se seraient déposés sous une *colonne d'eau anoxique*, ou pauvre en oxygène, fait suggéré par l'absence quasi-totale de la faune ; en conséquence, il y aurait de l'anoxie dans le sédiment aussi, ce qui permettrait la formation de la greigite. Pour fabriquer les monosulfures de fer qui persistent (ne se transforment pas en pyrite) il faudrait, en plus de milieu anaérobie, la matière organique (à dégrader par les bactéries) ou le méthane (à oxyder dans le milieu anoxique) et la source de soufre, assez limitée (pour garder la greigite). La source de soufre peut être la matière organique riche en soufre, ou les ions  $\text{SO}_4^{2-}$ , habituellement présents dans l'eau saumâtre et marine. Ainsi la présence des monosulfures de fer suggérerait la connexion de la Méditerranée à la Mer Noire, ce qui implique le niveau d'Océan mondial suffisamment haut pour que le Bosphore soit sous l'eau à l'âge des sédiments de nos carottes (28-25 kans B.P. et avant environ 20-19 kans B.P., l'âge des sédiments au dessus de la discontinuité dans la carotte BLKS 98-06). On peut aussi en déduire la non connexion (le niveau de l'Océan mondial bas) et le niveau de « lac Noire » très bas ce qui augmenterait la concentration des ions présents dans l'eau.
  - se seraient déposés *dans un milieu aérobie* malgré le déficit de faune, et ensuite transformés à cause du changement (plus ou moins rapide) en conditions anoxiques, favorables à l'authigenèse de la greigite dans le sédiment. Le fait que la zone avec la greigite s'étend de part et d'autre des discontinuités suggère une formation post-sédimentaire de greigite par la diagenèse précoce **après** le dépôt des sédiments sur la discontinuité (20-19 kans B.P. pour la carotte BLKS 98-06 et environ 12 kans B.P. pour BLKS 98-04). Cependant il est possible aussi, que l'âge de la diagenèse soit antérieur à l'âge des sédiments déposés sur les discontinuités, et serait ainsi antérieur à l'âge des sédiments se trouvant sur la discontinuité. Aussi, comme dans le premier cas, cela nécessite l'apport de soufre.
- **les sédiments présents au dessus des discontinuités** sont déposés sous une *colonne d'eau oxique et douce ou*



**Fig. 6.27.** Comparaison des propriétés magnétiques des carottes d'eau peu profonde BLKS 98-04 et BLKS 98-06; sur le graphe est marqué le type de faune dominante pour certains intervalles; M = marine; S-D = saumâtre - douce; D - S = douce - saumâtre; en jaune - la zone de pyrite, en rose - la zone avec de la greigite + magnétite

saumâtre, fait indiqué par la présence de la faune d'eau douce à saumâtre dans les niveaux près des discontinuités. La présence de la greigite indique l'anoxie dans les sédiments et, probablement, une insuffisance de sulfates dans les eaux interstitielles, qui a empêché la transformation totale des monosulfures de fer en pyrite. Cette insuffisance des sulfates peut être attribuée à une faible salinité des eaux du bassin qui sont à l'origine des eaux interstitielles considérées. L'âge de cette diagenèse précoce est ainsi postérieur à l'âge du sédiment;

- **dans les niveaux plus jeunes des carottes**, correspondant à la zone à pyrite, le sédiment reste anoxique, mais la quantité des sulfates dans les eaux interstitielles augmente, ce qui favorise la formation de la pyrite. Cette augmentation de la quantité des sulfates dans les eaux interstitielles peut être attribuée à l'augmentation de la salinité des eaux du bassin, jusqu'aux valeurs actuelles. Le changement de la faune des espèces d'eau douce et saumâtre jusqu'à des espèces marines, peut-être un argument pour le changement graduel de la salinité des eaux du bassin.

Les sédiments les plus vieux, en bas des sulfures de fer, observés dans la carotte BLKS 9806 et caractérisés par l'absence de la faune et par la présence des minéraux paramagnétiques accompagnés de faibles quantités de magnétite d'origine probablement détritique, sont suggestifs des conditions oxygènes de diagenèse précoce.

#### CAROTTES D'EAU PROFONDE

Il s'agit des carottes qui contiennent la succession sédimentaire spécifique pour les eaux profondes de la Mer Noire, définie par Hay *et al.* (1991): l'unité III – vase lacustre - en base, l'unité II – varves à sapropèle et ensuite l'unité I – varves aux coccolites. La description détaillée de ces trois unités est faite dans le **chapitre 2.2**. Dans ce cas se trouvent les carottes BLKS 98-09 à une profondeur de l'eau de 240 m, BLKS 98-10 à 378 m, BLKS 98-11 à 500 m et BLKS 98-22 à 2100 m.

La carotte BLKS 98-09 ne contient pas de succession complète de sédiments. Les deux unités Holocènes (le sapropèle et l'unité à coccolites) ont été récupérées uniquement dans le pilote (BLCP 98-09), tandis qu'une datation  $^{14}\text{C}$  à 15 cm dans la carotte (BLKS 98-09) révèle un âge de  $12310 \pm 95$  ans BP (Major *et al.*, 2002). Ceci prouve l'absence d'une partie de sédiment au sommet de la carotte. Comme elle se trouve sur la pente continentale, il est possible que les écoulements de vase soient responsables pour cette lacune de sédimentation entre les unités holocènes et le sédiment de 12310 ans. Aussi, il est probable que le sommet des sédiments n'a pas été prélevé pendant le carottage.

Pour cette raison, nous allons comparer uniquement les carottes BLKS 98-10, 11 et 22, et nous allons 'remplacer' la carotte BLKS 98-09 par la carotte MD04-2754 de la mission ASSEMBLAGE. Cette carotte, prélevée à 453 m profondeur de l'eau dans une zone avec des taux de sédimentation très élevés au Nord-Ouest du Bosphore, a l'avantage d'une séquence

sédimentaire complète et très épaisse. Elle a été étudiée du point de vue des paramètres magnétiques, par Alina Tudryn-Jelinowska.

La **figure 6.28** présente une comparaison des quatre carottes d'eau profonde : BLKS 98-10, 11, 22 et MD04-2754. A part les courbes de susceptibilité magnétique et les zones de minéralogie magnétique sont représentés les courbes de carbonates, les âges  $^{14}\text{C}$  et la photo de chaque colonne lithologique. Les carbonates servent à calibrer nos échelles de temps, comme on l'a démontré auparavant, dans le chapitre 3. Aussi nous pourrons établir les relations entre différentes zones de minéralogie magnétique et la teneur en carbonates en fonction des âges des sédiments.

Après avoir marqué les zones de minéralogie magnétique sur la figure, plusieurs caractéristiques communes des carottes ont été mises en évidence, du sommet vers le bas :

- l'unité I et le sommet de l'unité II sont caractérisés par la présence la zone à pyrite (marqué en jaune clair), avec des valeurs faibles de la susceptibilité magnétique ;
- la partie inférieure de l'unité II à sapropèle est marquée par une augmentation de la susceptibilité magnétique et par la présence dans le sédiment de la greigite (zone marqué en rose sur le graphe);
- ce fait nous a aidé aussi à préciser la limite entre les unités III et II pour la carotte BLKS 98-10 (à 40-42,5 cm), limite qui n'était pas claire pendant l'étude de la lithologie ;
- la partie supérieure de l'unité III lacustre, correspondante au pic des carbonates C1, est caractérisée par des valeurs faibles de la  $\kappa$  dû à la présence de la pyrite dans le sédiment ;
- vers le bas de carottes BLKS 98-10, MD04-2754 et BLKS 98-11 est visible une zone de fortes valeurs des paramètres magnétiques, représentés sur ce graphe par une zone de forts pics de la susceptibilité magnétique  $\kappa$  (marqué en rose foncé), superposés plus au moins au pic C2 de carbonates. Cette zone est caractérisée, du point de vue magnétique, par des fortes concentrations de minéraux magnétiques tels que la greigite et parfois aussi par de très faibles concentrations de magnétite (observées dans des creux de susceptibilité). Cette zone n'est pas évidente dans la carotte BLKS 98-22, probablement à cause de ses faibles taux de sédimentation qui ne permettent pas l'observation ou dû à la présence des turbidites dans celle-ci ;
- encore plus bas dans les carottes, il y a une zone de susceptibilités magnétiques assez constantes, contenant des minéraux paramagnétiques, non identifiés, mais aussi des faibles quantités de magnétite. Cette zone se caractérise par des valeurs de  $\kappa$  plus élevées que celles dans les zones à pyrite. Sur le graphe, cette zone est marquée en bleu.

Pour la carotte BLKS 98-11, des déterminations de faune, particulièrement des ostracodes, ont été effectués par Priscila Opreanu à *GeoEcoMar* – Constanta (**Annexe 4**). Sur la **figure 6.28** nous avons marqué les niveaux analysés et le type de milieu déduit de la présence ou de l'absence de la faune.

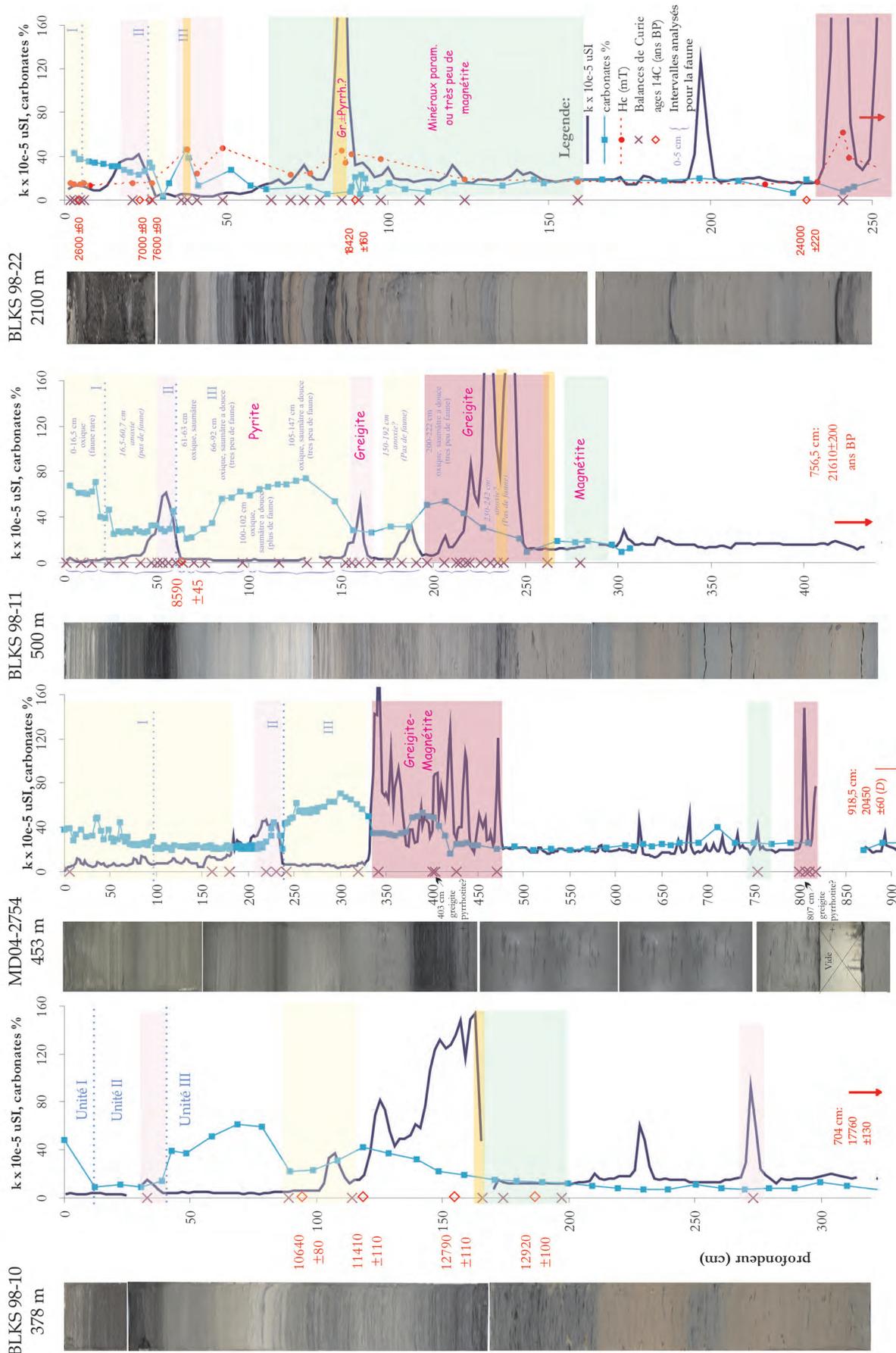


Fig.6.28. Comparaison des propriétés magnétiques des carottes d'eau profonde BLKS 98-10, MD04-2754, BLKS 98-11 et BLKS 98-22

Par exemple, pour les intervalles sans faune, nous pourrions déduire que la colonne d'eau était probablement anoxique, tandis que les intervalles où les ostracodes dominants sont les *Candonides* ± *Loxococoncha* sp. sont probablement caractérisés par une colonne d'eau oxygénée et saumâtre à douce.

Suite aux déterminations de faune dans la carotte BLKS 98-11, nous pouvons observer que les niveaux à greigite correspondent bien aux niveaux sans faune, quand la colonne d'eau était très probablement anoxique. C'est le cas de greigite dans le sapropèle (16,5-61 cm), sapropèle qui est justement attribué à la colonne d'eau anoxique. Les intervalles 150-192 cm et 230-242 cm riches en greigite, se trouvent également dépourvus de faune. Ceci pourrait suggérer que la formation de ces grandes quantités de greigite a eu lieu dans le sédiment sous la colonne d'eau anoxique également, et même peut être dans cette colonne d'eau. Des intervalles sans faune et avec des quantités élevées de greigite ont été observés aussi dans les parties basses des carottes peu profondes BLKS 98-04 et 06. Cependant la zone à greigite entre 190 et 250 cm de la carotte BLKS 98-11, contient quelques niveaux avec des ostracodes (200–220 cm), qui témoignent de la présence d'oxygène au moins sur le sommet des sédiments à ces endroits. Ainsi cette zone à greigite pourrait être à la limite des milieux aérobie/anaérobie. Dans les carottes moins profondes, la faune, même en quantités faibles, trouvée dans les niveaux autres que le sapropèle mais riches en greigite (mollusques dans BLKS 98-09 et BLKS 98-10, voir les descriptions lithologiques, et ostracodes dans MD04-2754 - Ian Boomer, communication personnelle), indique la colonne d'eau et le sommet des sédiments oxygénés. Ainsi l'authigénèse de greigite dans ces carottes se passerait plutôt **dans** le sédiment, donc **après** son dépôt. La zone à pyrite, qui se trouve entre la greigite en bas et la greigite du sapropèle dans les carottes BLKS 98-11 et MD04-2754, contient la faune, témoignant aussi du caractère aérobie du fond marin à l'âge et profondeurs considérées.

## DISCUSSION

En regroupant les informations sur la faune avec les données magnétiques, carbonates et les datations des carottes se trouvant sur la pente continentale (**Fig.6.28**), nous pouvons dire que:

**La partie inférieure de l'unité III** – en dessous des sulfures de fer – est caractérisée par la faible présence de magnétite, probablement d'origine détritique. Ceci suggère des conditions oxygénées et de l'eau douce dans le bassin.

**La partie supérieure de l'unité III ainsi que la suite jusqu'au sommet des sédiments** est caractérisée par la présence des sulfures de fer, qui témoignent des processus de sulfato-réduction :

a) la partie supérieure de l'unité III : greigite et pyrite jusqu'au début du sapropèle – est caractérisé par les conditions aérobie du sommet des sédiments (à l'exception peut

être de la zone à greigite de la carotte BLKS 98-11). Ceci implique l'authigénèse post-dépositionnaire de ces sulfures.

La sulfidisation a pu avoir lieu par la sulfatoréduction bactérienne ou par l'oxydation de méthane ; dans les deux cas le milieu sédimentaire (les eaux interstitielles) devait avoir les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  « à la disposition ».

L'apparition de grandes quantités de greigite dans toutes les carottes à peu près au même moment, indépendamment de sa position « métrique » sur ces carottes (qui traduit des différences dans le taux de déposition) ainsi qu'une corrélation du remplacement de la greigite par la pyrite avec le maximum de la teneur en carbonates (**Fig.6.28**) avant le sapropèle, témoignent d'un processus qui ne se fait pas au hasard des phénomènes post-dépositionnaires. Ces phénomènes incluent la mise en anoxie des sédiments et l'arrivée des sulfates dans les eaux interstitielles aussi bien durant la diagenèse précoce dans la zone sulfatoréductrice bactérienne que durant l'oxydation anaérobie du méthane. Le timing de l'authigénèse de greigite et de pyrite de l'unité III, en corrélation étroite avec les carbonates, montre un changement radical dans **tout** le milieu. Ce changement consiste sûrement, entre autres, en l'augmentation de la salinité des eaux du bassin.

Les niveaux de greigite dans les carottes de la pente continentale peuvent être corrélés entre eux dans différents endroits du bassin.

b) à partir du sapropèle et jusqu'à l'actuel, l'authigénèse des sulfures de fer a lieu dans un milieu, où même la colonne d'eau est en grande partie anoxique.

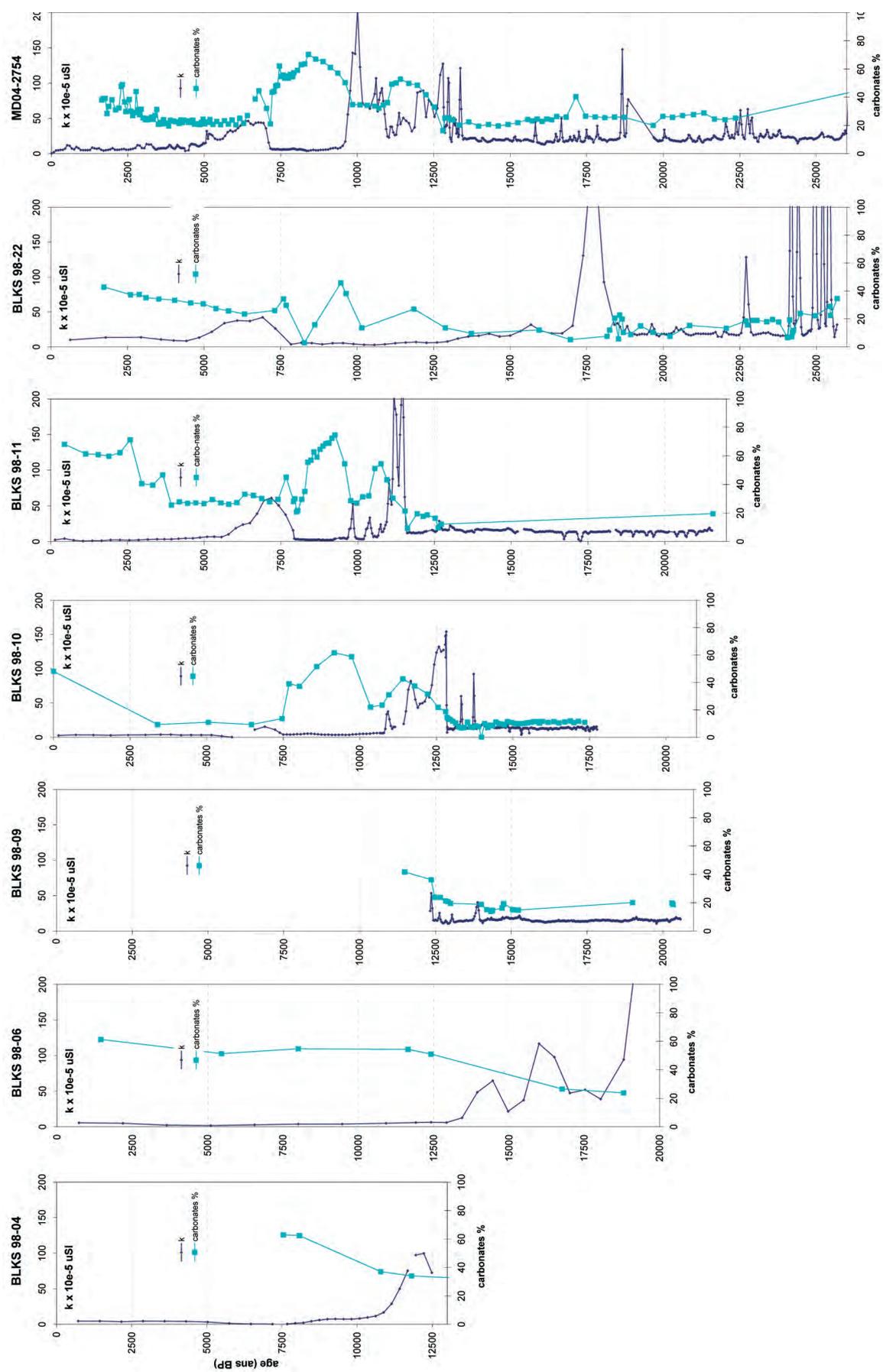
La partie inférieure de l'unité II – base du sapropèle, est caractérisée par des faibles quantités de greigite. Cette greigite peut être corrélée entre différentes carottes du bassin.

La partie supérieure de l'unité II et l'unité I sont caractérisées par la présence de pyrite, formée en général dans un milieu anaérobie sulfatoréducteur du sédiment et même d'une partie de la colonne d'eau.

## 6.6. CONCLUSION

La **figure 6.29** représente la susceptibilité magnétique et la teneur en carbonates de toutes les six carottes BLKS et de la carotte MD04-2754, en fonction du temps. Les courbes ne sont pas complètes du fait que nous n'avons pas des dates  $^{14}\text{C}$  pour les bases des carottes BLKS 98-04 et 06 et parce que la carotte BLKS 98-09 n'est pas complète du point de vue lithologique.

Une première observation est qu'une certaine similarité s'observe entre les carottes de profondeur semblable, notamment entre les carottes de plateforme continentale (BLKS 98-04 avec BLKS 98-06) et entre les carottes de pente (BLKS 98-09, BLKS 98-10 et BLKS 98-11). La carotte profonde BLKS 98-22 présente des similarités avec les carottes de pente continentale, surtout dans la partie supérieure, contenant les unités I et II, ensuite sa signature est plus complexe.



**Fig. 6.29.** Représentation de la susceptibilité magnétique et des carbonates en fonction du temps pour les carottes BLKS et pour la carotte MD04-2754. Les âges utilisées pour la construction des échelles de temps des carottes BLKS 98-09 et BLKS 98-10 sont ceux de Major *et al.*, 2002 et celle de MD04-2754 est selon Guichard (données ASSEMBLAGE non-publiées)

---

Sur les carottes de pente continentale (BLKS 9809, 10, 11, MD 2754) nous pouvons constater une relation entre les courbes de teneur en carbonates et de susceptibilité magnétique.

Pour les carottes d'eau peu profonde BLKS 98-04 et BLKS 98-06, et après la discontinuité, s'observe un décalage entre les pics de susceptibilité dus à la greigite. Sachant que cette greigite est post sédimentaire, nous pouvons conclure que son âge est postérieur à l'âge du sédiment qui la contient. Ainsi, ce processus a pu commencer plus ou moins rapidement après le dépôt, mais il a été présent après environ 12 kans BP (âge non corrigé dans la carotte BLKS 98-04).

Considérant les résultats en fonction d'âge nous pouvons mettre en évidence les périodes suivantes:

**28-25-24 kans B.P.** : La corrélation entre la présence des quantités élevées de greigite dans les sédiments et le déficit (?) de la faune observée dans les carottes BLKS 98-04, 06 et 22, peut indiquer l'existence des 'épisodes' anoxiques pendant la déposition de l'unité III autours 28000-25000-24000 ans BP. La greigite des niveaux de cet âge de nos carottes est formée très probablement dans des conditions de salinité basse des eaux du bassin. L'insuffisance du soufre élémentaire pendant la diagenèse précoce, peut être due à l'épuisement du H<sub>2</sub>S dans les eaux interstitielles à cause des hauts taux de sédimentation combinés à une faible concentration de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dans les eaux (Volkov, 1954 cité par Berner, 1970a, Berner, 1974).

**17.5-12.8 kans B.P.**: les carottes BLKS 98-09, 10, 11, MD04-2754 se caractérisent dans cet intervalle par les minéraux paramagnétiques avec une faible présence de magnétite, le taux de carbonates faible et constant. Ceci suggère des conditions aérobies, de l'eau douce et faible productivité dans le bassin.

**12.8-7.5 kans B.P.**: les carottes BLKS 98-04, 10, 11, MD04-2754 se caractérisent par la présence de greigite entre 12.8-10.5 kans B.P. dans le sédiment, qui ensuite est remplacée par la pyrite. La greigite, qui apparaît à peu près au même moment que le taux des carbonates augmente (productivité augmente) et indique un changement du milieu avec l'arrivée des sulfates, est post-dépositionnaire. Son âge est donc postérieur au sédiment et dépend de la rapidité de la mise en anoxie de ses sédiments et de l'arrivée des sulfates. Il est possible, que la ligne d'anoxie se trouvait à cette époque autours de profondeur à laquelle était la carotte BLKS 98-11. Autours de 10.5 kans B.P., greigite disparaît au profit de la pyrite et la diminution de la teneur en carbonates est enregistrée. En-

suite entre 10.5 et 7.5 kans B.P. la pyrite persiste dans le sédiment dont le sommet est oxygène et le taux des carbonates est élevé. La simultanéité des apparitions de greigite et de pyrite autours de 12.8 et 10.5 kans B.P. dans les carottes, bien en rapport avec des carbonates, suggère que ceci n'est pas dû au hasard des processus post dépositionnaires. Ainsi le changement d'un bassin d'eau douce à un bassin avec la salinité plus grande a sûrement dû s'opérer après 12.8 kans B.P. Ceci reste en accord avec la description des ostracodes dans la carotte BLKS 98-11, où les espèces saumâtres sont enregistrés autours de 10.6-10.7 ans B.P.. Dans la carotte MD04-2754, Jan Boomer interprète l'augmentation du rapport Sr/Ca autours de 12.8 kans B.P. dans des coquilles des ostracodes comme le signal d'augmentation de salinité des eaux (Boomer et Guichard, 2005, présentation à Hamburg). Enfin, Neretin *et al.* (2004) proposent le début de sulfidisation autours de 11.6 et 6.36 kans B.P..

**A partir de 7.5 kans B.P.** le sapropèle marque la connexion avec la Méditerranée et le milieu saumâtre, avec les eaux stratifiées telles que nous connaissons aujourd'hui s'installe.

La formation et la conservation de la greigite dans la moitié inférieure de l'unité à sapropèle, n'est probablement pas influencé par les quantités faibles de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> de l'eau de fond, car l'eau du bassin devenait de plus en plus salée, mais plutôt par les taux de sédimentation élevés, par la quantité importante de la matière organique et peut être aussi, par la formation de la greigite dans la colonne d'eau anoxique. Cutter et Kluckhohn, 1999, montrent que la greigite se forme par la précipitation dans la colonne d'eau anoxique actuelle de la Mer Noire, avec un pic de production à environs 70 m sous l'interface oxygène/anoxique.

Bref, i) grâce à l'augmentation légère de susceptibilité magnétique en base du sapropèle, les corrélations entre les carottes peuvent être effectuées.

ii) le changement simultané de greigite en pyrite, parallèlement avec l'augmentation de la teneur en carbonates autours de 10.5 kans, permet une corrélation entre différentes carottes de pente continentale.

**Tableau 6.3.** Paramètres d'hystérésis des carottes : a) BLKS 98-04 et b) BLKS 98-06 (modifié d'après F. André, 1999)

## a. Paramètres d'hystérésis de la carotte BLKS 98-04

Profondeur (cm)	masse (mg)	Hc (mT)	Hcr (mT)	Mr/Ms	Hcr/Hc	Mrs/masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$ )	Ms/masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$ )	S.C. / masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1} \text{T}^{-1}$ )	Identification, autres analyses et observations	Comportement (BC)
4	8.71	12.9	60.8	0.1125	4.713	0.09	0.8	44.89	Pyrite (BC)	(1)
17	16.43	7.08	56.1	0.127209	7.924	0.72	5.66	25.38	Pyrite (RX)	(4)
23	9.16	55.8	74.8	0.532087	1.341	8.54	16.05	29.26	Greigite	
27	3.88	52.4	71.2	0.510565	1.359	14.74	28.87	36.02	Greigite (BC)	(9)
29	5.27	49.9	73.3	0.441085	1.469	5.69	12.9	48.77	Greigite (BC)	(9)
35	8.1	15.1	53.2	0.150966	3.523	1.25	8.28	62.35	Magnetite (BC)	(7a)
64	9.9	32.7	69	0.288776	2.110	5.66	19.6	57.78	Greigite (BC, RX)	(9)

## b. Paramètres d'hystérésis de la carotte BLKS 98-06

Profondeur (cm)	masse (mg)	Hc (mT)	Hcr (mT)	Mr/Ms	Hcr/Hc	Mrs/masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$ )	Ms/masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$ )	S.C. / masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1} \text{T}^{-1}$ )	Identification, autres analyses et observations	Comportement (BC)
4	3.98	17.7	30.7	0.195	1.73	0.237	1.214	14	Pyrite (RX)	(1)
27	13.46	34.1	50.3	0.404	1.48	138.930	343.982	33	Greigite (BC, RX)	(9)
40	7.69	33.8	49.3	0.462	1.46	26.918	58.257	2		
50	9.49	49.8	66	0.523	1.33	74.921	143.309	57	Greigite (BC)	(9)
60	9.71	35.5	65.1	0.322	1.83	6.365	19.773	47	Greigite ? (BC)	(9)
91	11.59	47.8	63.3	0.517	1.32	23.986	46.419	57		
110	6.9	50	66.4	0.513	1.33	69.275	134.928	35		
174	7.18	11.2	35.1	0.099	3.13	1.269	12.869	58	Magnétite (BC)	(7)

**Tableau 6.4.** Paramètres d'hystérésis des carottes de pente continentale et d'eau profonde: a) BLKS 98-09 ; b) BLKS 98-11 et c) BLKS 98-22  
a. Paramètres d'hystérésis de la carotte BLKS 98-09 (modifié d'après F. André, 1999)

Profondeur (cm)	masse (mg)	Hc (mT)	Hcr (mT)	Mr/Ms	Hcr/Hc	Mrs/masse (µA m <sup>2</sup> mg <sup>-1</sup> )	Ms/masse (µA m <sup>2</sup> mg <sup>-1</sup> )	S.C./masse (µA m <sup>2</sup> mg <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> )	densité (g/cm <sup>3</sup> )	χ x 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /kg	Mrs/χ	Identification, autres analyses et observations	Comportement (BC)
5	4.41	14.4	22.8	0.162	1.58	0.25	1.52	31.97	1,3	555,933	0,001983	Py. ou Sid. (BC)	(1)
9	4.27	11.8	17.6	0.142	1.49	0.07	0.46	8.38	1,3	580,8248	0,000515		
13	5.94	17.7	28.7	0.313	1.62	0.54	1.73	31.31					
18	3.39	51.2	67.9	0.524	1.33	2112.09	4041.3	359.88	1,3509	3882,931	1,843964	Greigte (BC)	(9)
24	9.41	13.5	21.6	0.287	1.6	1.67	5.81	44.31	1,54	932,954	0,016844		
33	7.12	53.3	79.2	0.447	1.49	11.88	26.54	56.88	1,67	1357,986	0,062288	Pyrrhotite ± Greigte (BC)	(10)
40	2.26	12.7	19.7	0.314	1.55	3.16	10.04	-10.58	1,67	666,4796	0,010715		
49	9.19	53	81.9	0.427	1.55	3.1	7.26	55.82	1,67	668,6729	0,042605		
49.1	7.17	43.6	79	0.361	1.81	2.02	5.61	55.02		668,6729	0,02166		
65	2.89	22.3	58.1	0.218	2.61	1.23	5.64	54.33	1,67	742,138	0,00479		
65.1	7.74	21.6	62.1	0.204	2.88	1.17	5.72	67.18		742,138	0,012202		
86	2.4	26.5	95.1	0.265	3.59	1.35	5.13	65	1,72	884,719	0,003662	Magnétite (BC)	(7)
86.1	7.62	28.5	87.9	0.193	3.08	1.33	6.85	81.23		884,719	0,011455	Grain rouge du niveau 86 cm	
108	7.91	28.3	60.8	0.257	2.15	1.86	7.23	57.02	1,72	2361,456	0,00623		
126	4.85	18.2	45	0.18	2.47	0.96	5.34	56.08	1,72	847,5399	0,005494	Magnétite (BC)	(7)
136	4.39	19.3	54.6	0.186	2.83	1.04	5.6	57.18	1,72	925,2607	0,004934		

b. Paramètres d'hystérésis de la carotte BLKS 98-11

Profondeur (cm)	Masse (mg)	Hc (mT)	Hcr (mT)	Mr/Ms	Hcr/Hc	Mrs/masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$ )	Ms/masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$ )	S.C./masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1} \text{T}^{-1}$ )	Identification, autres analyses et observations	Type de comportement thermique magnétique
1	6.56	10.8	24	0.135107	2.222	2.012	14.893	-22.256	(BC)	(1)
9	8.15	14	21.8	0.324607	1.557	2.282	7.031	-24.540	Pyrite (RX, BC)	(1)
15	3.13	4.76	10	0.855509	2.101	0.263	0.307	-5.399	(BC)	(1)
24	4.52	15.7	24.4	0.193305	1.554	0.198	1.024	-32.080	(BC)	(1)
32	8.87	12.9	21.5	0.276923	1.667	1.421	5.130	-40.812	Pyrite (BC)	(2)
41	11.06	11.9	18.5	0.144008	1.555	0.129	0.898	-39.873	(BC)	(2)
47	5.45	10.4	18.6	0.100639	1.788	0.145	1.437	-25.138	(BC)	(2)
51	2.97	12.7	18.3	0.256	1.441	1.293	5.051	-7.508	(BC)	(2)
53	7.09	12.7	20.6	0.277663	1.622	1.140	4.104	-15.656	(BC)	(3)
56	3.27	8.19	24.4	0.215444	2.979	0.367	1.703	-13.731	Pyrite $\pm$ Greig. (RX, BC)	(3)
60	5.4	14.8	23.2	0.332661	1.568	30.556	91.852	-27.778	Grain noir (BC)	(3)
60		12.1	25.6	0.20255	2.116				Grain clair	
64	4.98	13.5	14.2	0.105945	1.052	0.200	1.892	-36.948	(BC)	(1)
70	2.48	6.08	22.1	0.112329	3.635	0.165	1.472	-27.500	(BC)	(1)
76		15	31.3	0.134734	2.087				(BC)	(1)
96	8.02	13.9	25.3	0.177856	1.820	0.188	1.059	-19.825	(BC)	(4)
116	9.64	21.2	31.1	0.365025	1.467	0.223	0.611	-15.975	Pyrite ? (RX, BC)	(4)
131	11.48	17.3	32.4	0.312689	1.873	0.180	0.577	-14.373	(BC)	(4)
142	14.89	36.2	63.6	0.37582	1.757	0.616	1.639	-29.550	(BC)	(4)
152	9.71	28.2	51.6	0.286957	1.830	0.408	1.421	-37.796	(BC)	(5 ?)
155	7.74	41.7	65.6	0.37963	1.573	0.795	2.093	-33.850	(BC)	(5)
159	13.96	45.8	67.7	0.491597	1.478	4.191	8.524	-37.822	(BC)	(5a)
166	20.17	38.7	59.7	0.432609	1.543	2.960	6.842	-35.449	(BC)	(5)
175	9.86	23.9	58.1	0.280672	2.431	0.339	1.207	-34.178	(BC)	(4)
183	8.83	41.8	63.2	0.458188	1.512	2.978	6.501	-30.578	(BC)	(4)
190	11.27	48.5	71.1	0.480349	1.466	3.904	8.128	-33.540	(BC)	(4)

Profondeur (cm)	Masse (mg)	Hc (mT)	Hcr (mT)	Mr/Ms	Hcr/Hc	Mrs/masse ( $\mu\text{A m}^{-2} \text{mg}^{-1}$ )	Ms/masse ( $\mu\text{A m}^{-2} \text{mg}^{-1}$ )	S.C./masse ( $\mu\text{A m}^{-2} \text{mg}^{-1} \text{T}^{-1}$ )	Identification, autres analyses et observations	Type de comportement thermique magnétique
196	9.18	55.7	80.9	0.496274	1.452	3.627	7.309	-29.521	(BC)	(5)
205	11.63	51.5	72.7	0.489231	1.412	4.101	8.383	-34.480	(BC)	(5)
212	15.74	40.5	56.5	0.499083	1.395	34.562	69.250	-42.757	(BC)	(5)
214.5	13.06	45.9	65.4	0.495614	1.425	8.652	17.458	-41.271	(BC)	(5)
217	11.96	37.3	55.6	0.455026	1.491	28.763	63.211	-45.234	(BC)	(5a)
219.5	26.2	46.3	64	0.50367	1.382	20.954	41.603	-49.618	(BC)	(5a)
225	9.9	36.8	56.1	0.433234	1.524	29.495	68.081	-55.253	(BC)	(5a)
225.1	9.6	32.9	50.3	0.413821	1.529	530.208	1281.250	-126.042	(BC) grain aimanté	(5a)
230	24.75	41.4	58.5	0.491315	1.413	80.000	162.828	-70.303	(BC)	(5a)
234	18.65	51.4	69.5	0.51476	1.352	14.960	29.062	-66.488	(BC)	(6)
238	12.4	43.8	62.7	0.472	1.432	9.516	20.161	-70.081	(BC)	(6)
261	23.19	23.3	50.3	0.242529	2.159	1.820	7.503	-71.151	(BC)	(6)
279	16.91	19.2	46.9	0.209091	2.443	1.496	7.156	-73.329	(BC)	(7)

c. Paramètres d'hystérésis de la carotte BLKS 98-22 (modifié d'après Fabien André, 1999)

Profondeur (cm)	masse (mg)	Hc (mT)	Hcr (mT)	Mr/Ms	Hcr/Hc	Mrs/masse ( $\mu\text{A m}^{-2} \text{mg}^{-1}$ )	Ms/masse ( $\mu\text{A m}^{-2} \text{mg}^{-1}$ )	S.C./masse ( $\mu\text{A m}^{-2} \text{mg}^{-1} \text{T}^{-1}$ )	Identification, autres analyses et observations	Type de comportement thermique magnétique
2	2.81	15.5	25.2	0.319	1.626	4.98	15.62	0.42	Pyrite (BC)	(1)
3	2.61	14.5	22.8	0.311	1.572	1.89	6.05	14.6	(BC)	(1)
5	2.1	14.8	24.5	0.324	1.655	4.47	13.81	-12.43	(BC)	(1)
6	3.05	15.3	24.1	0.338	1.575	11.31	33.44	7.05	(BC)	(1)
8	3.16	13.3	21.7	0.314	1.632	6.36	20.25	10.85		
21	2.46	15.2	22.8	0.362	1.5	70.73	195.53	12.2	Pyrite $\pm$ sulfures de fer magnétiques (BC, RX)	(3)
27	3.23	15.2	25.1	0.318	1.651	2.07	6.5	1.95		(3)
38	1.51	46.3	67.4	0.488	1.456	8.15	16.69	34.97	Pyrite + Pyrrhoïte ou greigite (BC)	(5)
41	5.2	24.7	66.6	0.23	2.696	0.35	1.52	35.38	(BC)	(5)

Profondeur (cm)	masse (mg)	Hc (mT)	Hcr (mT)	Mr/Ms	Hcr/Hc	Mrs/masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$ )	Ms/masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1}$ )	S.C./masse ( $\mu\text{A m}^2 \text{mg}^{-1} \text{T}^{-1}$ )	Identification, autres analyses et observations	Type de comportement thermique magnétique
49	6.25	47.7	70.3	0.492	1.474	5.12	10.4	24.96	(BC)	(5)
70	8.15	23.4	48	0.26	2.051	2.76	10.6	67.61	Magnétite (BC)	(7)
76	5.39	24	75.7	0.235	3.154	1.55	6.59	63.64		
86	6.14	44.8	62.4	0.487	1.393	60.26	123.78	55.7	Pyrrhotite (BC)	(10)
86.1	2.08	34.4	60.9	0.33	1.77	21.92	66.35	14.66	Grain rouge	
89	9.75	41.4	65	0.42	1.57	6.77	16.1	79.38		
98	9.36	37.4	63.1	0.359	1.687	5.02	14	76.5		
124	8.98	19.1	45.7	0.206	2.393	1.06	5.13	61.67	Magnétite $\pm$ Maghémite (BC)	(7a)
159	14.53	16	44.1	0.16	2.756	1.07	6.66	73.64	Magnétite (BC)	(7)
217	8.37	14.7	43.6	0.147	2.966	1.25	8.52	59.26		
233	7.18	16.5	44.5	0.164	2.697	0.7	4.23	50.28		
241	12.42	62	77.3	0.592	1.247	2431.56	4106.28	449.28	Greigite $\pm$ Pyrrhotite (BC, RX)	(8)
243	9.81	39	71	0.354	1.821	6.17	17.43	40.37		
255	10.25	26.4	64.9	0.239	2.458	2.55	10.63	57.27		
271	15.27	18.2	56.1	0.174	3.082	1.6	9.23	58.48	(BC)	(7a)
284	5.69	13.6	35.8	0.131	2.632	1.27	9.72	50.62	(BC)	(7a)
286	12.71	52.3	70.4	0.537	1.346	3926.04	7317.07	849.72	(BC)	(8)
300	16.08	13.4	40.5	0.126	3.022	1.19	9.45	59.7	(BC)	(7a)
303	16.09	51.2	73.3	0.466	1.432	58.73	126.17	67.12		
317	4.69	16.9	55.9	0.158	3.308	1.02	6.44	52.24	(BC)	(7a)
321	16.35	66.6	85.6	0.558	1.285	143.73	257.49	66.67	Greigite (BC)	(9)
363	12.29	12.9	39.2	0.121	3.039	1.26	10.41	64.12		
403	16.69	13	40.1	0.123	3.085	1.52	12.4	67.11		
405	17.24	12.7	38.2	0.124					Magnétite (BC)	(7)
441	12.39	12.2	37.4	0.122						

RX = analyse par diffraction des rayons X  
BC = analyse à l'aide de la balance de Curie



# CHAPITRE 7

## INTERPRÉTATION SYNTHÉTIQUE DES RÉSULTATS

### 7.1 VARIATIONS DES PARAMÈTRES MESURÉS ET LEUR RELATION AVEC LE CLIMAT

Dans ce sous-chapitre seront présentées une analyse des paramètres mesurés dans le cadre du travail présent et leur corrélation avec le climat.

Ci-dessous, le tableau synthétique **7.1**, présente les types d'analyses effectuées sur les carottes étudiées et le nombre des niveaux analysés.

L'intervalle de temps représenté par le sédiment de nos carottes est étendu sur les derniers ~30 000 ans, soit la der-

nière partie du stade OIS 3 et les stades 2 et 1. Du point de vue des glaciations, cet intervalle commence au Weichselien moyen (**Fig.7.1**)

Pour analyser les différents intervalles de temps, nous nous baserons sur les stades définis auparavant par divers auteurs pour le bassin de la Mer Noire (**Fig.7.1** et **Tableau 2.2**).

Ainsi, la période la plus ancienne représentée dans les carottes correspond à l'intervalle de temps d'**avant 28000 ans BP et jusqu'à 25000 ans BP**. C'est la fin du stade glaciaire Weichselien moyen (Valdaï moyen, OIS 3). Pour la Mer Noire, c'est équivalent,

**Tableau 7.1.** Types et nombres d'analyses effectuées sur les carottes

carotte	type d'analyse/numéro des niveaux analysés										
	<sup>14</sup> C	CaCO <sub>3</sub>	δ <sup>13</sup> C	Corg	N%	C/N	argiles	minéralogie : micro, IR, RX	magnétisme		
									κ, ARN, ARA	balance de Curie	micromag
BLKS 98-04	7	10	10	10	10	10	-	3 micro. + 2 RX	oui	6	7
BLKS 98-06	8	34	11	13	13	13	15	3 micro. + 9 IR + 2 RX	oui	6	8
BLKS 98-07	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BLCP 98-09 + BLKS 98-09	-	27	27	19	19	19	-	-	oui	5	13
BLKS98-10	-	-	-	-	-	-	-	-	oui	11	-
BLKS 98-11	3	57	34	40	40	40	-	4 RX	oui	40	37
BLKS 98-22	7	81	12	17	17	17	51	27 IR + 1 RX	oui	34	34
BLVK 98-14	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BLVK 98-15	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

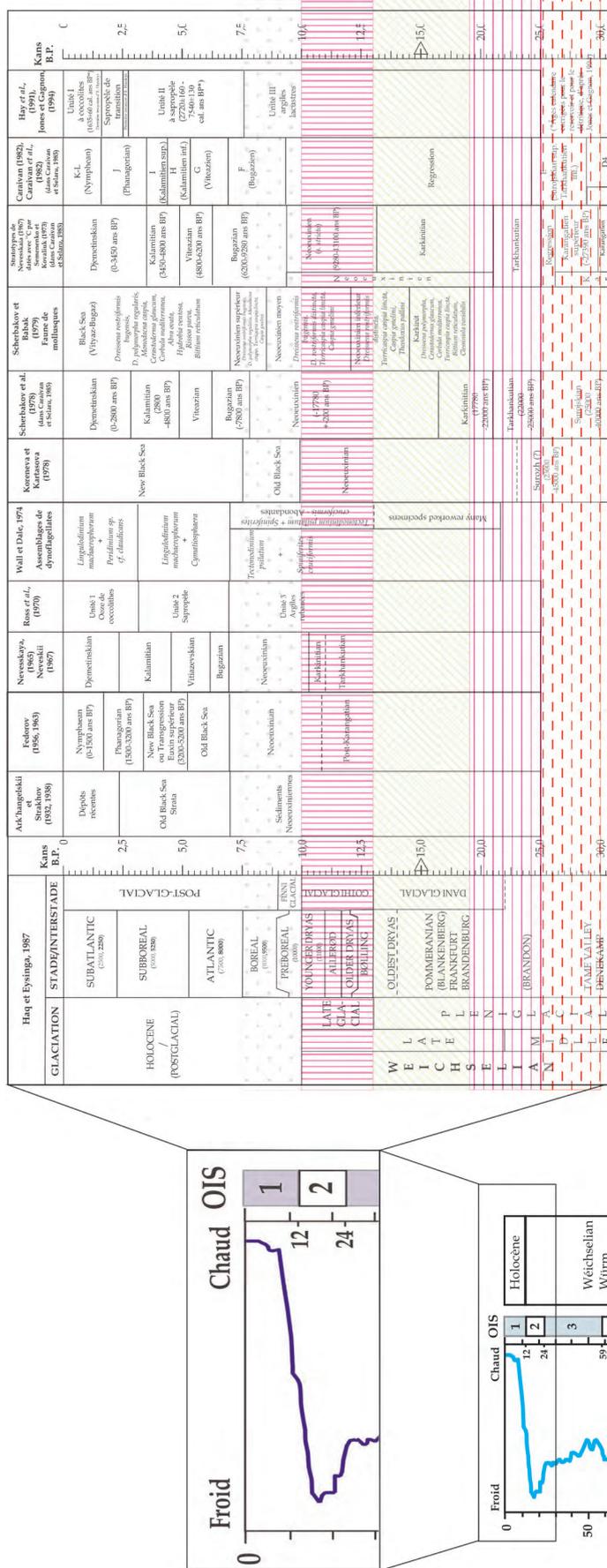


Fig. 7.1. Les derniers 30 000 ans: chronostratigraphie orbitale globale (SPECMAP), stades isotopiques sur le  $\delta^{18}O$  des foraminifères, stratigraphie terrestre et de la Mer Noire. Ages en Kams. Voir aussi la figure 1.5 et le tableau 2.2

selon Popov et Zubakov, 1975 (cité dans Chepalyga, 1984), Koreneva et Kartasova, 1978; et Scherbakov *et al.*, 1978, à la fin de la transgression Surojienne (40000-25000 ans BP).

Ce stade Surojien était caractérisé par un niveau haut de la Mer Noire, près du niveau actuel : -10 à 0 m (Ostrovskiy, Izmaylov, Shchlegov *et al.*, 1977, cité dans Chepalyga, 1984) (Fig.7.2), avec de l'eau salée et des associations de faune Méditerranéenne. D'après Ostrovskiy, Izmaylov, Balabanov *et al.*, 1977 (cité dans Chepalyga, 1984), la salinité des eaux du bassin était comparable à celle de nos jours. Du fait du prétendu contenu important de pyrite et du sapropèle dans les sédiments de cette période, Neprochnov, 1980 (cité dans Chepalyga, 1984) suggère une contamination des eaux de fond avec de l'hydrogène sulfuré.

Cet intervalle de temps d'avant 28000 ans BP et jusqu'à 25000 ans BP (la fin du Surojien) est présent dans nos carottes peu profondes BLKS 98-04 et BLKS 98-06 (Figs.7.3 et 7.4). Il est caractérisé par des valeurs des paramètres étudiés relativement constantes, avec des petites variations à la limite des faciès S5 et S4. Les taux de carbonates oscillent, autour de 20-25%, (avec de faibles variations à la limite des faciès S5 et S4), les paramètres de la matière organique semblent avoir la même évolution que les carbonates. Notons aussi des variations du  $\delta^{13}C$  avant la discontinuité de la carotte BLKS 98-06. L'origine de la matière organique, indiquée par les valeurs  $\delta^{13}C$  et C/N, est algale et du phytoplancton estuarien-marin. Les différents types d'argiles présents dans la carotte BLKS 98-06 et les minéraux tels que le quartz, la calcite ou les feldspaths présentent aussi des valeurs stables, à l'exception d'une inversion du type d'argile prédominante : l'illite devient prédominante par rapport à la smectite vers 200 cm de profondeur, et on observe deux pics de chlorite plus haut

dans la carotte (Fig.7.4). La susceptibilité magnétique et les autres paramètres magnétiques reflètent :

- les faibles quantités de la magnétite, probablement d'origine détritrique, dans le faciès S5 d'une part, et
- des quantités variables de la greigite, minéral d'origine diagénétique, dans le faciès S4 d'autre part.

Le fait que la plupart des paramètres sont en général constants est une indication de conditions climatiques peu changeantes.

L'examen de six niveaux appartenant à cet intervalle de temps nous a montré que ces sédiments ne contiennent pas de faune (voir l'annexe 4). Nous ne pouvons donc pas confirmer la présence de fossiles d'origine méditerranéenne mentionnée dans la littérature (voir plus haut). Néanmoins nous avons mis en évidence la présence de quantités importantes de greigite (voir le chapitre 5 – magnétisme environnemental). L'occurrence des sulfures de fer dans ce type de milieu est indicatrice des conditions d'anoxie dans le sédiment. L'absence de la faune peut indiquer une anoxie vers le sommet du sédiment et même, peut être, dans une partie de la colonne d'eau. Une éventuelle stratification des eaux, provoquant cette anoxie partielle dans la colonne d'eau, pourrait être à l'origine d'une formation de greigite par la précipitation dans les eaux anoxiques, comme c'est le cas actuellement dans les eaux profondes du bassin.

La présence d'un niveau haut de la Mer Noire vers la fin du stade Surojien pourrait être démontré, selon nos données, uniquement par le fait que l'anoxie dans l'eau ou au sommet des sédiments peut indiquer des tranches d'eau suffisamment épaisses pour empêcher une bonne ventilation à l'aplomb des sites des carottes 04 & 06: 100 et 135 m. On se souvient qu'actuellement les eaux de la Mer Noire sont dépourvues d'oxygène à des profondeurs supérieures à 100-140 mètres.

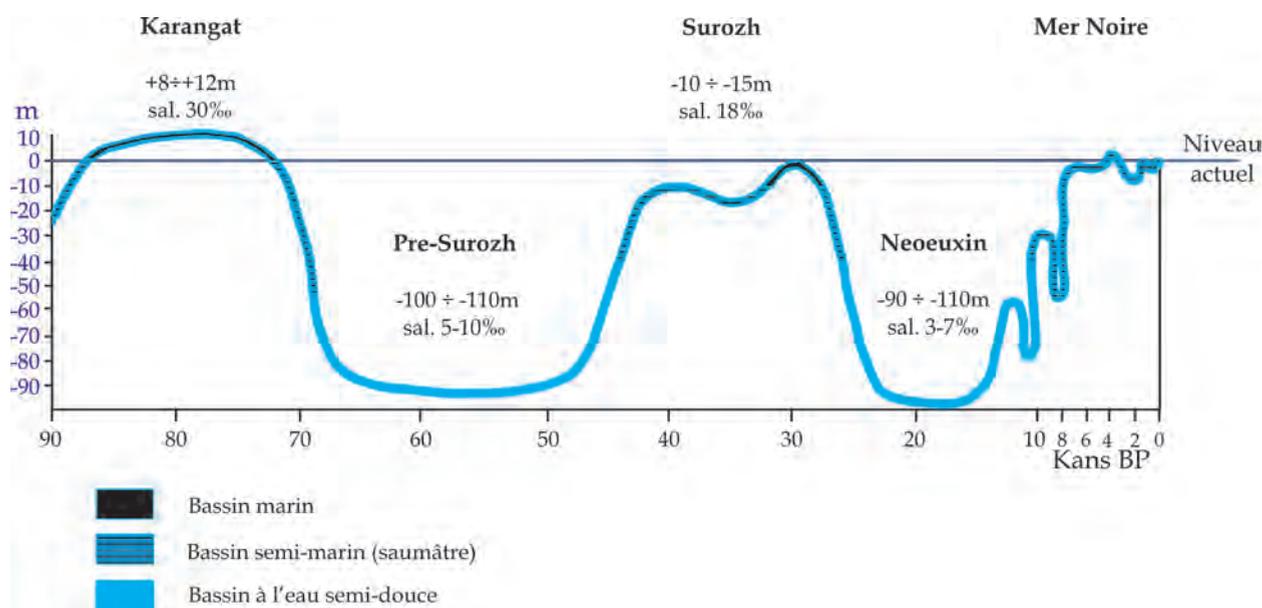
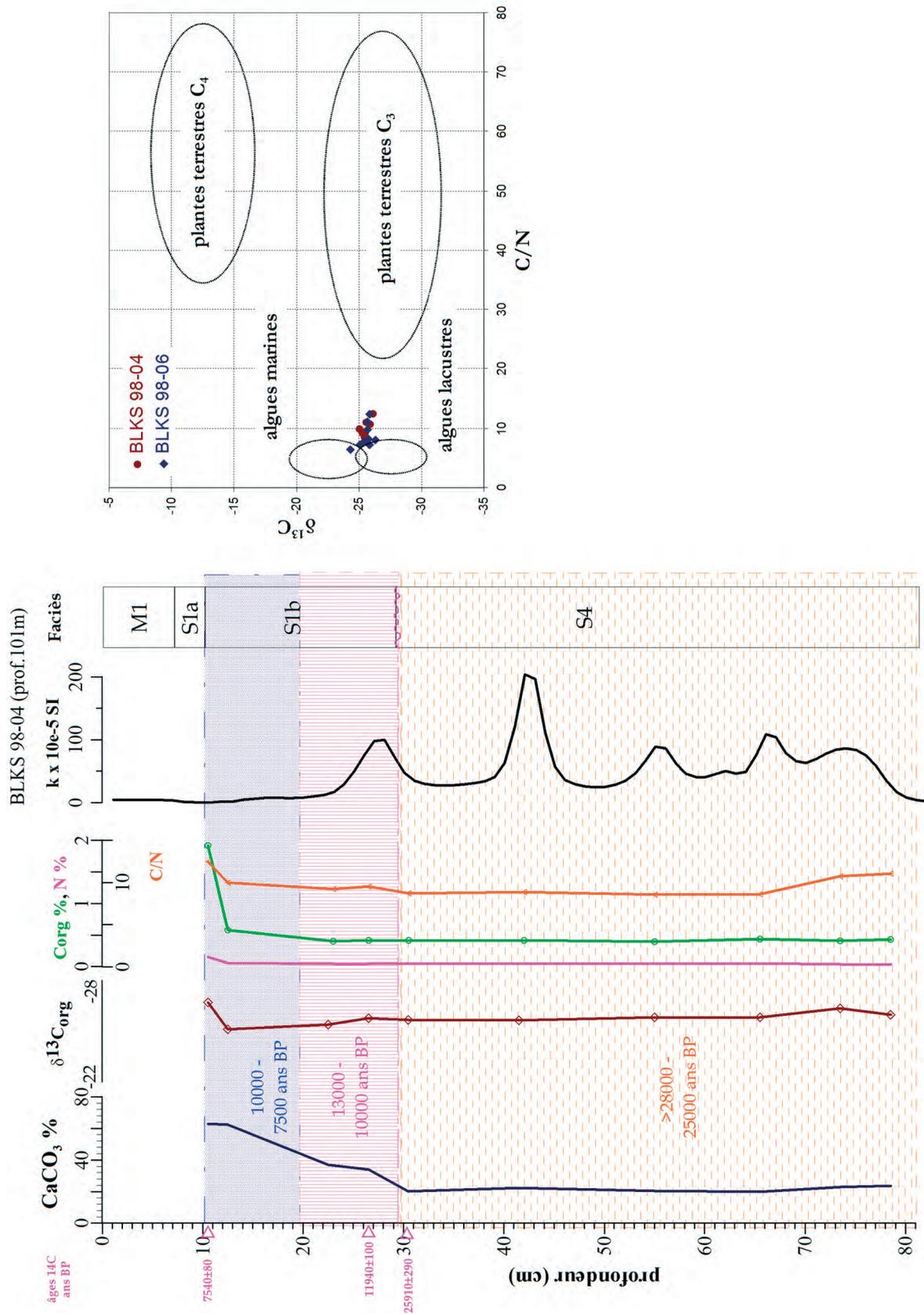


Fig.7.2. Variations du niveau et changements du milieu dans le bassin de la Mer Noire, pendant le Pléistocène supérieur et l'Holocène (d'après Chepalyga, 1984)



**Fig.7.3.** Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-04 et intervalles de temps analysés dans le texte. Pour le code des couleurs des intervalles de temps, voir la légende commune des figures 7.3 à 7.8

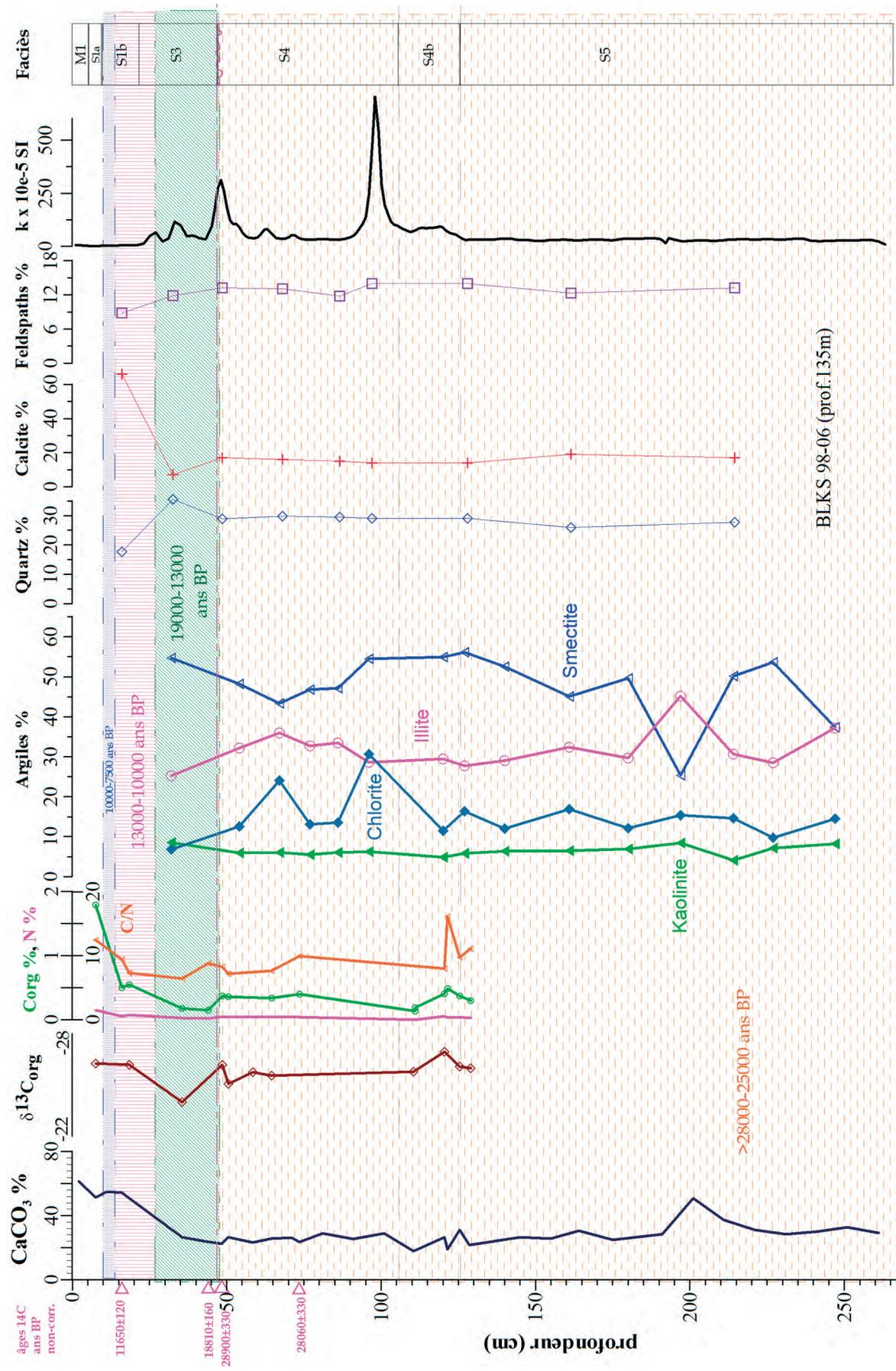


Fig.7.4. Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-06 et les intervalles de temps analysés dans le texte. Pour le code des couleurs des intervalles de temps voir la légende commune des figures 7.3 à 7.8

## Légende:



Légende pour les figures 7.3 à 7.8

La suggestion concernant la contamination des eaux de fond avec du H<sub>2</sub>S pourrait également être appuyée par nos données de magnétisme (greigite), tout comme la salinité des eaux serait indiquée par la matière organique provenant du phytoplancton estuarien-marin. **Cette possible contamination et la salinité seraient pourtant faibles, car nous n'avons ni de pyrite ni de paramètres isotopiques correspondant à l'état marin tel que nous le connaissons aujourd'hui.**

Contrairement à ce que Neprochnov, 1980 (cité dans Chepalyga, 1984) affirmait relativement à la présence de sapropèle dans cet intervalle, aucun sapropèle n'a pas été identifié pour cette tranche d'âge dans le matériel issu des missions BLASON et ASSEMBLAGE.

Pour résumer nous pouvons dire qu'autour de 28000 – 25000 ans B.P. il y avait un problème d'aération du sommet des sédiments et peut être aussi de la colonne d'eau (induisant des sulfures de fer et un manque de faune). Cette mauvaise aération est peut être due au niveau haut dans le bassin et à la stratification des eaux. Les isotopes, ainsi que la greigite avec éventuellement un peu de pyrite, **ne suggèrent pas de milieu marin - plutôt seulement un milieu un peu salé.**

L'intervalle suivant: de **25000 à 19000 ans BP** est inclus dans le stade glaciaire du Weichselien supérieur (Valdaï supérieur, OIS 2), 19000 ans BP correspondant au Dernier Maximum Glaciaire (LGM). Selon la courbe OIS, il s'agit d'une période de refroidissement du climat jusqu'à son maximum. Cette période correspond dans la Mer Noire au stade Tarkhankutien (25000-22000 ans BP) et à une partie du Karkinitien (22000-17780 ans BP) (voir la **Fig.7.1** et le **Tableau 2.2**) (selon Nevesskaya, 1967 et Scherbakov *et al.*, 1978 cité dans Chepalyga, 1984, Semenenko et Kovaliuk, 1973 cités dans Caraivan et Selaru, 1985). Le Tarkhankutien représente le début d'une régression marine avec une faune correspondante, tandis que le Karkinitien (partie inférieure du Néoeuxinien *sensu*

*lato*<sup>41</sup> selon Nevesskaya, 1967) contient une faune d'eau saumâtre avec peu d'éléments marins.

Cet intervalle de temps est représenté uniquement à la base des carottes profondes BLKS 98-11 (faciès S11) et BLKS 98-22 (faciès S12) (**Figs. 7.5 et 7.6**).

La partie inférieure de la carotte BLKS 98-22 contient une succession de 5,5 à 6 mètres de turbidites ayant un âge d'environ 24000 ans BP. La fin de cette succession est à ~110 cm (19200 ans B.P.) de profondeur. L'analyse de la *minéralogie des argiles* montre que la smectite est prédominante dans le sédiment. Les taux des *carbonates* ont une tendance de diminution du bas vers le haut de l'intervalle de profondeur, mais ils présentent de petites variations autour de la moyenne de 20%. Les plus importantes sont entre 330 et 220 cm, tout comme les variations des quantités d'argiles, de minéraux tels que les feldspaths, et aussi celles des paramètres magnétiques (dues ici à l'apparition de greigite). Pourtant, la présence des turbidites seule ne peut pas être l'unique explication de ces variations puisqu'elles sont étendues sur 5-6 m.

De grandes quantités de greigite pendant cet intervalle d'environ 24 000 ans B.P. suggèrent, comme au stade précédent, un milieu saumâtre et anaérobie, tandis que les variations des argiles et des carbonates pourraient refléter des conditions instables, à l'approche d'un changement environnemental (ou l'établissement de ce nouvel environnement lui-même). Les turbidites de la carotte BLKS 98-22, peuvent être expliquée par l'accumulation antérieure de quantités importantes de sédiments sur la pente continentale et leur déplacement vers la partie basse du bassin (sous forme des coulées gravitaires). Le changement des conditions hydrologiques du bassin, peut-être celui du niveau de l'eau, correspondant au début de la régression dont parlent Scherbakov *et al.* 1978, Nevesskaya, 1967 et Semenenko et Kovaliuk, 1973 (cités dans Caraivan et Selaru, 1985) aurait pu avoir comme résultat les variations des taux des carbonates et des argiles observées, puis enfin l'arrêt de ces turbidites à 19200 ans B.P.

La présence d'oxydes de fer (mais pas de sulfures) dans les carottes BLKS 98-11 et BLKS 9822, indique le changement des conditions environnementales: un possible radoucissement des eaux du bassin ainsi que sa bonne ventilation pendant cette période.

L'intervalle **19000-13000 ans BP**, représente la période entre le DMG et le début du glacial tardif ou Gothiglacial. Dans la Mer Noire, 13100 ans BP correspond au début du Néoeuxinien *s. stricto* (selon Nevesskaia, 1967 et Semenenko et Kovaliuk, 1973, dans Caraivan et Selaru, 1985).

Cette période est visible sur les *enregistrements sédimentaires* des carottes BLKS 98-06 (faciès S3), 09, 10, 11 et 22 (faciès S6 et S10) (**Figs.7.4, 7.7, 7.8, 7.5, 7.6**). Les *carbonates* en-

<sup>41</sup> Le début du stade *Néoeuxinien (s. lato)* varie beaucoup selon l'auteur, étant placé à 25000 ans BP par Ark'hangelskii et Strakhov (1932, 1938), à 23000 ou 22000 ans BP par Koreneva et Kartasova (1978) et Nevesskaia (1967), à 17780

registrent pour cette période des valeurs relativement faibles et constantes (autour de 20%) dans toutes les carottes<sup>42</sup>. Les valeurs de *carbone organique*, *azote* et *C/N* des carottes 6, 9 et 11 sont aussi faibles et constantes, tout comme celles de  $\delta^{13}\text{C}$  qui varient peu (autour de -26 ‰ dans les carottes 9 et 11, ce qui indique un **milieu lacustre**). Le  $\delta^{13}\text{C}$  de la carotte 6 présente une augmentation importante, jusqu'à -24,34‰ dans cette intervalle, mais le fait qu'il s'agisse uniquement d'un seul point analysé rend l'interprétation difficile. Les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  et *C/N* indiquent une matière organique issue des algues lacustres ou de phytoplancton caractéristique des zones estuariennes et des diatomées benthiques (dans le cas des carottes profondes). Les *paramètres magnétiques* indiquent la présence de quantités importantes de petits grains de greigite dans le cas de la carotte 06, ce qui se traduit par des pics dans la courbe de la susceptibilité magnétique et celles des autres paramètres magnétiques aussi. Au contraire, pour les carottes profondes, contenant de petites quantités de magnétite, les paramètres magnétiques ont des valeurs généralement faibles et constantes. Une exception est constituée par la présence d'un important pic de susceptibilité à ~18100-17300 ans BP dans la carotte 22. Ce pic peut être lié à certaines conditions locales générées par la proximité du système canal-levées du paléo-Danube (Popescu *et al.*, 2001, Popescu, 2002). Il faut se rappeler ici la position spéciale de cette carotte 22, qui est à côté d'un paléo-chenal du Danube.

Les *minéraux argileux* de la carotte 22 montrent un renversement clair en faveur de l'illite, il y a 19000-17800 ans, qui se superpose en partie avec un pic de susceptibilité magnétique (voir aussi la **figure 6.10** du chapitre argiles). Nous avons interprété ce changement comme étant dû à une influence prédominante des apports du Danube au moment du DGM, causé par l'étendue du permafrost discontinu jusqu'à la proximité de la côte nord de la Mer Noire. Pour le reste de l'intervalle, les argiles sont caractérisées par la prédominance de la smectite et de l'illite qui ont des proportions presque égales, autour de 40%. La kaolinite et la chlorite sont aussi présentes, avec des teneurs semblables mais autour de 10%. Ce changement, par rapport à l'inversion du type d'argile majoritaire enregistré autour de 19000-17800 ans BP, peut-être un indicateur important d'un changement des conditions environnementales, provoquant l'activation d'autres sources de smectite, telles que les rivières du nord du bassin, apportant davantage de sédiment après le dégel du sol. Malheureusement, cet intervalle de temps n'as pas pu être analysé en détail du point de vue des argiles, du fait de la quantité insuffisante de sédiment dans la carotte 06.

<sup>42</sup> Les taux de carbonates de la carotte 10 sont autour de 10% dû à la méthode différente de décarbonatation utilisé par Major *et al.*, 2002. Nous avons utilisé une méthode de décarbonatation lente, afin de ne pas hydrolyser la matière organique (voir aussi le chapitre 4), tandis que les auteurs cités plus haut ont utilisé une méthode 'classique' de décarbonatation rapide à l'acide fort.

Ostrovskiy, Izmailov, Schlegov *et al.*, 1977 et Scherbakov *et al.*, 1978 (dans Chepalyga, 1984) ont des arguments en faveur d'une régression du niveau du bassin jusqu'à -90 ÷ -110 m pendant le DGM. Quant à la connexion bidirectionnelle avec la Méditerranée, il y a deux opinions différents: certains auteurs pensent que cette connexion était interrompue du fait d'un niveau bas. A la suite de cet arrêt, la salinité de l'eau du bassin aurait diminué et le bassin contiendrait de l'eau saumâtre ou douce (Nevevskaya, 1965, Fedorov, 1978 dans Chepalyga, 1984). Toutefois d'autres auteurs pensent que même si le niveau de l'eau dans le bassin était bien en dessous du niveau du Bosphore (actuellement de -35 mètres), le bassin néoeuxien était toujours un bassin à travers lequel l'eau circulait ('flow-through basin'). Pour justifier ceci, il faut admettre une profondeur plus grande du Bosphore à cette époque, en considérant que les sédiments jeunes n'étaient pas encore en place. Chepalyga, 1984, a effectué un calcul du bilan hydrologique pendant cette période de temps. Il suppose que la diminution des températures a engendré celles de l'évaporation et de la précipitation dans le bassin par un facteur de 1,5 et une diminution de 40% des apports par les fleuves. Son calcul montre que à l'époque, un excès de 190 km<sup>3</sup> d'eau douce provenant de glaciers, des précipitations et des fleuves était déversé dans la Méditerranée. La plupart des auteurs pensent que la zone à hydrogène sulfuré n'existait pas dans le bassin Néoeuxien et que la salinité était faible, de 3 à 7‰.

Nos données indiquent qu'un niveau bas autour de 19000 ans est bien possible ; ce fait est suggéré par la discontinuité de sédimentation visible dans la carotte BLKS 98-06. Celle-ci s'est formée avant 18800 ans BP et a été suivie par la déposition d'un niveau sableux avec beaucoup de débris de coquilles. Le niveau bas pouvait être à plus de 100 m, étant donné que cette carotte se trouve à une profondeur de 135 m d'eau.

Le changement brusque du type de minéral argileux prédominant enregistré autour de 19000 ans BP indique probablement que, pendant le niveau le plus bas de la Mer, le Danube restait le principal fournisseur de sédiment au nord-ouest du bassin. Ensuite, une fois le dégel commencé, l'apport de smectite par d'autres fleuves du nord et nord-ouest mène à un équilibre des taux d'illite et de smectite dans le sédiment.

L'intervalle de temps **13000-10000 ans BP** est présent entièrement ou en partie dans toutes les carottes : BLKS 98-04, 06, 09, 10, 11 et 22, mais il est mieux représenté dans les carottes de la pente continentale : 10 et 11.

Dans les carottes peu profondes 04 et 06, les paramètres ne présentent pas de grosses variations à l'exception des taux des carbonates, qui augmentent en continu, et à l'exception de la susceptibilité magnétique qui présente un pic en début de l'intervalle (**Figs.7.3, 7.4**). La matière organique semble toujours d'origine algale lacustre (**Fig.7.3**).

Dans les carottes plus profondes, les courbes de carbonates enregistrent un pic important pendant cet intervalle

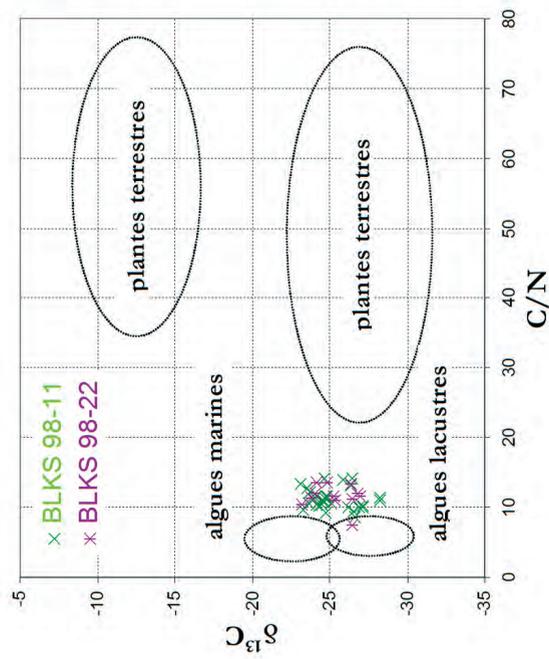
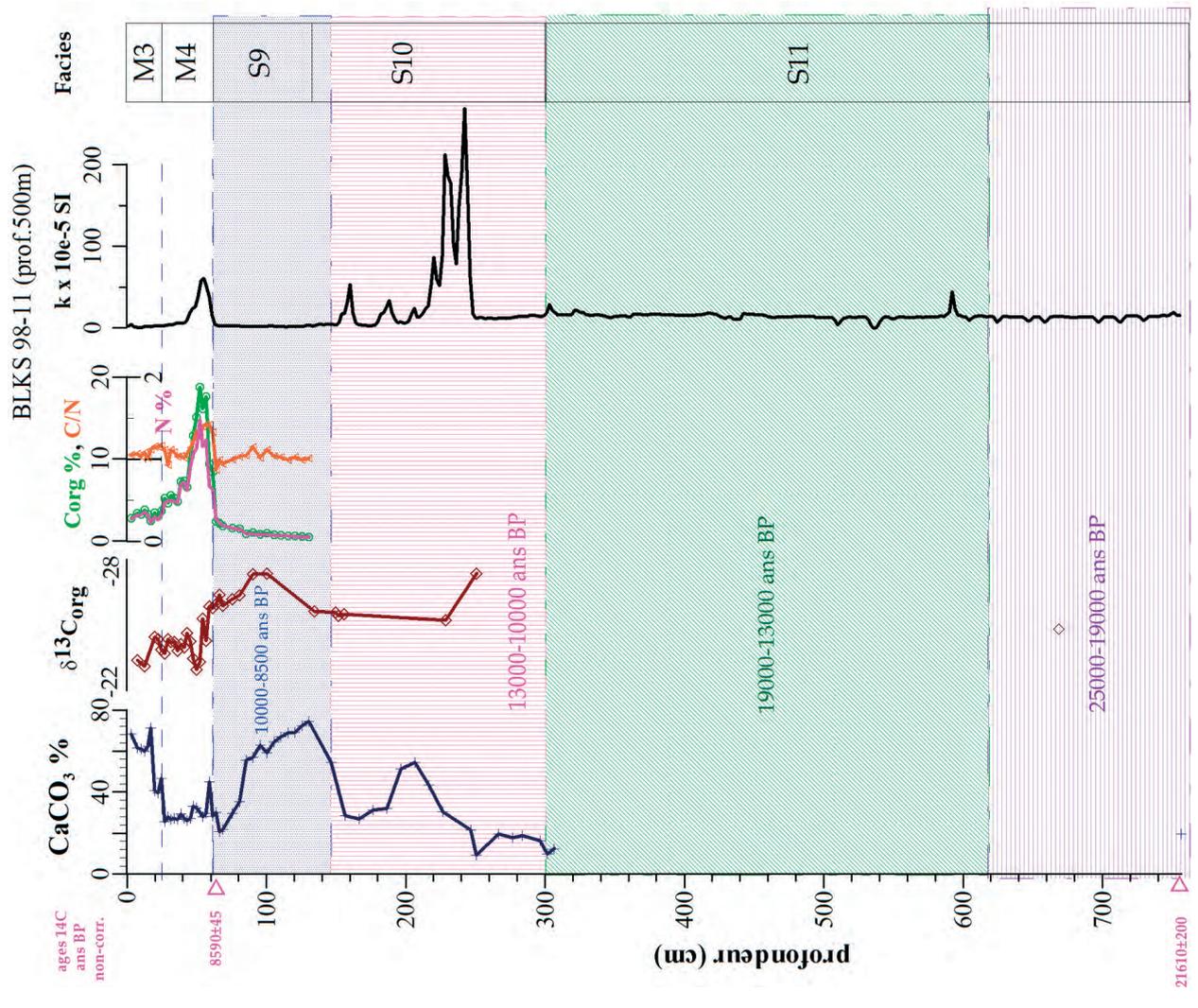


Fig.7.5. Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-11 et les intervalles de temps analysés dans le texte. Pour le code des couleurs des intervalles de temps voir la légende commune des figures 7.3 à 7.8

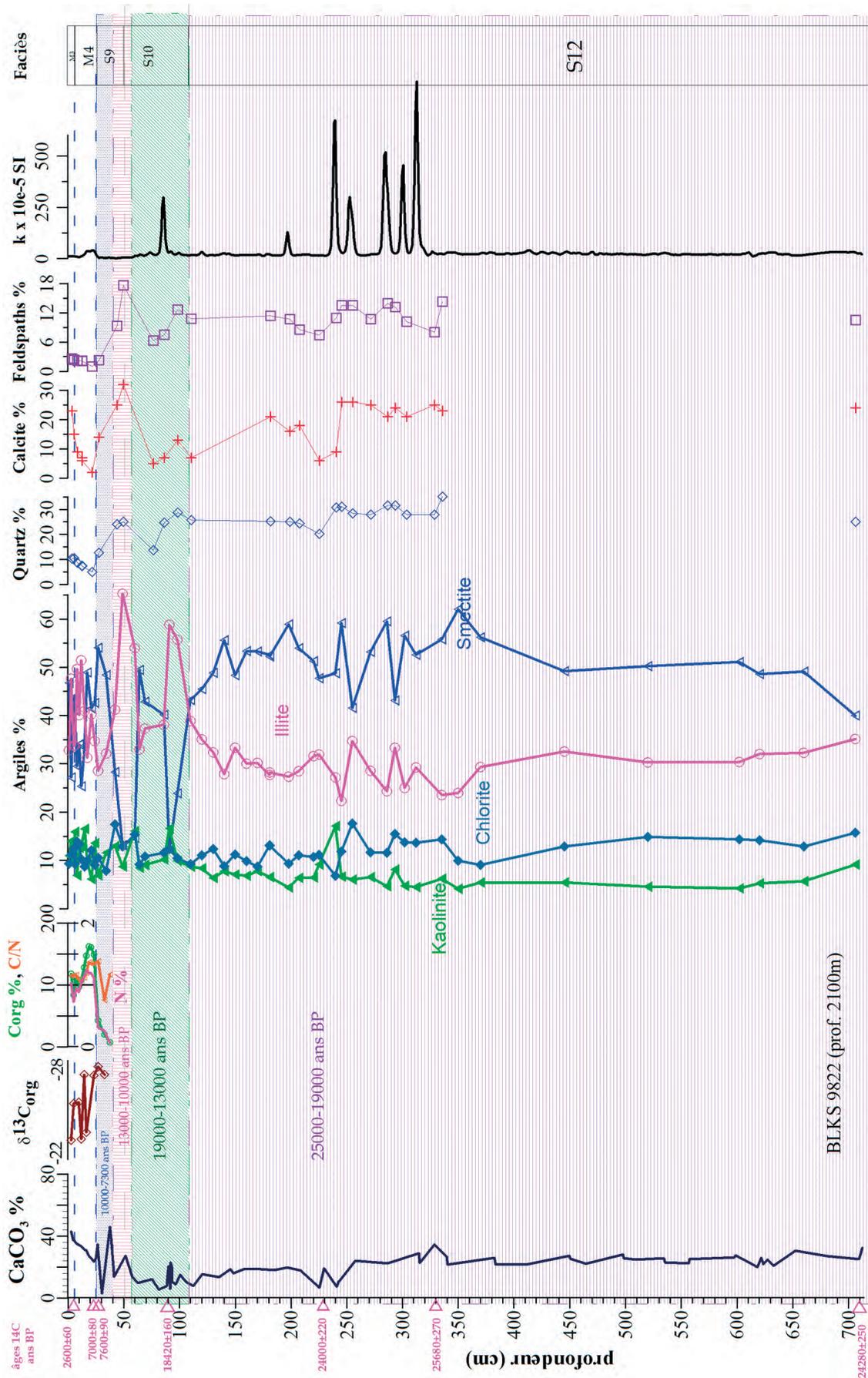
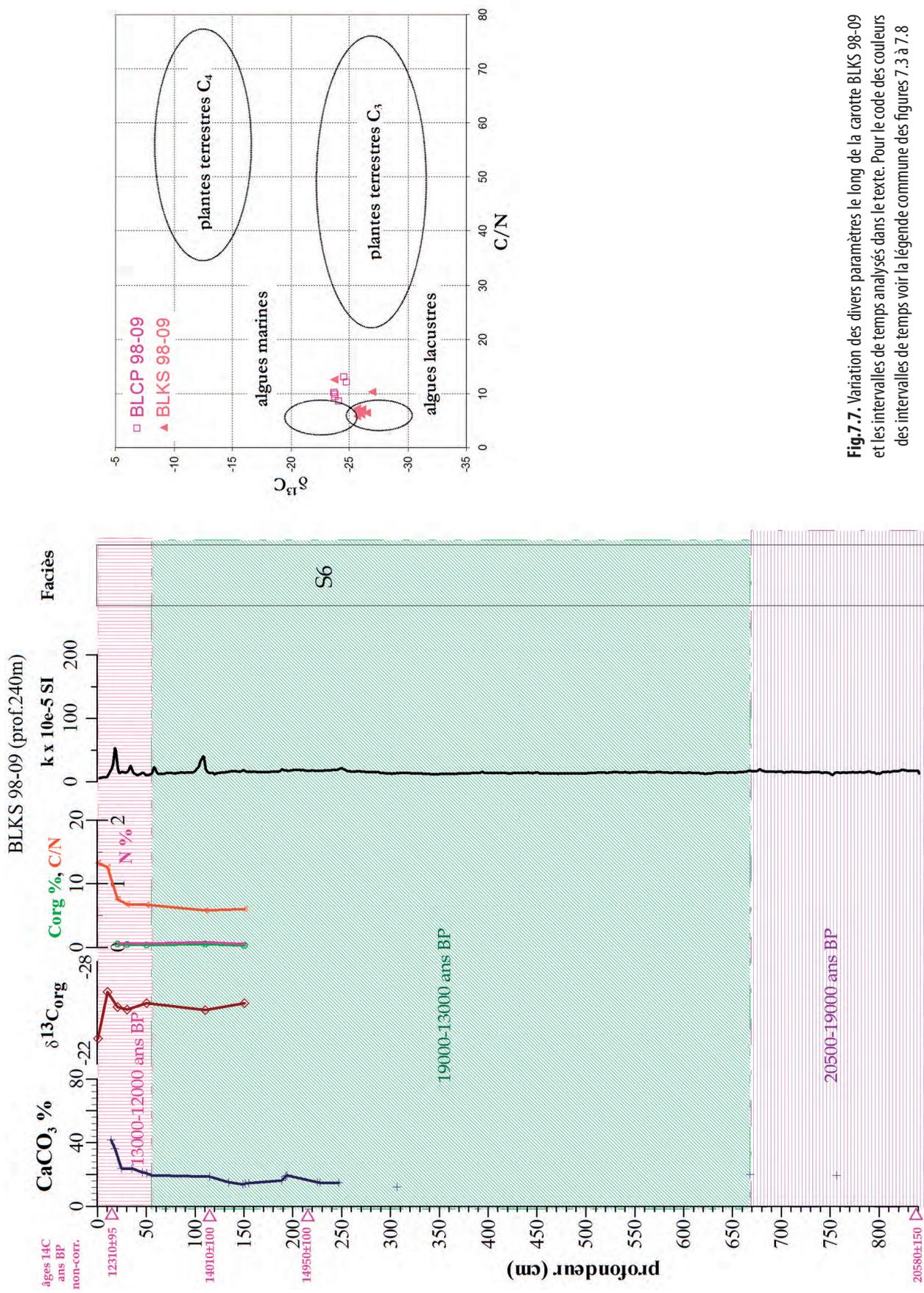
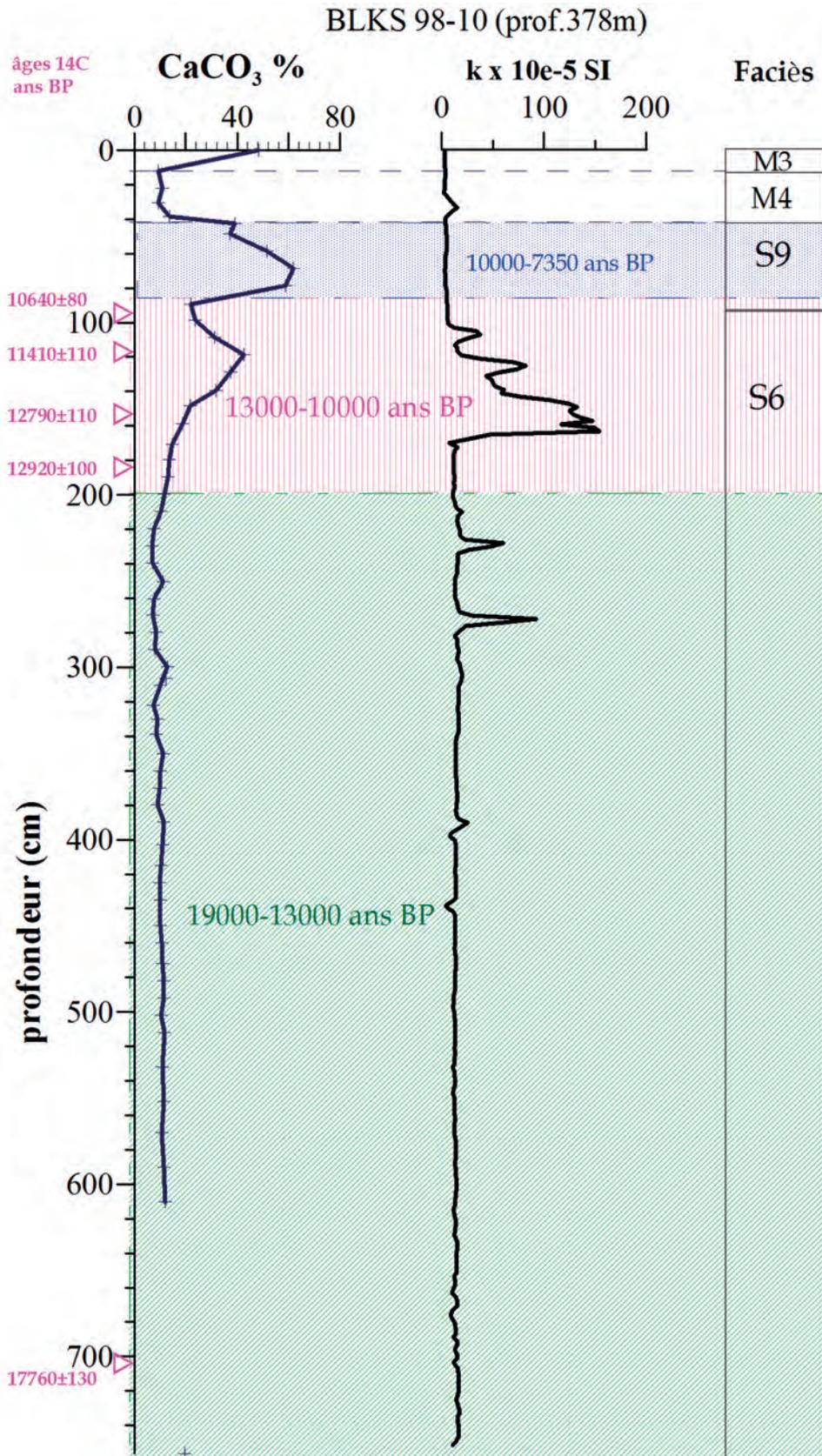


Fig. 7.6. Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-22 et les intervalles de temps analysés dans le texte. Pour le code des couleurs des intervalles de temps voir la légende commune des figures 7.3 à 7.8



**Fig.7.7.** Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-09 et les intervalles de temps analysés dans le texte. Pour le code des couleurs des intervalles de temps voir la légende commune des figures 7.3 à 7.8



**Fig.7.8.** Variation des divers paramètres le long de la carotte BLKS 98-10 et les intervalles de temps analysés dans le texte. Pour le code des couleurs des intervalles de temps voir la légende commune des figures 7.3 à 7.8

de temps et une diminution importante en fin de la période (**Figs. 7.5+7.8**). La susceptibilité magnétique est caractérisée par de grosses variations pendant cet intervalle, phénomène bien visible dans les carottes 10 et 11 (**Figs. 7.8 et 7.5**).

Le type d'argile dominante dans le sédiment change aussi, la courbe d'illite présentant un gros pic à environ 13000-11600 ans BP dans la carotte BLKS 98-22 (**Fig. 7.6**). Ceci peut-être une indication de l'augmentation de l'influence du Danube.

Les variations des paramètres enregistrent le **réchauffement du climat pendant le Bølling-Allerød** qui provoque un **réchauffement des eaux** de mer et en conséquence la précipitation de quantités plus grandes de carbonates, suivi par le **refroidissement du Younger Dryas**, lequel se traduit par la diminution des carbonates dans le sédiment. Les grandes quantités de greigite et une faible présence de la faune suggèrent l'installation de conditions de mauvaise ventilation du bassin et peut être aussi du sommet des sédiments. L'origine de la matière organique indique un milieu **lacustre**.

Dans la Mer Noire, l'intervalle en question, correspond à la fin du Néoeuxinien selon Koreneva et Kartasova, 1978 ou au Néoeuxinien *s. stricto* selon Nevesskaya, 1967 et Semenenko et Kovaliuk, 1973 (dans Caraivan et Selaru, 1985). Scherbakov *et al.*, 1978 et Scherbakov et Babak, 1979 considèrent cette période comme étant celle du Néoeuxinien moyen.

L'Holocène inférieur, entre **10000 ans BP et 8500-7300 ans BP** (jusqu'au début du premier faciès marin), correspond aux stades Preboréal et Boréal et, selon la plupart des auteurs, au final du Néoeuxinien dans la Mer Noire.

Cet intervalle est mieux représenté dans les carottes profondes que dans celles situées près de la côte. Dans les carottes moins profondes BLKS 98-04 et 06 il correspond à la partie supérieure du faciès S1b (**Figs. 7.3 et 7.4**), tandis que dans les carottes plus profondes tels que BLKS 98-10, 11 et 22 est représenté par le faciès S9 (**Figs. 7.8, 7.5 et 7.6**).

Pour toutes les carottes, la susceptibilité magnétique est très faible et constante. Dans les carottes profondes, les courbes de carbonates enregistrent un pic important et le  $\delta^{13}\text{C}$  une diminution importante jusqu'à  $-27\div -28\%$ . Ceci suggère une précipitation accrue des carbonates et une augmentation de la productivité dans les eaux de surface, probablement due aux **conditions climatiques favorables** à la vie aquatique. Les valeurs de carbone organique et d'azote sont faibles et le rapport C/N est autour de 10, caractéristique, à côté des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$ , pour le phytoplancton d'eau douce. Néanmoins, une influence des plantes vasculaires flottantes n'est pas exclue (voir discussion dans le chapitre 4.5).

Les paramètres analysés montrent que l'intervalle en question était caractérisé par un **climat chaud et l'eau du bassin de la Mer Noire** était toujours **douce**. A la fin de cet intervalle, une diminution importante de la quantité de carbonates observé sur les courbes des carottes 11 et 22 peut correspondre au refroidissement d'il y a environ 8200 ans

(ans calendaire) mentionnée dans diverses parties d'Europe (i.e. Magny *et al.*, 2003 in Bahr *et al.*, 2005).

L'histoire des changements environnementaux dans le bassin de la Mer Noire dans l'**intervalle 8500-7300 ans BP jusqu'à l'actuel** est assez bien connue par les études antérieures (i.e. Degens et Ross, 1970 ; Ross et Degens, 1974 ; Hay *et al.*, 1991 ; Arthur *et al.*, 1994 ; Jones et Gagnon, 1994 ; Arthur et Dean, 1998). La salinisation des eaux et l'installation de l'anoxie dans les eaux de fond sont prouvées par l'apparition et la préservation du sapropèle, témoin d'une productivité dans les eaux de surface et par la déposition des sédiments laminés à coccolites, témoins d'une salinité plus grande que 11 ‰ (Arthur et Dean, 1998).

## 7.2 ENREGISTREMENTS DES VARIATIONS DU NIVEAU DE LA MER NOIRE DANS LES SÉDIMENTS DE LA PLATE-FORME DU NORD-OUEST

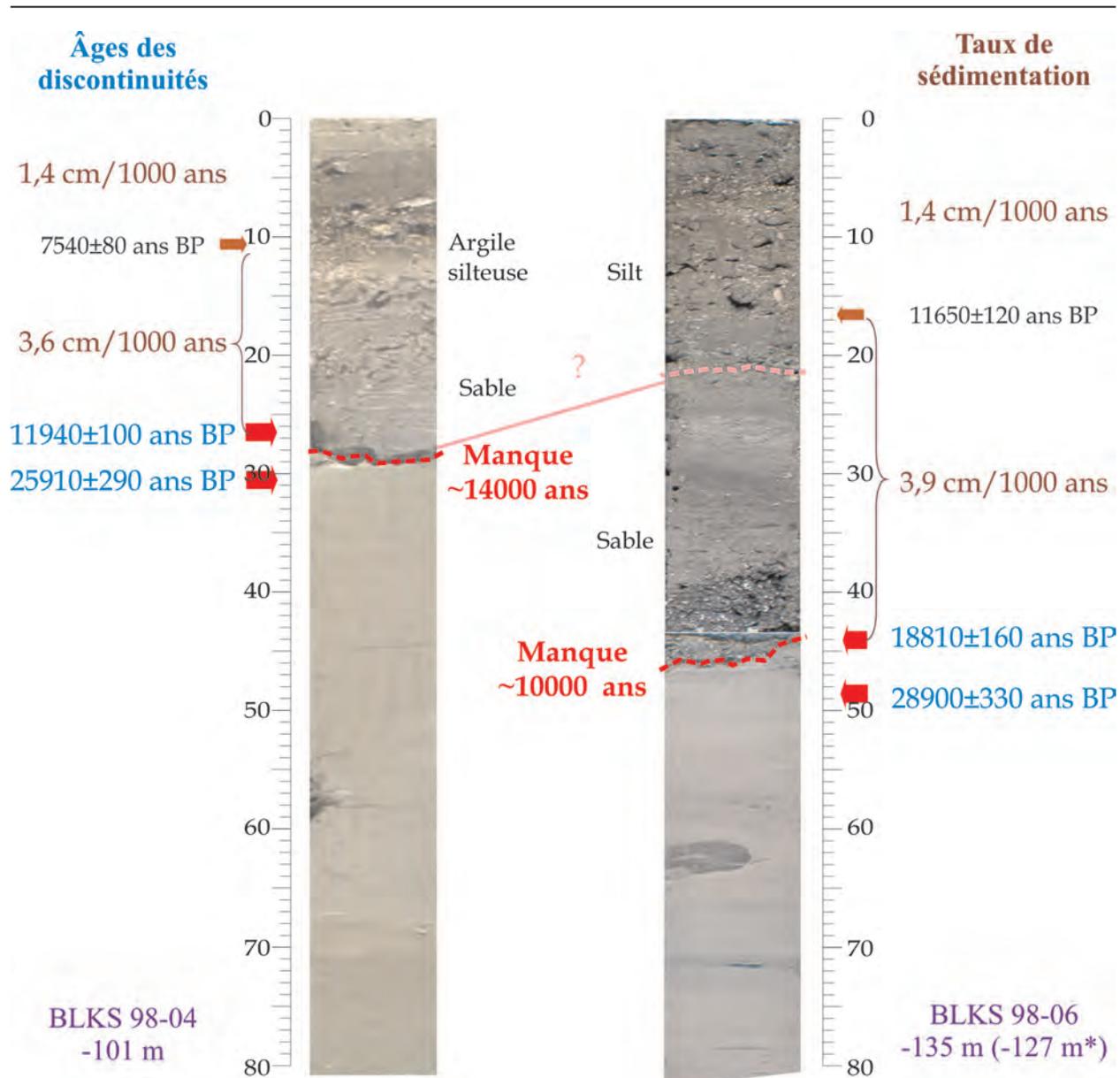
Nous avons pu obtenir des informations sur de possibles niveaux bas de l'eau dans le bassin.

La présence des discontinuités de sédimentation, les changements brutaux de la lithologie, de la minéralogie des argiles et d'autres paramètres sont visibles dans les carottes peu profondes provenant de la plateforme continentale. Ils marquent des niveaux bas de l'eau dans le bassin. Toutefois, il est possible que ces discontinuités marquent des changements de la position du dépo-centre de la sédimentation, depuis le DMG.

Les dates  $^{14}\text{C}$  obtenues confirment les discontinuités de sédimentation dans les carottes BLKS 98-06 et BLKS 98-04 (**Fig. 7.9**). Ces deux carottes, sont situés à  $-135\text{ m}$  et à  $-100\text{ m}$  respectivement. Pour la carotte 06, nous avons corrigé sa profondeur de 8 mètres, du fait de la tectonique récente, selon les failles identifiées sur le profil sismique « HR-24 traces » (voir la **figure 2.2**). La profondeur de cette carotte est donc, plus probablement, de  $-127\text{ m}$ .

Les lacunes de sédimentation sont comprises entre 28900 et 18800 ans BP dans la carotte 06 d'une part et entre 25900 et 11900 ans BP dans la carotte 04 d'autre part. Ainsi les redépôts à  $-127\text{ m}$  de profondeur il y a 18800 ans, et à  $-100\text{ m}$  il y a 11900 ans, marquent probablement l'augmentation du niveau de la mer.

Dans la partie profonde du bassin (BLKS 98-22 à 2100 m de profondeur), les variations des minéraux argileux montrent des 'inversions' (shifts) smectite-illite à :  $\sim 19000-18000$  ans BP et à  $13600-11600$  ans BP (**Fig. 7.10**). Si le pulse d'il y a  $13600-11600$  ans peut être attribué au réchauffement du climat caractéristique aux stades Bølling-Allerød et à un apport plus abondant des sédiments et des eaux par le Danube à cette époque, le pulse d'il y a  $19000-18000$  ans BP ne peut pas être attribué au réchauffement du climat parce qu'on se trouve au DMG. On l'a attribué au fait qu'à cette période, l'étendue du permafrost était maximale, jusqu'au nord du bassin de la Mer Noire (Peulvast *et al.*, 2000), et que le seul fleuve qui pouvait



**Fig.7.9.** Âges des discontinuités et taux de sédimentation dans les carottes de plateforme continentale BLKS 98-04 et BLKS 98-06. \*Profondeur de la carotte corrigée pour la tectonique, selon le profil sismique

encore apporter des quantités importantes du sédiment était le Danube qui pouvait aussi recevoir les eaux de fonte des dômes alpins<sup>43</sup>.

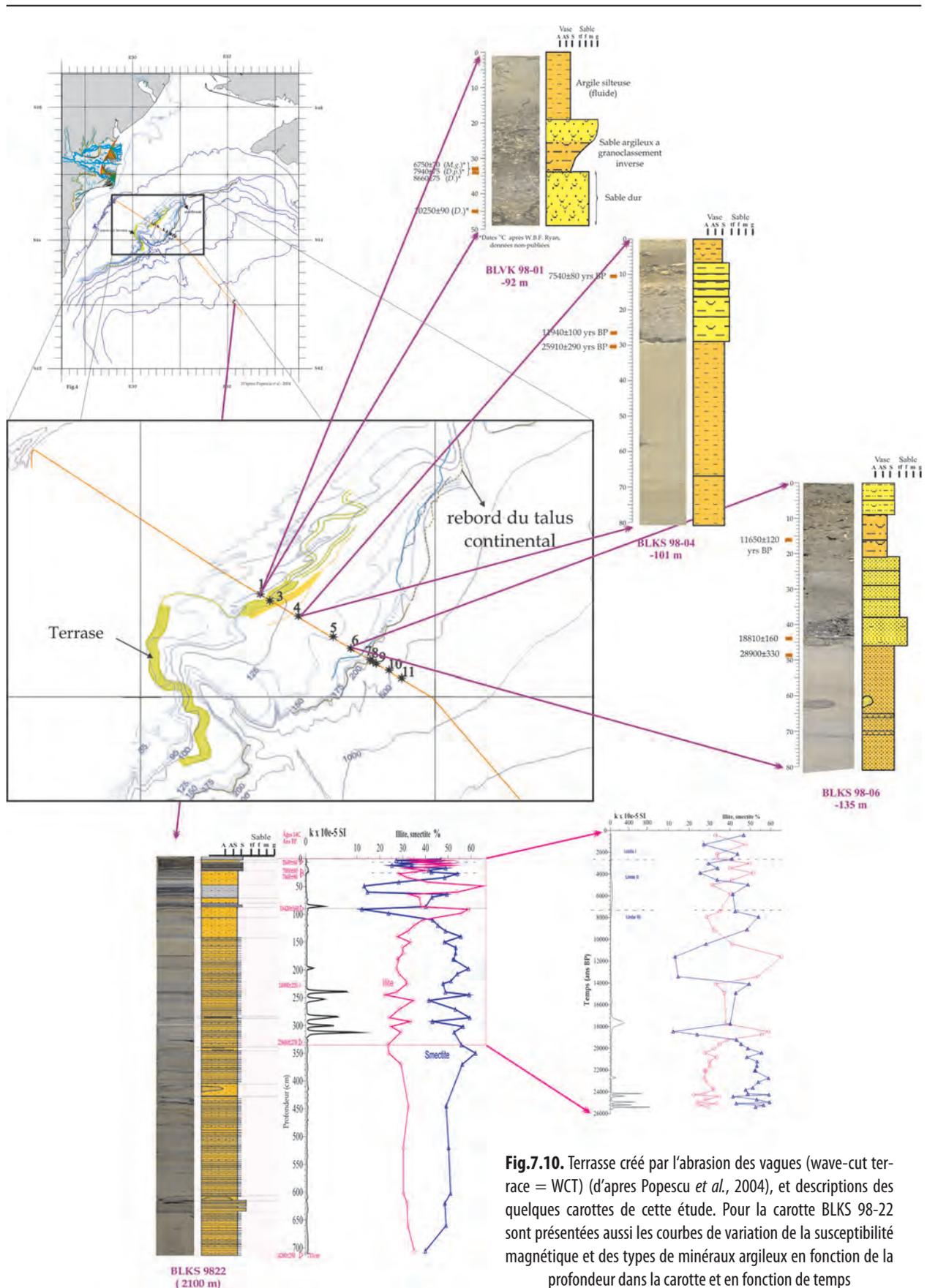
Ces 'inversions', correspondantes aux pics de l'illite ont donc été attribuées aux pulses d'activité du Danube et elles interviennent aussi aux moments de reprise de la sédimentation dans les carottes peu profondes.

Nos données suggèrent la présence d'un niveau d'eau à -130 m par rapport à l'actuel durant le dernier maximum glaciaire. Sa remontée débiterait déjà vers 19000-18000 ans B.P. Autour de ~12000 ans, le niveau atteint environs -100 m. Ce

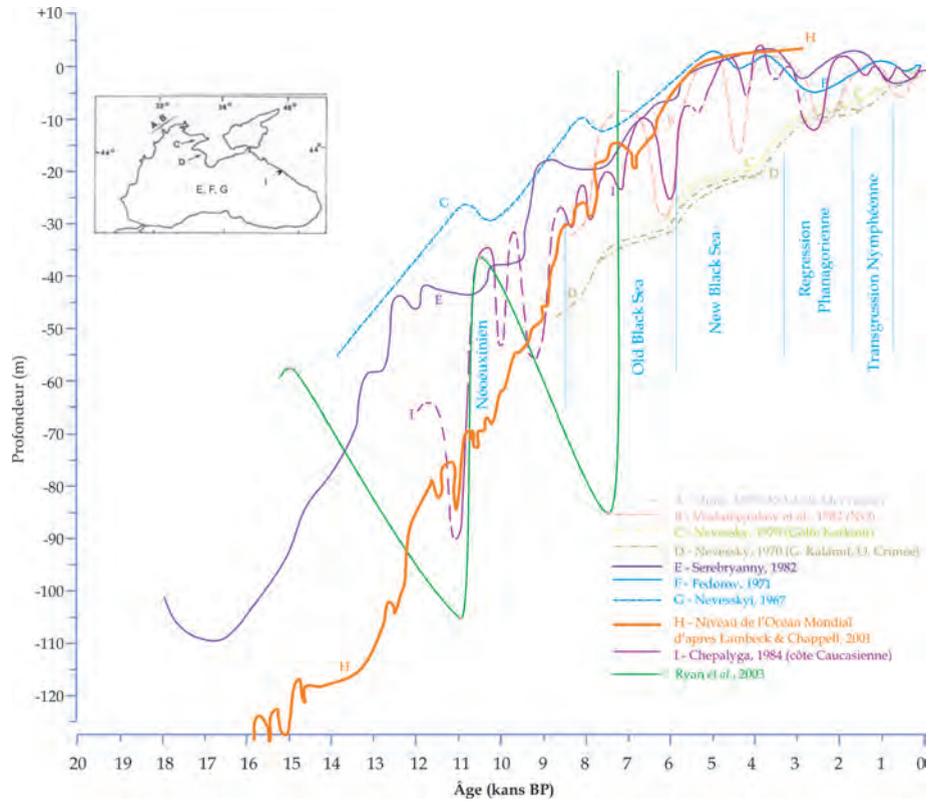
<sup>43</sup> retraite des dômes alpins pendant l'intervalle 17700-17300 ans BP calibrés in Denton *et al.*, 1999

niveau (-110 - -90 m) a aussi été identifié sur les profils sismiques de la zone étudiée (Fig.7.10) (Popescu, 2002 ; Popescu *et al.*, 2004). Il correspond à une terrasse créée par l'abrasion des vagues (wave-cut terrace = WCT). Les carottes BLKS 98-04 et BLVK 98-01 (92 m de profondeur) sont situées près de celle-ci. Dans la carotte BLVK 98-01, un niveau de sable dur confirme la proximité de la ligne de côte, il a été daté à 10250±90 ans BP (W.B.F. Ryan, données non publiées).

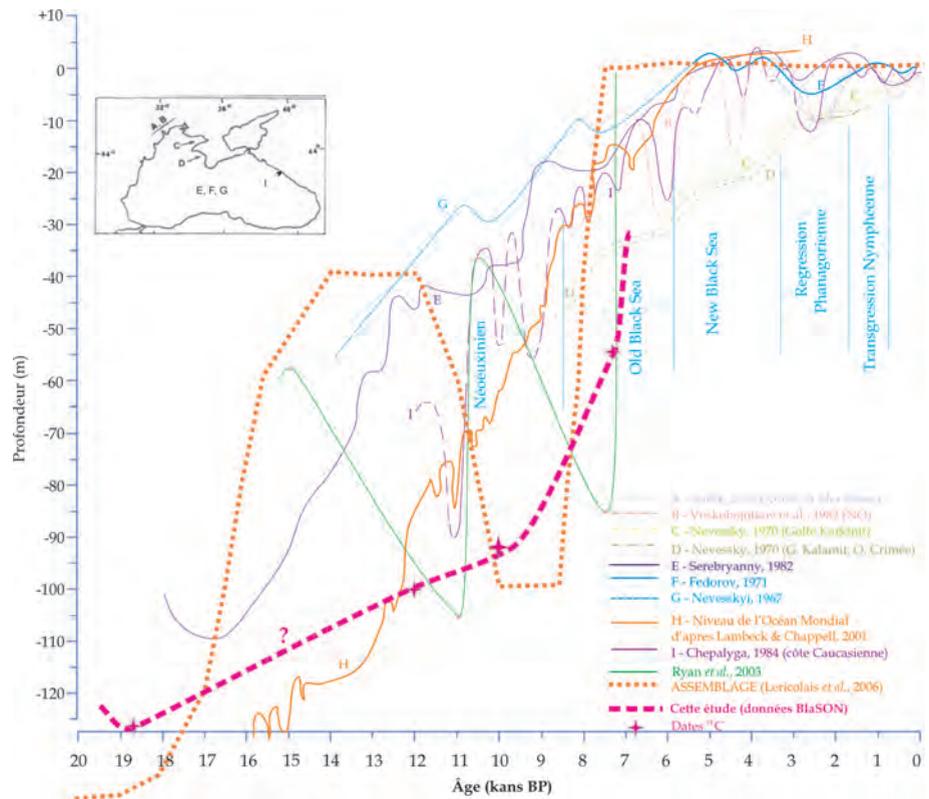
La discontinuité présente à environs -130 m de profondeur n'est pas confirmée par la sismique. Nous ne pouvons pas exclure, qu'elle a pu être formée à la suite d'un changement de la position du dépointe du Danube.



**Fig.7.10.** Terrasse créé par l'abrasion des vagues (wave-cut terrace = WCT) (d'après Popescu *et al.*, 2004), et descriptions des quelques carottes de cette étude. Pour la carotte BLKS 98-22 sont présentées aussi les courbes de variation de la susceptibilité magnétique et des types de minéraux argileux en fonction de la profondeur dans la carotte et en fonction de temps



a



b

**Fig.7.11.** Courbes de variation du niveau de la Mer Noire et de l'Océan Mondial pendant les derniers 19000 ans. a) dans la littérature (nous avons choisi en principal les courbes pour la partie nord-ouest du bassin, à l'exception de ceux de Serebryanny (1982), Fedorov (1971) et Neveskiy (1967) qui représentent des compilations des données des différents zones autour du bassin) ; b) courbes issus du programme ASSEMBLAGE (Lericolais et les partenaires ASSEMBLAGE, 2006) et de cet étude

---

**Le niveau bas enregistré dans nos carottes semble plus grand que celles calculées antérieurement autour du bassin.** Il faut noter quand même que ces amplitudes sont très différents d'une zone à l'autre, et d'un auteur à l'autre, du fait d'une tectonique différente dans les zones montagneuses (telles que le Caucase et l'Anatolie) et dans les zones plus basses et plus stables. Peuvent intervenir aussi les différents critères utilisés par chaque auteur pour calculer le niveau de la mer. Sur la **figure 7.11a** sont présentées les courbes de variation du niveau de la Mer Noire selon quelques auteurs, en principe pour la partie nord-ouest du bassin. On peut les comparer avec la courbe de variation de l'océan mondial de Lambeck et Chappell, 2001.

Les variations du niveau de la Mer Noire que nous proposons, ainsi que celles proposées à l'issue du programme ASSEMBLAGE (Lericolais, G. and Assemblage partners, 2006) dont ce travail fait partie, sont marquées sur la **figure 7.11b**.

Les deux courbes montrent le niveau bas autour de -130 mètres vers 19000 ans. Ensuite, sur la figure finale d'ASSEMBLAGE, est marquée la montée des eaux pour atteindre -40 mètres entre 14000 et 12000 ans, suivie de la baisse du niveau jusqu'à -100 mètres autour de 10000 et 8500 ans. Dans notre travail nous marquons le niveau d'eau à ~-100 mètres déjà vers 12000 ans (d'après la carotte BLKS 98-04), ensuite à ~-90 mètres autour de 10000 ans. Puisque nous n'avons pas de données nous indiquant clairement l'évolution du niveau d'eau entre 19000 et 12000 ans, nous avons marqué sa montée progressive. Cependant il se peut que le niveau d'eau changeait à un autre rythme suite à la fonte des glaces, et qu'autour de 14000 ans il était plus haut qu'à -100 mètres. Ceci est exprimé sur la courbe d'Assemblage.

L'arrivée de l'eau saline depuis la Méditerranée, marquée par le sapropèle, est enregistrée dans notre travail après ~7600 ans (d'après les datations dans la carotte BLKS 98-22).

---

## CHAPITRE 8 CONCLUSIONS

Du fait de la diversité des analyses effectuées, un chapitre d'interprétation synthétique (ch. 7) à été nécessaire.

Les nombreuses analyses effectuées, sur les sédiments des carottes, nous ont permis de montrer que les propriétés de la matière organique des sédiments, leurs propriétés magnétiques en corrélation avec les taux de carbonates et de divers minéraux argileux, reflètent certains aspects des variations climatiques et environnementales dans le bassin de la Mer Noire.

Ces analyses, couplées à des datations  $^{14}\text{C}$ , permettent de proposer une reconstitution des conditions de milieux au cours des derniers 28000 ans. Les aspects pris en compte sont : l'évolution de la paléo-activité du Danube, les variations du niveau et de la salinité de l'eau, l'oxygénation de l'eau et du sédiment, les sources des argiles (smectite/illite) dans la partie nord-occidentale du bassin.

### 1. LA CHRONOLOGIE

La chronologie des sédiments, obtenue à l'aide de datations  $^{14}\text{C}$  de la matière organique et de coquilles nous a montré que l'application des corrections sur les données  $^{14}\text{C}$  reste difficile dans le cas d'un bassin contenant parfois de l'eau douce oxygénée, parfois de l'eau stratifiée. Néanmoins, l'étude des taux des carbonates le long des carottes, nous a permis aussi de modifier l'échelle chronologique présentée. Celle-ci ne tient pas compte de correction en fonction d'âge réservoir.

### 2. SOURCE DES SÉDIMENTS À SMECTITE DANS LA PARTIE NORD-OUEST DU BASSIN

L'étude des minéraux argileux de sédiments nous a démontré que, au moins pour le nord-ouest du bassin, l'origine des sédiments à smectite doit être cherchée au nord du bassin et non pas au sud.

En effet, dans deux carottes étudiées, une à 135 mètres (127 m en profondeur corrigé) et l'autre à 2100 mètres, le minéral argileux prédominant est la smectite. Du fait de leurs positions géographiques, aucune de ces carottes ne pouvait recevoir de sédiments provenant de l'Anatolie: l'une est

trop peu profonde et l'autre se trouve près d'un chenal du système chenal-levées du paléo-Danube (décrit par Popescu *et al.*, 2001). Cette dernière carotte était donc alimentée pendant les périodes d'activité du canyon Viteaz. L'hypothèse des auteurs antérieurs sur une provenance méridionale des sédiments à smectite de la Mer Noire est infirmée, au moins pour la partie nord-ouest du bassin.

### 3. L'ACTIVITÉ DU DANUBE DANS LE PASSÉ

Avant cette étude il n'y avait pas de repères temporels pour les périodes d'activité du Danube. Grâce aux datations  $^{14}\text{C}$  effectués et à l'étude des minéraux argileux, nous avons pu mettre en évidence: une activité accrue du fleuve il y a 19000 ans et aussi à 13000 ans. Ce qui est indiquée par les fortes quantités d'illite présentes dans le sédiment à ces âges.

### 4. VARIATIONS DU NIVEAU DE LA MER

Un niveau bas à environs -90 ÷ -110 mètres de profondeur est mis en évidence dans des carottes de la partie peu profonde du bassin; il est confirmé par des profils sismiques (Popescu *et al.*, 2004). Dans une carotte située à 100 m de profondeur, il est daté à environs à 12000 ans B.P. et dans une autre carotte à 92 mètres, il est daté à ~10000 ans. Un autre niveau bas, à environs - 130 m est suggéré autours de 19000 ans B.P.

### 5. RECONSTITUTION DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DANS LE BASSIN DE LA MER NOIRE PENDANT LES DERNIERS 28000 ANS

Dans l'intervalle de temps entre 28000 ans BP et jusqu'à 25000 ans, les conditions environnementales du bassin étaient peu changeantes. L'eau du bassin était marine selon certains auteurs ou plutôt saumâtre et mal oxygéné. Cette mauvaise ventilation conduit à proposer l'existence d'un niveau haut dans le bassin, avec une éventuelle stratification des eaux, conduisant à l'anoxie des eaux de fond à 127 mètres (correspondant à la profondeur corrigée pour les mouvements tectoniques de la carotte BLKS 98-06).

---

Entre 25000 et 19000 ans BP, se produit le refroidissement du climat jusqu'au Dernier Maximum Glaciaire (DMG) il y a 19000 ans BP. La salinité de l'eau du bassin de la Mer Noire était *très réduite*. La présence des turbidites datés à 24000-25000 ans BP dans les carottes profondes, indique soit une période d'activité du système chenal levée relié au canyon Viteaz (Popescu *et al.*, 2001; Popescu, 2002), probablement due à un niveau bas de l'eau du bassin, soit la coulée d'une accumulation des sédiments de la pente continentale suite à leur déstabilisation par la gravitation et, éventuellement, par le changement du niveau de l'eau dans le bassin.

Le sédiment des carottes profondes contient de la smectite prédominante. *Au moment du DMG*, l'illite devient prédominante, indiquant un *apport renforcé des sédiments par le Danube*. La présence des 'épisodes' riches en greigite indique des *moments d'anoxie* dans le sédiment et éventuellement dans la colonne d'eau, tandis que les propriétés magnétiques, les argiles et les carbonates permettent d'envisager un *passage marin-saumâtre dans l'intervalle 25000-24000 ans BP*. Le radoucissement des eaux du bassin est indiqué dans l'intervalle 21600-19000 ans BP par la présence de matière organique d'origine algale et du phytoplancton d'eau douce.

Après le DMG, **entre 19000 et 13000 ans BP**, le milieu était lacustre dans la Mer Noire. Entre 19000 et 17800 ans, un apport important de sédiments apporté par le Danube (dominance d'illite) est enregistré. Ceci peut être dû à la débâcle des glaciers alpins et/ou au fait que les sources des sédiments au nord riches en smectite (transportée par le Dniepr et le Dniestr) sont probablement bloquées à cause du permafrost discontinu. Après 17800 ans BP, le dégel des régions du nord du bassin serait enregistré à travers l'apparition de plus grandes quantités de smectite. Cette période se caractérise aussi par une bonne ventilation des eaux du bassin.

L'intervalle **13000-10000 ans BP** est caractérisé par un milieu lacustre, un *climat relativement chaud*, favorable à la précipitation des carbonates, et un *apport accru du Danube entre 13000 et 11600 ans* (stades Bølling et Allerød). La diminution de la quantité de carbonates qui succède, (de 11000 à 10000 ans BP), est certainement liée au *refroidissement du Younger Dryas*. Cette période se caractérise aussi par une oxygénation restreinte des sédiments (mauvaise ventilation des eaux du bassin).

**Entre 10000 et 7300 ans BP**, les stades Préboréal et Boréal ou le final du stade Néoeuxinien dans la Mer Noire, sont caractérisés par un *climat chaud*, marqué par la précipitation accrue de carbonates et par l'augmentation de la productivité dans les eaux de surface déduite des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$ . L'étude de la matière organique montre que l'eau du bassin était *douce*. Une diminution de la quantité des carbonates vers la fin de cette période peut indiquer le refroidissement du climat d'il y a 8200 ans, observé dans plusieurs endroits de l'Europe (i.e. Magny *et al.*, 2003 in Bahr *et al.*, 2005).

Les **derniers 7300 ans** sont caractérisés par des conditions marines dans le bassin de la Mer Noire et les conditions anoxiques même dans la colonne d'eau.

Cette étude nous a clarifié beaucoup d'aspects de l'histoire récente de la Mer Noire, mais il nous a posé aussi des questions qui formeront la suite de ce travail. En perspective, on envisage éclaircir le problème des corrections d'âges  $^{14}\text{C}$  pour le bassin de la Mer Noire en fonction du type de milieu présent dans divers périodes de temps et de continuer l'amélioration de la chronologie des sédiments. L'étude plus détaillée de la succession des périodes oxiques-anoxiques, des sources de smectite, de changements de la salinité et aussi des changements de niveaux dans le bassin en fonction des connexions avec la Méditerranée, sera une continuation nécessaire de ce travail.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- AKSU, A.E., R.N. HISCOTT, D. YASAR, F.I. ISLER, S. MARSH, 2002. Seismic stratigraphy of Late Quaternary deposits from the southwestern Black Sea shelf: evidence for non-catastrophic variations in sea-level during the last ~10 000 yr. *Marine Geology*, **190**(1-2): 61-94.
- ALEKSINA, I.A., KOROLEV, YU.M., YEDIGARYAN, Z.P. (1972). Clay minerals in Late Quaternary deposits of the Sea of Azov. *Oceanology* **12**: 83-137.
- ALMAZOV, A. A., BONDAR, C., DIACONU, C., GHEDERIM, V., MIHAILOV, A.N., MITA, P., NICHIFOROV, I.D., RAI, I.A., RODIONOV, N.A., STANESCU, S., STANESCU, V., VAGHIN, N.F. (1963). *Zona de varsare a Dunarii, Morfografie hidrologica*. Editura tehnica, Bucuresti.
- AMMAN, B., LOTTER, A.F. (1989). Late-Glacial radiocarbon and palynostratigraphy on the Swiss Plateau. *Boreas*, **18**: 109-126.
- ANDERSON, B.G., BORNIS, H.W. (1997). The ice age world. Scandinavian University Press, Oslo.
- ANDRÉ, F. (1999). Vers une meilleure compréhension de la dernière transgression marine en Mer Noire (mission BLASON 1998). Rapport D.E.A., Universités de Lille et Paris-Sud Orsay. *Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement*. Gif-sur-Yvette: 65p.+ 4 annexes.
- ARKHANGEL'SKIY, A. D., STRAKHOV, N.M. (1938). Geology and evolution of the Black Sea. Izd. An. USSR, 200 p.
- ARKHIPOV, S. A., EHLERS, J., JOHNSON, R.G., WRIGHT, H.E. JR. (1995). "Glacial drainage towards the Mediterranean during the Middle and Late Pleistocene." *Boreas* **24**: 196-206.
- ARNOLD, M., BARD, E., MAURICE, P., DUPLESSY, J.-C. (1987). <sup>14</sup>C dating with the Gif-sur-Yvette Tandemron accelerator: status report. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. B*, **29**: 120-123.
- ARTHUR, M. A., DEAN, W.E. (1998). "Organic-matter production and preservation and evolution of anoxia in the Holocene Black Sea." *Paleoceanography* **13**(4): 395-411.
- ARTHUR, M. A., DEAN, W.E., NEFF, E.D., HAY, B.J., KING, J., JONES, G. (1994). "Varve calibrated records over the last 2000 years in the Black Sea." *Global Biogeochemical Cycles* **8**(2): 195-217.
- ASTAKHOV, V. (1992). The last glaciation in West Siberia. *Sveriges Geologiska Undersökning Ca* **81**, 21-30.
- ASTAKHOV, V. (1993). Problema polednego oledeneniya Zapadnoi Sibiri (Problem of the last glaciation of West Siberia). In : Velichko, A.A. (ed.), *Razvitiye landshaftov I klimata Zevernoy Evrazii* (Evolution of Landscapes and Climates of Northern Eurasia), 41-44, Nauka, Moscow.
- ATANASSOVA, J. (1995). "Dinoflagellate cysts of Late Quaternary and recent sediments from the western Black Sea." *Annual of the University of Sofia „St. Kliment Ohridski“* **87**(Book 2 - Botany): 17-28.
- ATANASSOVA, J., BOZILOVA, E. (1992). Palynological investigation of marine sediments from the western sector of the Black Sea. *Okeanologia* **1**: 97-103.
- BAHR, A., LAMY, F., HELGE, A., HOLGER, K., GEROLD, W. (2005). "Late glacial to Holocene climate and sedimentation history in the NW Black Sea." *Marine Geology* **214**(4): 309-322.
- BALLARD, R. D., COLEMAN, D.F., ROSENBERG, G.D. (2000). "Further evidence of abrupt Holocene drowning of the Black sea shelf." *Marine Geology* **170**(Letter Section): 253-261.
- BARD, E., HAMELIN, B., FAIRBANKS, R.G., ZINDLER, A. (1990). "Calibration of the <sup>14</sup>C timescale over the past 30,000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals." *Nature* **345**(31 May 1990): 405-410.
- BELOGORSKAYA, E.V., KONDRATYEVA, T.M. (1965). Phytoplankton distribution in the Black Sea. In: Vodjanitski, V.A. (ed.) – Planktonic investigations in the Black Sea and Azov Sea. Naukova Dumka, Kiev, p.36-69.
- BENDER, M.M. (1971). Variations in the <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratios of plants in relation to the pathway of photosynthetic carbon dioxide fixation. *Phytochemistry*, **10**: 1239-1244.
- BENTALEB, I., FONTUGNE, M., DESCOLAS-GROS, C., GIRARDIN, C., MARIOTTI, A., PIERRE, C., BRUNET, C., POISSON, A., (1998)- Carbon isotopic fractionation by plankton in the southern Indian Ocean: Relationship between  $\delta^{13}\text{C}$  of particulate organic carbon and dissolved carbon dioxide. *J. Marine Systems*, **17**: 39-58.
- BERGER, A. (1988). "Milankovitch theory and climate." *Reviews of Geophysics* **26**(4): 624-657.
- BERGER, R., TAYLOR, R.E., LIBBY, W.F. (1966). « Radiocarbon content of marine shells from the Californian and Mexican west coast ». *Science*, **153** (3738): 864-866.
- BERNER, R. A., 1970a. Pleistocene Sea Levels possibly indicated by Buried Black Sediments in the Black Sea. *Nature*, **227**(August 15): 700.
- BERNER, R. A., 1970b. Sedimentary pyrite formation. *Amer. J. Sci.*, **268**: 1-23.

- BERNER, R. A., 1974. Iron Sulfides in Pleistocene Deep Black Sea Sediments and Their Paleo-oceanographic Significance. In: D.A. Ross & E.T. Degens (Editors), *The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology - AAPG Memoir 20*. Tulsa, Oklahoma, pp. 524-531.
- BISCAVE, P.E. (1965). Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geol. Soc. Am Bull.* 76: 803-832.
- BLACK SEA GIS, (1997) - Geomorphological zonation of the Black Sea (CD).
- BONDAR, C., STATE, I., CERNEA, D., HARABAGIU, E. (1991). Water flow and sediment transport of the Danube and its outlet into the Black Sea. *Meteorology and Hydrology* 21(1): 21-25.
- BOOMER, I., GUICHARD, F. (2005). "Ostracod shell chemistry and hydrology: Towards an understanding of water mixing history", presentation at ASSEMBLAGE workshop in Hamburg, 2005.
- BUACHIDZE, I. M. (1974). Black Sea Shelf and Littoral Zone. *The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology - AAPG Memoir 20*. E. T. Degens & D. A. Ross (eds.). Tulsa, Oklahoma: 308-316.
- BUKRY, D. (1974). Coccoliths as Paleosalinity Indicators - Evidence from Black Sea. In: E.T. Degens & D.A. Ross - *The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology*, AAPG Memoir 20: 353-363.
- BUTUZOVA, G.Yu. (1960). Glinistye mineraly v osadkakh vostochnoi chasti Chernogo morya. (Clayey minerals of the deposits of the eastern part of the Black Sea). *Izv. Akad. Nauk S.S.S.R., Ser. Geol.*, 6.
- CALVERT, S. E., FONTUGNE, M.R. (1987). "Stable carbon isotopic evidence for the marine origin of the organic matter in the Holocene Black Sea sapropel." *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)* 66: 315-322.
- CALVERT, S. E., KARLIN, R. E., 1991. Relationships between sulphur, organic carbon and iron in the modern sediments of the Black Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 2483-2490.
- CALVERT, S. E., KARLIN, R.E. (1998). "Organic carbon accumulation in the Holocene sapropel of the Black Sea." *Geology* 26(February): 107-110.
- CALVERT, S. E., THODE, H. G., YEUNG, D., KARLIN, R. E. (1996). "A stable isotope study of pyrite formation in the Late Pleistocene and Holocene sediments of the Black Sea." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60(7): 1261-1270.
- CALVERT, S. E., VOGEL, J.S., SOUTHON, J.R. (1987). "Carbon accumulation rates and the origin of the Holocene sapropel in the Black Sea." *Geology* 15: 918-921.
- CALVERT, S.E., KARLIN, R.E., TOOLIN, L.J., DONAHUE, D.J., SOUTHON J.R., VOGEL, J.S. (1991). "Low organic carbon accumulation rates in Black Sea sediments." *Nature* 350(25 April): 692-695.
- CARAIVAN, G., 1982. Studiul sedimentologic al depozitelor din zona de plaja si a selfului intern din fata tarmului romanesc intre Portita si Tuzla. *Resumé thèse de doctorat*: 25p.
- CARAIVAN, G., HERZ, N., NOAKES, J. (1986). "New proofs of the Black Sea rise during the middle Wurm interstadial." *D.S. Inst. Geol. Geofiz.* 70-71(5 (1983-1984)): 57-62.
- CARAIVAN, G., SELARU, O., 1985. Quaternary environmental changes of the Black Sea. *Rev. Roum. Géol. Géophys.*, Tome 29(Géographie): 13-19.
- CHALINE, J., MOJSKI, J.E., MEYER, K.D. (1980). Report on the symposium Vistulian stratigraphy, Poland 1979. *Boreas* 9: 151.
- CHAPPELL, J., 2002. Sea level changes forced ice breakouts in the Last Glacial cycle: new results from coral terraces. *Quaternary Science Reviews* 21: 1229-1240.
- CHAPPELL, J., OMURA, A., ESAT, T., McCULLOCH, M., PANDOLFI, J.Y.O., PILLANS, B., 1996. Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records. *Earth and Planetary Science Letters* 141: 227-236.
- CHEPALYGA, A. L. (1984). Inland Sea Basins In: A. A. Velichko (ed.), *Late Quaternary environments of the Soviet Union*. Minneapolis, University of Minnesota Press: 229-247.
- CLIMAP, 1981. Seasonal reconstruction of the Earth's surface at the last glacial maximum. Geological Society of America, Map and Chart Series, Vol. C36.
- CLOERN, J. E., CANUEL, E.A., HARRIS, D. (2002). "Stable carbon and nitrogen isotope composition of aquatic and terrestrial plants of the San Francisco Bay estuarine system." *Limnol. Oceanogr.* 47(3): 713-729.
- COHMAP, 1988. Climatic changes of the last 18,000 years: observations and model simulations. *Science* 241, 1043-1052.
- COLLINSON, D. W. (1983). *Methods in Rock Magnetism and Paleomagnetism. Techniques and instrumentation*. London, Chapman and Hall Ltd: 504p.
- CRAIG, H. (1957). Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 12, 133-149.
- CUTTER, G. A., KLUCKHOHN, R. S. (1999). "The cycling of particulate carbon, nitrogen, sulfur and sulfur species (iron monosulfide, greigite, pyrite, and organic sulfur) in the water columns of Framvaren Fjord and the Black Sea." *Marine Chemistry* 67: 149-160.
- DANSGAARD, W., JOHNSEN, S.J., CLAUSEN, H.B., DAHL-JENSEN, D., GUNDESTRUP, N.S., HAMMER, C.U., HVIDBERG, C.S., STEFFENSEN, J.P., SVEINBJÖRNSDÓTTIR, A.E., JOUZEL, J., BOND, G. (1993). Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364: 218-220.
- DAY, R., FULLER, M., SCHMIDT, V.A., 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13: 260-267.
- DE VRIES, H. (1958). Variations in concentration of radiocarbon with time and location on earth. *Proc. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap Ser.*, B61, 94-102.
- DEGENS, E. T., ROSS, D.A. (1970). "Oceanographic Expedition in the Black Sea. A Preliminary Report." *Die Naturwissenschaften* 7: 349-353.
- DEGENS, E. T., ROSS, D.A. (1972). "Chronology of the Black Sea over the last 25,000 years." *Chemical Geology* 10: 1-16.
- DEGENS, E. T., S.W. WATSON, C.C. REMSEN (1970). "Fossil membranes and cell wall fragments from a 7000-years Old Black Sea sediment." *Science* 168: 1207-1208.
- DEGENS, E.T., MICHAELIS, W., GARRASI, C., MOPPER, K., KEMPE, S., ITTEKOT, A. (1980). *Warven-Chronologie und Frühdiagenetische Umsetzungen organischer Substanzen holozaner Sediments des Schwarzen Meeres. Neues Jahrb. Geol. Palaeontol. Monatsh* 83: 65-86.
- DEGENS, E.T., STOFFERS, P., 1976. Stratified waters as a key to the past. *Nature*, 263(September 2): 22-27.
- DEGENS, E.T., STOFFERS, P., GOLUBIC, S., DICKMAN, M.D. (1978). *Varve chronology: estimated rates of sedimentation in the Black Sea deep basin (Cap.4)*. In: Y.P. Neprochnov & D.A. Ross (Eds.) - Initial Reports of the DSDP (Deep Sea Drilling Project). Washington D.C., Vol.42 (part 2)
- DEINES, P. (1980). The isotopic composition of reduced organic carbon. In: P. Fritz & J.Ch. Fontes (Eds.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Amsterdam, Elsevier. Vol. 1: 329-406.
- DEKKERS, M.J., 1988. Magnetic properties of natural pyrrhotite. Part I: Behaviour of initial susceptibility and saturation-magnetization-

- related rock-magnetic parameters in a grain-size dependent framework. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 52: 376-393.
- DELIBRIAS, G. (1985). Le carbone 14. In: *Methodes de datation par des phenomenes nucleaires naturels*. Ed. Masson: 421-458.
- DENTON, G.H., HEUSSER, C.J., LOWELL, T.V., MORENO, P.I., ANDERSEN, B.G., HEUSSER, L.E., SCHLÜCHTER, C., MARCHANT, D.R., 1999. Interhemispheric linkage of paleoclimate during the last glaciation. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, Vol. 81, No. 2, Glacial and Vegetational History of the Southern Lake District of Chile (1999), pp. 107-153.
- DENTON, G.H., HUGHES, T.J. 1981. *The Last Great Ice Sheets*, Wiley, New York, 484pp.
- DEUSER, W.G. (1970a). "Carbon-13 in Black Sea Waters and Implications for the Origin of Hydrogen Sulfide." *Science* **168**: 1575-1577.
- DEUSER, W.G. (1970b). "Isotopic Evidence for Diminishing Supply of Available Carbon during Diatom Bloom in the Black Sea." *Nature* **225**(5237): 1069-1071.
- DEUSER, W.G. (1972). "Late-Pleistocene and Holocene History of the Black Sea as Indicated by Stable-Isotopes Studies." *Journal of Geophysical Research* **77**(6): 1071-1077.
- DIMITROV, P., NOVICOVA, Z. (1979). Mineralogia In: *Geology and Hydrology of the Western section of the Black Sea*, p.142-175. Bulgarian Academy of Sciences, Sofia.
- DUNLOP, D. J. (1986). "Hysteresis properties of magnetite and their dependence on particle size: a test of pseudo-single-domain remanence models." *Journal of Geophysical Research* **91**(B9): 9569-9584.
- EMERSON, S., HEDGES, J.I. (1988). Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments. *Paleoceanography* **3**, 621-634.
- ERGIN, M., KAZANCI, N., VAROL, B., ILERI, O., KARADENIZLI, L. (1997). Sea-level changes and related depositional environments on the southern Marmara shelf. *Marine geology* **140**: 391-403.
- FAIRBANKS, R. G. (1989). "A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation." *Nature* **342**(7 dec. 1989): 637-642.
- FARCAS, S., DE BEAULIEU, J.-J., REILLE, M., COLDEA, G., DIACONEASA, B., GOEURY, C., GOSLAR, TH., JULL, T. (1999). "First <sup>14</sup>C datings of Late Glacial and Holocene pollen sequences from Romanian Carpathes." *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie* **322**: 799-807.
- FARRERA, I., HARRISON, S.P., PRENTICE, I.C., RAMSTEIN, G., GUIOT, J., BARTLEIN, P.J., BONNIE"LE, R., BUSH, M., CRAMER, W., VON GRAFENSTEIN, U., HOLMGREN, K., HOOGHMESTRA, H., HOPE, G., JOLLY, D., LAURITZEN, S.-E., ONO, Y., PINOT, S., STUTE, M., YU, G., 1999. Tropical climates at the Last Glacial Maximum: a new synthesis of terrestrial palaeoclimate data. I. Vegetation, lake-levels, and geochemistry. *Climate Dynamics* **15**, 823-856.
- FAUSTOVA, M. A. (1984). Late Pleistocene Glaciation of European USSR. *Late Quaternary environments of the Soviet Union*. A. A. Velichko. Minneapolis, University of Minnesota Press: 3-12.
- FEDOROV, P. V. (1956). O sovremennoi epokhe v geologicheskoi istorii Chernogo morya (Modern epoch in geological history of Black Sea): *Akad. Nauk SSSR Doklady* **110**: 839-841.
- FEDOROV, P. V. (1962). "Stratigraphy of the Quaternary deposits in the Black Sea and the evolution of the Black Sea basin." *Bull. Soc. Nat. Sciences, Geology* **37**(4): 129-131.
- FEDOROV, P. V. (1963). Stratigrafiya obetvertichnykh otloshenii Krymskogo-Kavkazskogo poberezh'ya i nekotorye voprosy geologicheskoy istorii Chernogo morya (Stratigraphy of Quaternary sediments on coast of Crimea and Caucasus and some problems connected with geological history of the Black Sea). *Akad. Nauk SSSR Geol Inst. Trudy*, **88**: 7-159.
- FEDOROV, P.V. (1971). "Postglacial transgression of the Black Sea." *Internat. Geol. Rev.* **14**(2): 160-164.
- FLEMING, K., JOHNSTON, P., ZWARTZ, D., YOKOYAMA, Y., LAMBECK, K., CHAPPELL, J., 1998. "Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate-field sites." *Earth and Planetary Sciences Letters* **163**, 327-342.
- FONTUGNE, M. (1996). "Progrès de la datation par le Carbone 14." *Archéologia* **323**: 26-33.
- FONTUGNE, M. (2002) La dérive des âges carbone 14. In: *Géologie de la Préhistoire*, Ed. GEOPRE, Perpignan, 1199-2005.
- FONTUGNE, M., DUPLESSY, J.-C. (1981). "Organic carbon isotopic fractionation by marine plankton in the temperature range -1 to 31°C." *Oceanologica Acta* **4**(1): 85-90.
- FOUCAULT, A., RAOULT, J.-F., 2000. Dictionnaire de géologie. Masson Sciences. Dunod, Paris, 380 pp.
- FULGA, C. (2005). Terrigenous minerals in the sediments of the littoral and Black Sea inner shelf. *GeoEcoMarina* **9-10**(2003-2004): 47-52.
- FULGA, C., FULGA, V. (1996). Mineralogy of Black Sea sediments. *Anuarul Institutului Geologic al Romaniei* **69**(1)
- GEARING, J.N., GEARING, P.J., RUDNICK, D.T., REQUEJO, A.G., HUTCHINS, M.J. (1984). "Isotopic variability of organic carbon in a phytoplankton-based, temperate estuary." *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**: 1089-1098.
- GLENN, C. R., ARTHUR, M.A. (1985). "Sedimentary and geochemical indicators of productivity and oxygen contents in modern and ancient basins: the Holocene Black Sea as the „type“ anoxic basin." *Chemical Geology* **48**: 325-354.
- GODWIN, H. (1962). "Half-life of radiocarbon." *Nature*, **195**: 984.
- GONCEAROV, V.P., NEPROCHINOV, I.P., NEPROCHINOVA, A.F. (1972). *Relieful si structura de adincime a depresiei Mării Negre*. Ed. Nauka, Moscova (en russe).
- GROSSWALD, M.G. (1977). "The last Eurasian Ice Sheet. *Materialy Glyatsiol. Issled. Khronika Obsuzhdeniya* **30**, 45-60. [en russe, avec un résumé en anglais].
- GROSSWALD, M.G. (1980). "Late Weichselian Ice Sheet of Northern Eurasia." *Quaternary Research* **13**: 1-32.
- GROSSWALD, M.G. (1993). Extent and melting history of the Late Weichselian ice sheet, the Barents-Kara continental margin. In: Peltier, R.W. (Ed.), *Ice in the climate system*. NATO ASI Series I: Global Environmental Change. Springer, Berlin, pp. 1-20.
- GROSSWALD, M.G. (1998). Late-Weichselian ice sheets in Arctic and Pacific Siberia. *Quaternary International* **45/46**: 3-18.
- GUICHARD, F., CAREY, S., ARTHUR, M.A., SIGURDSSON, H., ARNOLD, M. (1993). "Tephra from the Minoan eruption of Santorini in sediments of the Black Sea." *Nature* **363**(17 June 1993, Letters to Nature): 610-612.
- GULIN, S.B., POLIKARPOV, G.G. AND EGOROV, V.N., 2003. The age of microbial carbonate structures grown at methane seeps in the Black Sea with an implication of dating of the seeping methane. *Marine Chemistry*, **84**: 67-72.
- GUNNERSON, C. G., OZTURGUT, E. (1974). The Bosphorus. *The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology - AAPG Memoir*. D. A. R. E. T. Degens. Tulsa, Oklahoma. **20**: 99-114.
- HAQ, B.U., VAN EYSINGA, F.B.W. (1987). *Geological Time Table*. Fourth, revised and enlarged edition. Elsevier.

- HAY, B. J. (1988). "Sediment accumulation in the central western Black Sea over the past 5100 years." *Paleoceanography* **3**(4): 491-508.
- HAY, B. J. HONJO, S., KEMPE, S., ITTEKKOT, A.V.; DEGENS, E.T., KONUK, T., IZDAR, E. (1990). "Interannual variability in particle flux in the south-western Black Sea." *Deep-Sea Research* **37**(6): 911-928.
- HAY, B. J., MICHAEL, A.A., DEAN, W.E., NEFF, E.D., HONJO, S. (1991). "Sediment deposition in the Late Holocene abyssal Black Sea with climatic and chronological implications." *Deep-Sea Research* **38**(Suppl.2): S1211-1235.
- HOU MARK-NIELSEN, M., 1989. The last interglacial-glacial cycle in Denmark. *Quaternary International* **3/4**: 31-39.
- HOU MARK-NIELSEN, M., 1999. A lithostratigraphy of Weichselian glacial and interstadial deposits in Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* **46**: 101-114.
- HSÜ, K. J. (1978). Stratigraphy of the lacustrine sedimentation in the Black Sea (Cap.15). Initial Reports of the DSDP (Deep Sea Drilling Project). In: Y.P. Neprochnov & D.A. Ross (Eds.) - Initial Reports of the DSDP (Deep Sea Drilling Project). Washington D.C., U.S. Vol. **42** (part 2): 509-524.
- HUBBERTEN, H.W., ANDREEV, A., ASTAKHOV, V.I., DEMIDOV, I., DOWDES WELL, J.A., HENRIKSEN, M., HJORT, C., HOU MARK-NIELSEN, M., JAKOBSSON, M., KUZMINA, S., LARSEN, E., LUNKKA, J.P., LYSÄ, A., MANGERUD, J., MÖLLER, P., SAARNISTO, M., SCHIRRMESTER, L., SHER, A.V., SIEGERT, C., SIEGERT, M.J., SVENDSEN, J.I. (2004). "The periglacial climate and environment in northern Eurasia during the Last Glaciation." *Quaternary Science Reviews* **23**: 1333-1357.
- HUGHES, T.J., DENTON, G.H., GROSSWALD, M.G., 1977. Was there a late Würm Arctic Ice Sheet? *Nature* **266**: 596-602.
- IMBRIE, J., E.A. BOYLE, S.C. CLEMENS, A. DUFFY, W.R. HOWARD, G; KUKLA, J. KUZBACH, D.G. MARTINSON, A. MCINTYRE, L.C. PETERSON, N.G. PISIAS, W.L. PRELL, M.E. RAYMO, N.J. SHACKLETON, J.R. TOGGWEILER (1992). "On the structure and origin of major glaciation cycles. 1. Linear responses to Milankovitch forcing." *Paleoceanography* **7**(6): 701-738.
- IMBRIE, J., HAYS, J.D., MARTINSON, D.G., MCINTYRE, A., MIX, A.C., MORLEY, J.J., PISIAS, N.G., PRELL, W.L., SHACKLETON, N.J. (1984). The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine delta18O record. In: A.L. Berger et al. (Eds.), *Milankovitch and Climate, Part 1*. D.Riedel, Hingham, Mass.: 269-305.
- ISHIWATARI, R., UZAKI, M. (1987). Diagenetic changes of lignin compounds in a more than 0.6 million-year-old lacustrine sediment (Lake Biwa Japan). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**: 321-328.
- JASPER, J.P., GAGOSIAN, R.B. (1990). The sources and deposition of organic matter in the Late Quaternary Pygmy Basin, Gulf of Mexico. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**: 117-132.
- JONES, B. (2004). "Carbonates" In: R. C. Selley, L. R. M. Cocks, I. R. Plimer (Eds.) - Encyclopedia of Geology. Elsevier B.V., p. 522-532.
- JONES, G. A. (1994). "A new hypothesis for the Holocene appearance of coccolithophores in the Black Sea." *The Holocene* **4**(2): 195-199.
- JONES, G.A., GAGNON, A.R. (1994). "Radiocarbon chronology of Black Sea sediments." *Deep-Sea Research* **41**(3): 531-557.
- JØRGENSEN, B. B., BÖTTCHER, M.E., LÜSCHEN, H., NERETIN, L.N., VOLKOV, I.I. (2004). "Anaerobic methane oxidation and deep H<sub>2</sub>S sink generate isotopically heavy sulfides in Black Sea sediments." *Geochimica et Cosmochimica Acta* **68**(9): 2095-2118.
- JOVER, O., ROCHETTE, P., LORAND, J.P., MAEDER, M., BOUCHEZ, J.L. (1989). Magnetic mineralogy of some granites from the French Massif Central: origin of their low-field susceptibility. *Phys. Earth Planet. Int.* **55** : 79-92.
- KARLEN, I., OLSSON, I.U., KALBERG, P., KILICCI, S. (1966). "Absolute determination of the activity of two <sup>14</sup>C dating standards." *Arkiv. Geofysik*, **6**: 465-471.
- KEELING, C.D., MOOK, W.G., TANS, P.P. (1979). Recent trends in the <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratio of atmospheric carbon dioxide. *Nature*, **277**: 121-123.
- KEREY, I. E., MERIC, E., TUNOGLU, C., KELLING, G., BRENNER, R.L., DOGAN, A.U. (2004). "Black Sea - Marmara Sea Quaternary connections: new data from the Bosphorus, Istanbul, Turkey." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **204**: 277-295.
- KITAGAWA H., VAN DER PLICHT, J. (1998). Atmospheric radiocarbon calibration to 45,000 yr B.P. : Late glacial fluctuations and cosmogenic isotope production. *Science*, **279**: 1187-1190.
- KONDRATJEVA, K.A., S.F. KHRUTSKY, AND N.N. ROMANOVSKY (1993): Changes in the extent of permafrost during the late Quaternary period in the territory of the Former Soviet Union. *Permafrost and Periglacial Processes* **4**: 113-119.
- KORENEVA, E., KARTASHOVA, G. (1978). Palynological study of samples from drills 379A, 380A. Leg.42B. Initial reports of DSDP Project **42**(2): 951-999.
- KRINNER, G., MANGERUD, J., JAKOBSSON, M., CRUCIFIX, M., RITZ, C., SVENDSEN, J.I. (2004). "Enhanced ice sheet growth in Eurasia owing to adjacent ice-dammed lakes." *Nature* **427**(29 January 2004): 429-432.
- KRUPATKINA, D.K., FINENKO, Z.Z., SHALAPYONOK, A.A. (1991). "Primary production and size-fractionated structure of the Black Sea phytoplankton in the winter-spring period." *Marine Ecology Progress Series* **73**(June 20): 25-31.
- KVASOV, D.D. (1975). „Pozdnechetvertichnaya Istoriya Krupnykh Ozer I Vnutrennikh Morei Vostochnoi Yevropy (Late Quaternary History of Major Lakes and Inland Seas of Eastern Europe)". Leningrad. [en russe]
- KVASOV, D.D. (1979). The Late-Quaternary history of large lakes and inland seas of Eastern Europe. *Annales Academiae Scientiarum Fennicae AIII* **127**: 1-71.
- LAMBECK, K., CHAPPELL, J. (2001). Sea Level Change Through the Late Glacial Cycle. *Science*, **292**(27 april 2001): 679-686.
- LARSEN, E., LYSÄ, A., DEMIDOV, I., FUNDER, S., HOU MARK-NIELSEN, M., KJÆR, K.H., MURRAY, A.S., 1999. Age and extent of the Scandinavian ice sheet in northwest Russia. *Boreas* **28**: 115-132.
- LATIF, M.A., ÖZSOY, E., OĞUZ, T., ÜNLÜATA, Ü. (1991). Observations of the Mediterranean inflow into the Black Sea. *Deep-Sea Res.* **38** (Suppl.2) : S711-S723.
- LERICOLAIS, G. AND ASSEMBLAGE PARTNERS, 2006 – Assemblage deliverable 25 : Assessment of the last sea-level rise in the Black Sea. European Community, Energy, Environment and Sustainable Development, Deliverables of the EVK3-CT-2002-00090 European Project; Lericola, G.; 32.
- LERICOLAIS, G., POPESCU, I., GUICHARD, F., POPESCU, S.-M., MANOLAKAKIS, L. (2007). Water-level Fluctuations in the Black Sea since the Last Glacial Maximum. In: *The Black Sea Flood Question: Changes in Coastline, Climate, and Human Settlement*. V. Yanko-Hombach, Gilbert, A.S., Panin, N., Dolukhanov, P.M. (Eds.). Dordrecht, The Netherlands, Springer. **XXXVIII**: 437-452.
- LIBBY, W.F. (1952). Radiocarbon dating. University of Chicago Press, 124 p.
- LOWE, J.J., GRAY, J.M. (1980). The stratigraphic subdivision of the Lateglacial of NW Europe: a discussion. In: Lowe, J.J., Gray, J.M. and Robin-

- son, J.E. (eds.), *Studies in the Lateglacial of North-Western Europe*, pp. 157-175. Pergamon Press, Oxford.
- LUNKKA, J.P., SAARNISTO, M., DEMIDOV, I. (2001a). The Last Glaciation on the Kola Peninsula, Russia. *In: EUG XI Strasbourg France 8<sup>th</sup>\_12<sup>th</sup> April 2001. Abstracts p.219.*
- LUNKKA, J.P., SAARNISTO, M., GEY, V., DEMIDOV, I., KISELOVA, V. (2001b). Extent and age of the Last Glacial Maximum in the southeastern sector of the Scandinavian Ice Sheet. *Global and Planetary Change* **31**: 407-425.
- MAHER, B. A., THOMPSON, R., HOUNSLOW, M.W. (1999). Introduction. *In: B. A. Maher & R. Thompson (eds.), Quaternary climates, environments and magnetism.* Cambridge University Press.
- MAJOR, C.O. (2002). Non-eustatic controls on sea-level change in semi-enclosed basins. PhD thesis, Columbia University.
- MAJOR, C.O., RYAN, W., LERICOLAIS, G., HAJDAS, I. (2002). "Constraints on Black Sea outflow to the Sea of Marmara during the last glacial-interglacial transition." *Marine Geology* **190**(1-2): 19-34.
- MANGERUD, J. (1989). "Correlation of the Eemian and the Weichselian with deep sea oxygen isotope stratigraphy." *Quaternary International* **3/4**: 1-4.
- MANGERUD, J. (1991a). The Last Interglacial/Glacial Cycle in Northern Europe. *In: L.C.K. Shane & E.J. Cushing (Eds.) - Quaternary Landscapes.* Minneapolis, University of Minnesota Press: 229p.
- MANGERUD, J. (1991b). The Scandinavian Ice Sheet through the last interglacial/glacial cycle. *In: . B. Frenzel (ed.) - Klimageschichtliche Probleme der letzten 130 000 Jahre.* Stuttgart, New York, G. Fisher. **Paleoklimaforschung Vol.1**: 451 pp.
- MANGERUD, J. (2004). Ice sheet limits on Norway and the Norwegian continental shelf. *In: Ehlers, J., Gibbard, P., (Eds.), Quaternary Glaciations—Extent and Chronology. Vol. 1. Europe.* Elsevier, Amsterdam, in press.
- MANGERUD, J., ANDERSEN, S.T., BERGLUND, B.E., DONNER, J.J. (1974). Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification. *Boreas* **4**: 109-128.
- MANGERUD, J., ASTAKHOV, V., JAKOBSSON, M., SVENDSEN, J.I. (2001a). Huge Ice-age lakes in Russia. *Journal of Quaternary Science*, **16**(8): 773-777.
- MANGERUD, J., ASTAKHOV, V.I., MURRAY, A., SVENDSEN, J.I. (2001b). The chronology of a large ice-dammed lake and the Barents–Kara Ice Sheet advances, Northern Russia. *Global and Planetary Change*, **31**: 321-336.
- MANGERUD, J., JAKOBSSON, M., ALEXANDERSON, H., ASTAKHOV, V., AND G. K. C. CLARKE, HENRIKSEN, M., HJORT, C., KRINNER, G., LUNNKAG, J.-P., MÖLLER, P., MURRAY, A., NIKOLSKAYA, O., SAARNISTO, M., SVENDSEN, J.I. (2004). "Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation." *Quaternary Science Reviews* **23**: 1313-1332.
- MANGERUD, J., JANSEN, E., LANDVIK, J.Y. (1996). Late Cenozoic history of the Scandinavian and Barents Sea ice sheets. *Global and Planetary Change*, **12**: 11-26.
- MARTINSON, D. G., N.G. PISIAS, J.D. HAYS, J. IMBRIE, T.C. MOORE JR., N.J. SHACKLETON (1987). "Age Dating and the Orbital Theory of the Ice Ages: Development of a High-Resolution 0 to 300,000-Year Chronostratigraphy." *Quaternary Research* **27**: 1-29.
- MAYNARD, N.G. (1974). Diatoms in Pleistocene Deep Black Sea Sediments. *In: D.A. Ross & E.T. Degens (Eds.) - The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology, AAPG Memoir* **20**: 389-395.
- MÉRIENNE, P. (2001). Atlas mondial. Editions Ouest-France, Rennes.
- MEYERS, P.A. (1990). "Impacts of Late Quaternary fluctuations in water level on the accumulation of sedimentary organic matter in Walker Lake, Nevada". *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **78**: 229-240.
- MEYERS, P.A. (1994). "Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter." *Chemical Geology* **114**: 289-302.
- MICHAELIS, W. ET AL., 2002. Microbial Reefs in the Black Sea Fueled by Anaerobic Oxidation of Methane. *Science*, **297**(9 August): 1013-1015.
- MIHĂILESCU, N., JIPA, D., RĂDAN, S., GIUȘCĂ, R. (1972). Studiul sedimentologic informativ al aluviunilor Dunării și al Lacului Schitu (L'étude sédimentologique informative des alluvions du Danube et du Lac Schitu)
- MIX, A.C., BARD, E., SCHNEIDER, R. (2001). "Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG)." *Quaternary Science Reviews* **20**: 627-657.
- MOOK, W.G., KOOPMANS, M., CARTER, A.F., KEELING, C.D. (1983). Seasonal latitudinal and secular variations in the abundance of the isotope ratios of atmospheric carbon dioxide. 1. Results from land stations. *Journal of Geophysical Research*, **88**: 10915-10933.
- MÜLLER, G., STOFFERS, P. (1974). Mineralogy and Petrology of Black Sea Basin Sediments. *In: E.T. Degens & D.A. Ross - The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology, AAPG Memoir* **20**: 200-248.
- MURATOV, M. V. (1972). "Istoriya formirovaniya glubokovodnoi kotlovinny Chernogo morya v sravnenii vpadinami Sredizemnogo." *Geotektonika* **5**: 22-41.
- MURRAY, J. W., TOP, Z., ÖZSOY, E. (1991). "Hydrographic properties and ventilation of the Black Sea." *Deep-Sea Research* **38**(Suppl.2): S663-S689.
- NEPROCHNOV, YU.P. (ED.) (1980). Geological History of the Black Sea from results of Deep-Sea Drilling: 52-77. Nauka Press, Moscow.
- NERETIN, L.N., BÖTTCHER, M.E., JØRGENSEN, B.B., VOLKOV, I.I., LÜSCHEN, H., HILGENFELDT, K., 2004. Pyritization processes and greigite formation in the advancing sulfidization front in the Upper Pleistocene sediments of the Black Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **68**(9): 2081-2093.
- NEVESSKAYA, L. A. (1965). Late Quaternary bivalve mollusks of the Black Sea: their systematics and ecology. Nauka Press, Moscow.
- NEVESSKIY, YE. N. (1961). O poslednikovoy transgressii Chernogo Morya (Post-glacial transgression of the Black Sea). *Akad.Nauk SSSR Doklady*, **137**: 667-670.
- NEVESSKIY, YE. N. (1967). Protsessy osadkoobrazovaniya v pribrezhnoy zone, morya (Processes of sediment formation in the near-shore zone of the sea). Moscow, Izd. "Nauka", 225p.
- NOVICOVA, Z.T. (1973). Characteristic features and dynamics of formation of terrigenous mineralogical provinces in the North-western Black Sea. *Oceanology* **13**(2): 242-246.
- O'LEARY, M.H. (1988). Carbon isotopes in photosynthesis. *Bioscience*, **38**: 328-336.
- OGUZ, T., LATUN, V.S., LATIF, M.A., VLADIMIROV, V.V., SUR, H.I., MARKOV, A.A., OZSOY, E., KOTOVSCHIKOV, B.B., EREMEEV, V.V., UNLUATA, U. (1993). Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea. *Deep-Sea Research I* **40**: 1597-1612.
- OGUZ, T., BESIKTEPE, S. (1999). "Observations on the Rim Current structure, CIW formation and transport in the western Black Sea." *Deep-Sea Research I* **46**: 1733-1753.

- OLSSON, I.U. (1974). "Some problems in connection with the evaluation of  $^{14}\text{C}$  dates." *Geol. Fören. Stockh. Förh.*, **96**: 311-320.
- OPDYKE, N. D. AND J. E. T. CHANNELL (1996). *Magnetic stratigraphy, International Geophysics Series 64*, Academic Press.
- OSMOND, C.B. (1975). Environmental control of photosynthetic options in crassulacean plants. *In*: R; Marcelle (Ed.), *Environmental and Biological Control of Photosynthesis*. Junk, The Hague, 299-309.
- ÖSTLUND, H. G. (1974). Expedition „Odysseus 65“: Radiocarbon Age of Black Sea Deep Water *In*: E.T. Degens & D.A. Ross (Eds.) - "The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology", *AAPG Memoir*: 127-132.
- ÖSTLUND, H.G., DRYSEN, D. (1986). Renewal rates of the Black sea deep water. Proceedings of the chemical and physical oceanography of the Black Sea, International Meeting, University of Goteborg, Goteborg, Sweden, 2-4 June 1986.
- OSTROVSKIY, A.B., IZMAYLOV, YA.A., BALABANOV, I.P., SKIBA, S.I., SKRYABINA, N.G., ARSLANOV, S.A., GEY, N.A., SUPRUNOVA, N.A. (1977). New data on the paleo-hydrological regime of the Black Sea in the Upper Pleistocene and Holocene. *In*: P.A. Kaplin & I.A. Shcherbakov (eds.), *Paleogeography and Deposits of the Pleistocene of the Southern Seas of the USSR*: 131-141. Nauka Press, Moscow.
- OSTROVSKIY, A.B., IZMAYLOV, YA.A., SHCHEGLOV, A.P., ARSLANOV, KH.A., TRETICHNYY, N.I., GEY, N.A., PIOTROVSKAYA, T.YU., MURATOV, V.M., SHCHELINSKIY, V.YE., BALABANOV, I.P., SKIBA, S.I. (1977). New data on the stratigraphy and geochronology of Pleistocene marine terraces of the Black sea coast, Caucasus and Kerch-Taman region. *In*: P.A. Kaplin & I.A. Shcherbakov (eds.), *Paleogeography and Deposits of the Pleistocene of the Southern Seas of the USSR*: 61-69. Nauka Press, Moscow.
- ÖZSOY, E., LATIF, M.A., TUĞRUL, S., ÜNLÜATA, U. (1995). "Exchanges with the Mediterranean, fluxes, and boundary mixing processes in the Black Sea." *Bulletin de l'Institut océanographique*, Monaco **15**(no. special): 1-25.
- PANIN, N. (1989). "Danube Delta Genesis, Evolution and Sedimentology." *Rev. Roum. Géol., Géophys., Géogr. Géographie*(Tome 33): 25-36.
- PANIN, N. (1996). "The Danube Delta Geological Setting, Genesis and Evolution." *GeoEcoMarina* **2**: 31-40.
- PANIN, N. AND STRECHIE, C., 2006. Late Quaternary Sea-level and Environmental Changes in the Black Sea: A Brief Review of Published Data. *The Journal of Archaeomythology*, **2**(1): 3-16.
- PANIN, N., POPESCU, I. (2002). The Black Sea: climatic and sea level changes in the Upper Quaternary
- PANIN, N., D. JIPA (1998). "Danube River sediment input and its interaction with the North-western Black Sea: Results of EROS-2000 and EROS-21 projects." *Geo-Eco-Marina* **3**: 23-35.
- PANIN, N., SALOMIE, G., VARODIN, V. (1977). "Cercetari batimetrice pe platforma continentală a Marii Negre." *Studii si Cercetari de Geologie, Geofizica, Geografie, Geofizica* **15**: 57-73.
- PECKMANN, J., REIMER, A., LUTH, C., HANSEN, B. T., HEINICKE, C., HOEFS, J., REITHER, J. (2001). "Methane-derived carbonates and authigenic pyrite from the northwestern Black Sea." *Marine Geology* **177**: 129-150.
- PELET, R., DEBYSER, Y., 1977. Organic geochemistry of Black Sea cores. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **41**: 1575-1586.
- PELTIER, W.R., 1994. Ice age paleotopography. *Science* **265**, 195-201.
- PELTIER, W.R., 1998a. Implicit icea in the global theory of glacial isostatic adjustment. *Geophysical Research Letters* **25**, 3955-3958.
- PELTIER, W.R., 1998b. Postglacial variations in the level of the sea: implications for climate dynamics and solid-earth geophysics. *Reviews of Geophysics* **36**, 603-689.
- PEREDERU, V. I. (2001). "Clay mineral composition and palaeoclimatic interpretation of the Pleistocene deposits of Ukraine." *Quaternary International* **76/77**: 113-121.
- PETERS, C., DEKKERS, M.J. (2003). "Selected room temperature magnetic parametres as a function of mineralogy, concentration and grain size." *Physics and Chemistry of the Earth* **28**: 659-667.
- PETERSON, G.M., WEBB, T.III, KUTZBACH, J.E., VAN DER HAMMEN, T., WUMSTRA, T., STREET, F.A., 1979. The continental record of environmental conditions at 18,000 yr B.P.: an initial evaluation. *Quaternary Research* **12**, 47-82.
- PEULVAST, J.-P., VERGNE, V., VANNEY, J.-R., BARRIER, E. (2000). Ch.24.- Last Glacial Maximum (Late Pleistocene, 22000 - 18000 years BP), *In*: Dercourt J., Gaetani M., Vrielynck B., Barrier E., Biju-Duval B., Brunet M.F., Cadet J.P., Crasquin S., Sandulescu M. (eds.) - Atlas Peri-Tethys, Palaeogeographical maps: 269p., 24 maps and explanatory notes: I-XX. Paris, CCGM/CGMW
- PIRAZZOLI, P. A. (1991). The Levant, the Black Sea, the Caspian Sea. *World atlas of Holocene sea-level changes*. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V. **1**: 99-105.
- PISIAS, N. G., IMBRIE, J. (1986). "Orbital geometry, CO<sub>2</sub>, and Pleistocene climate." *Oceanus* **29**(4): 43-49.
- PISIAS, N.G., SHACKLETON, N.J. (1984). Modelling the global climate response to orbital forcing and atmospheric carbon dioxide changes. *Nature* **310**: 757-759.
- POLACH, H.A. (1976). Radiocarbon dating as a research tool in archaeology-hopes and limitations, *In*: N. Barnard (ed.), *Symposium on scientific methods of research in the study of ancient Chinese Bronzes and South East Asian metal and other archaeological artifacts*. Proc. Australian Natl Univ., Dept. Far Eastern History Pub.
- POP, E., LUPSA, V., BOSCAIU, N. (1971). Diagrama sporo-polinica de la Taul Zanogutii (Muntii Retezat). *Progrese in palinologia romaneasca*, Ed. Acad. R.S.R., Bucharest, pp.219-225.
- POPA, A. (1993). "Liquid and Sediment Inputs of the Danube River into the North-Western Black Sea." *Mitt. Geol.-Palaont. Inst., Transport of Carbon and Nutrients in Lakes and Estuaries, Part 6* **74**: 137-149.
- POPESCU, I. (2002). Analyse des processus sédimentaires récents dans l'éventail profond du Danube (Mer Noire). Thèse de doctorat. *Géosciences Marines*. Brest, Université de Bretagne Occidentale - Université de Bucarest: 282p.
- POPESCU, I., 2002. Analyse des processus sédimentaires récents dans l'éventail profond du Danube (Mer Noire). Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale - Université de Bucarest, Brest, 282 pp.
- POPESCU, I., LERICOLAIS, G., PANIN, N., NORMAND, A., DINU, C., LE DREZEN, E. (2004). The Danube submarine canyon (Black Sea): morphology and sedimentary processes. *Marine Geology*, **206**(1-4): 249-265.
- POPESCU, I., LERICOLAIS, G., WONG, H.K., DROZ, L. (2001). "Late Quaternary channel avulsions on the Danube deep-sea fan." *Marine Geology* **173**: 25-37.
- POPOV, G.I., 1975. The Pleistocene of the Black Sea. Caspian straits. Nauka Press, Moscow (en russe).
- POPOV, G.I., ZUBAKOV, V.A. (1975). Age of Surozh transgression of the Black Sea region. *In*: *Fluctuations in the level of the World Ocean in the Pleistocene*: 115-128. Proceedings of the Twenty-Third Session of the International Geographical Congress, Leningrad.
- PRAHL, F.G., BENNETT, J.T., CARPENTER, R. (1980). The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particu-

- lates from Dabob Bay, Washington, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**: 1967-1976.
- PREMUZIC, E.T., BENKOVITZ, C.M., GAFFNEY, J.S., WALSH, J.J. (1982). The nature and distribution of organic matter in the surface sediments of world ocean and seas. *Org. Geochem.*, **4**: 63-77.
- RĂDAN, S. (1999). Evolutia mineralelor argiloase in procesele sedimentare: studii de caz in Romania. (L'évolution des minéraux argileux dans les processus sédimentaires : études de cas en Roumanie). Thèse non publiée, Facultatea de Geologie și Geofizică, Universitatea București.
- RĂDAN, S. C., RĂDAN, M., RĂDAN, S., GANCIU, A., OAI, GH., SZOBOTKA, ST. (1998). „Magnetic susceptibility monitoring in the Danube River - Danube Delta - Western Black Sea system; Environmental significances.” *Geologica Carpathica, International Geological Journal* **49**(3): 239-241.
- RĂDAN, S., JIPA, D. (1975). “Some data on the clay mineralogy and sedimentation in the abyssal zone of the Black Sea.” *Studii Tehnice și Economice, Mineralogie-Petrografie* **13**(Seria I): 113-125.
- RALPH, E.K. (1959). University of Pennsylvania radiocarbon dates, 3, *Am. J. Sci., Radiocarbon Suppl.* **1**: 45-58.
- RATEEV, M.A. (1952). Glinistye mineraly v donnykh osadkakh Chernogo moray. (Clay minerals in bottom sediments of the Black Sea). *Dokl. Akad. Nauk S.S.S.R.*, **83**(2): 287-290.
- RATEEV, M.A. (1964). Zakonomernosti i genesis glinistyykh mineralov v sovremennykh i drevnykh morskikh basseynakh (Distribution and genesis of clay minerals in modern and ancient marine basins): Moscow, Izd. “Nauka”: 67-73.
- RAU G.H., TAKAHASHI T., DES MARAIS D.J. (1989) Latitudinal variations in plankton  $\delta^{13}C$ : implication for  $CO_2$  and productivity in past oceans. *Nature*, **341**: 516-518.
- REDFIELD, A.C., KETCHUM, B.H., RICHARDS F.A. (1963). The influence of organisms on the composition of sea water. In : Mac Graw Hill (ed) *The Sea*, Vol II p 26-77
- REYNOLDS, R.L., TUTTLE, M.L., RICE, C.A., FISHMAN, N.S., KARACHEWSKI, J.A., SHERMAN, D.M., 1994. Magnetization and geochemistry of greigite-bearing Cretaceous strata, North Slope Basin, Alaska, *Am. J. Sci.* **294**: 485-528.
- ROBERTS, A. P. (1995). “Magnetic properties of sedimentary greigite ( $Fe_3S_4$ ).” *Earth and Planetary Science Letters* **134**(3-4): 227-236.
- ROBERTS, A.P. AND G.M. TURNER, 1993, Diagenetic formation of ferromagnetic iron sulphide minerals in rapidly deposited marine sediments. South Island, New Zealand. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **115**, 247-273.
- ROCHETTE, P., FILION, G., MATTÉI, J.-L., DEKKERS, M.J., 1990. Magnetic transition at 30-34 Kelvin in pyrrhotite: insight into a widespread occurrence of this mineral in rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, **98**: 319-328.
- RODELLI, M.R., GEARING, J.N., GEARING P.J., MARSHALL, N., SASEKUMAR, A. (1994). “Stable isotope ratio as a tracer of mangrove carbon in Malaysian ecosystem.” *Oecologia*, **61**: 326-333.
- ROSENBERG, G., LUDYANSKIY, M.L. (1994). “A nomenclatural review of Dreissenina (Bivalvia: Dreissenidae), with identification of the Quagga Mussel as Dreissenina bugensis.” *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **51**: 1474-1484.
- ROSS, D. A., DEGENS, E.T. (1974). Recent Sediments of the Black Sea. In: E. T. Degens & D. A. Ross -*The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology, AAPG Memoir* **20**: 183-199, Tulsa.
- ROSS, D. A., DEGENS, E.T., MACILVAINE, J. (1970). “Black Sea: Recent Sedimentary History.” *Science* **170**: 163-165.
- ROSS, D. A., UCHUPI, E., PRADA, K., MACILVAINE, J.C. (1974). Bathymetry and Microtopography of Black Sea. In: E. T. Degens & D. A. Ross (Eds.), *The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology. AAPG Memoir.* **20**: 1-10.
- RYAN, W. B. F., MAJOR, C.O., LERICOLAIS, G., GOLDSTEIN, S.L. (2003). „Catastrophic flooding of the Black Sea.” *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **31**: 525-554.
- RYAN, W. B. F., PITMAN III, W.C., MAJOR, C.O., SHIMKUS K., MOSKALENKO, V., JONES, G.A., DIMITROV, P., GORUR, N., SAKINC, M., YUCE, H. (1997). “An abrupt drowning of the Black Sea shelf at 7.5 Kyr BP.” *GeoEcoMarina* **2**: 115-125.
- RYAN, W. B. F., PITMAN III, W.C., MAJOR, C.O., SHIMKUS K., MOSKALENKO, V., JONES, G.A., DIMITROV, P., GORUR, N., SAKINC, M., YUCE, H. (1997). “An abrupt drowning of the Black Sea shelf.” *Marine Geology* **138**: 119-126.
- SCHERBAKOV, F. A., ET AL. (1978). Sedimentation on the continental shelf of the Black Sea. Nauka Press, Moscow.
- SCHERBAKOV, F.A., BABAK, YE.V., 1979. Stratigraphic Subdivision of the Neoeuxinian Deposits in the Black Sea. *Oceanology*, **19**(3): 298-300.
- SCHERBAKOV, F.A., KORENEVA, E.V., ZABELINA, E.K. (1979). Stratigraphia pozdnetchetvertichnikh otlojeniy Thchernogo Morya [Stratigraphy of Late Quaternary Deposits of the Black Sea]. In D.E. Ghershanovitch (Ed.) - *Pozdnetchetvertichnaya istoria i sedimentogenez ukraynikh i vnutrinnikh morei* [Late Quaternary History and Sedimentogenesis of Marginal and Internal Seas], pp.46-51, Nauka Acad. Of Sci. USSR, Moscow.
- SCHRADER, H.-J. (1979). “Quaternary paleoclimatology of the Black Sea basin.” *Sedimentary Geology* **23**: 165-180.
- SEJRUP, H.P., HAFLIDASON, H., AARSETH, I., KING, E., FORSBERG, C.F., LONG, D., ROKOENGEN, K., 1994. Late Weichselian glaciation history of the northern North sea. *Boreas* **23**: 1-13.
- SEREBRYANNY, L.R. (1982). Postglacial Black Sea fluctuations and their comparison with the glacial history of the Caucasian high mountain region. In: P.A. Kaplin et al. (eds.) – *Sea and Oceanic Level Fluctuations for 15,000 Years*. Nauka Press, Moscow: 161-167.
- SHILIK (1975), Nevevskyi (1970) and Voskoboynikov et al. (1982) sont cités en Pirazzoli (1991)
- SHIMKUS, K. M., TRIMONIS, E.S. (1974). Modern Sedimentation in Black Sea. In: D.A. Ross & E.T. Degens (Eds.) - *The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology*. Tulsa, Oklahoma. AAPG Memoir **20**: 249-278.
- SHOPOV, V. L., BOZILOVA, E.D., ATANASOVA, J.R. (1992). “Biostratigraphy and radiocarbon data of Upper Quaternary sediments from western part of Black Sea.” *Geologica Balcanica* **22**(2): 59-69.
- SIANI, G., PATERNE, M., ARNOLD, M., BARD, E., METIVIER, B., TISNERAT, N., BASSINOT, F. (2000). “Radiocarbon reservoir ages in the Mediterranean Sea and Black Sea.” *Radiocarbon* **42**(2): 271-280.
- SIMONEIT, B. R. T. (1977). „The Black Sea, a sink for terrigenous lipids.” *Deep-Sea Research* **24**: 813-830.
- SNOWBALL, I.F. (1991). Magnetic hysteresis properties of greigite ( $Fe_3S_4$ ) and a new occurrence in Holocene sediments from Swedish Lapland. *Phys. Earth. Planet. Inter.* **68**: 32-40.
- SNOWBALL, I.F., THOMPSON, R., 1990. A stable chemical remanence in Holocene sediments. *J. Geophys. Res.* **95** : 4471-4479.
- STOFFERS, P., MÜLLER, G. (1972). “Clay mineralogy of Black Sea sediments.” *Sedimentology* **18**: 113-121.
- STOFFERS, P., MÜLLER, G. (1978). Mineralogy and lithofacies of Black Sea sediments Leg 42B Deep Sea Drilling Project (ch.7). In: D.A. Ross, Y.P. Neprochnov et al. (Eds) - *Initial Reports of the DSDP (Deep Sea Drilling Project)*. Washington D.C., U.S. Govt. Printing Office. **42, part 2**: 373-393.

- STRECHIE, C., ANDRÉ, F., TUCHOLKA, P., GUICHARD, F., LERICOLAIS, G., PANIN, N., 2002. Magnetic minerals as indicators of major environmental change in Holocene Black Sea sediments: preliminary results. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 1363-1370.
- STUIVER, M., BRAZIAUNAS, T.F. (1993). "Modelling atmospheric  $^{14}\text{C}$  influences and  $^{14}\text{C}$  ages of marine samples to 10,000 BC." *Radiocarbon* 35(1): 137-189.
- STUIVER, M., POLACH, H.A. (1977). "Discussion: Reporting of  $^{14}\text{C}$  data." *Radiocarbon* 19(3): 355-363.
- STUIVER, M., REIMER, P.J. (1993). "Extended  $^{14}\text{C}$  data base and revised Calib 3.0  $^{14}\text{C}$  age calibration program." *Radiocarbon* 35(1): 215-230.
- SÜMEGI, P., KROLOPP, E. (2002). "Quaternary malacological analyses for modeling of the Upper Weichselian palaeoenvironmental changes in the Carpathian Basin." *Quaternary International* 91: 53-63.
- SVENDSEN, ET AL., (1999). Maximum extent of the Eurasian ice sheets in the Barents and Kara Sea region during the Weichselian. *Boreas* 28, 234-242.
- SVENDSEN, J.I., ALEXANDERSON, H., ASTAKHOV, V.I., DEMIDOV, I., DOWDESWELL, J.A., FUNDER, S., GATAULLIN, V., HENRIKSEN, M., HJORT, C., HOUMARK-NIELSEN, M., HUBBERTEN, H.W., INGOLFSSON, O., JAKOBSSON, M., KJÆRI, K.H., LARSEN, E., LOKRANTZ, H., LUNKKA, J.P., LYSÄ, A., MANGERUD, J., MATIOUCHKOV, A., MURRAY, A., MÖLLER, P., NIESSEN, F., NIKOLSKAYA, O., POLYAK, L., SAARNISTO, M., SIEGERT, C., SIEGERT, M.J., SPIELHAGEN, R.F., STEIN, R. (2004a). "Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia." *Quaternary Science Reviews* 23: 1229-1271.
- SVENDSEN, J.I., GATAULLIN, V., MANGERUD, J., POLYAK, L. (2004b). The glacial history of the Barents and Kara Sea Region. In: Ehlers, J. & Gibbard, P.L. (eds). *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology, Part I: Europe. Developments in Quaternary Science*, Vol. 2a. Amsterdam, Elsevier.
- TAGEYEVA, N.V., TIKHOMIROVA, M.M. (1962). Hydrogeochemistry of bottom sediments of the Black Sea (the northwestern part). *International Geology Review*: 345-348.
- TALBOT, M.R., JOHANNESSEN, T. (1992). "A high resolution palaeoclimatic record for the last 27,500 years in tropical West Africa from the carbon and nitrogen isotopic composition of lacustrine organic matter". *Earth Planet. Sci. Lett.*, 110: 23-37.
- TAYLOR, L.A. (1970). Smythite,  $\text{Fe}_{3+x}\text{S}_4$ , and associated minerals from the Silverfields Mine, Cobalt, Ontario. *Amer. Mineral.* 55: 1650-1658.
- TEKIROĞLU, S. E., EDIGER, V., YEMENICIOĞLU, S., KAPUR, S., AKÇA, E. (2001). "The experimental analysis of the Late Quaternary deposits of the Black Sea." *Oceanologica Acta* 24(1): 51-67.
- THOMPSON, R., OLDFIELD, F. (1986). Natural magnetic minerals (Cap.3) In: Environmental magnetism. London, Allen & Unwin: 227pp.
- THOUVENY, N. (1991). Variations du champ magnétique terrestre au cours du dernier cycle climatique (depuis 120 000 ans). *Documents du C.E.R.L.A.T., Memoire no.3.*
- TISNERAT-LABORDE, N., POUPEAU, J.J., TANNAU, J.F., PATERNE, M. (2001). "Development of a semiautomated system for routine preparation of carbonate samples." *Radiocarbon* 43(2A): 299-304.
- TRAVERSE, A. (1974). Palynologic Investigation of Two Black Sea Cores. In: D.A. Ross & E.T. Degens (Eds.) - *The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology*, Tulsa, Oklahoma. *AAPG Memoir* 20: 381-388.
- TRAVERSE, A. (1974). Palynologic Investigation of Two Black Sea Cores. In: D.A. Ross & E.T. Degens (Eds.) - *The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology*, *AAPG Memoir* 20: 381-388.
- TUDRYN-JELINOWSKA, A. AND TUCHOLKA, P., 2004. Magnetic monitoring of thermal alteration for natural pyrite and greigite. *Acta Geophysica Polonica*, 52(4): 509-520.
- ÜNLÜATA, Ü., OGUZ, T., LATIF, M.A., ÖZSOY, E. (1990). On the physical oceanography of the Turkish straits. In : Pratt, L.J. (Ed.), *The Physical Oceanography of Sea Straits*. NATO /ASI Series Kluwer, Dordrecht, pp.25-60.
- VAN ANDEL, T.H., TZEDAKIS, P.C. (1996). "Paleolithic landscapes of Europe and environs, 150,000-25,000 years ago: an overview." *Quaternary Science Reviews* 15: 481-500.
- VAN VELZEN, A.J., 1994. Magnetic Minerals in Pliocene and Pleistocene Marls from Southern Italy. *Geologica Ultraiectina* No.122 (PhD thesis) Thesis, Universiteit Utrecht, Utrecht, 154 pp.
- VAUGHAN, D.J., CRAIG, J.R. (1978). *Mineral chemistry of metal sulphides*, Cambridge University Press, Cambridge, 493 pp.
- VELICHKO, A.A. (1990). "Loess-paleosol formation on the Russian Plain." *Quaternary International* 7/8: 103-114.
- VELICHKO, A.A., KONONOV, YU.M., FAUSTOVA, M.A. (1997). "The Last Glaciation of Earth: size and volume of ice-sheets." *Quaternary International* 41/42: 43-51.
- VEROSUB, K. L., ROBERTS, A.P. (1996). "Capabilities of the new automated, long-core magnetometer facility at the University of California, Davis." *Geologica Carpathica* 47(3): 195.
- VOGEL, J.C. (1970).  $^{14}\text{C}$  dating of ground water. In: *Isotope hydrology*. Vienna, I.A.E.A.: 225-240.
- WALKER, M. J. C. (1995). "Climatic changes in Europe during the last glacial/interglacial transition." *Quaternary International* 28: 63-76.
- WALL, D., DALE, B., 1974. Dinoflagellates in Late Quaternary Deep-Water Sediments of Black Sea. In: E.T.Degens et D.A. Ross (Editor), *The Black Sea - Geology, Chemistry and Biology - AAPG Memoir* 20. AAPG, Tulsa, Oklahoma, pp. 364-379.
- WELTEN, M. (1982). Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen in den westlichen Schweizer Alpen: Bern -- Wallis. *Denkschrift Schweizer Naturforschende Gesellschaft*, 95,104 pp.
- WICKMAN, F.E. (1952). Variations in the relative abundance of carbon isotopes in plants. *Geochimica et cosmochimica Acta* 2, 243-254.
- WILKIN, R. T., ARTHUR, M. A., DEAN, W. E. (1997). "History of water-column anoxia in the Black Sea indicated by pyrite framboid size distributions." *Earth and Planetary Science Letters* 148: 517-525.
- WOHLFARTH, B., 1996. The chronology of the Last Termination: a review of radiocarbon-dated, high-resolution terrestrial stratigraphies. *Quaternary Science Reviews* 15: 267-284.
- WOHLFARTH, B., HANNON, G., FEUERDEAN, A., GHERGARI, L., ONAC, B.P., POSSNERT, G. (2001). "Reconstruction of climatic and environmental changes in NW Romania during the early part of the last deglaciation (~15,000-13,600 cal yr BP)." *Quaternary Science Reviews* 20: 1897-1914.
- YALDIRAK, C., ALPAR, B., SAKINÇ, M., YÜCE, H. (2000). "Origin of the Strait of Çanakkale (Dardanelles): regional tectonics and the Mediterranean - Marmara incursion." *Marine Geology* 164: 139-156.
- YOKOYAMA, Y., LAMBECK, K., DE DECKKER, P., JOHNSON, P., FIFIELD, K. (2000). Timing for the maximum of the Last Glacial constrained by lowest sea-level observations. *Nature* 406, 713-716.
- ZUBAKOV, V.A. (Ed.) (1974). *Geochronology of the USSR* 30: 111-124; 134-145. Nedra Press, Leningrad.

# ANNEXE 1

## DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES CAROTTES

### Légende

	Vase à coccolithes
	Vase à sapropèle
	Argile
	Argile silteuse
	Silt argileux
	Silt
	Silt sableux
	Sable très fin
	Sable fin
	Sable moyen

	Silt argileux à coquilles
	Silt sableux à débris de coquilles
	Sable fin à débris de coquilles

### Faune

Bivalves	
Gastéropodes	
Coccolithes	
Ostracodes	
Foraminifères	
Bioturbations	

Matière organique	
Coquilles et débris de coquilles	

### Échantillons pour:

datations <sup>14</sup> C	
carbonates	
δ <sup>13</sup> C	
%Corg, %N, C/N	
balance de Curie	
micromag	
faune	



### Mission: BlaSON 1

Ifremer

Carotte: BLVK 9801	Profondeur: 92 m	Sections: I/I	Côte tête/pied (cm): 0-49cm
--------------------	------------------	---------------	-----------------------------

Auteur: W.B.Ryan

Dates <sup>14</sup> C sans BP noncorr. Echantillons	Lithologie	Vase		Sable			Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
		A	AS	S	tf	f				
										0-19 cm argile silteuse, fluide
										19-34 cm sable argileux à granoclassement inverse la fraction sableuse est constituée principalement de débris de coquilles (surtout <i>Mytilus</i> )
(db.M.g.) (D.p.)* (db.D.)*										34-49 cm sable moyen très dur (dense) avec des débris de <i>Dreissena</i>
(D.)*										
										*datations <sup>14</sup> C d'après Major, 2002.





# Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLCP 9805	Profondeur: 131m	Sections: I/I	Côte tête/pied (cm): 0-25 cm
--------------------	------------------	---------------	------------------------------

Auteur: François Guichard

Echantillons Ages <sup>14</sup> C ans BP non corr.	Lithologie	Vase						Sable	Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
		A	AS	S	tf	f	m					
0-25												0-4: vase gris clair fine avec qq coquilles 4-10: vase plus sombre avec fins debris de CaCO3 10-13: <i>Dreissena</i> de tailles moyennes et intactes de plus en plus abondantes à la base du niveau 13-16: vase fine sans fossile apparent 16-19: vase avec grosses et moyennes <i>Dreissena</i> niveau riche en coquilles 19-25: vase grise avec qq grosses coquilles (centimétriques), mais moins de coquilles que de 16 à 19 cm
10090 ±130 (2.sp.)*												

\*Toutes par le J. Minicucci & H.H. Hoeggerberg (Major/2002) - IANIGLA



# Mission: BlaSON

Ifremer

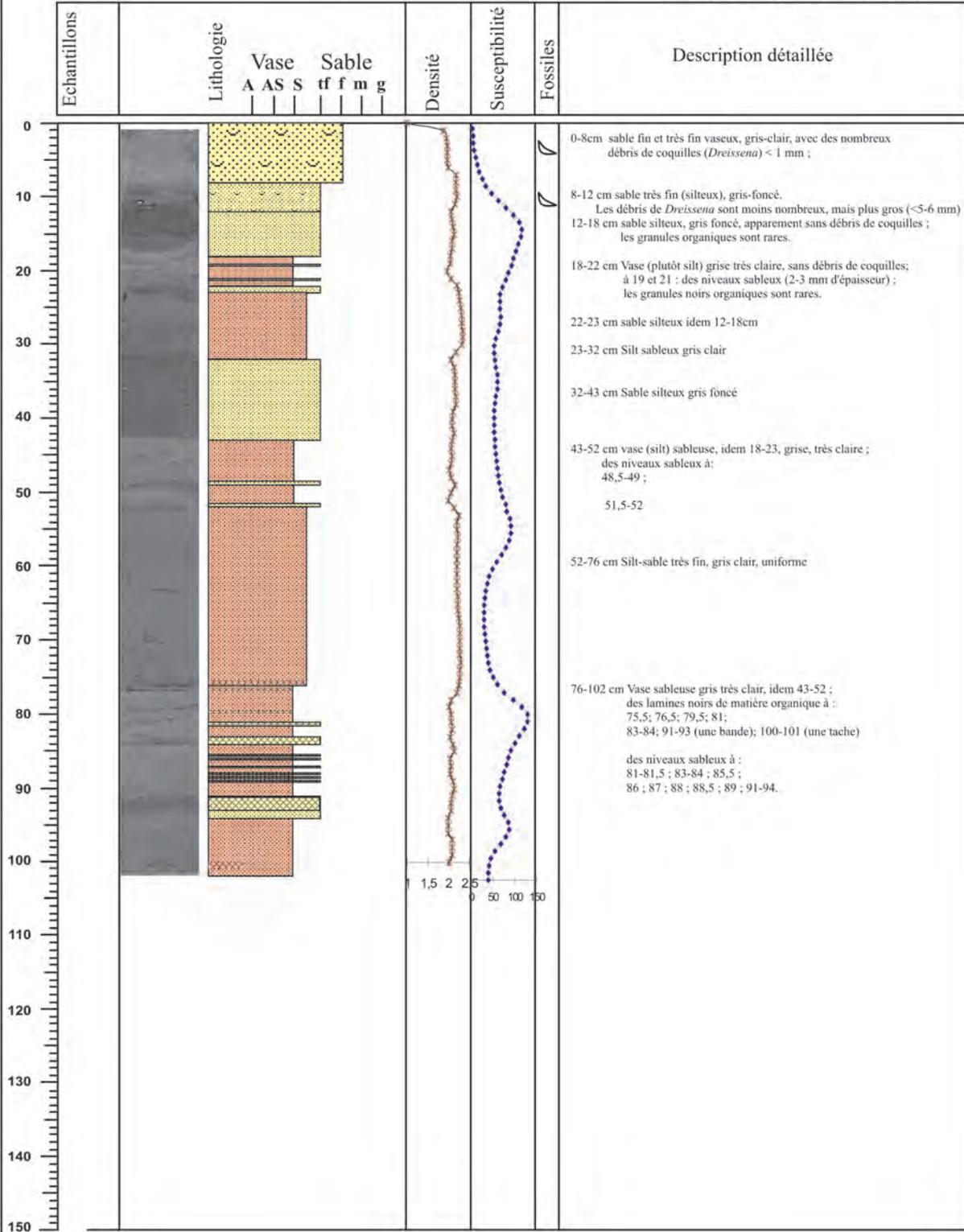
Carotte: BLKS 9805

Profondeur: 131m

Sections: I/I

Côte tête/pied (cm): 0-102 cm

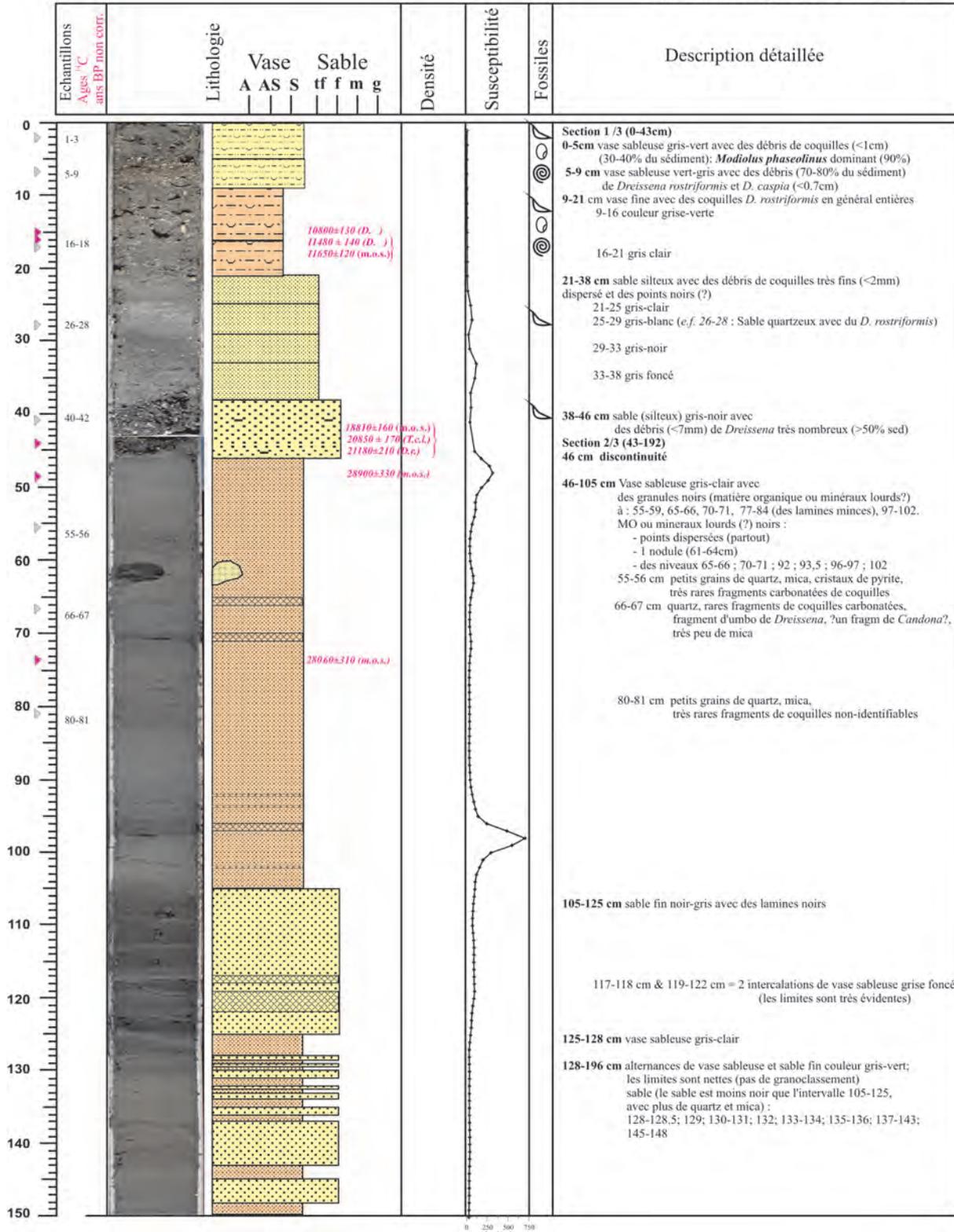
Auteurs: Irina Popescu & Claudia Strehie





Carotte: BLKS 9806	Profondeur: 135m	Sections: I/III II/III	Côte tête/pied (cm): 0-43 43-150 cm
--------------------	------------------	---------------------------	----------------------------------------

Auteurs: Irina Popescu & Claudia Strehie





Carotte: BLKS 9806	Profondeur: 135m	Sections: II/III III/III	Côte tête/pied (cm): 150-192; 192-265 cm
--------------------	------------------	-----------------------------	---------------------------------------------

Auteurs: Irina Popescu & Claudia Strechie

Echantillons	Lithologie	Vase A AS S	Sable tf f m g	Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
150							<p><b>128-196 cm</b> alternances de vase sableuse et sable fin couleur gris-vert; les limites sont nettes (pas de granoclassement) sable (le sable est moins noir que l'intervalle 105-125, avec plus de quartz et mica) : 157.5-159; 160; 167-168; 169-170; 179-180; 182.5-183; 184-186; 188-190; 192-194; 195; 195.5</p>
160							
170							
180							
190							<p><b>Section 3/3 (192-265)</b></p>
200							<p><b>196-234 cm</b> Vase (plus ou moins sableuse) grise-claire avec des niveaux sableux 196-204 cm vase fine (201-202) : deux nodules sableux) 204-205 cm sable fin  211-221 cm sable fin, plus grossier vers la partie inf.  221-234 cm alternance vase sableuse/sable fin sable à : 222 ; 223 ; 224 ; 226 ; 227 (2-3mm d'épaisseur) ;  230-230,5 ; 231 ; 232 ; 232,5 ; 233 cm.</p>
210							
220							
230							<p><b>234-239 cm</b> Sable fin (plus grossier que 201-202)</p>
240							<p><b>239-265 cm</b> Vase fine (grise) avec des lamines de sable fin (très fin). Sables à : 242,5 243 ; 246,5 ;  250 ; 251 ; 252 ; 254 ; 255 ; 256 ; 257 ; 258-259 cm.</p>
250							
260							<p><b>258-265 cm</b> bioturbations ? ou fissures minces horizontales oxydées et remplies avec du sable.</p>
270							
280							
290							
300							



# Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLCP 9807	Profondeur: 163m	Sections: I/I	Côte tête/pied (cm): 0-55 cm
--------------------	------------------	---------------	------------------------------

Auteurs: Irina Popescu & Claudia Strehie

Echantillons	Lithologie	Vase						Sable						Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
		A	AS	S	tf	f	m	g	tf	f	m	g					
0																	0-2cm vase gris-vert à <i>Modiolus</i> 2-5cm vase grise avec des débris de <i>Dreissena</i> (>90% du sédiment)
10																	5-19,5 cm vase grise (plus noire que dans la carotte KS07) avec des débris de <i>Dreissena</i> dispersées
20																	19,5-22,5 cm* Niveau où le débris des coquilles (<2-3mm) constitue la plus grande partie du sédiment
30																	22,5-55cm comme dans la carotte KS07: vase gris clair à forte odeur de H <sub>2</sub> S et niveaux à débris de coquilles
40																	*le niveau 19,5-22,5 cm correspond au niveau 8-10 cm de la carotte
50																	
60																	
70																	
80																	
90																	
100																	
110																	
120																	
130																	
140																	
150																	

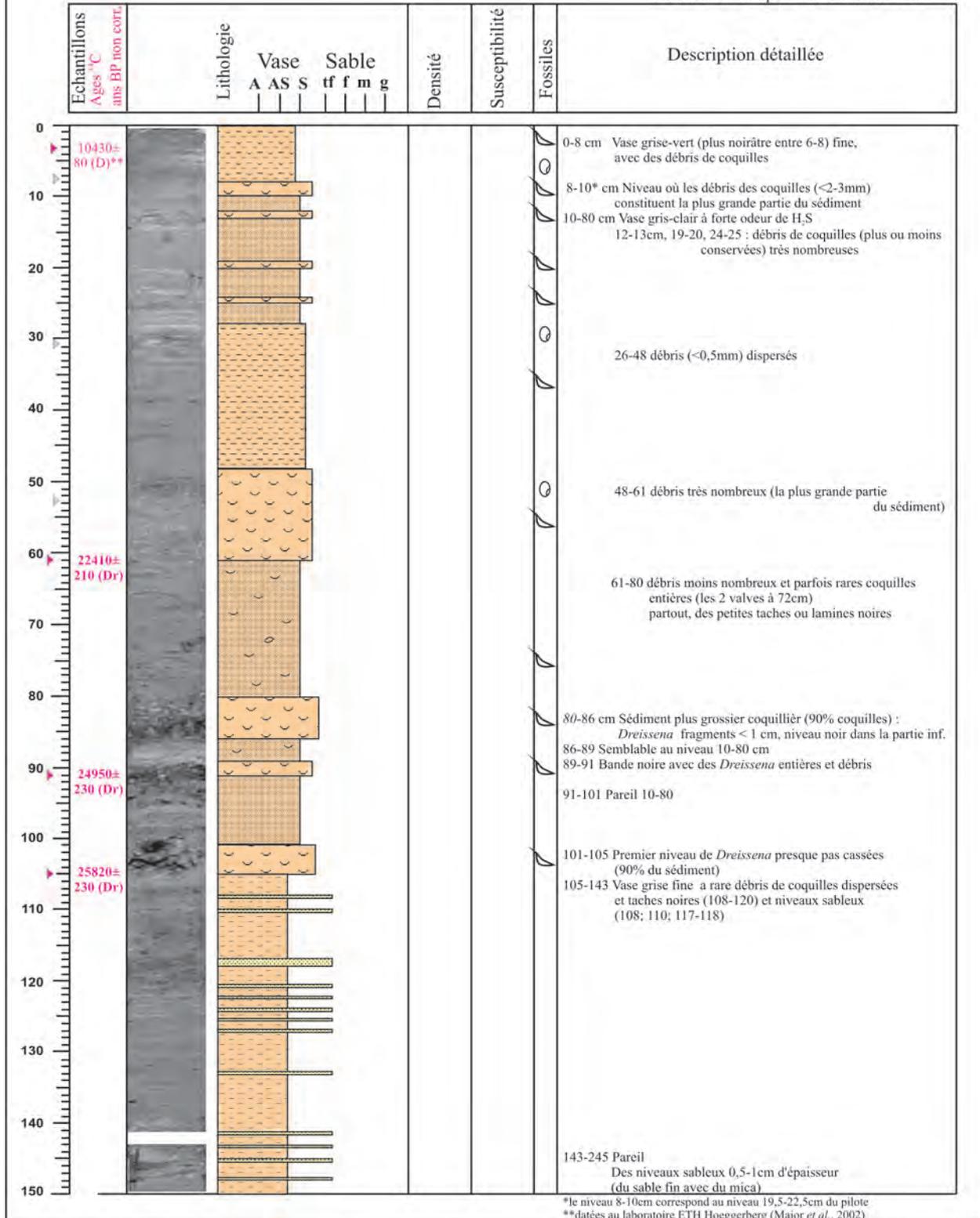


Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 9807	Profondeur: 163 m	Sections: I/III II/III	Côte tête/pied (cm): 0-143cm 143-245cm
--------------------	-------------------	---------------------------	-------------------------------------------

Auteurs: Irina Popescu & Claudia Strehie



\*le niveau 8-10cm correspond au niveau 19,5-22,5cm du pilote  
\*\*datées au laboratoire ETH Hoeggerberg (Major et al., 2002)



Mission: BlaSON 1

Ifremer

Carotte: BLKS 9807	Profondeur: 163m	Sections: II/III III/III	Côte tête/pied (cm): 143-245 cm 245-324 cm
--------------------	------------------	-----------------------------	-----------------------------------------------

Echantillons	Lithologie	Vase						Sable						Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée		
		A	AS	S	tf	f	m	g	tf	f	m	g							
150																	<p>143-245 Pareil 105-143cm: Vase grise fine a rare débris de coquilles dispersées des taches noires et des niveaux sableux de 0,5-1cm d'épaisseur (du sable fin avec du mica)</p>		
160																			
170																			
180																			
190																			
200																			
210																			
220																			
230																			
240																			
250																			<p>245-324cm Pareil Vase grise fine a rare débris de coquilles dispersées des taches noires et des niveaux sableux plus clairs et plus épaisse (2cm) à: 248,5 (0,5cm l'épaisseur) 249,5 251,5 254 255,5-256,5 258-259 260,5 262-263 264,5 265,5 267-268 269 272-274 277-278,5 281cm</p>
260																			
270																			
280																			
290																			
300																			



### Mission: BlaSON 1

Ifremer

Carotte: BLKS 9807	Profondeur: 163m	Sections: III/III	Côte tête/pied (cm):245-324cm
--------------------	------------------	-------------------	-------------------------------

#### Auteurs:

Echantillons	Lithologie	Vase						Sable						Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée	
		A	AS	S	tf	f	m	g	tf	f	m	g						
300																	245-324cm Pareil Vase grise fine à rare débris de coquilles dispersées, des taches noires et des niveaux sableux plus clairs et plus épais (2cm) à: 301-302 305-306 310,5-312,5 315,5-317,5cm	
310																		
320																		
330																		
340																		
350																		
360																		
370																		
380																		
390																		
400																		
410																		
420																		
430																		
440																		
450																		

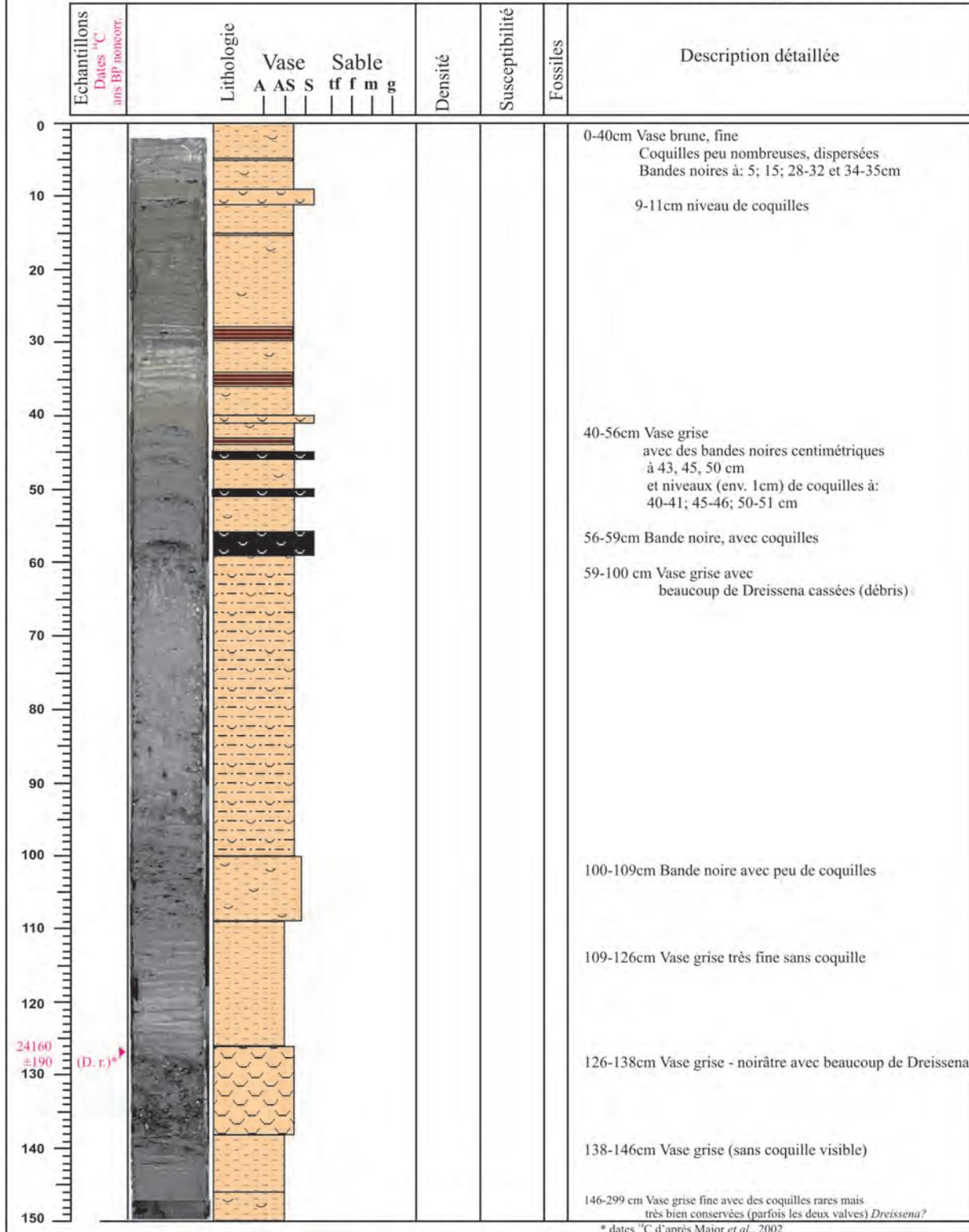


Mission: BlaSON 1

Ifremer

Carotte: BLKS 9808	Profondeur: 186m	Sections: I/III II/III	Côte tête/pied (cm): 0-146cm 146-299cm
--------------------	------------------	---------------------------	-------------------------------------------

Auteurs: Irina Popescu & Claudia Strehle



24160  
±190  
130 (D. r.)

\* dates <sup>14</sup>C d'après Major *et al.*, 2002



### Mission: BlaSON 1

Ifremer

Carotte: BLKS 9808	Profondeur: 186m	Sections: II/III III/III	Côte tête/pied (cm): 146-299 cm 299-368 cm
--------------------	------------------	-----------------------------	-----------------------------------------------

Echantillons	Lithologie	Vase						Sable						Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
		A	AS	S	S	S	S	tf	f	m	g	g	g				
150																	<p>146-299 cm Vase grise fine avec des coquilles rares mais très bien conservées (parfois les deux valves) <i>Dreissena?</i></p> <p>165-175 cm avec taches brunes</p>
160																	
170																	
180																	
190																	
200																	
210																	
220																	
230																	
240																	
250																	
260																	
270																	
280																	
290																	
300																	



Mission: BlaSON 1

Ifremer

Carotte: BLKS 9808	Profondeur: 186m	Sections: III/III	Côte tête/pied (cm):299-368cm
--------------------	------------------	-------------------	-------------------------------

Auteurs:

Echantillons	Lithologie	Vase						Sable						Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
		A	AS	S	tf	f	m	g	tf	f	m	g					
300																	<p>Pareil vase grise fine avec des coquilles rares bien conservées</p> <p>+300 -345 cm des niveaux sableux de 0,5 cm d'épaisseur</p> <p>347-348 cm niveau sableux avec débris de coquilles</p>
310																	
320																	
330																	
340																	
350																	
360																	
370																	
380																	
390																	
400																	
410																	
420																	
430																	
440																	
450																	

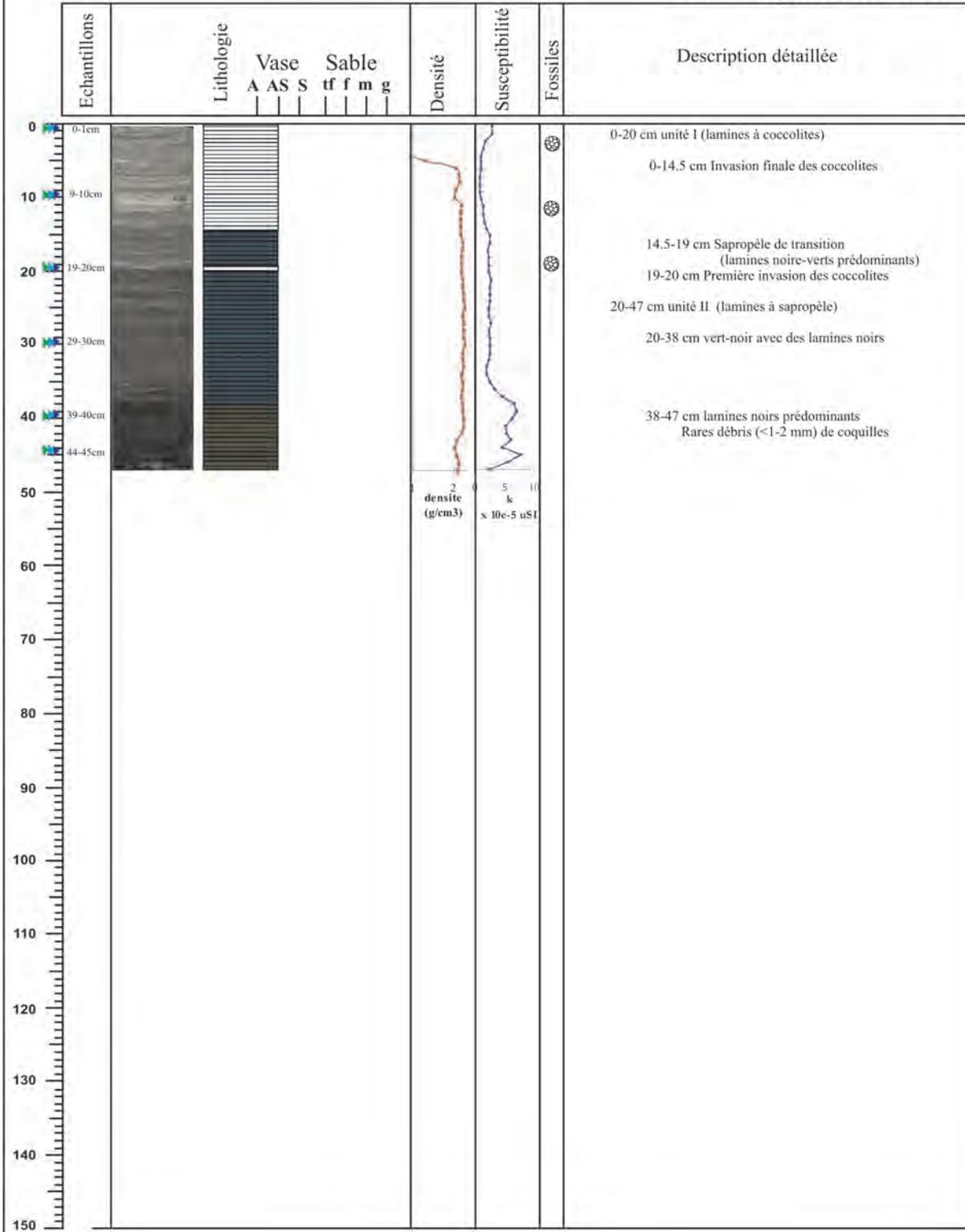


# Mission: BlaSON1

Ifremer

Carotte: BLCP 9809	Profondeur: 240m	Sections: I/I	Côte tête/pied (cm): 0-47cm
--------------------	------------------	---------------	-----------------------------

Auteurs: Irina Popescu & Claudia Strehie



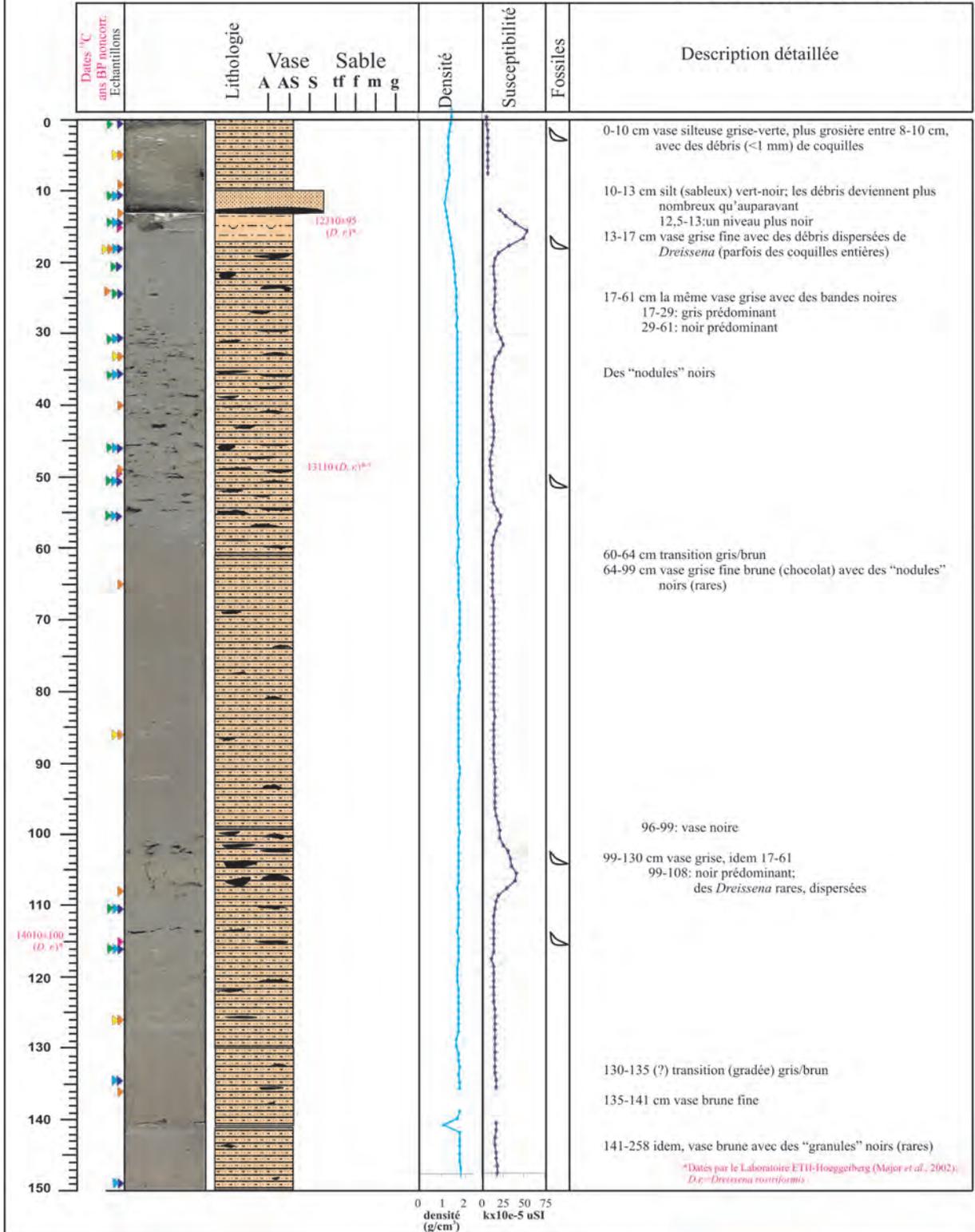


# Mission: BlaSON1

Ifremer

Carotte: BLKS 9809	Profondeur: 240m	Sections: I, II, III/VII	Côte tête/pied (cm): 0-13cm; 13-141 cm; 141-150 cm
--------------------	------------------	--------------------------	----------------------------------------------------

Auteurs: Irina Popescu & Claudia Strechie

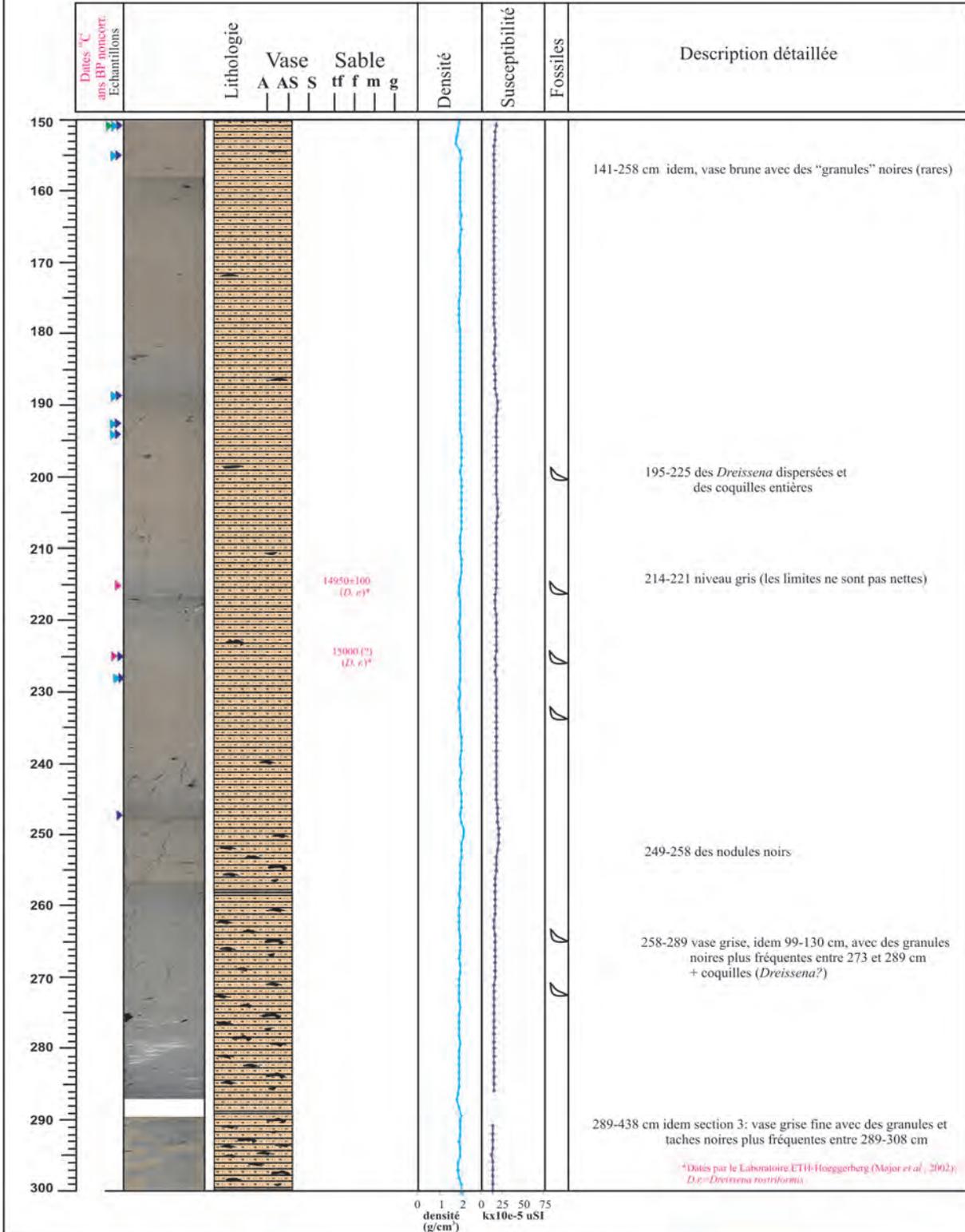




# Mission: BlaSON1

Ifremer

Carotte: BLKS 9809	Profondeur: 240m	Sections: III, IV/VII	Côte tête/pied (cm): 150-289 cm; 289-300 cm
--------------------	------------------	-----------------------	------------------------------------------------



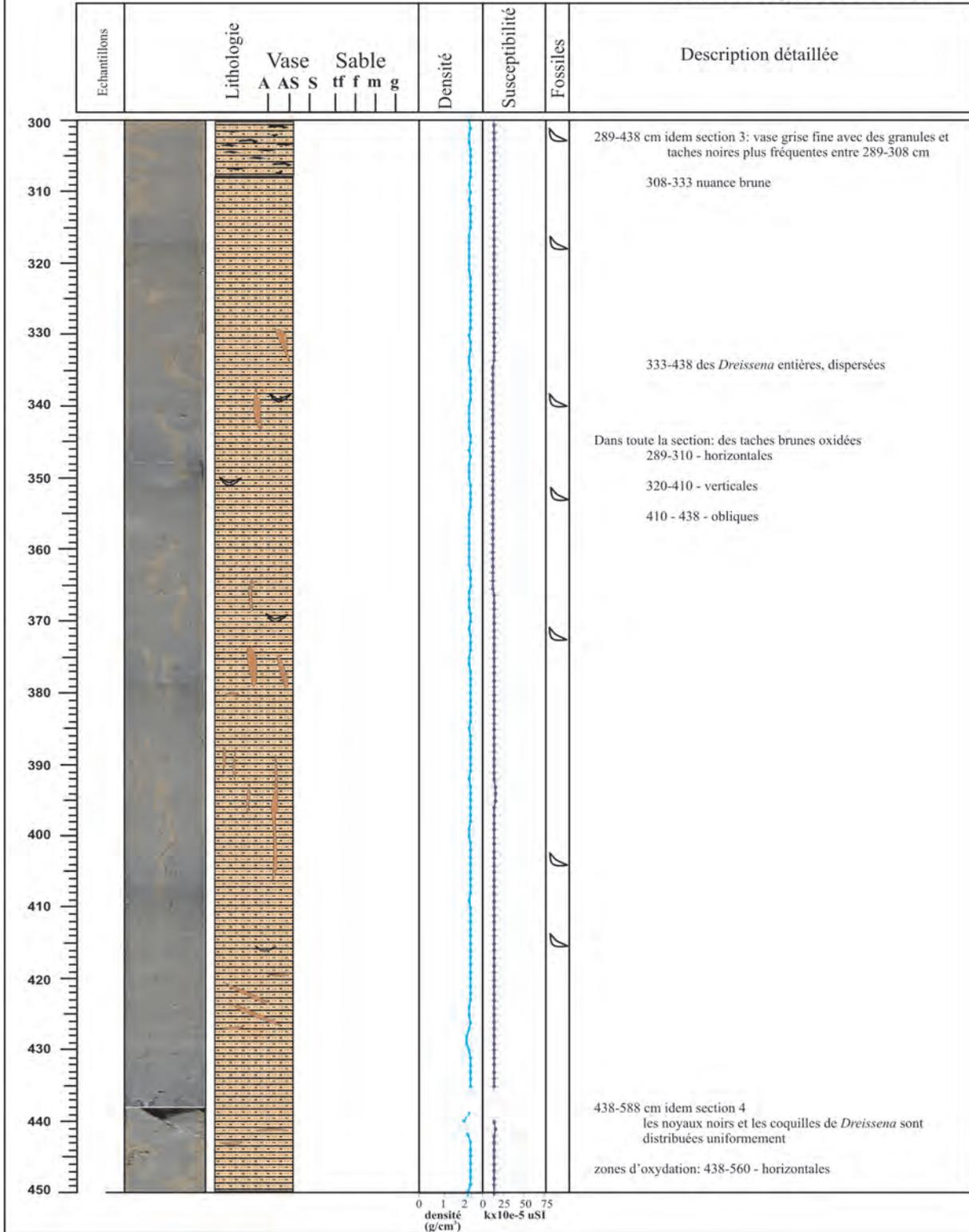


# Mission: BlaSON1

Ifremer

Carotte: BLKS 9809	Profondeur: 240m	Sections: IV, V/VII	Côte tête/pied (cm): 300-438 cm; 438-450 cm
--------------------	------------------	---------------------	------------------------------------------------

Auteurs: Irina Popescu & Claudia Strechie

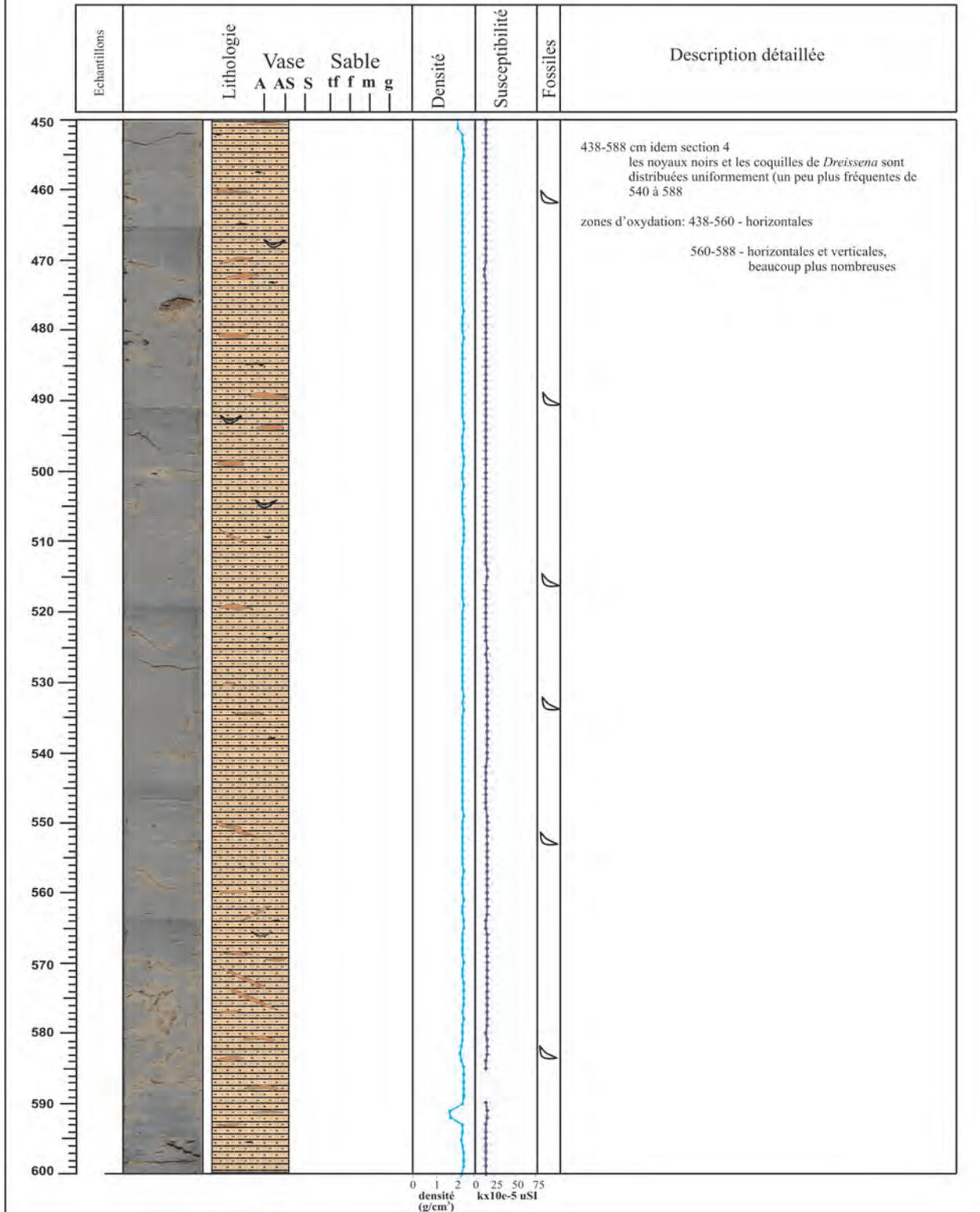




# Mission: BlaSON1

Ifremer

Carotte: BLKS 9809	Profondeur: 240m	Sections: V, VI/VII	Côte tête/pied (cm): 450-588 cm; 588-600 cm
--------------------	------------------	---------------------	------------------------------------------------

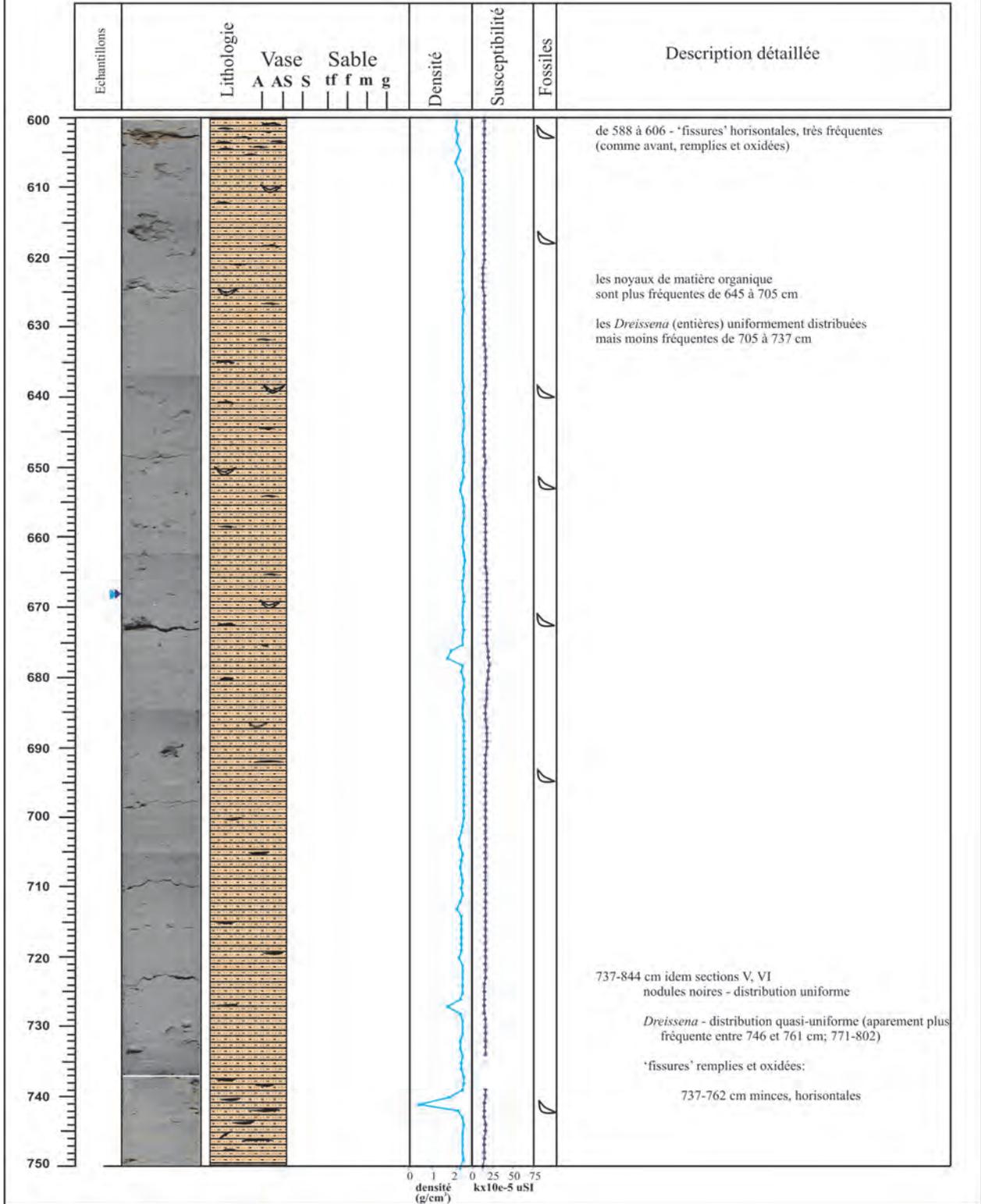




# Mission: BlaSON1

Ifremer

Carotte: BLKS 9809	Profondeur: 240m	Sections: VI; VII/VII	Côte tête/pied (cm): 600-737 cm; 737-750 cm
--------------------	------------------	-----------------------	------------------------------------------------

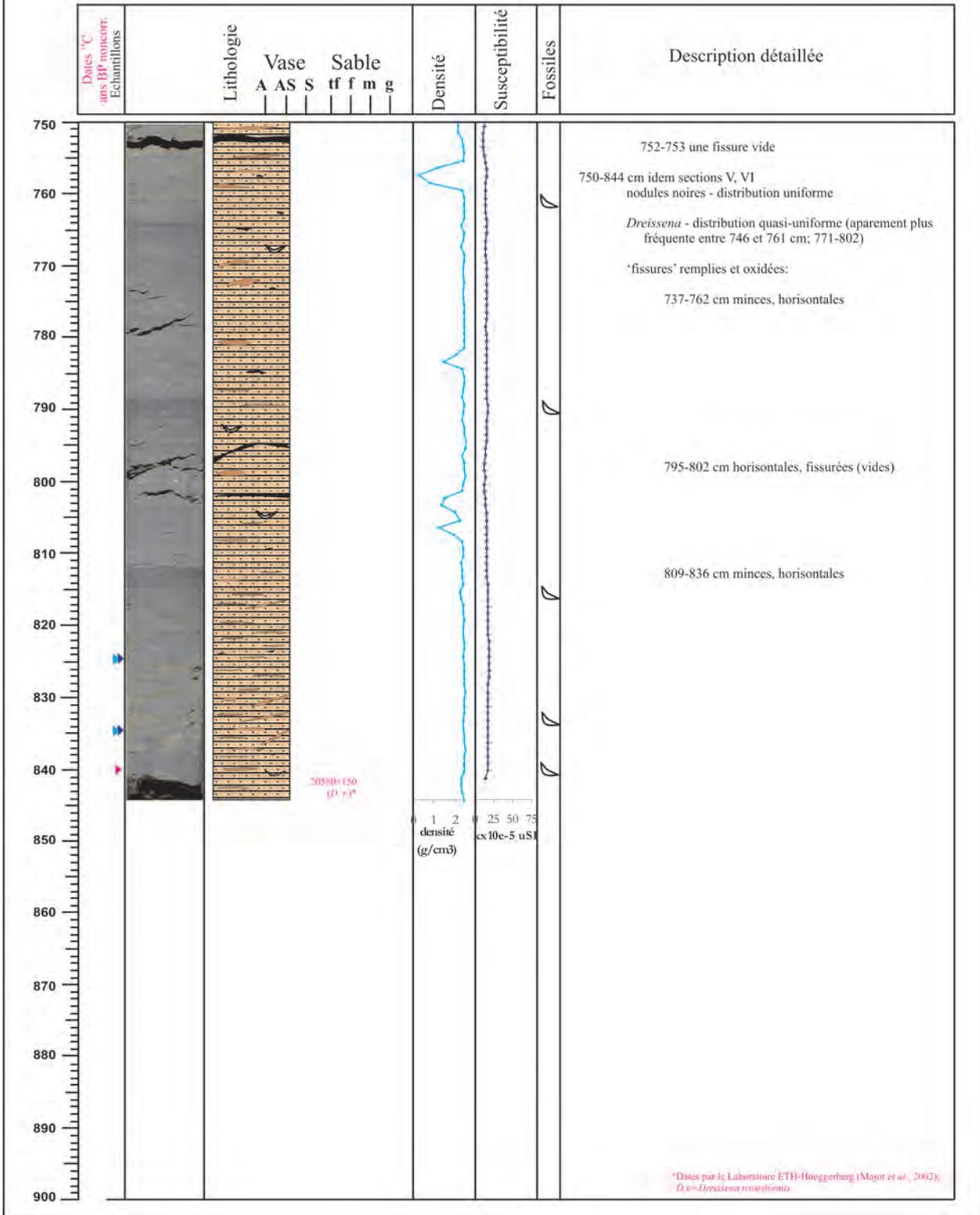




Mission: BlaSON1

Ifremer

Carotte: BLKS 9809	Profondeur: 240m	Sections: VII/VII	Côte tête/pied (cm): 750-844 cm
--------------------	------------------	-------------------	---------------------------------





### Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLCP 9810	Profondeur: 378m	Sections: I/I	Côte tête/pied (cm): 0-34cm
--------------------	------------------	---------------	-----------------------------

Auteurs: Irina Popescu & Claudia Strehci

Echantillons	Lithologie	Vase						Sable						Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
		A	AS	S	tf	f	m	g									
0																0-16 (18) cm unité I (lamines à coccolites)	
10																0-10 cm Invasion finale des coccolites	
20																10-15 cm Sapropèle de transition	
30																15-16 cm Première invasion des coccolites	
40																16(18)-34 cm Unité II	
50																Sapropèle laminé vert-marron	
60																Obs: 5-34 cm lamines obliques a cause du carottage	
70																	
80																	
90																	
100																	
110																	
120																	
130																	
140																	
150																	

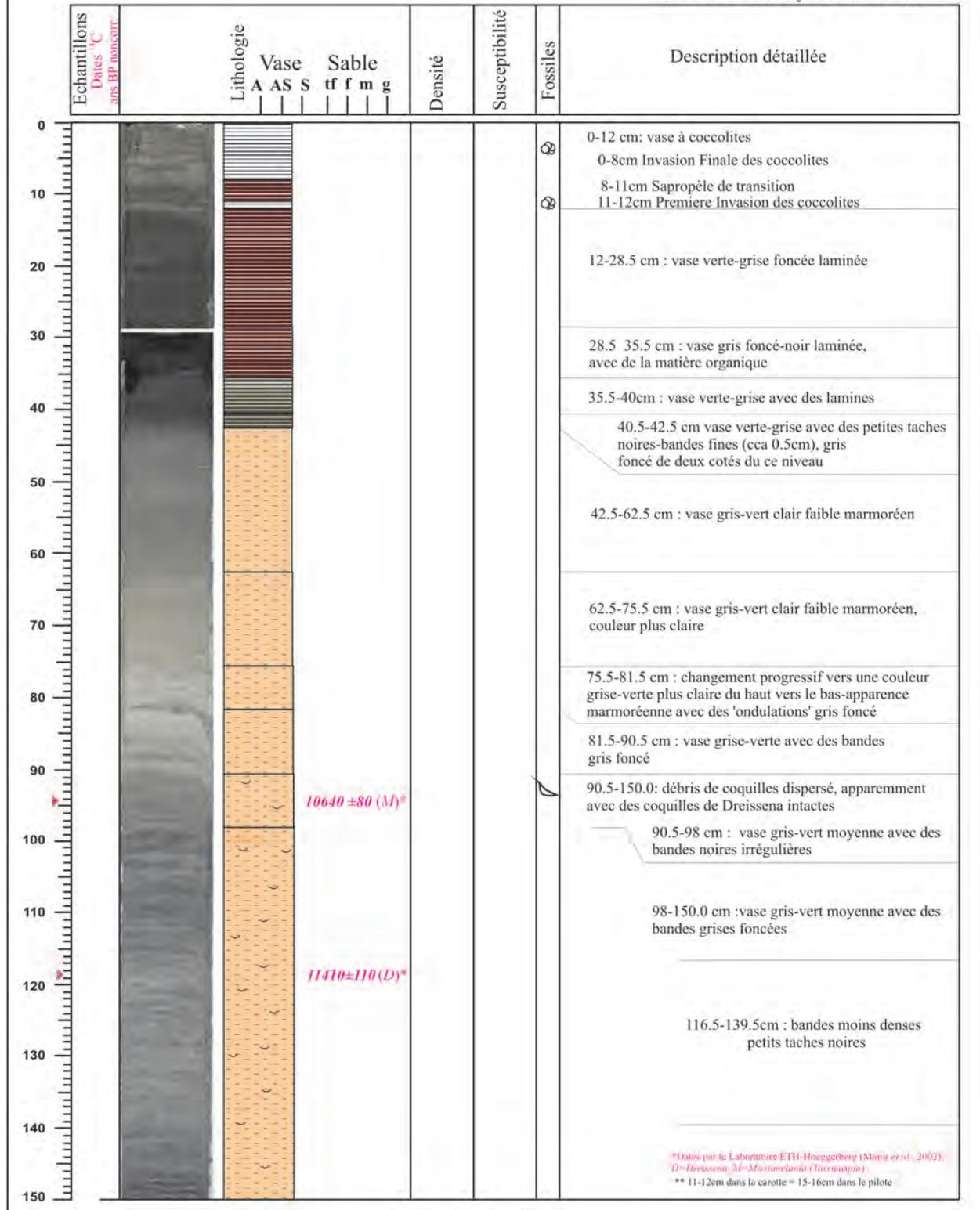


# Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 9810	Profondeur: 378m	Sections: I/VI II/VI	Côte tête/pied (cm): 0-28 28-150
--------------------	------------------	-------------------------	-------------------------------------

Auteurs: Candace Major & Claudia Strehle





Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 9810	Profondeur: 378 m	Sections: II/VI III/VI	Côte tête/pied (cm): 28-169,5 169,5-300
--------------------	-------------------	---------------------------	--------------------------------------------

Auteurs: Candace Major & Claudia Strehle

Echantillons Dates <sup>14</sup> C ans BP noncorr.	Lithologie						Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
	Vase A	Sable S	Sable f	Sable m	Sable g	Sable g				
150										150.0-162.5: débris de coquilles dispersés, apparemment avec des coquilles de Dreissena intactes vase gris-vert moyenne avec des bandes grises foncées
160										162.5-169.5cm : idem, mais avec des petites taches noires concentrés (sulfures de Fe ?)
170										
180										
190										169.5-212 cm: vase verte-grise et grise foncé marmoréenne avec des bandes irrégulières sub-horizontales -taches noires et petits nodules noirs -taches irrégulières de vase marron, entre 192.5 et 209.5cm; ? bioturbations ? débris des coquilles (Dreissena)
200										
210										
220										
230										212-247.5 cm : vase marron avec des faibles bandes et quelques petites taches noires comme en haut -taches orange-marron partout bioturbations
240										
250										
260										247.5-260 cm: vase vert-gris avec des petites taches noires et des bioturbations (ou fissures?) marron comme dans le top de la section : 169.5-212 cm
270										
280										260-300 cm : le sommet est transitionnel d'une vase marron en haut - bioturbations (fissures?)
290										
300										291.5-300 : petits taches noires plus nombreuses <small>*Datés par le Laboratoire ETH-Hoeggerberg (Major et al., 2002). D = Dreissena</small>



### Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 9810	Profondeur: 378m	Sections: III/VI IV/VI	Côte tête/pied (cm): 300-320 320-450
--------------------	------------------	---------------------------	-----------------------------------------

Auteurs: Candace Major & Claudia Strehle

Echantillons	Lithologie							Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
	Vase A	AS	S	Sable tf	f	m	g				
300											300-320 cm : le sommet: transition de la vase marron en haut avec des fissures (aspect de bioturbations) jusqu'à une partie avec des taches noires plus nombreuses
310											300-310.5 : petits taches noires plus nombreuses
320											
330											320-343 cm: Vase marmoréenne brune à des bandes faibles gris-foncé la limite est nette
340											
350											343-450 cm : Vase gris marmoréen -petites taches noires, rares -très bioturbé (ou, plutôt, fissuré); les fissures sont oxydées et marron-rouge -débris de coquilles ( <i>Dreissena</i> )
360											
370											
380											
390											
400											FISSURES : 398-400 cm et 439-443 cm expansion du gaz?
410											Le long de la section, on trouve de rares fragments de coquilles; en surface, on ne voit pas de valves intactes
420											
430											
440											
450											



### Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 9810	Profondeur: 378m	Sections: IV/VI V/VI	Côte tête/pied (cm): 450-470 470-600
--------------------	------------------	-------------------------	-----------------------------------------

Auteurs: Candace Major & Claudia Strehle

Echantillons	Lithologie							Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
	Vase A	AS	S	Sable tf	f	m	g				
450											450-470 cm : Vase gris marmoréen -petites taches noires, rares -très fissuré; les fissures sont oxydées et de couleur marron-rouge -débris de coquilles ( <i>Dreissena</i> ) Le long de la section, on trouve de rares fragments de coquilles; en surface, on ne voit pas de valves intactes
460											
470											470-600 cm (longueur 130 cm) Argile marmoréenne vert-gris -taches noires diffuses irrégulières -débris de coquilles dispersés partout -fissures larges dans la partie supérieure de la section, avec des auréoles d'oxydations larges -les fissures en dessous de 510 cm sont fines, la plupart sub-horizontales, avec d'étroites auréoles d'oxydation en dessous de 590 cm il n'y a plus de fissures
480											
490											
500											
510											
520											
530											
540											
550											
560											
570											
580											
590											
600											



# Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 9810	Profondeur: 378m	Sections: V+VI/VI	Côte tête/pied (cm):600-618 618-750
--------------------	------------------	-------------------	----------------------------------------

Auteurs: Candace Major & Claudia Strehle

Echantillons Dates <sup>14</sup> C jus BP non corr.	Lithologie						Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
	Vase A	Sable S	Sable tf	Sable fm	Sable mg	Sable g				
600										600-618 cm(longueur 18 cm) Argile marmoréenne vert-gris -taches noires diffuses irrégulières -débris de coquilles dispersés partout -bioturbations larges dans la partie supérieure de la section, avec des auréoles d'oxydations larges -les bioturbations en dessous de 510 cm sont fines, la plupart sub-horizontales, avec d'étroits auréoles d'oxydation
610										
620										
630										618-653 cm: Vase gris-vert avec des bioturbations fines, oxydées -taches noires -débris de coquilles rares
640										
650										
660										
670										
680										
690										653-745 cm: Vase gris-vert faiblement marmoréen avec des taches noires -espaces vides jusqu'à 1 cm de largeur entre 658 cm et 690 cm -débris de coquilles y compris quelques valves entières
700										
710										17760±130 (D)*
720										
730										
740										*Datés par le Laboratoire ETH-Hoeggerberg (Major et al., 2002); D=Dreissena
750										745-750 cm: semblable au niveau 618-653 cm



### Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 9810	Profondeur: 378m	Sections: VI/VI	Côte tête/pied (cm): 750-756,5
--------------------	------------------	-----------------	--------------------------------

Auteurs: Candace Major & Claudia Strehle

Echantillons	Lithologie						Densité	Susceptibilité	Fossiles	Description détaillée
	A	AS	S	tf	f	m				
750										750-756.5 cm: pareil au niveau 618-653 cm
760										
770										
780										
790										
800										
810										
820										
830										
840										
850										
860										
870										
880										
890										
900										

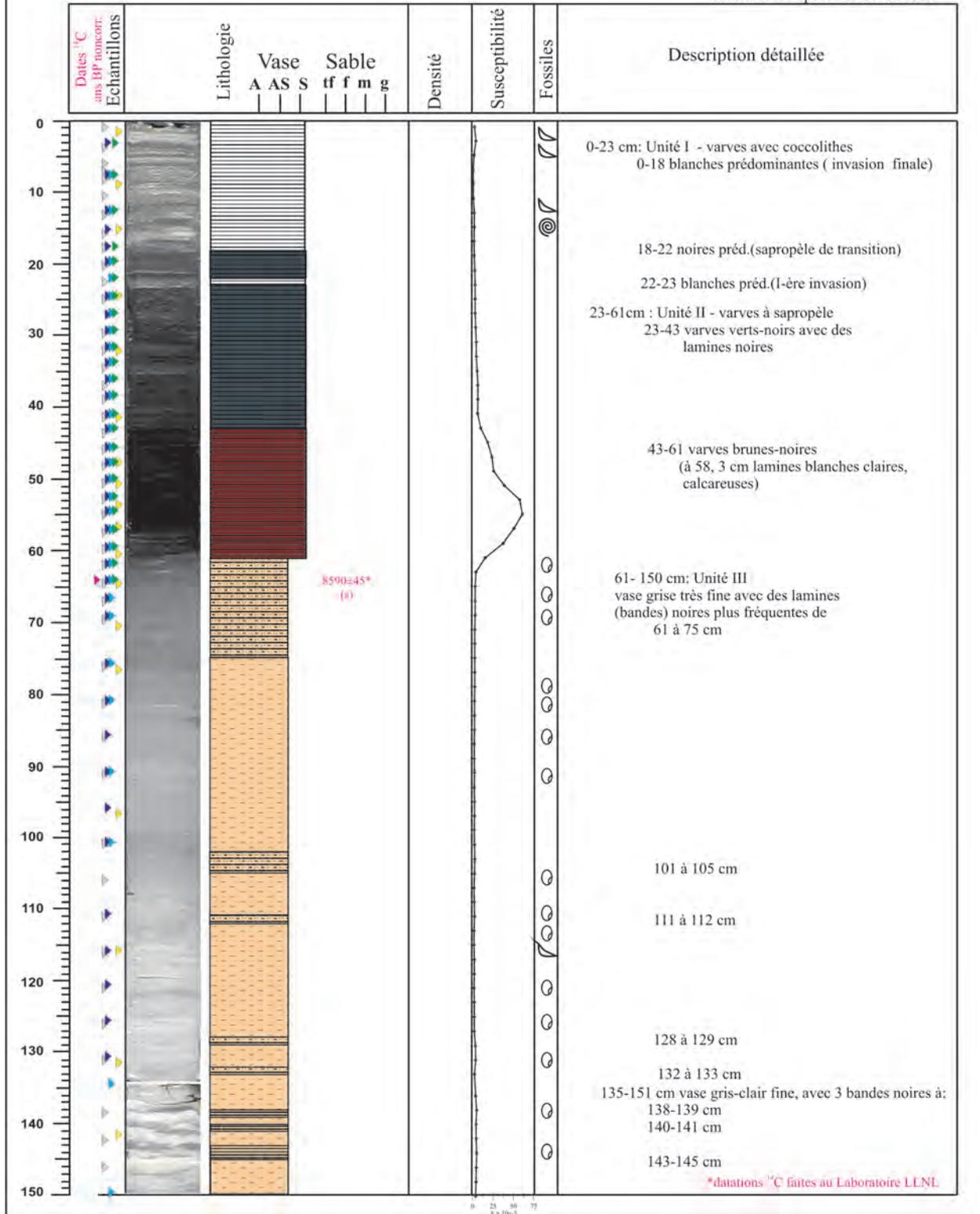


# Mission: BlaSON 1

Ifremer

Carotte: BLKS 98-11	Profondeur: 500m	Sections: I/VI II/VI	Côte tête/pied (cm): 0-135cm 135-150cm
---------------------	------------------	-------------------------	-------------------------------------------

Auteurs: I. Popescu & C. Strehie





# Mission: BlaSON 1

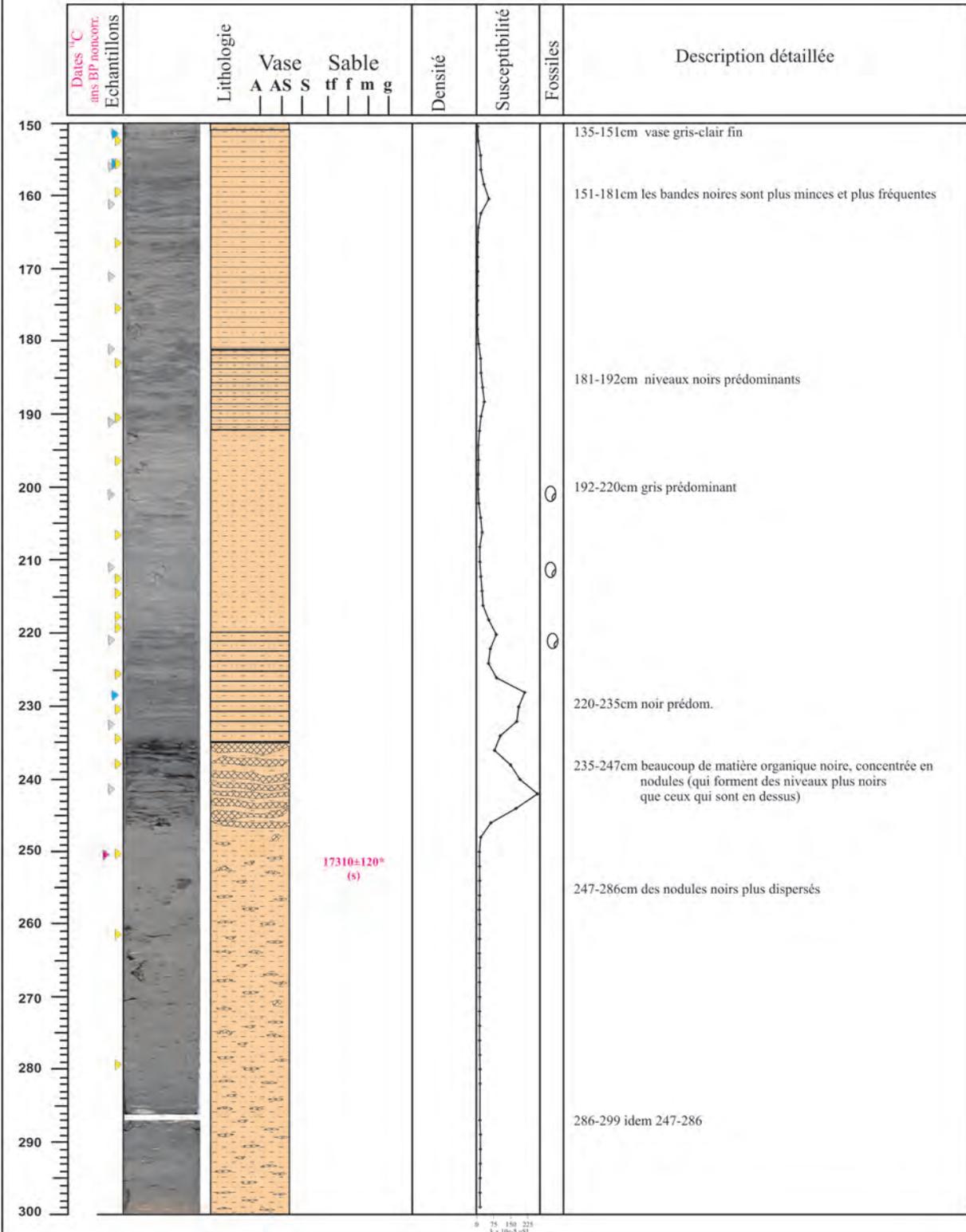
Ifremer

Carotte: BLKS 98-11

Profondeur: 500m

Sections: II/VI  
III/VI

Côte tête/pied (cm): 135-286 cm  
286-300 cm

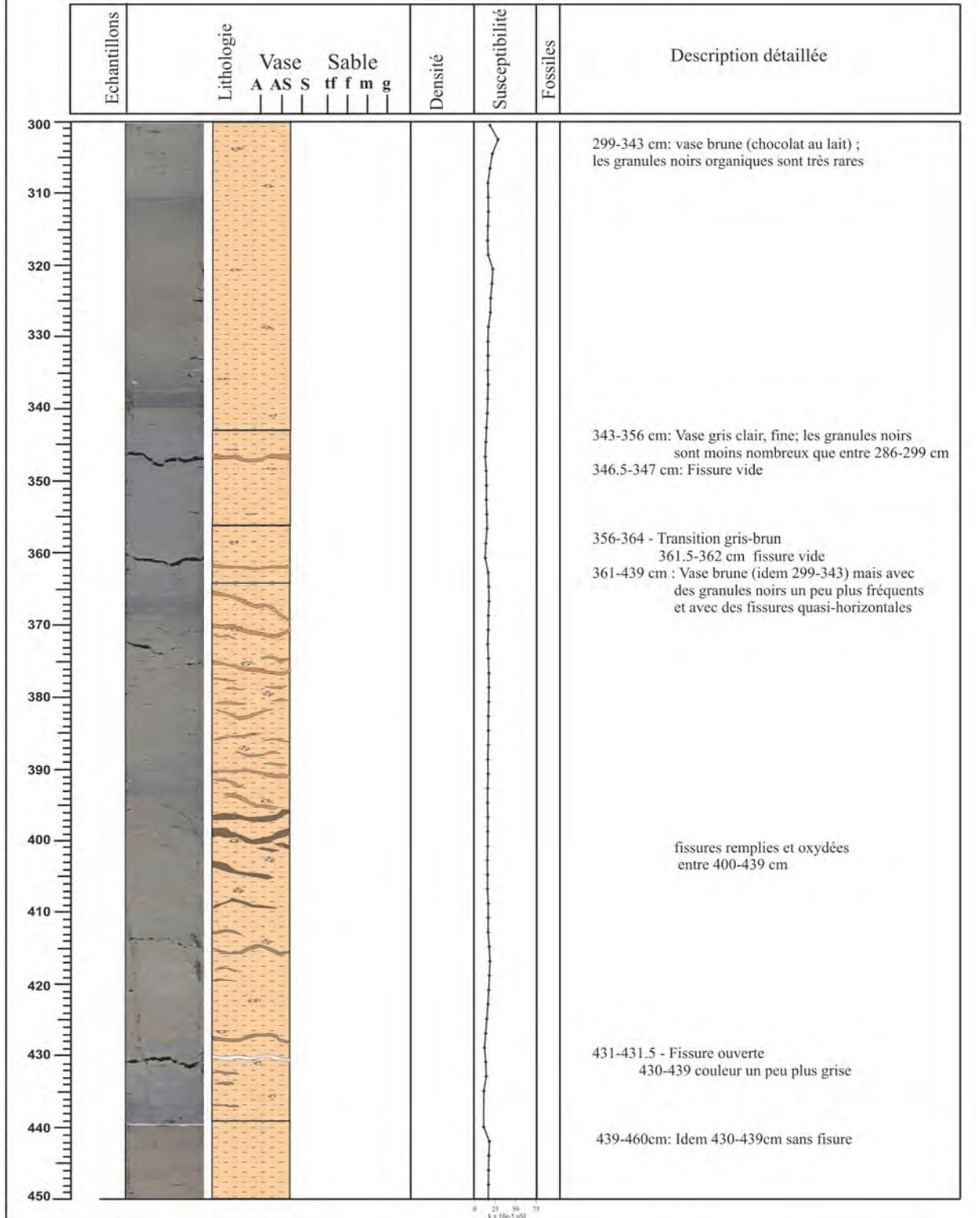




### Mission: BlaSON 1

Ifremer

Carotte: BLKS 9811	Profondeur: 500m	Sections: III/VI IV/VI	Côte tête/pied (cm): 300--439 cm 439-450 cm
--------------------	------------------	---------------------------	------------------------------------------------

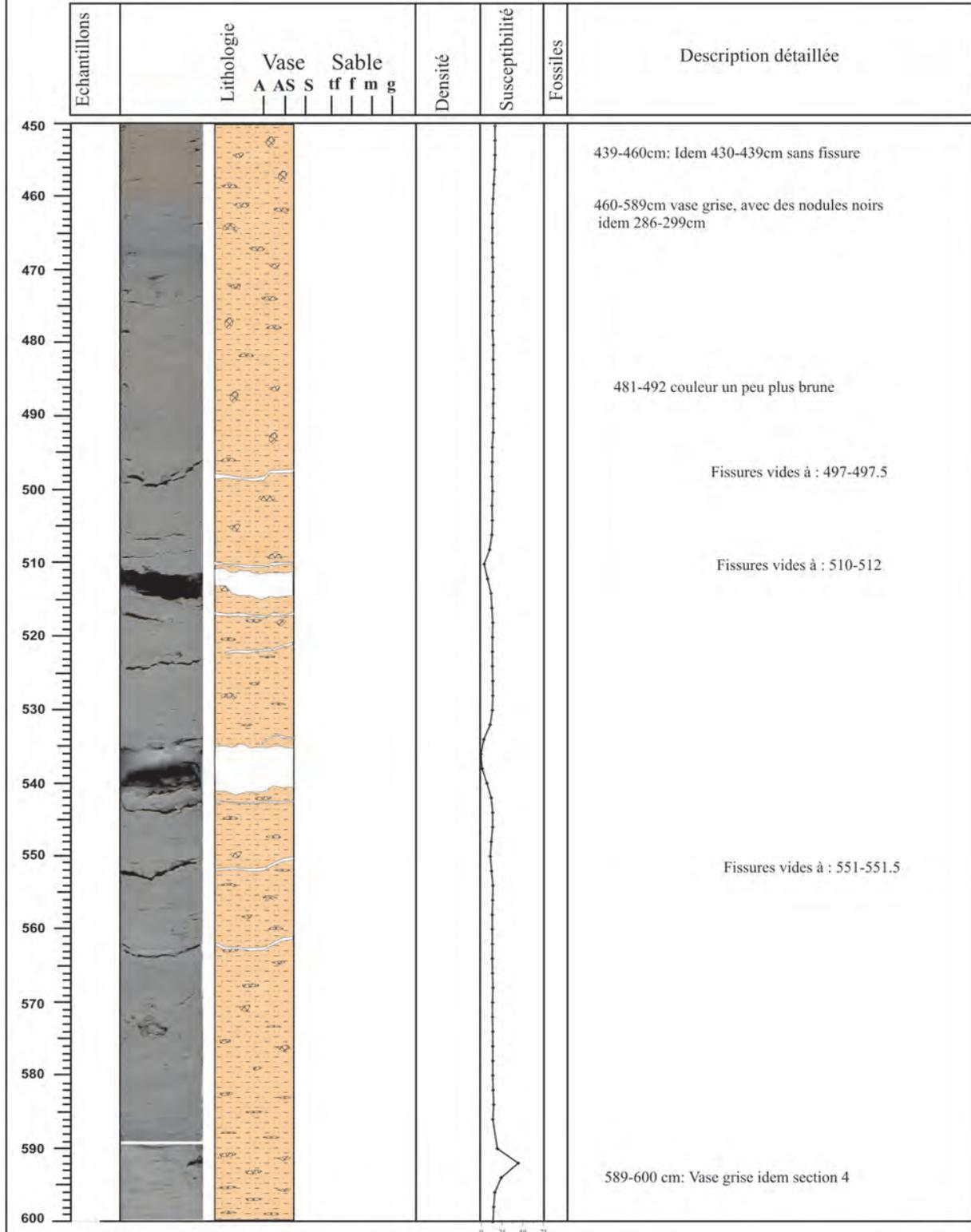




Mission: BlaSON 1

Ifremer

Carotte: BLKS 9811	Profondeur: 500m	Sections: IV/VI V/VI	Côte tête/pied (cm): 450-589 cm 589-600 cm
--------------------	------------------	-------------------------	-----------------------------------------------

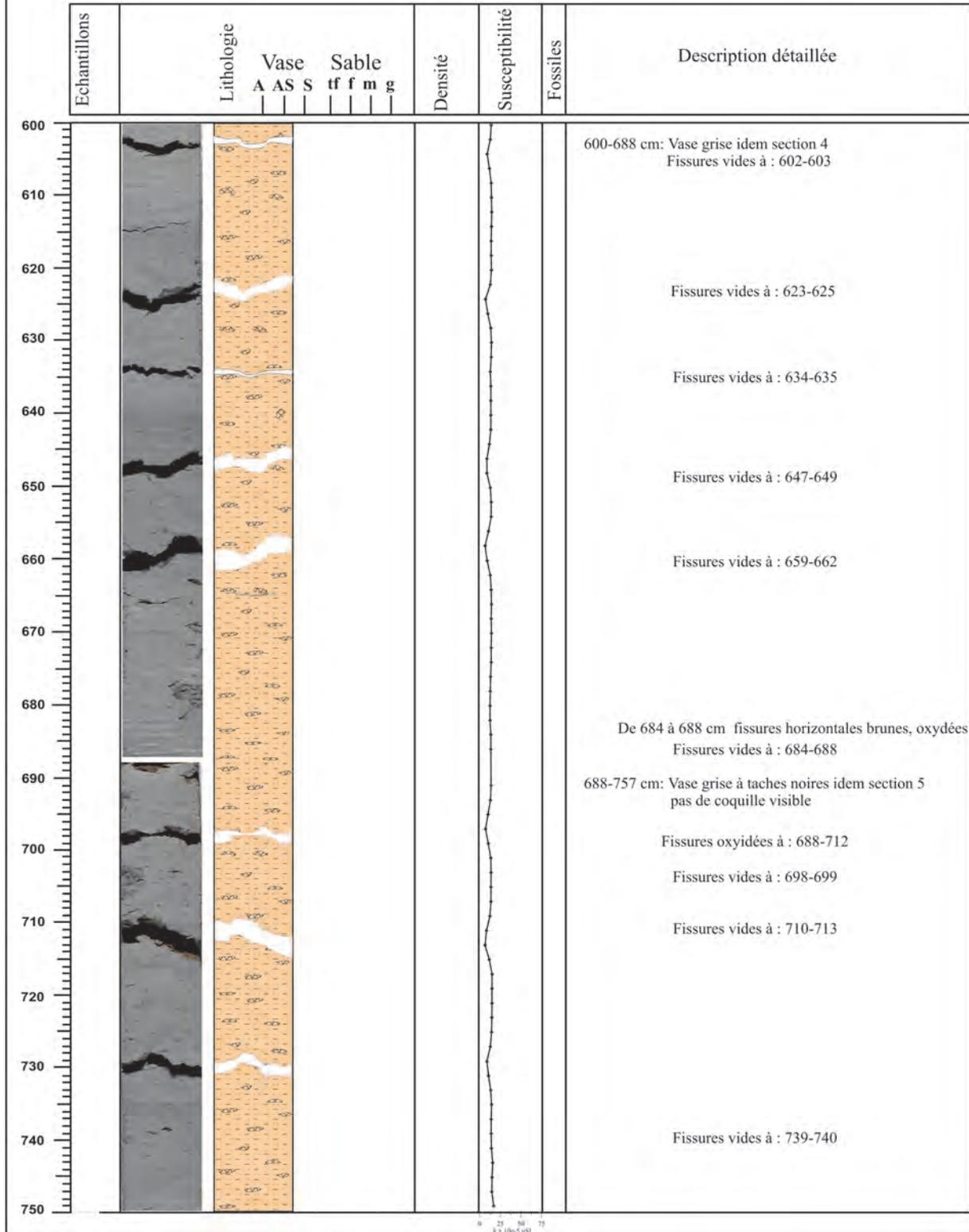




Mission: BlaSON 1

Ifremer

Carotte: BLKS 9811	Profondeur: 500m	Sections: V/VI VI/VI	Côte tête/pied (cm): 600-688 cm 688-750 cm
--------------------	------------------	-------------------------	-----------------------------------------------

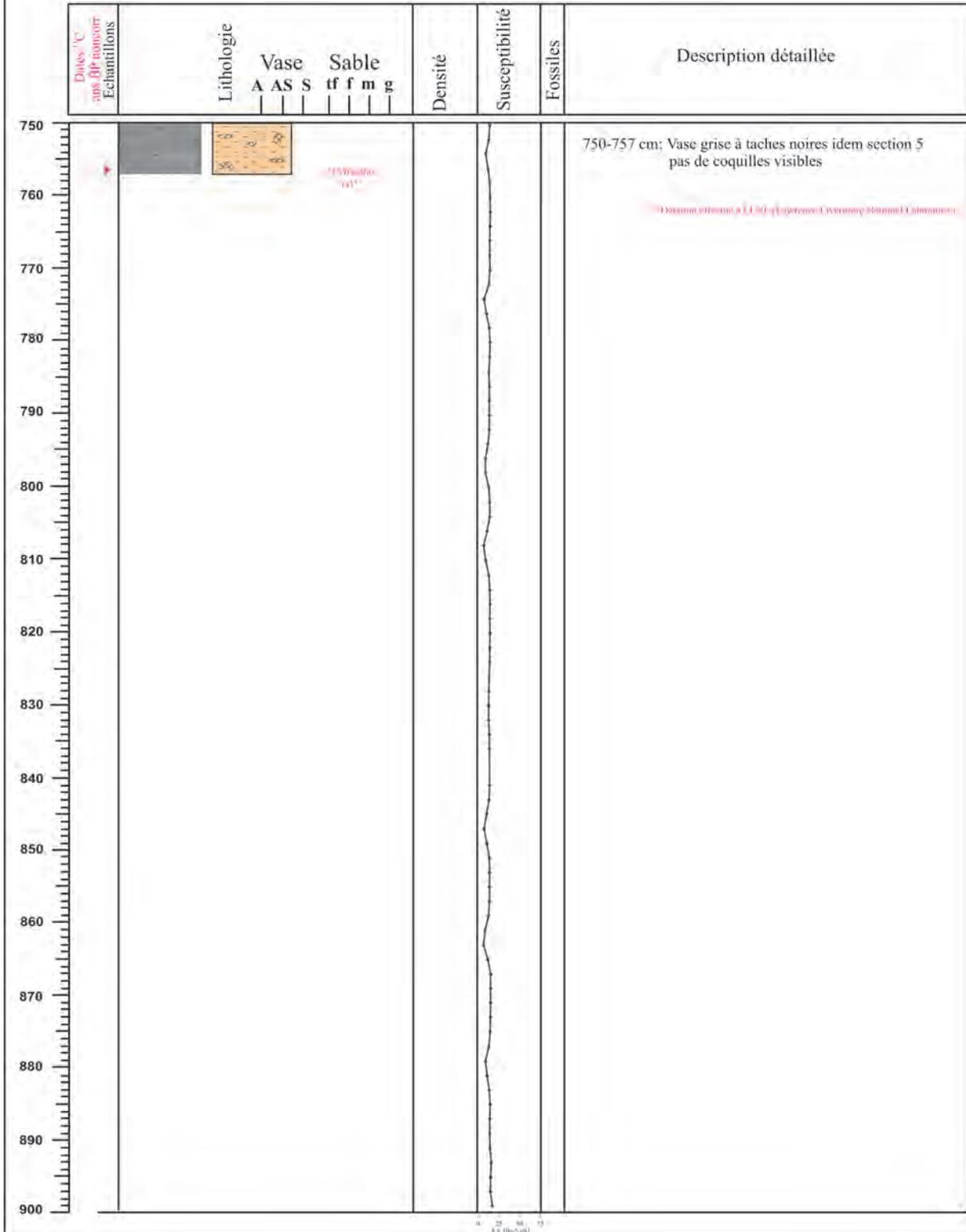




### Mission: BlaSON 1

Ifremer

Carotte: BLKS 9811	Profondeur: 500m	Sections: VI/VI	Côte tête/pied (cm): 700-757 cm
--------------------	------------------	-----------------	---------------------------------



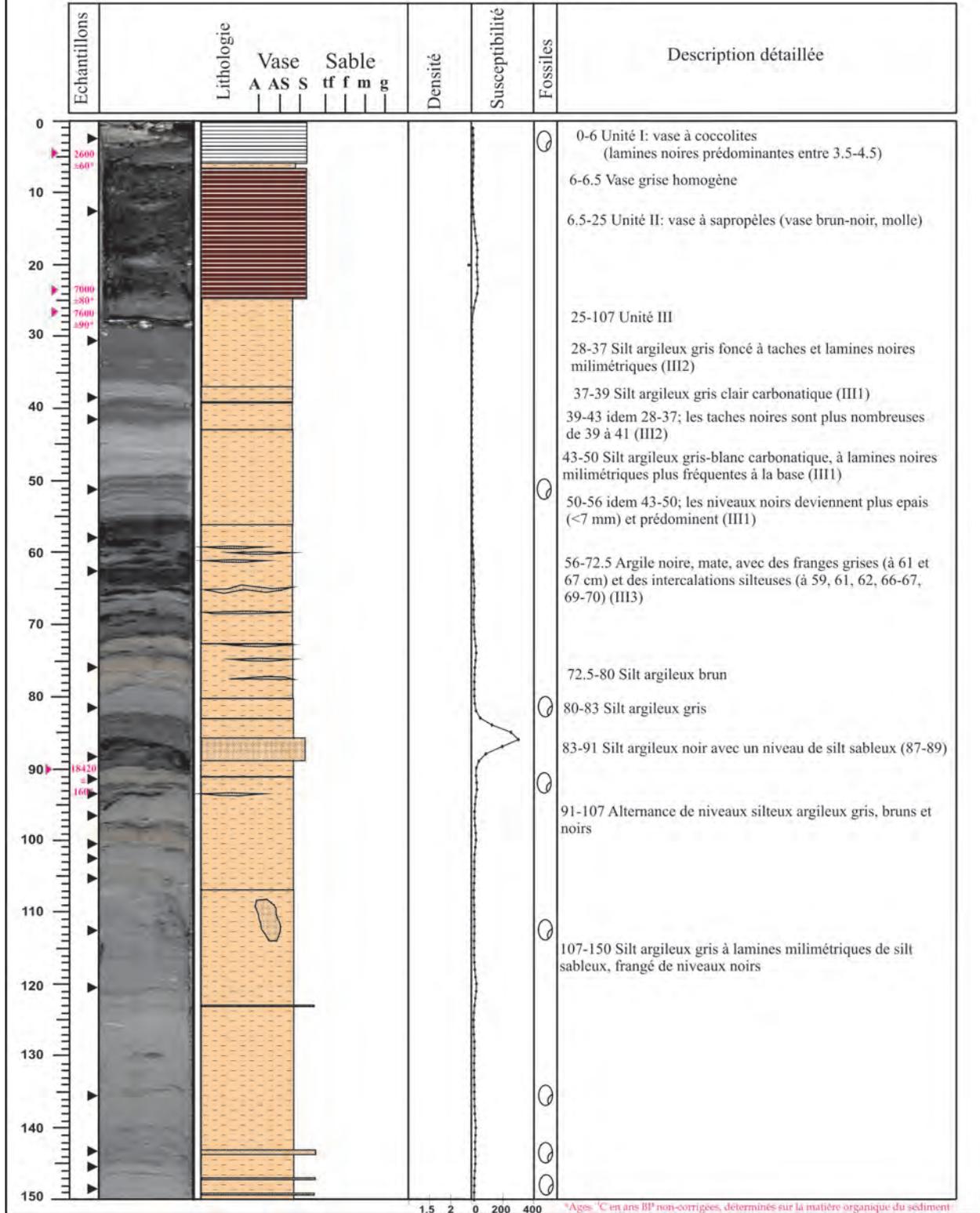


Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 98 22	Profondeur: 2100 m	Sections: I/VI II/VI	Côte tête/pied (cm): 0/28 28/177
---------------------	--------------------	-------------------------	-------------------------------------

Auteurs: I. Popescu et G. Floch



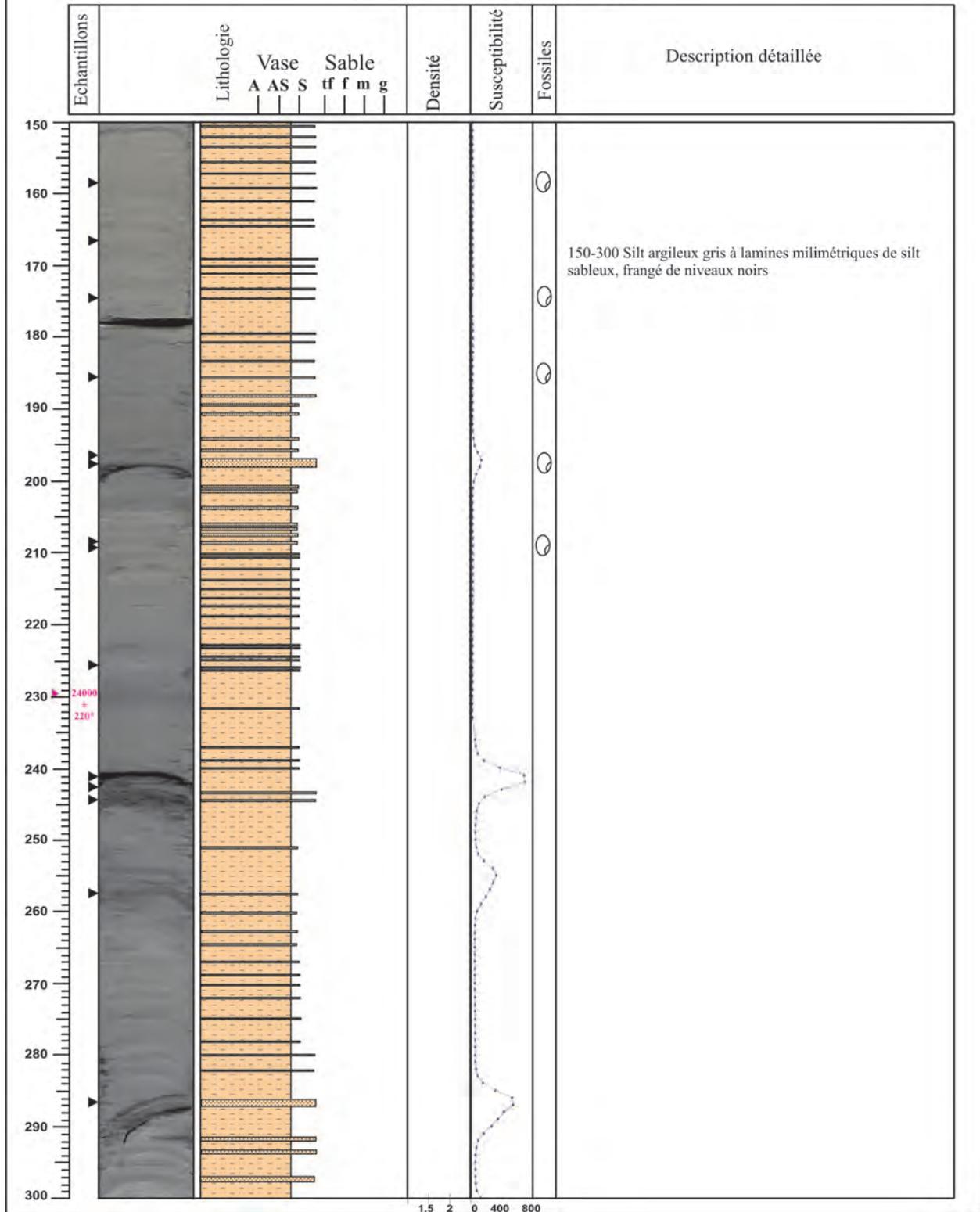


# Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 98 22 | Profondeur: 2100 m | Sections: II/VI III/VI | Côte tête/pied (cm): 28/177 177/326

Auteurs: I. Popescu et G. Floch



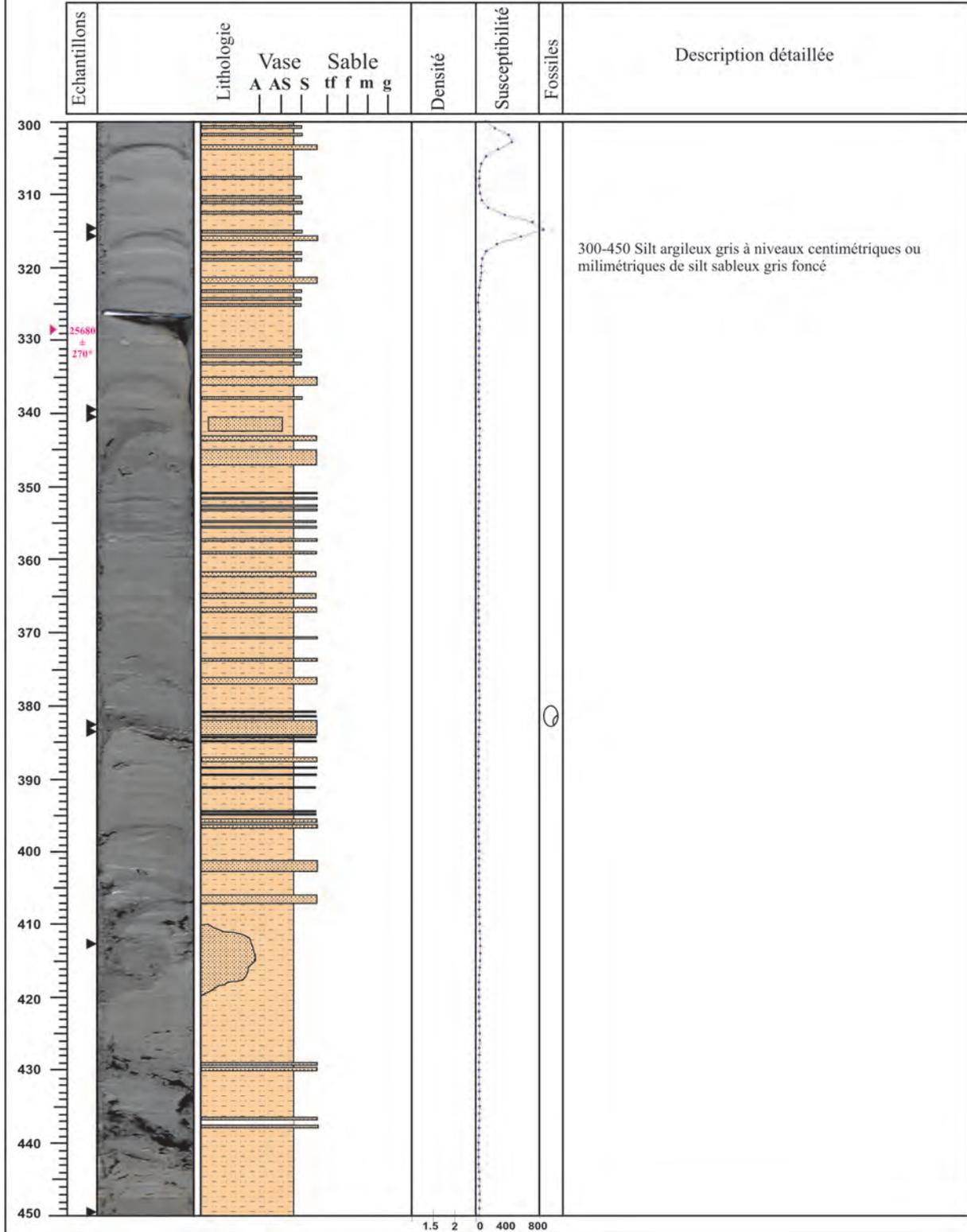


Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 98 22	Profondeur: 2100 m	Sections: III/VI IV/VI	Côte tête/pied (cm): 177/326 326/475
---------------------	--------------------	---------------------------	-----------------------------------------

Auteurs: I. Popescu et G. Floch



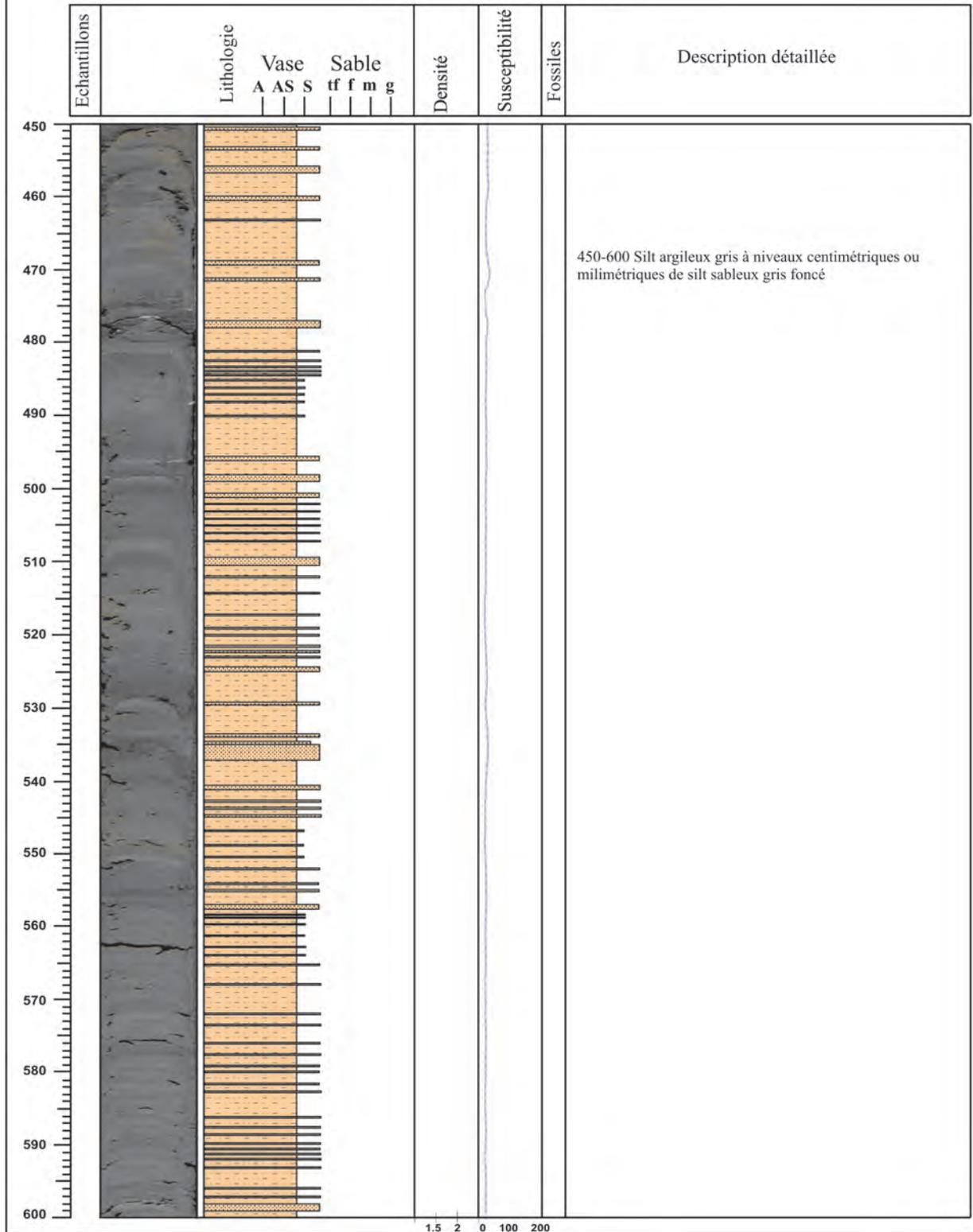


# Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 98 22	Profondeur: 2100 m	Sections: IV/VI V/VI	Côte tête/pied (cm): 326/475 475/616
---------------------	--------------------	-------------------------	-----------------------------------------

Auteurs: I. Popescu et G. Floch



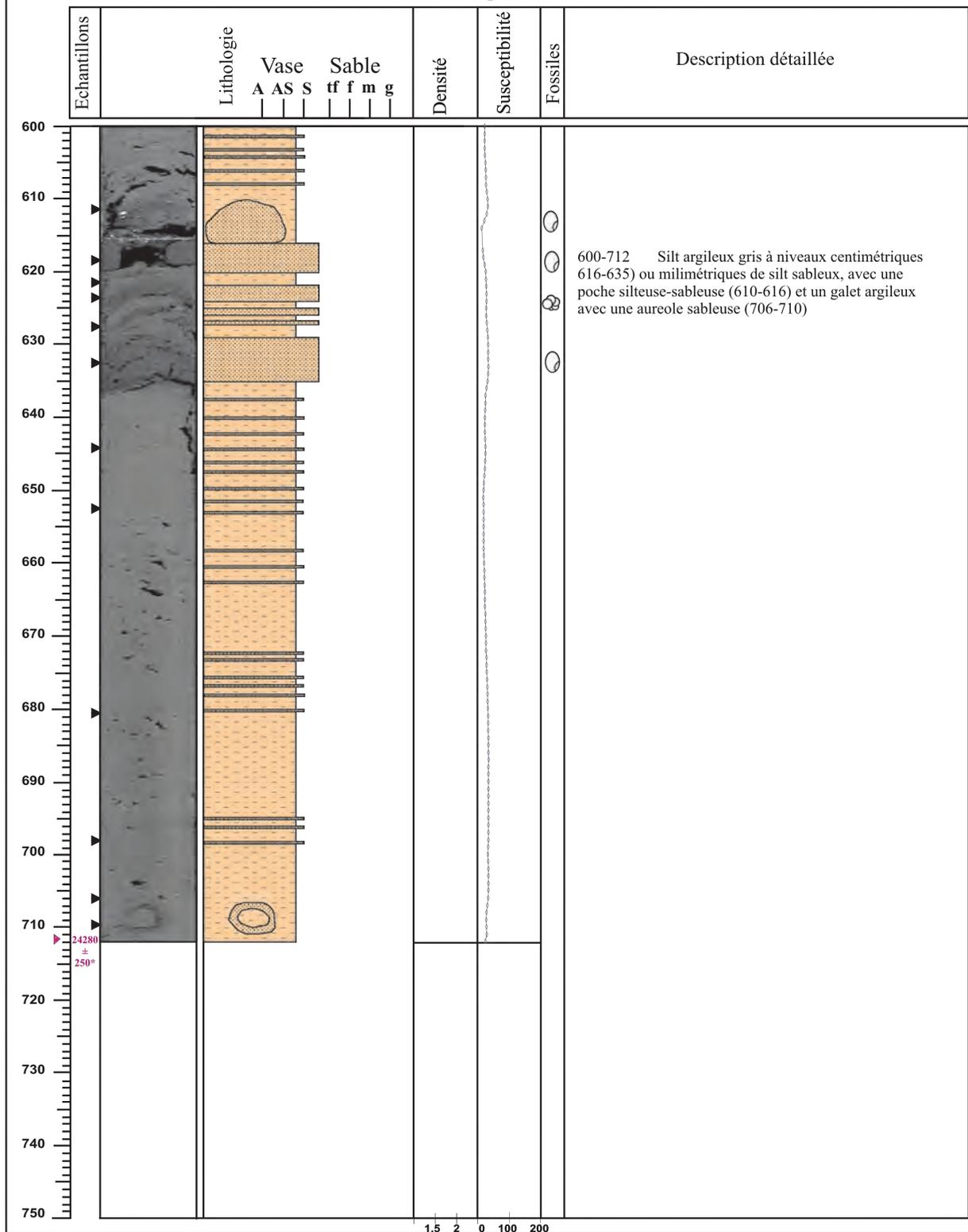


# Mission: BlaSON

Ifremer

Carotte: BLKS 98 22	Profondeur: 2100 m	Sections: V/VI VI/VI	Côte tête/pied (cm): 475/616 616/712
---------------------	--------------------	-------------------------	-----------------------------------------

Auteurs: I. Popescu et G. Floch





---

## ANNEXE 2

# DATATION $^{14}\text{C}$ - PRINCIPE ET MÉTHODE

### LE PRINCIPE DE LA DATATION PAR LE $^{14}\text{C}$

Le carbone a trois isotopes: deux stables – le carbone 12 et le carbone 13 et un qui est radioactif – le carbone 14. Dans la nature, l'abondance de ces isotopes est de:

98,89 %	pour le $^{12}\text{C}$
1.108 %	pour le $^{13}\text{C}$
et	
$1,2 \cdot 10^{-12}$ %	pour le $^{14}\text{C}$

Autrement dit, seulement 1 atome sur 1000 milliards d'atomes de carbone est radioactif. Et c'est précisément cette propriété qui le rend intéressant pour la datation de divers matériaux d'origine organique. Ceci est dû au fait que, tout au long de leur vie, les végétaux et les animaux assimilent directement ou indirectement le gaz carbonique de l'atmosphère.

Le gaz carbonique de l'air présente une certaine radioactivité qui est due à la très faible proportion de  $^{14}\text{C}$  qu'il contient. Lorsque l'organisme vit, il interagit avec le  $\text{CO}_2$  atmosphérique directement par la photosynthèse ou indirectement en se nourrissant de plantes, et il est en équilibre avec celui-ci: il contient autant de  $^{14}\text{C}$  que le  $\text{CO}_2$  atmosphérique. A sa mort, les échanges cessent, le  $^{14}\text{C}$  n'est pas renouvelé et sa radioactivité diminue de moitié tous les  $5730 \pm 40$  ans.

Ainsi, si l'on mesure aujourd'hui l'activité  $^{14}\text{C}$  (A) d'un échantillon d'origine biologique (charbon de bois, bois, coquilles ou os), on peut, en la comparant à l'activité du carbone moderne ( $A_0$ ), en déduire le temps (t) qui s'est écoulé depuis sa mort. C'est ce qu'on appelle l'âge. Il est calculé à partir de la formule classique de décroissance exponentielle radioactive:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

où  $\lambda$  est la constante de désintégration L2/T égale à  $0.693/T$ , T étant la période de désintégration du  $^{14}\text{C}$  de 5568 ans.

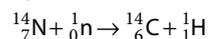
La formule pour le calcul des âges s'obtient en introduisant la valeur de la période, dans la formule de décroissance:

$$t = \frac{\ln A_0}{A} \times 18.5 \times 10^3 \text{ ans}$$

Le principe de la méthode repose sur l'hypothèse qu'au moins au cours des 50 000 dernières années la radioactivité naturelle du carbone est restée constante et égale à celle mesurée en 1950 (= année de référence « Before Present », B.P.) (Libby, 1952). Des mesures plus précises, ont démontré ultérieurement que cette hypothèse n'est pas rigoureusement exacte et que l'activité du carbone n'a pas toujours été constante dans le temps.

### L'ORIGINE DU $^{14}\text{C}$

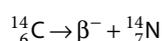
L'isotope de masse 14 du carbone est le résultat de l'interaction, dans la haute atmosphère, des rayonnements cosmiques avec les éléments terrestres. Quand ils ne sont pas déviés par les champs magnétiques, les protons de grande énergie, qui forment l'essentiel du rayonnement primaire, provoquent des réactions nucléaires violentes qui font éclater des noyaux des composants atmosphériques. Ils créent ainsi des rayonnements secondaires, parmi lesquels, de nombreux neutrons. Ces neutrons entrent en collision avec des atomes d'azote  $^{14}\text{N}$  et donnent naissance à l'isotope  $^{14}\text{C}$ . La réaction est la suivante:



Il y a d'autres réactions conduisant à la formation de  $^{14}\text{C}$  dans l'atmosphère, à partir de:  $^{16}\text{O}$  (n,  $^3\text{He}$ );  $^{16}\text{O}$  (p, 3p);  $^{17}\text{O}$  (n,  $\alpha$ );  $^{15}\text{N}$  (n,  $\delta$ );  $^{13}\text{C}$  (n,  $\gamma$ ), mais ils ont une importance mineure.

Le taux maximal de formation du  $^{14}\text{C}$  se produit à la base de la stratosphère, à des altitudes de 15 à 20 km. Les atomes de  $^{14}\text{C}$  créés sont rapidement oxydés et donnent du gaz carbonique  $^{14}\text{CO}_2$  qui se mélange au reste du gaz carbonique de l'air de manière pratiquement homogène dans les basses couches de l'atmosphère (Delibrias, 1985; Fontugne, 1996).

Le carbone 14 se désintègre avec l'émission de radiations  $\beta^-$ , selon le schéma:



La **période de désintégration** du carbone 14 est de **5730 ± 40 ans** (Godwin, 1962). Pourtant, afin d'éviter les confusions, on utilise pour le calcul des âges la **période de désintégration de 5568 ans** adoptée en 1951 à la suite des conventions internationales. Son utilisation a comme résultat une sous-estimation de l'âge d'environ 3 %.

La radioactivité naturelle d'un gramme de carbone est très faible. Elle a été déterminée par Karlen *et al.*, 1966 comme étant égale à  $13.56 \pm 0.07$  désintégrations par minute.

## CORRECTIONS DES ÂGES ${}^{14}\text{C}$

Des différences entre les âges mesurées et les âges historiquement bien déterminés, ont conduit à l'idée qu'il est nécessaire d'effectuer des corrections d'âges  ${}^{14}\text{C}$ . Il faudra donc, tenir compte de la nature des végétaux qui ont donné le matériel organique daté, du milieu (continental ou terrestre; marin ou lacustre), du type de bassin où les organismes ont vécu et de la variation de concentration du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère au fil du temps.

### LES CORRECTIONS DE FRACTIONNEMENT BIOLOGIQUE (CORRECTION DE $\delta^{13}\text{C}$ )

Les végétaux n'assimilent pas de la même manière tous les isotopes du carbone. Les végétaux faisant leur photosynthèse suivant le cycle de Hatch-Slack (Cycle C4) comme le maïs, le millet ou les graminées des milieux arides et de savanes sont enrichis en carbone 13 (et par conséquent en carbone 14) par rapport à ceux faisant leur photosynthèse suivant le cycle de Calvin-Benson (Cycle C3), tels les arbres. Un enrichissement plus important est également observé pour les carbonates marins et continentaux. Ce phénomène de **fractionnement biologique** se traduit par une dispersion des âges selon la nature des échantillons pourtant contemporains (**Fig.A2.1**) (Polach, 1976; Stuiver et Polach, 1977; Fontugne, 1996). Autrement dit, si on mesure les activités  ${}^{14}\text{C}$  d'un maïs, d'un arbre et d'une coquille morts le même jour, on va obtenir des âges divers, dus au fractionnement isotopique.

Il s'ensuit la nécessité des **corrections du fractionnement biologique** (correction de  $\delta^{13}\text{C}$ ). Ces corrections sont effectuées en normalisant les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  qui sont une autre formulation du rapport isotopique  ${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ , à une valeur de  $-25 \text{‰}$  par rapport à un standard international, le PDB.

Par définition,  $\delta^{13}\text{C}$  du standard est égal à  $0 \text{‰}$  (c'est un carbone extrait d'une calcite provenant d'un rostre de **Bélemnite** du Crétacé supérieur de la formation de **Pee Dee** - Caroline du Sud, Etats-Unis). Cette calcite n'est plus disponible, on utilise d'autres standards calibrés par rapport à cette référence, mais tous les résultats doivent être exprimés en  $\text{‰}$ , wrt<sup>1</sup> PDB.

La formule de calcul de  $\delta^{13}\text{C}$  est:

$$\delta^{13}\text{C}\text{‰} = \left[ \frac{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{éch}} - {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{PDB}}}{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{PDB}}} \right] \times 1000$$

<sup>1</sup> with respect to = par rapport au

La correction de l'activité  $\Delta^{14}\text{C}$  mesuré se fait selon la formule:

$$\Delta^{14}\text{C}\text{‰} = \delta^{14}\text{C} - (2 \delta^{13}\text{C} + 50) (1 + \delta^{14}\text{C}/1000)$$

ou  $\delta^{14}\text{C}$  est la différence en  $\text{‰}$  entre le rapport  ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  de l'échantillon et celui du carbone standard

$$\delta^{14}\text{C}\text{‰} = \left[ \frac{{}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{éch}} - {}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{stand.}}}{{}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{stand.}}} \right] \times 1000$$

$\delta^{13}\text{C}$  est déterminé à partir du composé carboné utilisé pour la mesure de radioactivité, ce qui permet de corriger également les éventuels fractionnements qui peuvent se produire au cours de la préparation chimique.

Cette correction, peut varier d'environ  $-100$  ans pour une tourbe à  $+400$  ans pour un carbonate (**Fig.A2.1**).

### LA CORRECTION D'ÂGE RÉSERVOIR

Pour comprendre la nécessité d'une correction réservoir, il faut d'abord définir et expliquer la notion d'**âge  ${}^{14}\text{C}$  apparent**.

L'eau de mer contient du  ${}^{14}\text{C}$  issu principalement de la dissolution du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère dans les eaux superficielles. Les eaux profondes océaniques se trouvent appauvries en carbone 14 du fait d'échanges plus difficiles avec l'atmosphère. Le mélange des eaux superficielles avec les masses d'eaux profondes plus anciennes a comme résultat un appauvrissement en  ${}^{14}\text{C}$  des premières d'environ 5%, soit un vieillissement d'environ 400 ans. Les organismes marins qui y vivent fixent le carbone dissous dans l'eau, ils présentent de ce fait le même rapport  ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  et se trouvent ainsi systématiquement vieilliss. C'est le cas, en particulier des coquillages marins littoraux qui ont l'âge des eaux superficielles océaniques.

En mesurant soigneusement la radioactivité de coquillages littoraux collectés vivants à une date précise, avant les perturbations apportées par les bombes atomiques, et conservés dans des collections de fossiles, les chercheurs ont obtenu des **âges apparents** d'environ 380-400 ans (par ex.: Delibrias, 1985; Stuiver et Braziunas, 1993). Dans les zones d'upwelling, le long de certaines côtes où les eaux profondes ascendantes se retrouvent partiellement en surface, l'âge apparent peut atteindre 700 à 800 ans (Berger *et al.*, 1966).

Il s'impose donc une **correction de réservoir**, au sujet de laquelle les laboratoires ont des idées variées: Olsson (1974) pense que dans l'impossibilité de connaître avec certitude l'âge de l'eau de mer dans laquelle a vécu le coquillage daté, il est préférable de ne faire aucune correction, et de préciser qu'il s'agit d'un âge apparent. En pratique, la plupart des laboratoires font une correction d'environ 400 ans, âge moyen des eaux de mer superficielles.

Le même problème se pose dans un milieu lacustre, où les plantes et les animaux sont aussi à l'équilibre radioactif avec l'eau. La difficulté, dans le cas des lacs vient de ce que l'origine du carbone y est le plus souvent complexe: les échanges avec l'atmosphère aux quelles peut se rajouter la dissolution du calcaire qui se trouve dans le bassin de drainage du lac et qui entraîne un vieillissement des eaux, connu sur le nom de « hard effect ». Le  $\text{CO}_2$  introduit par la dissolution d'un calcaire ancien est très appauvri ou même sans  ${}^{14}\text{C}$ .

Vogel (1970) a déterminé empiriquement que, dans la plupart des cas, on avait  $15 \pm 5\%$  de carbone ancien et  $85 \pm 5\%$

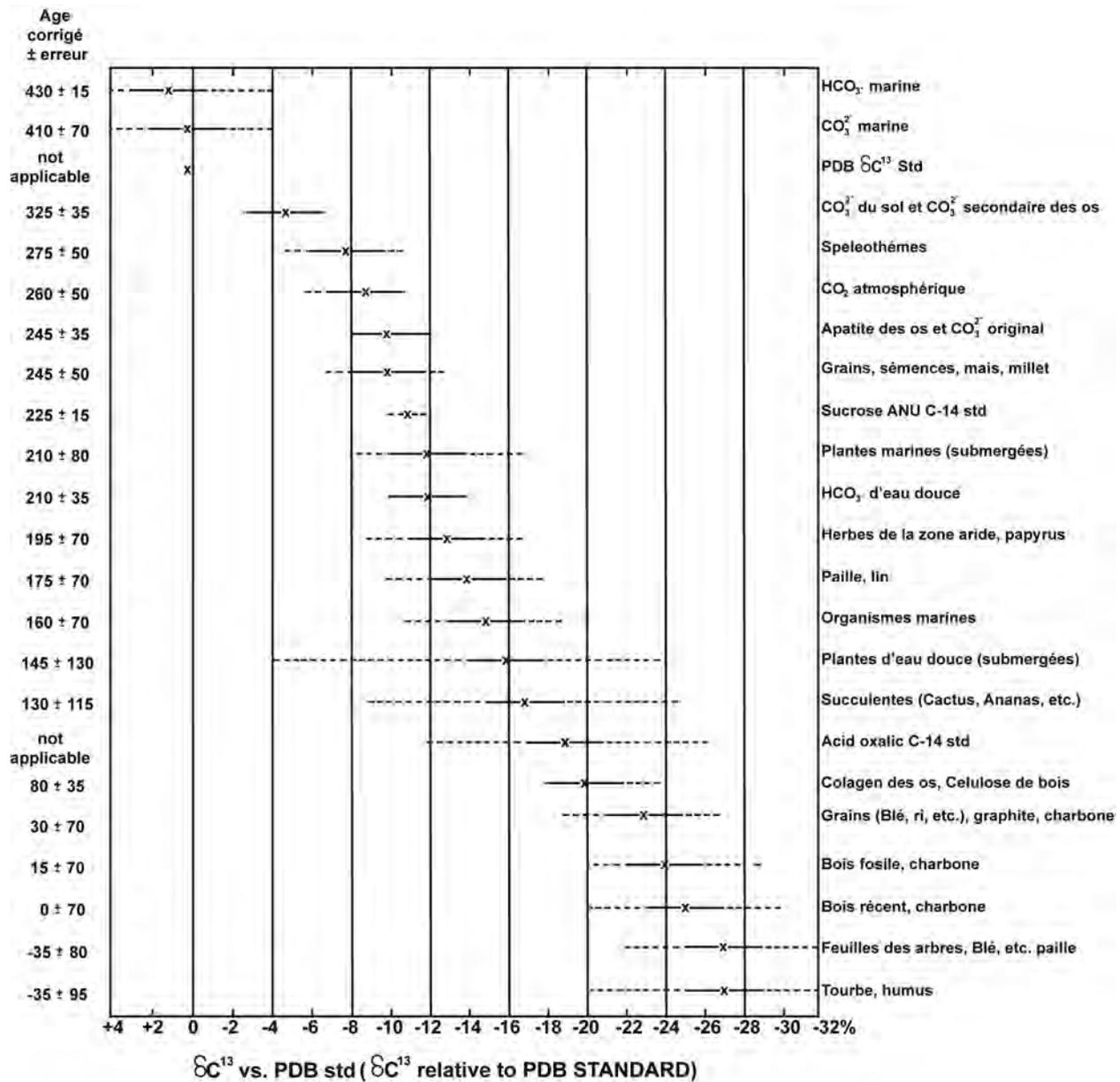


Fig.A2.1. Dispersion des âges <sup>14</sup>C en fonction des rapports δ<sup>13</sup>C, en nature (d'après Polach, 1976)

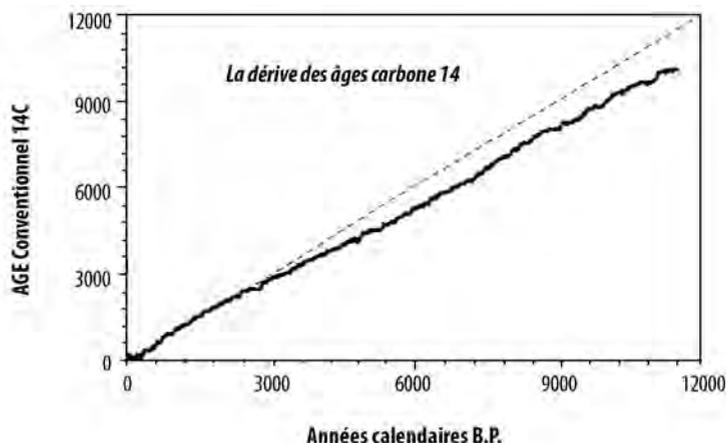
de carbone moderne: ceci conduit à un âge apparent de 1300 ans environ pour l'eau des lacs et pour les organismes lacustres vivants.

En l'absence démontrée de roches calcaires dans un bassin, on n'a théoriquement pas de vieillissement important pour les organismes du lac correspondant.

#### LA CALIBRATION DES ÂGES <sup>14</sup>C

La calibration des âges <sup>14</sup>C est leur conversion en âges calendaires. En réalité, un âge <sup>14</sup>C, après calibration, se trouve converti, non pas en une autre date, mais en un intervalle de dates, plus au moins long, selon l'incertitude statistique sur l'âge mesuré et selon la période considérée. Il représente un intervalle de confiance à 95 % pour la date calibré.

Une plus grande précision des mesures a souligné le rajeunissement systématique des âges <sup>14</sup>C par rapport aux âges bien déterminés à l'aide du calendrier de l'ancienne Egypte (Ralph, 1959). Le phénomène a été confirmé par l'étude détaillée des âges des *cernes annuels de troncs de vieux arbres* à croissance assez lente. Ainsi, contrairement à l'hypothèse de début de la méthode, le rapport <sup>14</sup>C/<sup>12</sup>C du carbone atmosphérique a subi des modifications au cours du temps (De Vries, 1958). Aujourd'hui, on sait que les paramètres qui contrôlent la teneur en <sup>14</sup>C de l'atmosphère sont: les flux de particules cosmiques incidentes, l'intensité du champ magnétique terrestre et les échanges entre les différents réservoirs de carbone qui sont: l'océan, la biosphère et l'atmosphère.



**Fig.A2.2.** Dérive des âges  $^{14}\text{C}$  mise en évidence par les études dendro-chronologiques (d'après Fontugne, 1996)

Tout en sachant que seule la couche annuelle externe d'un arbre vivant est en équilibre avec l'atmosphère, les couches internes étant « mortes », si on mesure les activités  $^{14}\text{C}$  des cerneaux des arbres, on peut reconstituer les taux de  $^{14}\text{C}$  atmosphérique du passé. En étudiant la succession d'anneaux d'arbres vivants ou fossiles (dendrochronologie), les chercheurs ont repéré des séquences caractéristiques permettant de faire des recoupements d'un tronc à un autre et d'obtenir une très longue série chronologique de bois d'âges connus. La dendrochronologie permet une calibration fiable remontant à près de 11 400 ans (**Fig.A2.2**) (Stuiver et Braziunas, 1993, Stuiver et Reimer, 1993; Fontugne, 1996, 2002). Ceci constitue une sorte d'abaque permettant de transcrire directement un âge  $^{14}\text{C}$  conventionnel en années avant le présent (BP<sup>2</sup>) ou en années avant/après Jésus Christ (AD<sup>3</sup>), la date calendaire.

La calibration peut s'étendre au-delà de 11 400 ans par le comptage des *varves* et la mesure de l'activité  $^{14}\text{C}$  des macro-restes végétaux contenus dans les lamines de sédiment déposés dans des lacs profonds dépourvus d'oxygène. Cette méthode est en accord avec les enregistrements dendrochronologiques pour les périodes inférieures à 15 000 ans. Au-delà de 20 000 ans, nous disposons seulement de l'enregistrement du lac Suigetsu (Japon) qui couvre les 45 000 dernières années (Kitagawa et Van der Plicht, 1998).

Une autre méthode de calibration des âges  $^{14}\text{C}$  a été fournie par la datation  $^{14}\text{C}$  en parallèle avec la datation  $^{230}\text{U}/^{234}\text{Th}$  de couches successives des *coraux*. Bard *et al.*, 1990 ont publié une esquisse de calibration basée sur une trentaine d'échantillons pour une période allant jusqu'à 20 000 ans.

## MÉTHODE

La plupart des datations  $^{14}\text{C}$  ont été effectuées au Tandetron de Gif-sur-Yvette, par Martine Paterne, Christine Hatté et Michel Fontugne du Laboratoire de Sciences du Climat et de

l'Environnement (LSCE). 4 datations ont été réalisées au Center for Accelerator Mass Spectrometry de Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). La technique de datation utilisée est la Spectrométrie de Masse avec Accélérateur (en anglais, Accelerator Mass Spectrometry, AMS).

Nous avons daté les carbonates de coquilles et la matière organique de sédiments.

Les échantillons de *sédiment* (environ 2 grammes), sont séchés immédiatement après le prélèvement, à 50°C jusqu'au poids constant, ils sont ensuite broyés dans un mortier en agate. Le séchage immédiat après l'échantillonnage des sédiments, permet une bonne conservation de la matière organique et minimise l'influence de la dégradation bactérienne. Une décarbonatation lente à HCl 0.3N pendant plusieurs jours, a

permis l'enlèvement des carbonates, sans détruire la matière organique. En fin de la réaction acide, le sédiment a été lavé à l'eau ultra-pure jusqu'à pH 5-6, séché à l'étuve à 50°C et rebroyé, pour l'homogénéisation.

Les échantillons sont ensuite scellés sous vide en présence de CuO et Ag, dans un tube en quartz. La combustion se fait à 840°C pour 6 heures. Le  $\text{CO}_2$  obtenu est purifié, quantifié et stocké dans un réacteur en verre. Le  $\text{CO}_2$  est ensuite réduit en graphite utilisant du fer comme catalyseur, en présence de  $\text{H}_2$ , à 650°C. La poudre Fer-Graphite est compactée en une ou plusieurs cibles, stockées sous atmosphère d'argon jusqu'à l'analyse par AMS au Tandetron de Gif-sur-Yvette (UMS 2004) (Arnold *et al.*, 1987).

Les *coquilles* de bivalves ont été soigneusement nettoyées à l'aide d'un jet de sable, afin d'enlever toutes les contaminants, comme par exemple le carbonate déposé éventuellement sur la coquille après sa mort et qui peut altérer la date. Pour la même raison, les coquilles plus fragiles de gastéropodes ont été trempées quelques secondes en acide azotique  $\text{HNO}_3$  0.1-0.5N et rincées ensuite à l'eau ultra-pure, quelques secondes aux ultrasons et séchées à l'étuve à 50°C. Le nettoyage a été effectué de manière différente du fait de leur forme et de leur petite taille, qui rend difficile l'opération de nettoyage au jet de sable. Les coquilles ainsi nettoyées, ont été introduites dans des ampoules à deux doigts alors que le second doigt contenait 1 ml d'acide phosphorique pur (100%  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). Le carbonate a ensuite été hydrolysé sous vide (Tisnérat-Laborde *et al.*, 2001). Deux cibles de 2 mm de poudre fer-carbone ont été réalisées et mesurées. Pour une datation environ 15 mg de carbonate des coquilles sont nécessaires.

Les âges sont des âges conventionnels en années BP, corrigés pour le fractionnement isotopique par la normalisation des résultats à la valeur standard de  $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$  PDB (Stuiver et Polach, 1977).

<sup>2</sup> Before Present, le 0 BP étant par convention, l'année 1950

<sup>3</sup> Anno Domine

---

**ANNEXE 3**  
**DATATION <sup>14</sup>C DES SÉDIMENTS ET DE COQUILLES DE**  
**LA MER NOIRE, DANS LA LITTÉRATURE**

Année	Référence	Carotte	Profondeur de l'échantillon (cm)	Latitude N	Longitude E	Profondeur de l'eau (m)	Longueur de la carotte (m)	Matériel daté	Méthode	Age conventionnel (ans BP)	Erreur (ans)	Age corrigé pour le réservoir BP	Age corrigé pour le réservoir et pour le détritique (ans BP)	Age calibré	Age réservoir (ans)		
1974	Deuser, 1972; Ross & Degens, 1974	1474K	16-22	42°23.3'	37°36.2'	2117	6	carbonates		3450	140						
		1474K	125	42°23.3'	37°36.2'	2117	6	carbonates		14600	220						
		1474K	335	42°23.3'	37°36.2'	2117	6	carbonates		20900	400						
		1474K	585	42°23.3'	37°36.2'	2117	6	carbonates		30700	1200						
		1474K	27	42°23.3'	37°36.2'	2117	6	MO		3090	140						
		1474K	65	42°23.3'	37°36.2'	2117	6	MO		7090	180						
		1474K	125-135	42°23.3'	37°36.2'	2117	6	MO		8600	150						
		1474K	330	42°23.3'	37°36.2'	2117	6	MO		13850	210						
		1474K	580	42°23.3'	37°36.2'	2117	6	MO		16900	270						
				1474P	1080-1160	42°23.0'	37°36.6'	2114	11,58	MO		22830	800				
1974	Ross & Degens, 1974	1462K	72	43°02.8'	33°02.1'	2186	2,96	MO		3450	120						
		1462K	102	43°02.8'	33°02.1'	2186	2,96	MO		3450	130						
		1462K	151	43°02.8'	33°02.1'	2186	2,96	MO		6650	150						
		1451G	42-62	43°34.2'	29°31.5'	460	0,72	MO		6240	120						
		1450G	50-66	43°39.4'	30°09.4'	563	1,15	MO		6270	110						
1987	Calvert <i>et al.</i> , 1987	1432	64-66	43°00.6'N	34°04.5'E	2248	1,24	MO	AMS <sup>14</sup> C	3945	280				2000		
		1432	100-102	43°00.6'N	34°04.5'E	2248	1,24	MO	AMS <sup>14</sup> C	8660	150				2000		
		1470	130	42°02.9'N	41°18.1'E	906	2,27	MO	AMS <sup>14</sup> C	6270	200				2000		
		1470	160	42°02.9'N	41°18.1'E	906	2,27	MO	AMS <sup>14</sup> C	7789	150				2000		
1992	Shopov <i>et al.</i> , 1992	XK-55	57-62			1430	2,07	sapropèle		6135	75						
		XK-71	99-102			520	9,55	sapropèle		6775	350						
		E-26	68-72			2165	2,55	sapropèle		6370	170						
		E-26	239-245			2165	2,55	détritus		11350	205						
		XK-120	55-60			94	0,6	vase argileuse grise		15380	540						

Année	Référence	Carotte	Profondeur de l'échantillon (cm)	Latitude N	Longitude E	Profondeur de l'eau (m)	Longueur de la carotte (m)	Matériel daté	Méthode	Age conventionnel (ans BP)	Erreur (ans)	Age corrigé pour le réservoir (ans BP)	Age corrigé pour le réservoir et pour le détritique (ans BP)	Age calibré	Age réservoir (ans)	
1993	Gutcharde <i>et al.</i> , 1993	G6C-79	74.2	42°19.39	34°00.94	707		MO du niveau adjacent à celui des cendres	AMS <sup>14</sup> C	4450	120	3170		erreur 2 sigma	1280	
		G6C-71	92.2	42°12.02	34°06.33	411		MO du niveau adjacent à celui des cendres	AMS <sup>14</sup> C	4830	120	3550		erreur 2 sigma	1280	
		Minoan event									3355	32				1285
1994	Jones & Gagnon, 1994	KNR 134-08 BCI7	0.7-1.4	42°58'N	31°25'E	2066		MO	AMS <sup>14</sup> C	825	45	765	185			60
			11.0-11.4	42°58'N	31°25'E	2066		MO	AMS <sup>14</sup> C	1180	50	1120	540			60
			20.6-21.1	42°58'N	31°25'E	2066		MO	AMS <sup>14</sup> C	1910	60	1850	1270			60
			27.3-27.8	42°58'N	31°25'E	2066		MO	AMS <sup>14</sup> C	2430	50	2370	1790			60
			33.8-34.3	42°58'N	31°25'E	2066		MO	AMS <sup>14</sup> C	3640	70	3580	3000			60
			0.7-1.4	42°58'N	31°25'E	2066		TCC	AMS <sup>14</sup> C	1000	100	540	280			460
			11.0-11.4	42°58'N	31°25'E	2066		TCC	AMS <sup>14</sup> C	960	65	500	240			460
			20.6-21.1	42°58'N	31°25'E	2066		TCC	AMS <sup>14</sup> C	1790	65	1330	1070			460
			27.3-27.8	42°58'N	31°25'E	2066		TCC	AMS <sup>14</sup> C	2170	90	1710	1450			460
			33.8-34.3	42°58'N	31°25'E	2066		TCC	AMS <sup>14</sup> C	3350	70	2890	2630			460
			0.3-0.8	42°56'N	34°01'E	2217		MO	AMS <sup>14</sup> C	390	50	330				60
			11.5-12.0	42°56'N	34°01'E	2217		MO	AMS <sup>14</sup> C	980	50	920	340			60
			22.5-23.0	42°56'N	34°01'E	2217		MO	AMS <sup>14</sup> C	1890	50	1830	1250			60
			41.0-41.5	42°56'N	34°01'E	2217		MO	AMS <sup>14</sup> C	2310	55	2250	1670			60
			48.8-49.3	42°56'N	34°01'E	2217		MO	AMS <sup>14</sup> C	3000	55	2940	2360			60
	0.3-0.8	42°56'N	34°01'E	2217		TCC	AMS <sup>14</sup> C	1270	50	810	550			460		
	11.5-12.0	42°56'N	34°01'E	2217		TCC	AMS <sup>14</sup> C	1370	50	910	650			460		
	22.5-23.0	42°56'N	34°01'E	2217		TCC	AMS <sup>14</sup> C	1990	50	1530	1270			460		

Année	Référence	Carotte	Profondeur de l'échantillon (cm)	Latitude N	Longitude E	Profondeur de l'eau (m)	Longueur de la carotte (m)	Matériel daté	Méthode	Age conventionnel (ans BP)	Erreur (ans)	Age corrigé pour le réservoir (ans BP)	Age corrigé pour le réservoir et pour le détritique (ans BP)	Age calibré	Age réservoir (ans)	
1994	Jones & Gagnon, 1994	KNR 134-08 BC55	41.0-41.5	42°56'N	34°01'E	2217		TCC	AMS <sup>14</sup> C	2490	50	2030	1770		460	
			48.8-49.3	42°56'N	34°01'E	2217		TCC	AMS <sup>14</sup> C	3540	50	3080	2820		460	
			0.0-0.7	42°45'N	37°35'E	2164		MO	AMS <sup>14</sup> C	-390		55				
			2.9-3.5	42°45'N	37°35'E	2164		MO	AMS <sup>14</sup> C	840		100	780	200		60
			14.0-14.6	42°45'N	37°35'E	2164		MO	AMS <sup>14</sup> C	1120		100	1060	480		60
			24.2-24.6	42°45'N	37°35'E	2164		MO	AMS <sup>14</sup> C	1990		70	1930	1350		60
			32.2-32.6	42°45'N	37°35'E	2164		MO	AMS <sup>14</sup> C	2420		60	2360	1780		60
			39.5-39.7	42°45'N	37°35'E	2164		MO	AMS <sup>14</sup> C	845		55	785	205		60
			39.2-39.6	42°45'N	37°35'E	2164		MO	AMS <sup>14</sup> C	2810		65	2750	2170		60
			0.0-0.7	42°45'N	37°35'E	2164		TCC	AMS <sup>14</sup> C	-70		65				
		2.9-3.5	42°45'N	37°35'E	2164		TCC	AMS <sup>14</sup> C	860		45	400	140		460	
		14.0-14.6	42°45'N	37°35'E	2164		TCC	AMS <sup>14</sup> C	1000		100	540	280		460	
		24.2-24.6	42°45'N	37°35'E	2164		TCC	AMS <sup>14</sup> C	1830		100	1370	1110		460	
		32.2-32.6	42°45'N	37°35'E	2164		TCC	AMS <sup>14</sup> C	2290		100	1830	1570		460	
		39.5-39.7	42°45'N	37°35'E	2164		TCC	AMS <sup>14</sup> C	3100		100	2640	2380		460	
		47.5-48.0	41°53'N	28°49'E	549		MO	AMS <sup>14</sup> C	2760		60	2700	2120		60	
		64.8-65.3	41°53'N	28°49'E	549		MO	AMS <sup>14</sup> C	3410		60	3350	2770		60	
		115.3-115.8	41°53'N	28°49'E	549		MO	AMS <sup>14</sup> C	4850		80	4790	4210		60	
		154.8-155.3	41°53'N	28°49'E	549		MO	AMS <sup>14</sup> C	7010		100	6950	6370		60	
		158.8-159.3	41°53'N	28°49'E	549		MO	AMS <sup>14</sup> C	7300		80	7240	6660		60	
47.5-48.0	41°53'N	28°49'E	549		TCC	AMS <sup>14</sup> C	4770		80	4310	4050		460			
64.8-65.3	41°53'N	28°49'E	549		TCC	AMS <sup>14</sup> C	4680		50	4220	3960		460			
154.8-155.3	41°53'N	28°49'E	549		TCC	AMS <sup>14</sup> C	8040		100	7580	7320		460			
158.8-159.3	41°53'N	28°49'E	549		TCC	AMS <sup>14</sup> C	12500		130	12040	11780		460			

Année	Référence	Carotte	Profondeur de l'échantillon (cm)	Latitude N	Longitude E	Profondeur de l'eau (m)	Longueur de la carotte (m)	Matériel daté	Méthode	Age conventionnel (ans BP)	Erreur (ans)	Age corrigé pour le réservoir (ans BP)	Age corrigé pour le réservoir et pour le détritique (ans BP)	Age calibré	Age réservoir (ans)	
1994	Jones & Gagnon, 1994	KNR 134-08 GGC08	64.0-64.5	41°56'N	28°55'E	897		MO	AMS 14C	6840	110	6780	6200		60	
			68.3-68.7	41°56'N	28°55'E	897		MO	AMS 14C	7210	70	7150	6570		60	
				64.0-64.5	41°56'N	28°55'E	897		TCC	AMS 14C	8640	130	8180	7320		460
				68.3-68.7	41°56'N	28°55'E	897		TCC	AMS 14C	15300	140	14840	14580		460
				11.8-12.3	41°56'N	29°02'E	1259		MO	AMS 14C	2660	60	2600	2020		60
				16.0-16.5	41°56'N	29°02'E	1259		MO	AMS 14C	3210	50	3150	2570		60
				39.3-39.8	41°56'N	29°02'E	1259		MO	AMS 14C	5220	60	5160	4580		60
				57.3-57.8	41°56'N	29°02'E	1259		MO	AMS 14C	6610	100	6550	5970		60
				60.5-61.0	41°56'N	29°02'E	1259		MO	AMS 14C	7290	120	7230	6650		60
				11.8-12.3	41°56'N	29°02'E	1259		TCC	AMS 14C	3800	50	3340	3080		460
				16.0-16.5	41°56'N	29°02'E	1259		TCC	AMS 14C	4360	50	3900	3640		460
				57.3-57.8	41°56'N	29°02'E	1259		TCC	AMS 14C	9390	130	8930	8670		460
				60.5-61.0	41°56'N	29°02'E	1259		TCC	AMS 14C	13200	80	12740	12480		460
				4.0-4.5	41°57'N	29°06'E	1490		MO	AMS 14C	7050	80	6990	6410		60
				4.0-4.5	41°57'N	29°06'E	1490		TCC	AMS 14C	18300	230	17780	17520		520
				18.5-19.0	42°53'N	31°23'E	2096		MO	AMS 14C	4620	70	4560	3980		60
				24.2-24.7	42°53'N	31°23'E	2096		MO	AMS 14C	5380	70	5320	4740		60
				31.0-31.5	42°53'N	31°23'E	2096		MO	AMS 14C	6640	60	6580	6000		60
				37.3-37.8	42°53'N	31°23'E	2096		MO	AMS 14C	7200	80	7140	6560		60
				39.0-39.5	42°53'N	31°23'E	2096		MO	AMS 14C	7290	90	7230	6650		60
		37.3-37.8	42°53'N	31°23'E	2096		TCC	AMS 14C	13900	100	13440	13180		460		
		39.0-39.5	42°53'N	31°23'E	2096		TCC	AMS 14C	12100	120	11640	11380		460		
		49.8-50.2 (22.8-23.2)	42°59'N	34°00'E	2195		MO	AMS 14C	4370	60	4310	3730		60		
		61.5-62.0 (34.5-35.0)	42°59'N	34°00'E	2195		MO	AMS 14C	5240	60	5180	4600		60		

Année	Référence	Carotte	Profondeur de l'échantillon (cm)	Latitude N	Longitude E	Profondeur de l'eau (m)	Longueur de la carotte (m)	Matériel daté	Méthode	Age conventionnel (ans BP)	Erreur (ans)	Age corrigé pour le réservoir (ans BP)	Age corrigé pour le réservoir et pour le détritique (ans BP)	Age calibré	Age réservoir (ans)
1994	Jones & Gagnon, 1994	KNR 134-08 GGC38	70.2-70.7 (43.2-43.7)	42°59'N	34°00'E	2195		MO	AMS 14C	6100	60	6040	5460		60
			78.8-79.3 (51.8-52.3)	42°59'N	34°00'E	2195		MO	AMS 14C	7130	60	7070	6490		60
			83.2-83.7 (56.2-56.7)	42°59'N	34°00'E	2195		MO	AMS 14C	7560	70	7500	6920		60
			78.8-79.3 (51.8-52.3)	42°59'N	34°00'E	2195		TCC	AMS 14C	10200	70	9740	9480		460
			83.2-83.7 (56.2-56.7)	42°59'N	34°00'E	2195		TCC	AMS 14C	12820	80	12360	12100		460
			17.3-17.8	42°21'N	37°30'E	2030		MO	AMS 14C	4560	60	4500	3920		60
			24.0-24.5	42°21'N	37°30'E	2030		MO	AMS 14C	5690	70	5630	5050		60
			31.1-31.6	42°21'N	37°30'E	2030		MO	AMS 14C	6390	70	6330	5750		60
			36.5-37.0	42°21'N	37°30'E	2030		MO	AMS 14C	7500	110	7440	6860		60
			38.2-38.7	42°21'N	37°30'E	2030		MO	AMS 14C	7640	80	7580	7000		60
		KNR 134-08 GGC48	36.5-37.0	42°21'N	37°30'E	2030		TCC	AMS 14C	10900	100	10440	10180		460
			38.2-38.7	42°21'N	37°30'E	2030		TCC	AMS 14C	16500	120	16040	15780		460
			52.0-52.5	41°27'N	41°22'E	205		MO	AMS 14C	2380	60	2320	1740		60
			90.2-90.7	41°27'N	41°22'E	205		MO	AMS 14C	3030	50	2970	2390		60
			275.5-275.8	41°27'N	41°22'E	205		MO	AMS 14C	7450	60	7390	6810		60
			283.8-284.3	41°27'N	41°22'E	205		MO	AMS 14C	7550	70	7490	6910		60
			52.0-52.5	41°27'N	41°22'E	205		TCC	AMS 14C	3940	60	3480	3220		460
			90.2-90.7	41°27'N	41°22'E	205		TCC	AMS 14C	7510	70	7050	6790		460
			275.5-275.8	41°27'N	41°22'E	205		TCC	AMS 14C	7560	60	7100	6840		460
			283.8-284.3	41°27'N	41°22'E	205		TCC	AMS 14C	13100	100	12640	12380		460
KNR 134-08 GGC65	23.0-23.5	42°18'N	34°00'E	563		MO	AMS 14C	2810	70	2750	2170		60		
	51.0-51.5	42°18'N	34°00'E	563		MO	AMS 14C	3430	60	3370	2790		60		
			122.5-123.0	42°18'N	34°00'E	563		MO	AMS 14C	5080	60	5020	4440		60

Année	Référence	Carotte	Profondeur de l'échantillon (cm)	Latitude N	Longitude E	Profondeur de l'eau (m)	Longueur de la carotte (m)	Matériel daté	Méthode	Age conventionnel (ans BP)	Erreur (ans)	Age corrigé pour le réservoir (ans BP)	Age corrigé pour le réservoir et pour le détritique (ans BP)	Age calibré	Age réservoir (ans)	
			155.2-155.7	42°18'N	34°00'E	563		MO	AMS <sup>14</sup> C	7090	100	7030	6450		60	
			158.4-158.9	42°18'N	34°00'E	563		MO	AMS <sup>14</sup> C	7230	60	7170	6590		60	
			23.0-23.5	42°18'N	34°00'E	563		TCC	AMS <sup>14</sup> C	7110	80	6650	6390		460	
			51.0-51.5	42°18'N	34°00'E	563		TCC	AMS <sup>14</sup> C	6300	60	5840	5580		460	
			155.2-155.7	42°18'N	34°00'E	563		TCC	AMS <sup>14</sup> C	7610	60	7150	6890		460	
			158.4-158.9	42°18'N	34°00'E	563		TCC	AMS <sup>14</sup> C	11500	70	11040	10780		460	
			M. gallo-provincialis			33°30'E	<5		Mollusque pré-bombes: Mytilus galloprovincialis		460	35				
1994	Jones, 1994	Composite (3)	0							640					60	
		Composite (7)	10							2540	85				60	
		Composite (7)	12,5								3220	130			60	
		KNR134-08-GGC24	47,5													
			47,5								4110	75				
1997	Ryan et al., 1997	AK3-2-93	49			49	0,60	Monodactna caspia	AMS <sup>14</sup> C	7130	40				460	
		AK1-93	134	44°58'	32°06'	68	1,35	M. caspia	AMS <sup>14</sup> C	7220	40				460	
		AK12-93	144	44°59'	32°11'	78	1,50	Cardium edule	AMS <sup>14</sup> C	7140	40				460	
		AK8-93	104	44°54'	32°09'	99	1,60	C.edule	AMS <sup>14</sup> C	7140	40				460	
		AK9-93	92	44°53'	32°09'	123	1,70	C.edule	AMS <sup>14</sup> C	7100	40				460	
		AK10-93	145	44°54'	32°09'	106	1,75	Dreissena rostriformis	AMS <sup>14</sup> C	11350	45				460	
		AK7-93	95-97	44°54'	32°10'	108	1,45	D.rostriformis	AMS <sup>14</sup> C	10400	55				460	
			100-104	44°54'	32°10'	108	1,45	D.rostriformis	AMS <sup>14</sup> C	8250	35				460	

BC = box cores; GGC = giant gravity cores  
MO = matière organique du sédiment (angl. TOC = Total Organic Carbon from sediment); TCC = carbonates totaux du sédiment (angl. Total Carbonate fraction)

Année	Référence	Carotte	Profondeur de l'échantillon ( cm )	Latitude N	Longitude E	Profondeur de l'eau (m)	Longueur de la carotte (m)	Matériel daté	Méthode	Age conventionnel (ans BP)	Erreur (ans)	Age corrigé pour le réservoir (ans BP)	Age corrigé pour le réservoir et pour le détritique (ans BP)	Age calibré	Age réservoir (ans)
			140-145	44°54'	32°10'	108	1,45	D.rostriformis	AMS 14C	10800	65				460
		AK14-93	20	44°52'	32°22'	140	3,05	D.rostriformis	AMS 14C	10000	50				460
			215	44°52'	32°22'	140	3,05	D.rostriformis	AMS 14C	14700	65				460
2000	Ballard et al., 2000	dredge	surface			140-170		Papillicardium papillosum	AMS 14C	3200	70				
		dredge	surface			140-170		Modiolula? phaseolinus	AMS 14C	2810	40				
		dredge	surface			140-170		Dreissena rostriformis var. distincta	AMS 14C	15550	120				
		dredge	surface			140-170		Dreissena rostriformis var. distincta	AMS 14C	10800	75				
		dredge	surface			140-170		Dreissena rostriformis var. distincta	AMS 14C	10450	70				
		dredge	surface			140-170		Dreissena rostriformis var. distincta	AMS 14C	10450	70				
		dredge	surface			140-170		Dreissena rostriformis var. distincta	AMS 14C	10400	70				
		dredge	surface			140-170		Dreissena rostriformis var. distincta	AMS 14C	10500	70				
		dredge	surface			140-170		Trochopsis breviata	AMS 14C	2800	45				
		dredge	surface			140-170		Bittium reticulatum	AMS 14C	3860	50				
		dredge	surface			140-170		Abra alba	AMS 14C	4130	45				
		dredge	surface			140-170		Mytilus galloprovincialis	AMS 14C	6820	55				
		dredge	surface			140-170		Parvicardium exiguum	AMS 14C	3190	50				
		dredge	surface			140-170		Turricaspa caspia linctia	AMS 14C	12100	85				

Année	Référence	Carotte	Profondeur de l'échantillon (cm)	Latitude N	Longitude E	Profondeur de l'eau (m)	Longueur de la carotte (m)	Matériel daté	Méthode	Age conventionnel (ans BP)	Erreur (ans)	Age corrigé pour le réservoir (ans BP)	Age corrigé pour le réservoir et pour le détritique (ans BP)	Age calibré	Age réservoir (ans)
		dredge	surface			140-170		Turricaspia caspia lincta	AMS 14C	9310	65				
		dredge	surface			140-170		Turricaspia caspia lincta	AMS 14C	7460	55				
		dredge	surface			140-170		Turricaspia caspia lincta	AMS 14C	7590	55				
		dredge	surface			140-170		Turricaspia caspia lincta	AMS 14C	7480	55				
									AMS 14C						
		dredge	surface			140-170		Myrillus gallo-provincialis	AMS 14C	4830	45				
		dredge	surface			140-170		Myrillus gallo-provincialis	AMS 14C	6470	45				
		dredge	surface			140-170		Myrillus gallo-provincialis	AMS 14C	6020	45				
		dredge	surface			140-170		Myrillus gallo-provincialis	AMS 14C	4000	45				
									AMS 14C						
		dredge	surface			140-170		fragment of „fresh“ milled wood	AMS 14C	245	30				
		dredge	surface			140-170		fragment of fragile waterlogged wood	AMS 14C	3580	35				
		BLKS9810	94,5	44°04.04'	30°50.68'	378	759	Turricaspia	AMS 14C	10640	80				
			118,5	44°04.04'	30°50.68'	378	759	Dreissena	AMS 14C	11410	110				
			154,5	44°04.04'	30°50.68'	378	759	Dreissena	AMS 14C	12790	110				
			186,5	44°04.04'	30°50.68'	378	759	Dreissena	AMS 14C	12920	100				
			704	44°04.04'	30°50.68'	378	759	Dreissena	AMS 14C	17760	130				
		BLKS9809	15	44°05.23'	30°47.98'	240	840	Dreissena	AMS 14C	12310	95				
			115	44°05.23'	30°47.98'	240	840	Dreissena	AMS 14C	14010	100				
			215	44°05.23'	30°47.98'	240	840	Dreissena	AMS 14C	14950	100				
2002	Major et al., 2002														

Année	Référence	Carotte	Profondeur de l'échantillon (cm)	Latitude N	Longitude E	Profondeur de l'eau (m)	Longueur de la carotte (m)	Matériel daté	Méthode	Age conventionnel (ans BP)	Erreur (ans)	Age corrigé pour le réservoir (ans BP)	Age corrigé pour le réservoir et pour le détritique (ans BP)	Age calibré	Age réservoir (ans)
2002	Major <i>et al.</i> , 2002		840	44°05.23'	30°47.98'	240	840	Dreissena	AMS <sup>14</sup> C	20580	150				
2002	Aksu <i>et al.</i> , 2002	MAR98-04	24	41°27.26'	29°16.01'	112	1,50	Mytilus spp.	AMS <sup>14</sup> C	5680	60				415
			104	41°27.26'	29°16.01'	112	1,50	Mytilus spp.	AMS <sup>14</sup> C	5780	60				415
			118	41°27.26'	29°16.01'	112	1,50	White mussel	AMS <sup>14</sup> C	33550	330				415
		MAR00-05	60	41°49.01'	28°30.68'	83	1,75	Mytilus spp.	AMS <sup>14</sup> C	5460	70				415
			167	41°49.01'	28°30.68'	83	1,75	Cardium spp.	AMS <sup>14</sup> C	6600	60				415
		MAR00-06	45	41°50.38'	28°37.54'	127	1,35	Mytilus spp.	AMS <sup>14</sup> C	2160	60				415
			124	41°50.38'	28°37.54'	127	1,35	Mytilus spp.	AMS <sup>14</sup> C	7770	70				415
		MAR00-08	54	41°42.16'	28°43.32'	96	1,35	Mytilus spp.	AMS <sup>14</sup> C	5780	70				415
			116	41°42.16'	28°43.32'	96	1,35	Mytilus spp.	AMS <sup>14</sup> C	6590	70				415
		MAR00-09	119	41°42.38'	29°06.31'	115	1,25	Mytilus spp.	AMS <sup>14</sup> C	5740	60				415
		MAR00-23	170	41°19.82'	29°45.53'	98	1,70	Mytilus spp.	AMS <sup>14</sup> C	6760	60				415

---

**ANNEXE 4**  
**TABLEAUX DE DÉTERMINATION DE LA FAUNE ET TYPE**  
**DE MILIEU POUR CHAQUE ESPÈCE**

**Annexe 4 a) Déterminations de faune d'ostracodes dans la carotte BLKS 98-04 (Priscilia Opreanu, GeoEcoMar – Constanta)**

Niveau analysé (cm)	Mollusques	Milieu	Ostracodes	Milieu	Foraminifères	Milieu possible	Observations
0 – 3 cm <b>Marine</b>	<i>Modiolus phaseolinus</i>	<b>Marine</b> act., > 10 m prof. Eau; substrat mou (sable, vase); mollusque dominante à plus de 40 m prof. de l'eau	<i>Carinocythereis rubra</i> (7 valves)	<b>Marine</b> , act. prof < 50 m	<i>Ammonia beccarii</i> (18 valves)	<b>Marine à Saumâtre</b> En Méditerranée et Oc. Atlantique jusqu'à 35‰, elle n'est pas un indicateur de salinité	Quartz, débris de <i>Modiolus</i> , concrétions ferrugineuses
	<i>Mytilus galloprovincialis</i> (fragments)	<b>Marine</b> , act., attaché au substrat dur, en profondeur - substrat mou, les individus s'attachent l'un à l'autre	<i>Loxanocha granulata</i> (4 valves)	<b>Marine</b> , act. prof < 50 m	<i>Ammonia tepida</i>	<b>Marine - Saumâtre.</b> Actuelle et fossile, zone littorale ou d'eaux peu profondes.	Pellicules ferrugineuses sur les valves de <i>Mytilus</i>
	<i>Dreissena polymorpha</i> (une valve)	eau <b>douce</b> , actuelle (Danube, tout le delta)	<i>Callistocythere diffusa</i> (1 valve)	<b>Marine</b> , act. prof < 50 m	<i>Ammonia viennensis</i>	Salinité réduite – <b>Saumâtre.</b> Actuelle et fossile, zone littorale ou d'eaux peu profondes.	
	<i>Dreissena rostriformis</i> petits fragments		<i>Amnicocythere striatocostata</i>		<i>Eggerella scabra</i>		
	<i>Dreissena rostriformis distincta</i> (une valve ex. juvénile)	<b>Saumâtre</b> 12,6‰ en Mer Caspienne (M.C.)	<i>Amnicocythere bacuana</i>	<b>Douce à Saumâtre</b> Relique ponto-caspienne 4-13,5‰ en Mer Caspienne; Delta du Danube, limans du Dniestr, littoral de la Mer Noire (M.N.)	<i>Lagena laevis</i>	<b>Marine</b> , act., eaux profondes	
	<i>Micromelania caspia</i>	<b>Saumâtre</b>	<i>Amnicocythere olivina</i>	<b>Saumâtre</b> 12,75-13,25‰ act. en M.C.	<i>Fissurina lucida</i>	<b>Marine</b> , act., eaux profondes	
	Fragment de <i>Cardium?</i>		<i>Amnicocythere reticulata</i>		<i>Eosyrinx jatzkoi</i>	<b>Marine</b> , act., eaux profondes	
			<i>Euxinocythere bosqueti</i> (? lopaticci)	<b>Saumâtre</b> 12-13,5‰ act. en M.C.			
			<i>Loxanocha lepida</i>	<b>Saumâtre à douce</b> (5-14‰) 13‰ act. en M.C.; relictive P-C; eaux douces de DD et limans de Dniestr + litt. MN			
			<i>Loxanocha gibboides</i>	<b>Saumâtre</b> 11,5-13,25‰ act en MC			
		<i>Loxanocha sp.</i>					
		<i>L. kailokyji</i>	<b>Saumâtre</b> 12,5‰ act en MC				
		<i>Xestoleberis chanakovi</i>					

Niveau analysé (cm)	Mollusques	Milieu	Ostracodes	Milieu	Foraminifères	Milieu possible	Observations
3 - 7 cm			<i>Tyrhenocythere amnicola donetziensis</i> (= <i>Heterocythereis</i> )	<b>Saumâtre</b> Litt MN Dans la M.C. à salin. ~ 11‰			
			<i>Heterocythereis amnicola</i>	<b>Saumâtre</b> Litt MN			
			<i>Aurila</i> sp.	<b>Marine à Saumâtre</b>			
7 - 10 cm <b>M-S</b>	Petits fragments de <i>Dreissena rostriformis</i> (majoritaires) et <i>Modiolus phaseolinus</i>		<i>Carinocythereis rubra</i> <i>Amnicocythere olivina</i> <i>Xestoleberis chanakovi</i> fragment	<b>Marine</b> act, prof. < 50m Saumâtre	<i>Ammonia viennensis</i> <i>Fissurina lucida</i> (1 valve)	<b>Marine</b> actuel	Cristaux de gypse Très peu de faune: 1-2 valves de chaque espèce.
	fragments de: <i>Dreissena rostriformis distincta</i> (abondantes) <i>Modiolus</i> (rares) <i>Monodacna</i> (rares)	Saumâtre	<i>Carinocythereis rubra</i> (13 valves)	<b>Marine</b> , prof. > 50m			La plupart des fragments sont des <i>Dreissena</i> ; certaines coquilles présentent des traces de dissolution chimique; moins de faune marine actuelle ( <i>Modiolus</i> et des espèces d'ostracodes)
	<i>Dreissena rostriformis pontocaspica</i>		<i>Loxocancho granulata</i> (6 valves)	<b>Marine-saumâtre</b> , Prof. 30-80-100 m			<i>Carinocythereis rubra pontica</i> et <i>Loxocancho granulata</i> peuvent vivre dans le sédiment, jusqu'à 5-10-15 cm de profondeur sous l'interface séd-eau.
	<i>Micromelania caspia lincta</i>		<i>Amnicocythere (Leptocythere) andrussovi</i>	<b>Saumâtre</b> 12,5-13‰ act. en M.C.			
			<i>Euxinocythere bosqueti</i> <i>Loxocancho lepida</i> <i>Loxocancho eichwaldi</i> <i>Loxocancho aff. L. kalickyi</i>	<b>Saumâtre</b> <b>Saumâtre</b> (5-14%)			
10 - 12 cm <b>S</b>			<i>Tyrhenocythere amnicola donetziensis</i>	<b>Saumâtre</b>			
			<i>Heterocythereis amnicola</i> (30 valves)	<b>Saumâtre</b>			
			<i>Candona schweyeri</i>	<b>Saumâtre-douce</b> ,			
	<i>Dreissena rostriformis distincta</i>	Saumâtre	<i>Carinocythereis rubra</i> (2 valves)	<b>Marine</b> , act., > 50m			

Niveau analysé (cm)	Mollusques	Milieu	Ostracodes	Milieu	Foraminifères	Milieu possible	Observations
10 – 12 cm <b>S</b>	<i>Dreissena rostriformis ponto-caspica</i>		<i>Amnicythère (Leptocythere) argonica</i>				
	<i>Micromelania caspia lincta</i> fragments		<i>Amnicythère olivina</i>	<b>Saumâtre</b>			
			<i>Euxinocythere bosqueti</i>	<b>Saumâtre</b>			
			<i>Loxocancha lepida</i>	<b>Saumâtre</b> (5-14‰)			
			<i>Loxocancha eichwaldi</i>	<b>Saumâtre</b> – act. en M.			
			<i>Loxocancha gibboides</i>	<b>Caspienne</b>			
			<i>Loxocancha aff. L. kalickyi</i>				
			<i>Xestoleberis chanakovi</i>				
			<i>Tyrhenocythere amnicola donetziensis</i>	<b>Saumâtre</b>			
			<i>Heterocythereis amnicola Aurila sp.</i>	<b>Saumâtre</b>			
		<i>Candona schweyeri</i>	<b>Douce</b> à <b>Saumâtre</b> , froide, alk.; act. Dans les lacs du Delta du Danube				
14 – 16 cm	<i>Dreissena rostriformis distincta</i>	<b>Saumâtre</b>	<i>Carinocythereis rubra</i> (1 valve)	<b>Marine</b> , act > 50m	<i>Ammonia beccarii</i> (1 valve)	<b>Marine</b> , prof. faible; salinité < 5‰	
	<i>Micromelania caspia lincta</i>		<i>Tyrhenocythere amnicola donetziensis</i>	<b>Saumâtre</b> à <b>Douce</b>	<i>Eggerella scabra</i> fragment		
	<i>Theodoxus pilidei lamelliferus</i>		<i>Heterocythereis amnicola</i>	<b>Saumâtre</b>			
	<i>Caspia gmelini</i>		<i>Aurila sp.</i>				
			<i>Amnicythère striatocostata</i>				
			<i>Amnicythère aff. Amnicythère olivina</i>	<b>Saumâtre</b> 12,25-13,25‰, act MC			
			<i>Amnicythère gubkini</i>				
			<i>Euxinocythere bosqueti</i>	<b>Saumâtre</b>			
			<i>Loxocancha lepida</i>	<b>Saumâtre</b> (5-14‰)			
			<i>Loxocancha eichwaldi</i>				
		<i>Loxocancha aff. L. kalickyi</i>					
		<i>Xestoleberis chanakovi</i>					

Niveau analysé (cm)	Mollusques	Milieu	Ostracodes	Milieu	Foraminifères	Milieu possible	Observations
			<i>Candona schweyeri</i> <i>Candona pontica</i> <i>Candona candida</i>	<b>Douce à Saumâtre</b> , froide, alcaline			
22 – 23 cm	fragmente de <i>Dreissena rostriformis distincta</i>	<b>Saumâtre</b>	<i>Amnicythere striatocostata</i> <i>Amnicythere cymbula</i> <i>Amnicythere aff. Amnicythere gratiosa</i> <i>Amnicythere gubkini</i> <i>Amnicythere olivina</i> <i>Amnicythere caspia</i>	<b>Saumâtre</b> à <b>douce</b> 7,5-13,25‰+ limanes, DD <b>Saumâtre</b> <b>Saumâtre</b> <b>Saumâtre</b>			
	<i>Micromelania caspia lincta</i>		<i>Euxinocythere bosqueti</i> <i>Loxoconcha lepida</i> <i>Loxoconcha eichwaldi</i>	<b>Saumâtre</b> <b>Saumâtre</b> à <b>douce</b>			
			<i>Heterocythereis amnicola</i>	<b>Saumâtre</b>			
			<i>Candona schweyeri</i> – le plus grand nombre de valves	<b>Douce</b> à <b>Saumâtre</b> , froide, alcaline.			
<b>29-30</b>	<b>discontinuité</b>						
33-34 cm				<b>Pas de faune</b>			Petits grains de quartz, rares paillettes de mica
52-53 cm	Petits morceaux de valves de mollusques?			<b>Pas de faune</b>			Grains de quartz, mica, rarement - petites fragments carbonatés provenant probablement des valves de mollusques
63-64 cm				<b>Pas de faune</b>			Petits grains de quartz, mica très rares petits fragments de coquilles? + fragments de plantes?

**Annexe 4 b) Déterminations de faune d'ostracodes dans la carotte BLKS 98-06 (M.-T. Gomoiti - mollusques, P. Opreanu & R. Olteanu - ostracodes, M. Melinte - nanofossiles)**

Niveau analysé (cm)	Mollusques	Ostracodes	Nanofossiles calcaireux	Milieu
<b>1-3 cm</b>	Débris de <i>Modiolus</i> <i>Modiolus phaseolimus</i> dominant (90%) (fragments, parfois avec des trous de <i>Trophon</i> ) formes juvéniles de diverses coquilles non identifiées <i>Dreissena</i> (2 valves) <i>Cerithidium</i> (6 valves)	Faune actuelle marine <i>Carinocythereis rubra</i> (dominante) <i>Loxoconcha granulata</i> <i>Loxoconcha elliptica</i> <i>Paradoxostoma</i> <i>Xestoleberis cornelii</i> <i>Xestoleberis aurantia</i> <i>Cytheroma variabile</i> + Reliques ponto-caspiennes <i>Loxoconcha lepida</i>	<i>Thoracosphaera saxea</i> <i>Coccolithus pelagicus</i> <i>Syracosphaera pulchra</i> <i>Emiliana huxleyi</i> <i>Discoster</i> sp. <i>Gephyrocapsa oceanica</i> <i>Braarudosphaera bigelowii</i> <i>Helicosphaera carteri</i> <i>Cristallolithus</i> sp. <i>Pontosphaera multipora</i> <i>Rhabdosphaera claviger</i> <i>Scyphosphaera cf. recurvata</i>	Marin
<b>5-9 cm</b>	Débris avec <i>Dreissena rostriformis</i> et <i>D. caspia</i> <i>Modiolus</i> - rare Fragments de gastéropodes non identifiés	<i>Candona schweyeri</i> (dominante) <i>Candona angulata</i> <i>Xestoleberis chakanovi</i> <i>Xestoleberis cornelii</i> <i>Loxoconcha bairdy</i> <i>Loxoconcha eichwaldi</i> <i>Loxoconcha petasus</i> <i>Loxoconcha granulata</i> <i>Leptocythere bosqueti</i> <i>Leptocythere olivina</i> <i>Aglaocypris complanata</i> <i>Euxinocythere</i> aff. <i>Soljanica</i>	<i>Thoracosphaera saxea</i> <i>Coccolithus pelagicus</i> <i>Syracosphaera pulchra</i> <i>Emiliana huxleyi</i> <i>Braarudosphaera bigelowii</i> <i>Helicosphaera carteri</i> <i>Pontosphaera multipora</i> <i>Rhabdosphaera claviger</i>	Saumâtre à douce
<b>16-18 cm</b>	Débris avec <i>Dreissena rostriformis</i> <i>Modiolus</i> - rare Fragments des gastéropodes: <i>Micromelania</i> <i>Cerithidium</i> <i>Bittium reticulatum</i> <i>Caspia gmelini</i> <i>C. knipowitschi</i>	<i>Candona schweyeri</i> (dominante) <i>Candona neglecta</i> <i>Euxinocythere malva</i> <i>Euxinocythere litica</i> <i>Loxoconcha petasus</i> <i>Euxinocythere</i> aff. <i>Camelii</i> <i>Amnicythere</i> sp. <i>Euxinocythere lopaticci</i> <i>Euxinocythere histriana</i>	<i>Braarudosphaera bigelowii</i> <i>Coccolithus pelagicus</i> <i>Syracosphaera pulchra</i> <i>Emiliana huxleyi</i> <i>Discoster</i> sp. <i>Gephyrocapsa oceanica</i> <i>Helicosphaera carteri</i> <i>Pontosphaera multipora</i> <i>Rhabdosphaera claviger</i> <i>Ceratolithina</i> sp.	Douce à saumâtre
<b>26-28 cm</b>	Sable quartzière avec <i>Dreissena rostriformis</i>			
<b>40-42 cm</b>	Sable quartzière avec <i>Dreissena</i> (coquilles noircies, parfois avec des dépôts calcaires)			

**Annexe 4 c)** Déterminations de faune d'ostracodes dans la carotte BLKS 98-11 (Priscila Opreanu, *GeoEcoMar* - Constanta)

Intervalle analysé (cm)	Ostracodes	Mollusques	Milieu possible	Observations	
0-2	<i>Candona</i> - petits fragments	valves juvéniles non identifiées	saumâtre		
2,5-4,5		3 valves de bivalves + 2 gastéropodes, toutes juvéniles			
5-7		valves rares			
7,1-9,1		valves rares			
9,8-11		3 valves de bivalves		vertèbres?	
12,1-14,1		valves de bivalves fréquentes + 1 gastéropode			
14,4-16,5		1 valve de bivalve		sédiment argileux gris clair avec des lamines et des restes de faune non identifiée	
16,6-18,7			anoxique?		
19,2-21,2					
21,6-23,6					
26,5-28,5					
28,8-30,8					
31,1-33,1					
33,4-35,4					
35,7-37,7					
38-40					restes de vertèbres?
40,4-42,4					
42,6-44,6					restes de vertèbres?
44,9-46,9					
47,1-49,1					restes de vertèbres?
49,5-51,5					
51,8-53,5					
54-56					
56,4-58,4					
58,7-60,7					
61,2-63,2	<i>Candona schweyeri</i> - 11 valves + bcp. des fragments; <i>Loxoconcha lepida</i> - 1 valve		saumâtre		
63,5-65,5		fragm. non identifié		concrétions noires rares	
65,9-67,9	<i>Candona</i> - fragments		saumâtre à douce	concrétions noires rares	
68,3-70,3	<i>Candona</i> - fragments			concrétions noires rares	
75-77	<i>Candona</i> - fragments rares			petites concrétions noires rares	
80-82	<i>Candona</i> - fragments rares			petites concrétions noires rares	
85-87	<i>Candona schweyeri</i> - formes juvéniles, <i>Loxoconcha</i> - fragments	fragments de gastéropodes	saumâtre	concrétions noires rares	
90-92	<i>Candona schweyeri</i> - formes juvéniles,		saumâtre à douce	concrétions noires rares	
100-102	<i>Candona schweyeri</i> , <i>Candona</i> sp. - 11 valves			pellicules d'oxydation, restes chitineux	

Intervalle analysé (cm)	Ostracodes	Mollusques	Milieu possible	Observations
105-107	<i>Candona</i> - fragments; <i>Loxoconcha lepida</i> - fragments	fragments de gastéropodes	saumâtre	concrétions noires rares
110-115	<i>Candona</i> - fragments		saumâtre à douce	concrétions noires plus fréquentes
115-117	<i>Candona schweyeri</i> - 1 valve <i>Candona</i> - fragments	fragments de bivalves		concrétions de dimensions plus grandes
120-122	<i>Candona schweyeri</i> <i>Loxoconcha</i> sp. - fragments		saumâtre	idem 115-117
125-127	<i>Candona schweyeri</i> <i>Candona combibo</i> <i>Aurila</i> sp.			
130-132	<i>Candona schweyeri</i> - fragments			
137,5-139,5	<i>Candona</i> sp. - fragments			
141-143				
145-147	<i>Candona</i> sp. - fragments			
150-152				
160-162				
170-172				quartz prédominant
180-182				
190-192				
200-202	<i>Candona schweyeri</i> <i>Liventalina gracilis</i> <i>Loxoconcha</i> sp.		saumâtre	
210-212	<i>Candona</i> sp. - fragments rares		saumâtre à douce	concrétions, quartz, fragments oxydés, mica
220-222	<i>Candona</i> sp. - fragments			concrétions, quartz, fragments oxydés, mica
231,5-233,5				concrétions, quartz, fragments oxydés
240,5-242,5				concrétions
680-682				quartz et concrétions rares

---

## ANNEXE 5

# MÉTHODES D'ANALYSE UTILISÉES

### MINÉRALOGIE DES SÉDIMENTS

Les analyses pour les différents **types d'argiles** ont été effectuées au Laboratoire de Géologie et de Géochimie Sédimentaire de l'Université Paris-Sud XI. La quantification des argiles par l'examen de diffractogrammes, a été réalisée à l'aide du logiciel *Analyserie*, utilisant la méthode de Biscaye (1965).

10-15 cc de sédiment humide ont été traités à l'acide chlorhydrique 20% sur un bain de sablé chauffé à 65° C, afin d'enlever les carbonates. Le lavage se fait à l'eau distillée, jusqu'à pH 6. Plusieurs échantillons ont nécessité l'enlèvement de la matière organique avant la décarbonatation, à l'aide du H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. La préparation de 3 lames orientées pour chaque échantillon a été faite à partir d'une suspension du sédiment, par le prélèvement de la fraction < 2 µm. Deux des trois lames ont été traitées de manière à modifier les espaces interfoliaires des argiles, afin de pouvoir identifier les diverses espèces. L'une a été saturé à l'éthylène-glycol pendant environ 12 heures, et l'autre a été chauffée à 490°C pendant 2 heures. Les lames, ont été ensuite analysées à l'aide d'un diffractomètre constitué d'un tube de rayons X à anticatode de cobalt et d'un détecteur courbe INEL CPS 120.

Les analyses de **minéralogie par spectrométrie infrarouge (IR)** ont été effectuées à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-ORSTOM) de Bondy. Le but de ces analyses était de quantifier la calcite, la kaolinite, le quartz et les feldspaths afin d'obtenir davantage d'informations sur la source de sédiments. Ce sont des analyses complémentaires à celles de diffraction des rayons X.

Des échantillons de sédiment, broyés au mortier, sont ensuite broyés pendant une heure dans une cellule à billes en agate, en milieu réfrigéré et sous acétone. Le sédiment ainsi obtenu est dilué à 0.25 % dans du KBr en poudre. L'homogénéisation du mélange se fait dans un mortier. Des pastilles de 300 mg de ce mélange sont réalisées à l'aide d'un moule en acier, en appliquant une pression 10<sup>7</sup> g/cm<sup>2</sup>, pendant 1-2 minutes. Les pastilles sont gardées ensuite 24 heures dans

une étuve, à 110°C, afin d'éliminer l'eau. La mesure des échantillons a été réalisée à l'aide d'un spectromètre Prekin-Elmer, IR-TF, modèle 16PC.

### MAGNÉTISME

Deux types de mesures ont été faites dans le cadre de cette étude: (1) des mesures en continu sur des U-channels (telles que la susceptibilité magnétique en champ faible  $\kappa$  et les aimantations rémanentes naturelle ARN et anhystérique ARA), et (2) des mesures sur des échantillons discrets (tels que les paramètres d'hystérésis, et le comportement thermomagnétique). Nous allons définir brièvement ces paramètres ainsi que quelques notions nécessaires à la compréhension des analyses effectuées.

#### 1. NOTIONS DE BASE

La *susceptibilité magnétique* représente la facilité des corps à s'aimanter dans un champ magnétique H. Elle peut être exprimée en unité de volume notée avec  $\kappa$  (sans dimension en S.I.) ou en unité de masse notée avec  $\chi$  (m<sup>3</sup>/kg).

La relation entre la susceptibilité magnétique ( $\kappa$  ou  $\chi$ ), le champ appliqué (H) et les aimantations induites par unité de volume M [A/m] et par unité de masse J [A m<sup>2</sup>/kg] est:

$$M = \kappa H \text{ ou } J = \chi H$$

Lorsque le champ appliqué est inférieur à 1 mT, la susceptibilité (susceptibilité en champ faible) est virtuellement indépendante de l'intensité du champ et dépend de la nature et de la taille des minéraux. Dans cette étude, nous avons mesuré la susceptibilité magnétique en champ faible.

Tout matériel répond à l'application d'un champ magnétique extérieur à cause de l'effet du champ sur les mouvements des électrons dans les atomes. Dans tous les matériaux les mouvements orbitaux des électrons sont modifiés. Les ions de certains métaux transitionnels, particulièrement Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> et Mn<sup>2+</sup> ont un moment magnétique de spin intrinsèque dû

aux spins des électrons non-appariés de leur couches électroniques internes.

Ces ions, appelés des *ions paramagnétiques*, présentent une modification de leurs moments magnétiques du spin en plus des modifications orbitales.

La réponse la plus faible et négative d'une substance à l'application du champ magnétique extérieur est dénommée *diamagnétisme*. Une fois placées dans un champ magnétique d'intensité  $H$ , une aimantation ( $M_i$ ) faible est induite par l'effet du champ sur les mouvements orbitaux des électrons. Cette aimantation est orientée *en direction opposée par rapport au champ appliqué*. La susceptibilité magnétique ( $\kappa$ ) (ou  $M_i = \kappa H$ ) est donc négative et petite, de l'ordre de  $-10^{-5}$  uSI. Elle se perd après l'enlèvement du champ. Le comportement diamagnétique est indépendant de la température. Les minéraux diamagnétiques ne contiennent pas ou ont très peu d'ions paramagnétiques. La plupart des minéraux communs (le quartz, le sel, la calcite, la kaolinite, le graphite, le gypse etc.) sont diamagnétiques et, en conséquence, les roches composées principalement de ces minéraux ont une susceptibilité négative (**Fig.A5.1A**).

Une réponse faible et positive à l'application d'un champ magnétique est appelée *paramagnétisme*. Les matériaux paramagnétiques contiennent des quantités plus élevées d'ions paramagnétiques. L'aimantation acquise par ces matériaux est *orientée en même direction que le champ appliqué* et elle est due à l'alignement des spins non appariés de ces ions paramagnétiques avec le champ. La susceptibilité magnétique est positive, souvent plus grande que dans le cas du diamagnétisme (de l'ordre  $10^{-3} - 10^{-5}$  uSI); elle se perd après l'enlèvement du champ. Le paramagnétisme est dépendant de la température: le moment magnétique est inversement proportionnel à la température à cause de la difficulté d'ordonner les moments magnétiques des atomes individuels quand la température (et implicitement l'agitation thermique) augmentent. La plupart des minéraux argileux et les minéraux de fer communs comme la sidérite, l'ilménite, la biotite et la pyrite sont paramagnétiques (**Fig.A5.1B**).

Un troisième type de comportement magnétique est appelé *ferromagnétisme (sensu lato)*. Il caractérise un nombre restreint des minéraux: certains oxydes de fer, oxyhydroxydes et sulfures de fer. Dans ces matériaux, les cations paramagnétiques sont juxtaposés étroitement dans le réseau cristallin de manière à ce que les moments magnétiques des spins des électrons non-appariés soient ordonnés entre eux directement ou par l'intermédiaire d'un anion. Ainsi l'ordre magnétique qui se crée entre ces électrons non-appariés peut mener vers une aimantation spontanée, même sans la présence du  $H$  extérieur. Les valeurs de la susceptibilité ferromagnétique (des corps pouvant posséder une aimantation spontanée), varient beaucoup, mais elles sont élevées (par rapport à la susceptibilité paramagnétique) et positives.

Contrairement aux susceptibilités dia- et paramagnétiques, la susceptibilité ferromagnétique est très dépendante de l'intensité du champ appliqué ( $H$ ):

- à des champs  $H$  faibles, l'aimantation induite  $M_i$  est proportionnelle au  $H$ , en conséquence la *susceptibilité initiale*  $\kappa$  (susceptibilité en champ faible) est constante et l'aimantation se perd après l'enlèvement du champ.
- à des valeurs plus élevées du  $H$ , une partie d'aimantation est retenue par le matériel après l'enlèvement du champ; la susceptibilité varie avec le champ.

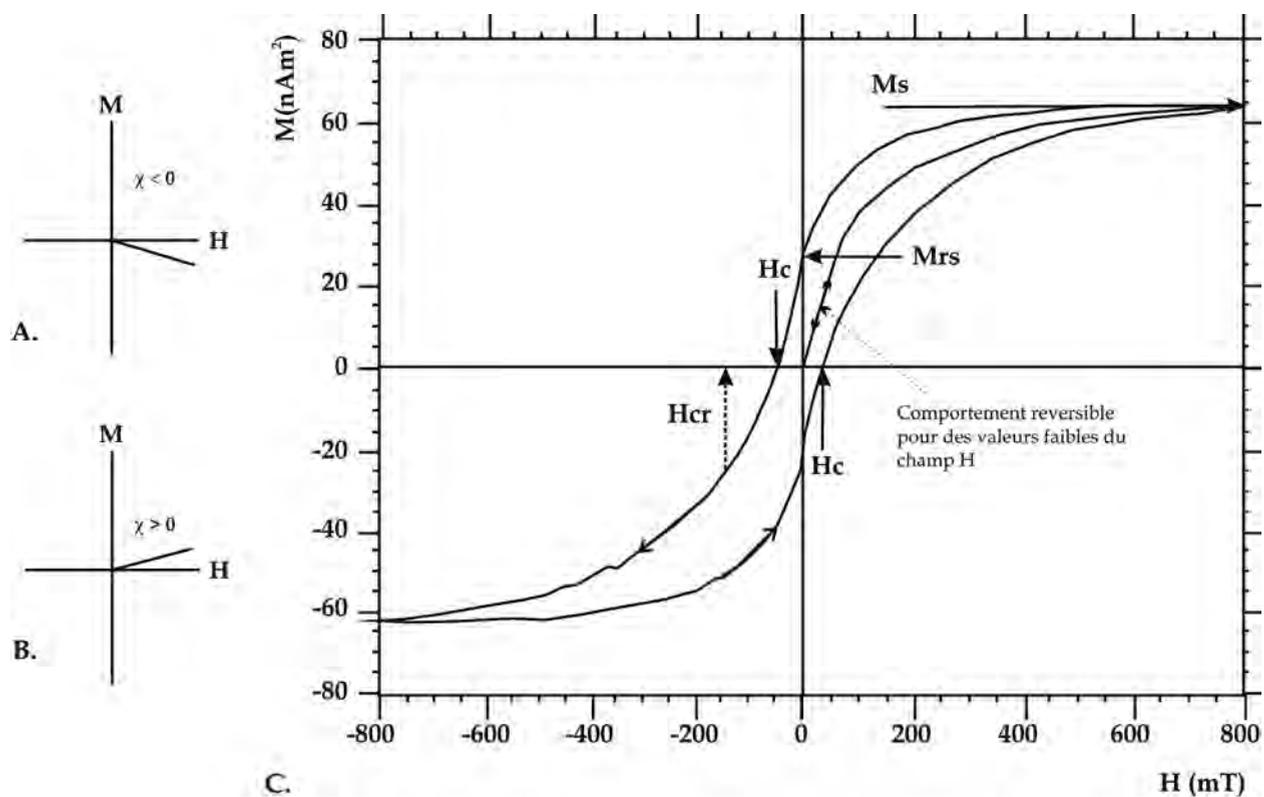
L'aimantation  $M$  en fonction du champ appliqué  $H$  peut être décrite à l'aide de la *courbe d'hystérésis*<sup>4</sup>, représentation graphique de la relation entre  $M$  et  $H$  (**Fig.A5.1C**). A des valeurs faibles du  $H$ , le  $M$  augmente proportionnellement (de là,  $\kappa$  est constant pour le  $H$  faible) et le processus d'aimantation est réversible. A des valeurs plus élevées du  $H$ , l'aimantation n'est plus proportionnelle à  $H$  et une petite portion de l'aimantation dénommée *aimantation rémanente* ( $M_r$ ) est retenue par le matériel après l'enlèvement du champ. Par la suite, quand  $H$  augmente davantage, l'*aimantation de saturation* ( $M_s$ ) est atteinte. Si on supprime le champ, l'échantillon va garder une *aimantation rémanente de saturation* ( $M_{rs}$ ). Si on applique un champ ( $-H$ ) qui augmente dans le sens opposé, l'aimantation totale de l'échantillon va diminuer jusqu'à zéro pour une valeur du champ négative dénommée *champ coercitif* ( $H_c$ ). Le champ négatif, plus fort que  $H_c$ , qui laisse l'échantillon avec une aimantation rémanente nulle ( $M_r=0$ ) est le *champ coercitif rémanent* ( $H_{cr}$ ). Le cycle hystérésis est complet si on porte l'échantillon jusqu'à l'aimantation de saturation en champ négatif et si ensuite on lui impose un champ  $H$  positif jusqu'à la saturation.

Ce comportement est dû à l'existence des *domaines magnétiques* qui s'orientent dans la direction du champ appliqué ( $H$ ).

Le concept des domaines magnétiques a été proposé par Weiss (1907) pour expliquer comment un corps avec une aimantation spontanée existe dans un état désaimanté. Il a suggéré que le corps peut-être divisé en plusieurs domaines (multidomaine MD) ou régions, chacun aimanté dans une certaine direction et que les domaines pouvaient être orientés dans des directions différentes (**Fig.A5.2a**). La formation des domaines magnétiques dans un cristal est due au fait qu'ils vont produire un état d'énergie plus bas, donc une plus grande stabilité. Un grand cristal aimanté en entier dans la même direction créerait un champ magnétique extérieur considérable, qui posséderait une grande énergie. Cette énergie est moindre s'il est divisé en deux domaines d'aimantation antiparallèle ou bien plusieurs, orientées de telle manière que les forces magnétostatiques des domaines adjacents sont réduites par interaction mutuelle.

Bloch suggéraient en 1930, que les domaines magnétiques sont séparés par des zones étroites d'une épaisseur de l'ordre de 0,01 à 0,1 microns où les directions d'aimantation

<sup>4</sup> du gr. *husterésis*, retard



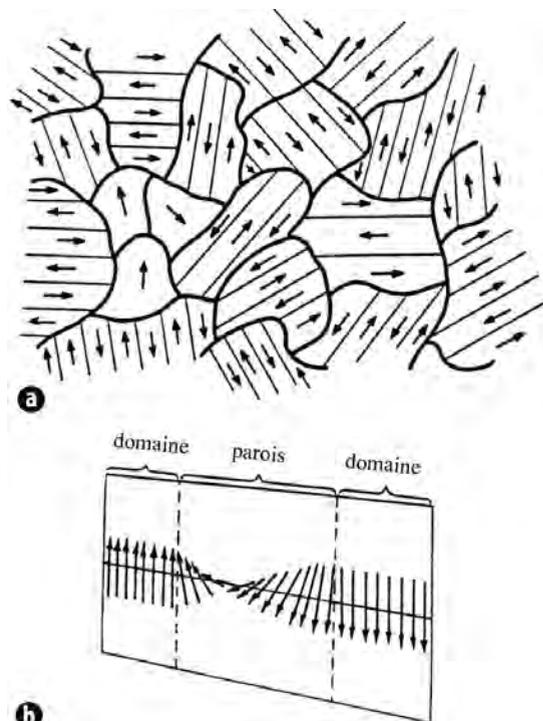
**Fig.A5.1.** Aimantations et désaimantations linéaires des corps **A.** dia- et **B.** paramagnétiques; **C.** Cycle hystérésis pour un calcaire pélagique rose, présentant l'aimantation de saturation ( $M_s$ ), la rémanence de saturation ( $M_r$ ) et le champ coercitif ( $H_c$ ). Le cycle resserré est dû à la présence de magnétite à coercivité basse et d'hématite à coercivité haute. (modifié d'après Opdyke et Channell, 1996 et Maher *et al.*, 1999)

des spins des électrons changent graduellement. Ces régions de passage d'un domaine à l'autre sont dénommées les domaines ou les parois de Bloch (**Fig.A5.2b**). On ne peut pas subdiviser un grain en domaines trop petits du fait de l'augmentation de l'énergie des parois. Ainsi en dessous d'une certaine dimension, un grain constitue un seul domaine: il est monodomaine (single domain SD) et il porte une aimantation spontanée.

Les propriétés d'hystérésis des matériaux sont détruites à des températures caractéristiques pour chaque minéral. Elles sont nommées *températures de Curie*. Au-delà de ce point, où l'ordre magnétique est cassé par les fluctuations thermiques, le comportement des matériaux est paramagnétique.

Le terme ferromagnétisme (sensu lato) est utilisé pour décrire les matériaux qui présentent un ordre magnétique entre les spins non appariés même sans la présence du champ extérieur. Il y a plusieurs types d'ordre magnétique qui donnent des propriétés magnétiques différentes dues à l'arrangement différent des moments de spin dans le réseau cristallin des minéraux (**Fig.A5.3**):

- dans le cas du **ferromagnétisme** (*sensu stricto*) les moments de spin sont parallèles et de valeurs uniformes. Il en résulte une forte aimantation spontanée. Ce comportement est restreint pour le fer natif, le nickel et le cobalt où les ions paramagnétiques sont suffisamment rappro-



**Fig.A5.2 a.** Orientations des domaines dans un corps polycristallin; **b.** Parois de Bloch

chés pour permettre des échanges directs. Les minéraux ne présentent pas ce type de comportement;

- dans le cas du **ferrimagnétisme**, les moments de spin adjacents sont antiparallèles, mais de valeurs inégales; il en résulte une nette aimantation spontanée;
- pour l'**antiferromagnétisme** les spins adjacents sont antiparallèles et de valeurs égales; en conséquence il n'en résulte pas un moment net;
- si l'antiparallélisme est imparfait, il en résulte un faible moment et une faible aimantation spontanée apparaît; on à un **antiferromagnétisme incliné**.

Les minéraux porteurs d'aimantation rémanente, appelés les minéraux magnétiques ont le comportement ferrimagnétique ou antiferromagnétique incliné. Les minéraux ferrimagnétiques présentent en général des susceptibilités et des intensités d'aimantation élevées, des coercivités relativement basses, à l'inverse des minéraux antiferromagnétiques inclinés.

## 2. LES MINÉRAUX MAGNÉTIQUES

Les propriétés magnétiques des sédiments marins ne dépendent pas uniquement de la nature des minéraux magnétiques primaires d'origine détritrique, biogène ou de précipitation de la colonne d'eau, mais aussi des conditions diagénétiques qui déterminent l'altération des phases magnétiques primaires et la formation authigène des minéraux magnétiques secondaires.

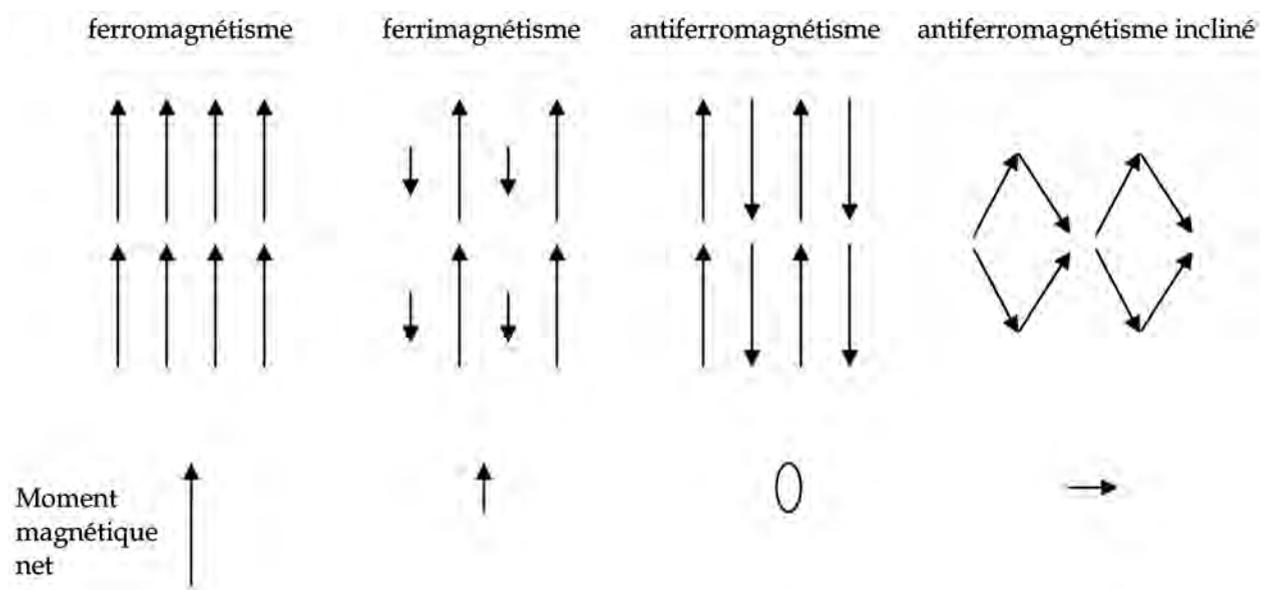
Les principaux minéraux porteurs d'aimantation rémanente dans les sédiments marins sont: la **magnétite** ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la **titanomagnétite**, l'**hématite** ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), la **maghémite** ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), la **goethite** ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) et des sulfures de fer comme la **pyrrhotite** ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) et la **greigite** ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ). Parmi ces minéraux, la magnétite, la maghémite, l'hématite, la titanomagnétite et la goethite peuvent être des porteurs de

l'aimantation primaire. Les minéraux authigènes, formés pendant la diagenèse précoce sont la pyrrhotite et la greigite mais aussi l'hématite ainsi que la magnétite, la maghémite et la goethite, qui peut être un produit d'oxydation, surtout des sulfures de fer.

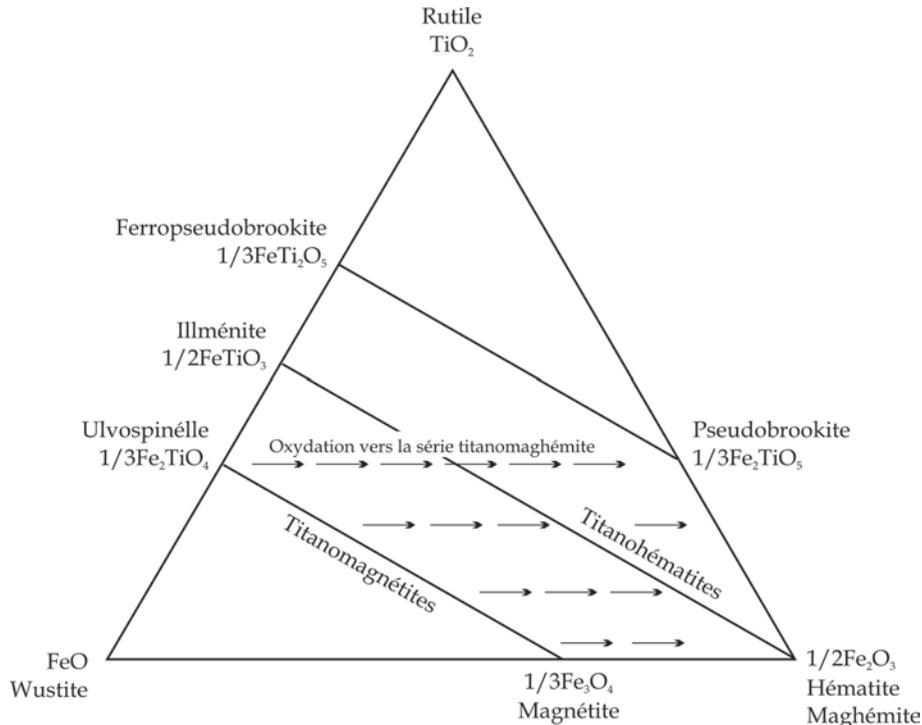
### A. LA MAGNÉTITE ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ET LES TITANOMAGNÉTITES ( $x\text{Fe}_2\text{TiO}_4 [1-x]\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

La magnétite est un des termes finaux de la solution solide ulvospinelle - magnétite (**Fig.A5.4**) et le minéral magnétique le plus commun sur la Terre. Elle est cubique avec une structure de spinelle inverse. La température de Curie (Néel pour les corps antiferromagnétiques) varie plus au moins linéairement avec le contenu de Ti depuis  $-150^\circ\text{C}$  pour l'ulvospinelle à  $580^\circ\text{C}$  pour la magnétite. En conséquence, l'ulvospinelle, antiferromagnétique, est paramagnétique à la température ambiante. Les titanomagnétites sont ferrimagnétiques à la température ambiante (pour les valeurs de  $x < 0,8$ ). La solution solide complète entre ulvospinelle et magnétite apparaît uniquement à des températures supérieures à  $600^\circ\text{C}$ , ainsi dans les roches ignées les lamelles d'exsolution sont communes. En général, l'exsolution n'est pas entre ulvospinelle et magnétite mais entre ilménite et magnétite à cause de l'oxydation de haute température (deuterique) de l'ulvospinelle en ilménite (Haggerty, 1967a, b cité dans Opdyke et Channell, 1996).

Les titanomagnétites sont communes dans les roches ignées et métamorphiques; en conséquence, elles font partie des composants détritriques importants dans les sédiments. Beaucoup de sédiments contiennent des grains de magnétite avec un faible contenu de titane, ce qui est peu commun dans les roches ignées. De telles magnétites sont considérés comme étant d'origine authigène et/ou biogène. Beaucoup d'organismes, y compris les bactéries et les mollusques, pro-



**Fig.A5.3.** Arrangement des moments de spin associés aux différents comportements magnétiques



**Fig.A5.4.** Diagramme ternaire indiquant les minéraux magnétiques formés d'oxydes de fer, les solutions solides de titanomagnétite et titanohématite, et la tendance d'oxydation vers la titanomaghémite (d'après Opdyke et Channell, 1996)

duisent de la magnétite: soit par la précipitation extracellulaire, soit en tant que partie intégrante de leur métabolisme (e.g. Blakemore, 1975; Kirschvink and Lowenstam, 1979; Blakemore et al. 1985; Frankel, 1987; Lovley *et al.*, 1987; Lovley, 1990; Bazylinski *et al.*, 1988; Chang et Kirschvink, 1989; Sparks *et al.*, 1990, cités dans Opdyke et Channell, 1996). La microscopie électronique des extraits magnétiques des sédiments lacustres (Snowball, 1994 cité dans Opdyke et Channell, 1996) et d'une large variété des sédiments marins (Vail *et al.*, 1987; McNeil, 1990, Yamazaki *et al.* 1991 cités dans Opdyke et Channell, 1996) a montré que la magnétite est souvent trouvée dans l'intervalle de granulation monodomaine, similaire à la taille des grains de magnétite produite par les bactéries vivantes. La taille des grains et le faible contenu en titane de cette phase magnétique sont tels qu'elle est un porteur important de l'aimantation rémanente stable.

**B. L'HÉMATITE ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) ET LA TITANOHÉMATITE ( $x\text{FeTiO}_3$  [ $1-x$ ] $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )**

Les compositions minérales intermédiaires entre l'ilménite et l'hématite sont dénommées des titanohématites. Les hématites ont une symétrie rhomboïdale et la structure du corindon. Pour les titanohématites, la température de Néel varie avec le  $x$ , de  $-218^\circ\text{C}$  pour l'ilménite à  $675^\circ\text{C}$  pour l'hématite. Les compositions correspondantes aux valeurs de  $x$  plus grandes que 0,8 sont paramagnétiques à la température ambiante. Les autres compositions sont ferrimagnétiques pour des valeurs de  $x$  situés dans l'intervalle 0,5-0,8 et antiferromagnétiques pour  $0 < x < 0,5$ . La solution solide complète se

forme à plus de  $1000^\circ\text{C}$  et l'exsolution des 2 termes finaux est commune à l'exception des cas où  $x < 0,1$  ou  $x > 0,9$ . Les titanohématites sont associés à des roches métamorphiques et plutoniques; l'hématite presque pure est abondante dans les roches métamorphiques, sédimentaires et ignées. L'hématite est très importante en tant que porteur de la rémanence dans les roches clastiques et aussi dans les sédiments chimiques. L'hématite peut apparaître dans les sédiments tels que le fer spéculaire détritique ou un pigment authigène qui se forme pendant la diagenèse. Les hématites sont **antiferromagnétiques**, le moment net faible étant dû à la faible inclinaison des moments de spin. L'aimantation de saturation est beaucoup plus petite que celle de la magnétite et la coercivité de rémanence est beaucoup plus élevée.

**C. LA MAGHÉMITE ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) ET LA TITANOMAGHÉMITE ( $x\text{FeTiO}_3$  [ $1-x$ ] $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )**

La maghémite possède la structure du spinelle de la magnétite et la composition chimique de l'hématite. La maghémite et la titanomaghémite sont des phases métastables qui se transforment respectivement en hématite et en magnétite à des températures plus hautes que  $250^\circ\text{C}$ . Par conséquent, la température de Curie est difficile à déterminer, étant probablement autour de  $640^\circ\text{C}$ . Les propriétés magnétiques sont similaires à celles de la magnétite, avec des aimantations de saturation légèrement plus basses mais avec des coercivités de rémanence comparables. La maghémite est commune en tant que produit d'oxydation à basse température de la magnétite, dans les roches ignées et sédimentaires.

---

#### D. LA GOETHITE ( $\alpha$ -FeOOH)

La goethite est le plus commun des oxyhydroxydes de fer. Elle est **antiferromagnétique** avec une température de Néel d'environ 120°C (Hedley, 1971 cité dans Opdyke et Channell, 1996). La goethite, lorsque son réseau cristallin est imparfait, présente une aimantation de saturation faible et une coercivité très haute, ce en quoi elle ressemble à l'hématite (Hedley, 1971; Rochette et Fillion, 1989, cités dans Opdyke et Channell, 1996). Elle se déshydrate en hématite à environs 300°C. La goethite est un produit important dans l'oxydation à température basse des sulfures de fer et un constituant des nodules manganeux et des argiles rouges de Pacifique où elle peut précipiter directement à partir de l'eau de mer. La lépidochrocite ( $\gamma$ -FeOOH) est moins commune que la goethite, a une température de Néel de -196°C et en conséquence, elle n'est pas un porteur important de la rémanence, mais elle se déshydrate en maghémite et peut donc contribuer indirectement à la rémanence magnétique.

#### E. LA PYRRHOTITE ( $\text{FeS}_{1+x}$ , OU $x = 0-0,14$ )

$\text{Fe}_7\text{S}_8$ , la *pyrrhotite* la plus magnétique est monoclinique et **ferrimagnétique**, avec une température de Curie d'environ 325°C.  $\text{Fe}_9\text{S}_{10}$  est moins important du point de vue magnétique, étant ferrimagnétique dans un intervalle de température très restreint: ~100-200°C. L'aimantation de saturation de  $\text{Fe}_7\text{S}_8$  est environs dix fois plus grande que celle de l'hématite et environs la moitié de celle de la magnétite et de la maghémite (Clark, 1984, cité dans Opdyke and Channell, 1996). La coercivité de rémanence est en général plus grande que celle

de la magnétite et de la maghémite (Dekkers, 1988). La pyrrhotite apparaît dans les roches ignées basiques (Soffel, 1977, 1981 cité dans Opdyke et Channell, 1996) et peut se former pendant la diagenèse des sédiments, dans certains milieux réducteurs (Kligfield et Channell, 1981; Freeman, 1986 cités dans Opdyke et Channell, 1996). La *pyrite* ( $\text{FeS}_2$ ), le sulfure de fer le plus commun, est **paramagnétique**.

#### F. LA GREIGITE ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ )

La greigite est **ferrimagnétique** et porteuse d'une aimantation stable dans des sédiments lacustres (Snowball et Thompson, 1990; Snowball, 1991) et dans des sédiments clastiques marins déposés rapidement (Tric *et al.*, 1991a cité dans Opdyke et Channell, 1996; Roberts et Turner, 1993; Reynolds *et al.*, 1994). Elle est diagénétique, métastable et se transforme en pyrite, sauf dans des conditions particulières qui empêchent cette transformation. Elle a une structure de spinelle, comme la magnétite, ainsi ses propriétés magnétiques sont similaires à celles de la magnétite. En conséquence, les coercivités de la greigite sont un peu plus basses que celles de la pyrrhotite.

La température de Curie de la greigite est d'environ 320°C, et les courbes thermomagnétiques sont caractérisées par l'augmentation du moment magnétique (et de la susceptibilité) quand elle s'oxyde en magnétite aux alentours de 400-500°C.

La **pyrite** ( $\text{FeS}_2$ ), le sulfure de fer le plus commun, est paramagnétique, tout comme la **sidérite**, un carbonate de fer ( $\text{FeCO}_3$ ).



