

50376
1993
356

50376
1993
356

n° d'ordre : 1194

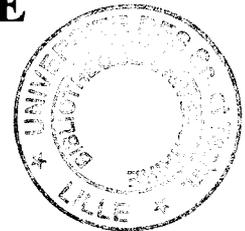
U.F.R. des Sciences de la Terre - Laboratoire de Sédimentologie et Géodynamique

THÈSE

présentée à

**L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES DE LILLE**

pour obtenir le titre de



**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ,
SOUS LE LABEL EUROPÉEN,
EN GÉOLOGIE ET GÉOCHIMIE SÉDIMENTAIRES**

par

Alain TRENTESAUX

**Structure et dynamique sédimentaire
du Middelkerke Bank,
Mer du Nord méridionale**

**Sedimentary structure and dynamics
of the Middelkerke Bank,
Southern North Sea**

Soutenue le 22 Novembre 1993 devant la commission d'examen :

Président : H. CHAMLEY
Rapporteurs : M. COLLINS
G. DE MOOR
F. THIÉBAULT
Examineurs : S. BERNÉ
M. DE BATIST
J. TERWINDT

REMERCIEMENTS

S'il est un milieu naturel dans lequel l'équipe, bien plus que l'individu, est un élément essentiel à la réussite d'un projet, c'est assurément la mer. Bien sûr, la marine à voile a laissé place aux plaisanciers et marins modernes mais l'esprit est resté. Je ne suis pas un marin, loin s'en faut et pourtant, ce travail n'aurait jamais pu être réalisé sans la participation d'un équipage qui ferait rêver le plus blasé des capitaines. L'aventure pourrait s'intituler "Le tour du Middelkerke Bank en trois ans". Elle ne risque pas d'intéresser un Jules Verne moderne. Vous qui vous êtes parfois posé la question "- Mais qu'allais-je donc faire dans cette galère ?". J'espère que vous le saurez un peu mieux en lisant ce mémoire.

Ma reconnaissance s'adresse tout d'abord à M Hervé Chamley, Professeur à l'Université de Lille I. Alors que je n'étais qu'un simple tondu au service de la France en Allemagne, il a été l'armateur de cette thèse, préparant des coopérations et m'aidant à trouver un financement. Tout au long de mon travail, et malgré ses multiples occupations, il a toujours su rester disponible pour relire un rapport, ce travail ou discuter des résultats.

Le professeur Guy De Moor de l'Université de Gand (Belgique) a été pendant trois ans le coordinateur du projet dans lequel s'inscrit ce travail. A chacune de nos entrevues, il a pu faire partager à tous son enthousiasme et ses connaissances sur les Bancs de Flandres et la culture flamande. Je lui suis très reconnaissant pour le travail de rapporteur qu'il a bien voulu prendre en charge.

C'est avec plaisir que j'ai appris que le Professeur Michael Collins de l'Université de Norwich (Angleterre) acceptait d'être rapporteur de ce mémoire. Je le remercie d'avoir bien voulu se déplacer jusqu'à Lille pour jeter un oeil critique sur mon travail.

Déjà pour mon DEA, le Professeur François Thiébault de l'Université de Lille I avait accepté la charge de relire mon manuscrit. Je le remercie chaleureusement pour avoir montré une telle aptitude à pouvoir juger deux travaux relativement différents.

Au cours de mes nombreux déplacements à l'Université d'Utrecht (Pays-Bas), j'ai pu apprécier la sympathie du Professeur Joost Terwindt. En tant que sédimentologiste, il me fait un grand honneur de bien vouloir participer au jury de cette thèse. Je le remercie également pour m'avoir ouvert son laboratoire et permis de travailler avec son équipe.

Le Docteur Marc DeBatist de l'Université de Gand (Belgique) occupe une place à part. C'est chez lui, et au sein d'une équipe formidable et chaleureuse, que j'ai pu apprendre les mystères de l'interprétation sismique ainsi que les joies de la grammaire néerlandaise. J'ai passé beaucoup de temps à Gand, mettant à contribution la gentillesse de Marc et ses compétences. Je le remercie vivement d'en passer encore à examiner ce travail.

"Last but not least", le Docteur Serge Berné du centre IFREMER de Brest a été mon parrain pendant trois

années. Même si j'ai un peu souffert de son année sabbatique aux États-Unis, j'ai apprécié son sérieux et son humour sur les navires océanographiques et à Brest où nous avons dépouillé les premiers rouleaux de sonar latéral. Son aide a été très efficace lors de la rédaction de ce mémoire. Je le remercie chaleureusement d'être à la fin du travail un examinateur attentif.

A la fin de mon travail de recherche, je tiens à exprimer ma gratitude envers les deux organismes qui ont assuré le financement de mon travail : L'Institut Français pour la Recherche et l'Exploitation de la MER (IFREMER) et le Conseil Régional du Nord/Pas-de-Calais. Si ces deux organismes m'ont fait vivre, je ne peux oublier de remercier la Communauté Européenne (CE) et plus particulièrement M Christos Fragakis. Les efforts financiers consentis par la CE pour favoriser la coopération européenne dans les domaines de l'océanographie (programmes MAST) ont fait se rencontrer des chercheurs de différentes universités et permis de joindre leurs compétences au sein d'un projet passionnant.

Pendant ces trois années, j'ai rencontré des personnes éminemment sympathiques, efficaces et souvent les deux. Grâce à elles, l'accès à de nombreuses techniques et données a été facilité.

Une mention spéciale pour Bernadette Tessier de l'Université de Lille I qui a suivi mon travail de bout en bout. Elle a été mon interlocutrice locale de plus en plus efficace avec le temps. Elle n'a pas ménagé sa peine en relisant ce manuscrit, mettant ma réflexion et mes zygomatics à dure épreuve.

A l'IFREMER, à Brest ou sur les navires océanographiques, j'ai été accueilli par Jean-Pierre Henriot qui après avoir été à Gand s'est retrouvé breton d'adoption en tant que Directeur du département "Géosciences marines". Il m'a invité chaleureusement. J'ai apprécié la gentillesse et l'efficacité d'Éliane Le Drezen, spécialiste ès mosaïques sonar latéral, Christian Prud'homme qui à chaque mission sonar a prouvé ses multiples compétences, Jean-Michel Raillard, fanatique de blagues à rallonges et véritable chef pour la navigation. Tania Marsset a été mon interlocutrice pendant l'absence de Serge. J'ai pu apprécier sa discrétion et son efficacité. Je citerai également René Kerbrat, qui aime les carottes (de sable) autant que moi, Jean-François Bourillet qui a su rester éveillé pendant la nuit pour me sortir de mes soucis informatiques, Babette Savoye, Bruno Savoye qui ont eu la gentillesse de me faire découvrir le logiciel "Canvas" ainsi que de somptueuses pizzas familiales, Claude Augris toujours à l'écoute des problèmes des étudiants, Bruno Marsset à la bonne humeur communicative et à tous les habitants de ce laboratoire "coupables" de la bonne ambiance qui règne dans cette contrée pas aussi humide que la tradition nous le laisse croire.

Gand n'est pas seulement une ville chargée d'histoire et remplie de cafés pittoresques. Elle renferme des gens qui, bien que flamands, sont d'une sympathie que l'on ne trouve qu'en Belgique, à la fois simple et sincère. Mes remerciements s'adressent au Professeur Maréchal qui m'a accueilli et m'a fait partager ses connaissances encyclopédiques, Jean Lanckneus qui fut le bras droit du Professeur De Moor et m'a souvent invité pour discuter du fameux Middelkerke Bank, Pieter Van Rensbergen qui est vraiment un ami, Erwin Van Heuverswyn, Wim Versteeg, Mark Verschuren, Théophile Bandora aussi flamand que je suis noir de peau, Martine Bogaert aux grands talents de

dessinatrice et les autres qui m'ont aidé à comprendre le flamand en évitant de parler trop vite.

Les membres associés au projet RESECUSED de le CE ont été des interlocuteurs privilégiés à chacune de nos rencontres. Je remercie chaleureusement Ad Stolk, doctorant à l'Université d'Utrecht. Pendant trois ans, il m'a invité sur les navires néerlandais, me permettant d'échantillonner plusieurs fois. Nous avons ensuite décrit ensemble une partie des carottes qui sont utilisées dans ce mémoire et seront l'ossature d'une partie de son doctorat. C'est avec un véritable ami que j'ai pu travailler et espère encore travailler. Je remercie également Rick Houthuys de la compagnie EUROSENSE avec qui j'ai eu de sympathiques discussions sur les bancs de Flandres, Chris Vincent de l'Université de Norwich (Angleterre) ainsi que les autres chercheurs rencontrés au cours de l'une ou l'autre réunion.

Je tiens également à remercier ceux que j'ai rencontrés au congrès de Wilhemshaven en Août 1992 et qui ont montré de l'intérêt pour mes travaux et avec qui parfois, je continue de correspondre. Daniel Hartmann de l'Université du Negev (Israël), Le Professeur Claude Larsonneur de l'Université de Caen, Peter Harris de l'Université de Sydney, Bob Dalrymple de l'Université de Kingston (Canada) qui a poussé l'amabilité à me consacrer une demi-journée lors de son passage à Lille, Cécile Baeteman avec qui j'ai longuement discuté et qui m'a ouvert les portes du Service Géologique de Belgique pour y redécrire et échantillonner une carotte fondamentale pour cette étude, et Kate Krank du Bedford Institute (Canada) trop tôt décédée.

Mes remerciements s'adressent également à Pascal Bouchez de Météo France qui m'a fourni de précieuses données sur la zone d'étude.

Mais non, je ne vous ai pas oubliés, vous, mes collègues de tous les jours. Pendant trois années, vous avez subi "mon" banc et sa prononciation si chantante et délicate. Corinne Corbau et Jean-Yves Reynaud qui me font la sympathie de rester dans notre bureau quand j'y suis, Christos Lazarou à qui j'en veu beaucoup de m'avoir battu au Tristan mais que je remercie de m'avoir fait découvrir le goût du poulpe, Abderrazak El Albani, "mon ami" avec qui j'ai partagé tant d'aventures, Nadia M'Hammdi qui usa ses pantalons sur le même banc que moi avant de retrouver celui de Serk, Florence Thauront que j'envie d'avoir un sujet de thèse là où je passerais volontiers mes vacances, Philippe Récourt, à la fois ami sympathique et technicien de talent prouvant enfin qu'il est possible d'avoir deux qualités (et peut-être plus) à la fois, Richard Cloutier qui pris de son temps pour relire et améliorer mon "abridged version". Il y a aussi Fabienne qui fit quelques tamisages le temps d'un été, Christine qui m'a aidé à traduire les quelques mots en néerlandais, Madame Françoise Dujardin, Vivianne Bout, Nathalie Fagel, Anne Huyghe, Martine Buatier, Olivier Goffette, Jean-François Deconinck, Jean-Noël Proust ou Jean Carpentier. Bien sûr j'en oublie, mais tous, soyez remerciés.

Tout ce travail n'aurait pas été possible sans la participation des commandants et des marins des navires Le Suroit, Belgica et Navicula. Je les en remercie vivement.

Nota ter attentie van de nederlandstaligen

Na zoveel weken in Gent en Utrecht voel ik mij genoodzaakt een aantal woorder te richten tot diegenen die ik er ontmoet heb. Ook al hebben wij dikwijls in het Frans of in het Engels gepraat, weten jullie dat jullie mij toch hard zien zwoegen de Nederlandse lessen alles behalve nutteloos geweest zijn.

Dank U zeer veel voor het hartelijke onthaal in uw landen die als "noordelijk" en "streng" beschreven worden, maar waar ik oprechte en sympathieke vrienden ontmoet heb.

En zoals het lied zegt :

- " - Oh het is toch so fein
- Om een zeeman te zein"

... vooral met jullie.

Voilà pour l'équipage. Et pour clore ces quelques pages, il me faut remercier mes chers parents, restés au port. Ils m'ont accompagné par la pensée à chacun de mes déplacements et soutenu moralement quand j'en avais besoin.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Table des matières.....	I à VI
-------------------------	--------

ABRIDGED VERSION

I - Introduction.....	1
1 - Tidal sand banks.....	1
2 - Study area	1
3 - The RESECUSED Project.....	1
4 - This Work	2
II - Sedimentary dynamics in the Middelkerke Bank area.....	2
1 - Factors controlling the sediment distribution.....	2
1.1 - Common distribution - 1st campaign, May 1990.....	2
1.1.1 - Results	2
1.1.2 - Relation between grain-size parameters and bank morphology.....	3
1.2 - Particular distribution - 2d campaign, April 1991.....	3
1.2.1 - Results	3
1.2.2 - Effects of a storm	3
2 - Qualitative evaluation of the sedimentary transport.....	4
2.1 - Side-scan sonar results	4
2.2 - Results from numerical models	4
2.3 - Comparison between numerical and side-scan sonar results	4
3 - Quantitative evaluation of the sediment transport.....	4
4 - Conclusion	4
III - Internal structure of the Middelkerke Bank	5
1 - Architecture.....	5
1.1 - Seismic units.....	5
1.2 - Seismic unit boundaries and internal reflectors.....	6
1.2.1 - The unconformity at the base of the Quaternary deposits ..	6
1.2.2 - The unit boundaries	6
1.2.3 - The internal reflectors	6
1.3 - Conclusion	6
2 - Structures observed in cores	6
3 - Combined use of seismic and lithologic data.....	7
3.1 - Physical nature of the seismic reflections.....	7
3.2 - Main characteristics of the seismic units	7
3.2.1 - Observations.....	7
3.2.2 - Seismic and lithological facies of the seismic units.....	8
4 - Synthesis - Evolution of the Middelkerke Bank	9
4.1 - Unit U1	9
4.2 - Unit U2	9
4.3 - Unit U3	9
4.4 - Unit U4	9
4.5 - Unit U5	10

II

4.6 - Unit U6.....	10
4.7 - Unit U7.....	10
4.8 - Conclusion.....	10

OBJECTIFS ET PRESENTATION..... 11

Avant-propos - LE PROJET MAST 0025-C : RESECUSED

A - Historique.....	13
B - Les partenaires.....	13
C - Résumé des opérations à la mer.....	14

CHAPITRE I - INTRODUCTION, METHODES D'ETUDE

A - Zone d'étude.....	17
1 - Choix de la zone.....	17
2 - Caractères généraux.....	17
3 - Histoire pré-quaternaire.....	22
4 - Histoire quaternaire.....	22
4.1 - Courbe de remontée du niveau marin.....	23
4.2 - Conséquences environnementales.....	24
4.3 - Évolution du marnage.....	26
B - Méthodes d'étude.....	28
1 - Positionnement.....	28
2 - Etude des sédiments superficiels.....	28
2.1 - Mode de prélèvement.....	28
2.2 - Techniques et méthodes d'étude.....	30
3 - Imagerie acoustique.....	32
3.1 - Introduction.....	32
3.2 - Description de l'équipement utilisé.....	33
3.3 - Traitement des images sonar.....	35
3.4 - Interprétation.....	35
3.5 - Couverture par sonar latéral de la zone d'étude.....	36
4 - Sismique haute et très haute résolution.....	37
4.1 - La chaîne d'acquisition haute résolution du RCMG.....	39
4.2 - La chaîne d'acquisition très haute résolution de l'IFREMER.....	39
4.3 - Mode d'interprétation des données sismiques.....	41
4.4 - Traitement des données.....	41
4.5 - Couverture sismique.....	42
5 - Carottages.....	44
5.1 - Prélèvements.....	44
5.2 - Localisation des carottages.....	45
6 - Limites météorologiques.....	47
7 - Intégration des données.....	47

CHAPITRE II - DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE ACTUELLE

A - Analyse de la couverture sédimentaire.....	49
1 - Caractéristiques générales des sédiments	50
1.1 - Fraction argileuse ($< 2 \mu\text{m}$, 9 Φ)	50
1.2 - Silts (2 - 63 μm , 9 - 4 Φ)	51
1.3 - Sables très fins (63 - 125 μm , 4 - 3 Φ)	52
1.4 - Sables fins (125 - 250 μm , 3 - 2 Φ)	52
1.5 - Sables moyens (250 - 500 μm , 2 - 1 Φ)	52
1.6 - Sables grossiers (500 - 1000 μm , 1 - 0 Φ)	52
1.7 - Sables très grossiers (1000 - 2000 μm , 0 à -1 Φ)	52
1.8 - Graviers ($>2000 \mu\text{m}$, $< -1 \Phi$)	53
2 - Répartition des sédiments superficiels en Mai 1990.....	54
2.1 - Répartition granulométrique.....	54
2.2 - Répartition de la teneur en carbonate de calcium	57
2.3 - Relation granulométrie/carbonate de calcium	59
2.4 - Comparaison d'ensemble entre médiane, CaCO_3 et profondeurs....	60
3 - Résultats de la campagne d'Avril 1991	62
3.1 - Répartition granulométrique.....	63
3.2 - Répartition du carbonate de calcium	63
4 - Variations granulométriques à un an d'intervalle	63
4.1 - Le positionnement.....	63
4.2 - Facteurs hydrodynamiques.....	67
4.2.1 - Conditions météorologiques générales	67
4.2.2 - Météorologie avant la première campagne (01-16 Mai 1990)	67
4.2.3 - Météorologie avant la seconde campagne (09-24 Avril 1991)	70
4.3 - Conclusion	70
5 - Évaluation du transit sédimentaire par une approche numérique... 70	70
5.1 Introduction	70
5.2 - Application de la méthode de McLaren : principes et limites	71
5.2.1 - Définition de classes de sédiments	72
5.2.2 - Filiations interclasses	76
5.2.3 - Conclusion	79
6 - Analyse détaillée de la partie nord du banc	79
6.1 - Résultats	79
6.1.1 - Granularité.....	79
6.1.2 - Teneurs en calcaire	79
6.1.3 - Classement	80
7 - Conclusion	81
B - Morphologie des fonds marins.....	82
1 - Classification.....	82
1.1 - Généralités.....	82
1.2 - Figures observées.....	83
1.2.1 - Figures sédimentaires naturelles	83
1.2.2 - Figures artificielles.....	85
2 - Répartition des dunes à la surface du banc	85
2.1 - Localisation	85
2.2 - Direction des crêtes des dunes	87
3 - Classes de dunes.....	87
4 - Obliquité des figures entre elles.....	89
5 - Étude détaillée de la terminaison septentrionale du banc	91
5.1 - Mosaïque du 6 Mai 1991.....	91

IV

5.2 - Mosaïque du 2 Juillet 1992.....	92
5.3 - Etude comparative des deux mosaïques.....	98
5.3.1 - Similitudes.....	98
5.3.2 - Différences.....	98
6 - Mobilité des grandes et très grandes dunes.....	100
6.1 - Etudes antérieures.....	100
6.2 - Apports de la présente étude.....	101
6.2.1 - Masse déplacée.....	101
6.2.2 - Renouvellement des sédiments.....	102
6.3 - Conclusion à l'étude détaillée de la partie nord.....	102
7 - Transit sédimentaire déduit des données morphologiques.....	103
7.1 - Introduction.....	103
7.2 - Résultats.....	103
7.3 - Interprétation.....	105

C - Utilisation combinée des données de la granulométrie et du sonar latéral. Conclusion.....107

1 - Nature des sédiments superficiels.....	107
2 - Transit sédimentaire.....	107
2.1 - Cas où les sonogrammes et la méthode numérique indiquent la même direction.....	107
2.2 - Cas où les sonogrammes et la méthode numérique n'indiquent pas la même direction.....	109
2.3 - Conclusion.....	109
3 - Conclusion sur la mobilité des sédiments.....	111

CHAPITRE III - STRUCTURE INTERNE

A - Étude de l'architecture du Middelkerke Bank par les techniques de sismique réflexion.....113

1 - Interprétation des profils - Méthode d'étude.....	113
2 - Modélisation tridimensionnelle.....	115
3 - Définition des réflecteurs.....	118
3.1 - Introduction.....	118
3.2 - Les réflecteurs de premier ordre. Limites des unités sismiques....	118
3.2.1 - La discontinuité Tertiaire/Quaternaire.....	118
3.2.1.1 - Nature des terrains tertiaires.....	118
3.2.1.2 - Modelé général de la surface anté-quaternaire.....	119
3.2.1.3 - Précisions sur la base du Quaternaire dans la zone du Middelkerke Bank.....	121
3.2.2 - Les limites intra-quaternaires des unités sismiques.....	122
3.3 - Les réflecteurs de second ordre : Réflecteurs internes.....	124
4 - Les unités sismiques définies par la sismique haute résolution... ..	125
4.1 - Introduction.....	125
4.2 - Description des unités.....	125
4.2.1 - Unité U1 (Fig. III-12 a, b et c).....	126
4.2.2 - Unité U2 (Fig. III-13 a, b et c).....	127
4.2.3 - Unité U3 (Fig. III-14 a, b et c).....	128
4.2.4 - Unité U4 (Fig. III-15 a, b et c).....	129
4.2.5 - Unité U5 (Fig. III-16 a, b et c).....	130
4.2.6 - Unité U6 (Fig. III-17 a, b et c).....	131
4.2.7 - Unité U7 (Fig. III-18 a, b et c).....	132
4.3 - Récapitulatif.....	133

5 - Apports de la sismique très haute résolution (THR).....	139
5.1 - Introduction.....	139
5.2 - Application à la partie nord du banc	140
5.2.1 - Situation générale.....	140
5.2.2 - Architecture de la terminaison septentrionale du banc ..	140
5.2.3 - Unités sismiques.....	140
5.2.4 - Discontinuités	143
5.2.5 - Récapitulatif	145
6 - Conclusion	146
B - Structures observées sur carottes	147
1 - Détermination des faciès	148
1.1 - Critères de distinction.....	148
1.2 - Les faciès sédimentaires	150
2 - Structure sédimentaire de la partie Sud du banc - Profil 80.....	152
2.1 - Variabilité verticale	152
2.2 - Corrélations latérales.....	154
3 - Structure sédimentaire de la partie nord du banc - Profil N°30....	155
3.1 - Caractères sédimentaires du sommet du banc.....	157
3.2 - Caractères sédimentaires des flancs du banc	157
4 - Conclusion	158
C - Caractérisation des séquences de dépôt - Utilisation combinée des données de sismique et de carottage.....	159
1 - Relations entre les propriétés physiques observées sur carottes et la réponse sismique	159
1.1 - Introduction.....	159
1.2 - Cas où les réflecteurs correspondent à des discontinuités lithologiques nettes. Exemple de la carotte VK 05.....	159
1.3 - Cas où les réflecteurs correspondent à de très faibles discontinuités lithologiques. Exemple de la carotte VK 04	161
1.4 - Nature des réflecteurs internes. Exemple de la carotte VK 03.....	163
1.5 - Conclusions	163
2 - Caractérisation des unités supérieures.....	165
2.1 - Présentation des données	165
2.1.1 - Profil lithologique à l'extrémité nord du banc (N°20)...	165
2.1.3 - Profil lithologique dans la partie sud du banc (N°80) ...	170
2.1.4 - Profil lithologique à l'extrémité sud du banc (N°100)...	172
2.2 - Caractères propres à chaque unité.....	174
2.2.1 - Unité U4.....	174
2.2.2 - Unité U5.....	177
2.2.3 - Unité U6.....	177
2.2.4 - Unité U7.....	177
3 - Caractérisation d'une séquence complète	178
3.1 - Description de la carotte "Uitdiep".....	179
3.2 - Caractères des unités inférieures	182
3.2.1 - Unité U1.....	182
3.2.2 - Unité U2.....	182
3.2.3 - Unité U3.....	182
3.3 - Compléments sur les unités U4 et U6.....	182

D - Synthèse - Modèle d'évolution du Middelkerke Bank.....183

1 - Unité U1	183
1.1 - Discussion	183
1.2 - Conclusion.....	184
2 - Unité U2	185
2.1 - Discussion	185
2.2 - Conclusion.....	185
3 - Unité U3	185
3.1 - Discussion	185
3.2 - Conclusion.....	186
4 - Unité U4	186
4.1 - Discussion	186
4.2 - Conclusion.....	188
5 - Unité U5	188
6 - Unité U6	188
6.1 - Discussion	188
6.2 - Conclusion.....	190
7 - Unité U7	190
7.1 - Discussion	190
7.2 - Conclusion.....	191
8 - Tentative de datation - Conclusion	192
8.1 - Utilisation de la courbe de remontée du niveau marin.....	192
8.2 - Limites méthodologiques de la technique utilisée.....	195
8.3 - Conclusion.....	196

Conclusions générales

I - Objectifs et méthodes	199
II - Principaux apports	200
1 - Dynamique sédimentaire actuelle.....	200
2 - Dynamique sédimentaire passée.....	201
3 - Bilan	202
III - Perspectives.....	203

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....205**LISTE DES FIGURES.....217****LISTE DES TABLEAUX**223**ANNEXES.....225**

ABRIDGED VERSION

ABRIDGED VERSION

I - Introduction

1 - Tidal sand banks

Tidal sand banks are sedimentary bodies distributed all over the world where continental plateforms are wide enough and local conditions provide active current and sediment supply. They have been and continue to be the subject of numerous short or long term studies.

1) The origin of sand banks is still a controversial issue. Because the genetic interpretation and palaeoecological setting of large sand bodies is one of the clues in oil exploitation, it is necessary to go deeper in the bank architecture. Long term evolution of the banks gives information about the effects of sea level changes on sedimentation.

2) Because of their location near the coasts, sand banks are potential areas for sand exploitations, mineral concentrations, and fish production. This close distance to the coast, especially in the southern North Sea, is the cause of problems in the routing of coastal navigation. It is important to know the short term evolution of the banks and consequently their surficial sediment mobility.

Whatever the time interval considered, results of ancient studies often remain controversial. It is therefore necessary to use a multidisciplinary approach.

2 - Study area

In order to answer some of these questions, the Middelkerke Bank was selected as an investigation area. This bank is located in the southern North Sea, 15 km off the Belgium coast. It is a part of the Flemish Banks group (Fig. I-1 and I-2). This bank is an asymmetric elongated body of about 15 km long and from 3 to 5 km wide (Fig. I-3). The depth varies between -25 m in adjacent channels and -5 m at the top of the bank.

From a dynamic point of view, the study area is characterized by a macrotidal regime (tidal range slightly higher than 4 m). Tidal currents are slightly oblique with regard to the bank axis and may exceed one meter per second during spring tides (Fig. I-4 and I-5).

3 - The RESECUSED Project

Under the coordination of Professor Guy De Moor from the University of Gent, seven European universities and

private companies have joined their skill: the Institute of Marine and Atmospheric research from the University of Utrecht, the laboratories of physical Geography and Seismostratigraphy (RCMG) from the University of Gent, Eurosense from Brussel, the School of Environmental Sciences from the University of Norwich, the laboratory of "Environnements sédimentaires" from the IFREMER and the laboratory of "Dynamique sédimentaire et Structurale" from the University of Lille (Tab. 0-1).

The project was funded partly by the European Communities by the MAST-1 project (number MAST 0025-C). The aim of this project was to study the Relationship between SEafloor CUrrents and SEDiment mobility in the Southern North Sea (RESECUSED). The project used a multi-disciplinary approach covering a wide range of techniques used in oceanography.

4 - This Work

The present work is divided in two main research axes: 1) to understand the present day sedimentary dynamics of a sand bank, and to describe the bank architecture and its evolution during the Quaternary.

The techniques used comprise among others surficial sediment grain-size analysis and side-scan sonar for the sedimentary dynamics. In order to study the architecture, high resolution and very high resolution seismics allows to define seismic units, whereas vibrocoring provides the lithologic control. A total of 224 surficial samples have been taken, 350 km were sounded by side-scan sonar, 800 km of seismic profiles were shot and 65 cores were sampled.

II - Sedimentary dynamics in the Middelkerke Bank area

1 - Factors controlling the sediment distribution

1.1 - Common distribution - 1st campaign, May 1990

The surficial sediment distribution was studied twice on the whole bank in order to calibrate the grain-size parameters relative to the bank morphology. The first campaign took place after two weeks of fair weather, the second campaign after two weeks of severe meteorological conditions.

1.1.1 - Results

The granulometry studied by sieving methods on the whole bank indicates that all sediments are sands, ranging from fine ($175 \mu\text{m}$; 2.5Φ) to coarse ($884 \mu\text{m}$; 0.2Φ). Placed on a map, (Fig. II-4), the distribution fits the general shape of the bank. Coarser sediments are located in the northern part and in the shallower zones, whereas

finer sediments are found in the southern part and in the deeper zones. The same distribution is observed for the CaCO₃ content (Fig. II-7); samples from shallower depths being richer in CaCO₃. This behaviour indicates that the sediment grain-size is a function of the depth, the shallower areas having a more energetic hydrodynamism. The CaCO₃ follows the same distribution because it is mainly present as shell debris, especially abundant in the coarser granulometric fractions (Fig. II-2). Sorting index is closely related to the mean grain-size. The finer the sediments, the better the sorting is (Fig. II-6). Special attention was given to the northern end of the bank (Fig. I-12) in order to calibrate grain-size parameters with side-scan pictures. The results (Fig. II-22 to II-24) are similar to those obtained on the whole bank.

1.1.2 - Relation between grain-size parameters and bank morphology

For both campaigns, the distribution of the grain-size parameters fits the general shape of the bank. The grain-size and CaCO₃ crests are almost superimposed (Fig. II-9), but there is a shift between these crests and the topographic crest. To the North, there is a seaward shift of the grain-size crest: coarsest (CaCO₃ rich) sediments are located on the steep slope of the bank. On the other hand, to the South, there is a coastward shift. The displacement of these crests constitutes an anticlockwise angle offset relative to the bank axis. This phenomenon is interpreted as owing to general sediment circulation pattern around the bank. Although grain-size is controlled mainly by the water depth, the mosaic area shows that it is controlled also by the dune height. It appears that coarsest sediments (> 500 μm ; 1Φ) are located in the area occupied by the highest dunes (large dunes up to 5 m high). Finer sediments occur in the areas occupied by medium dunes.

1.2 - Particular distribution - 2d campaign, April 1991

1.2.1 - Results

The bank was sampled a second time in April 1991. Figures II-10 and II-12 show the distribution of mean grain-size and of CaCO₃ content. As noticed for the first campaign, there is a correlation between grain-size parameters and the bank shape, and between grain-size and CaCO₃ content, despite the fact that this correlation seems to be worst than for the first campaign.

1.2.2 - Effects of a storm

Although the general results of grain-size parameters are supported by the data of the two campaigns, some important differences are observed (Fig. II-13) in the mean distribution. The distribution is more randomized for the second campaign. The observed differences are interpreted by different meteorological conditions during the two weeks preceding the campaigns (Tab. II-1 and Fig. II-14 and II-15). The first campaign was characterized by fair weather conditions responsible for an equilibrium state, mainly controlled by tidal currents. The second campaign was characterized by stormy conditions responsible for a disequilibrium state.

2 - Qualitative evaluation of the sedimentary transport

The directions of the sedimentary transport were evaluated by the mean of side-scan sonar surveys and numerical granulometric methods.

2.1 - Side-scan sonar results

A complete view of the area (Fig. II-28) shows an opposition between the two flanks of the bank. On both sides, the lee side of the dunes tends to be more and more oriented toward the crest of the bank as the dunes get shallower. The largest dunes (up to 5m high) are located in the northern part. This area was chosen for the establishment of a side-scan sonar mosaic (Fig. II-31). The mosaic shows that at the end of the bank, the large dunes display an "en echelon" planar geometry, their lee side dipping to the NE. The superimposed small dunes are oblique to the large dunes. For the whole area, general investigations show a clockwise pattern of the sediment transport around the Middelkerke Bank (Fig. II-36). This pattern is interrupted at both ends.

2.2 - Results from numerical models

The sediment transport pattern was studied also using McLaren method. This method shows that the general trend is a sediment displacement in the direction of the bank crest (Fig. II-21). Some zones (e.g., to the northern end) seem to be potential source areas for the surrounding areas.

2.3 - Comparison between numerical and side-scan sonar results

The two methods display almost the same opposition between the two flanks characterized by a converging transport toward the crest (Fig. II-39). Nevertheless, large areas display opposite or different directions of transport. The directions deduced from the side-scan sonar data are preferred because they seem to be more consistent with currents data and usual patterns around tidal sand-banks.

3 - Quantitative evaluation of the sediment transport

The mosaic area was surveyed one year later (Fig. II-33) and an unexpected strong displacement of the large dunes was observed. Although the shape of the dunes changes slightly, the displacement of the dunes is on average 100 m (Fig. II-35). It corresponds to a movement of $86 \text{ m}\cdot\text{year}^{-1}$ or to $275 \text{ ton}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$. The values are high with regard to the literature (Tab. II-6). They indicate that the northern part of the bank is highly dynamic and that the large dunes are completely rebuilt in less than one decade.

4 - Conclusion

The combined results of grain-size and side-scan sonar studies give information on the sedimentary dynamics of

the studied area :

- Storm effects are recorded in the sedimentation and cause important changes in the sediment distribution.
- The large-dunes mobility may be high and reach 86 metres per year in the northern end of the bank.
- There is an obvious opposition between the two flanks of the bank indicating a complex circulation pattern around it. The results of a numerical method and side-scan sonar studies may provide contradictory interpretations.
- The long term resulting mobility of the bank is difficult to extrapolate. It is considered in the third chapter dealing with the internal structure of the bank.

III - Internal structure of the Middelkerke Bank

Two complementary methods were used in order to know the internal structure of the bank. High and very high resolution reflection seismics give the architecture of the bank, while coring allows one to characterize the main stages from a sedimentological point of view.

1 - Architecture

1.1 - Seismic units

Seismic profiles were interpreted according to basic seismic principles. Two main units are distinguished easily: the Tertiary often affected by block faulting (Fig. III-6) and the Quaternary deposits. Only the last deposits are studied in detail.

Seven seismostratigraphic units are identified within Quaternary deposits (Fig. III-19). They are chronologically labelled U1 to U7. Their base, thickness and occurrences, and the direction of internal reflectors are illustrated on GEOFOX three- or two-dimensional maps (Fig. III-12 a, b and c to III-18 a, b and c). The GEOFOX software is a 3D surface and volume modelling system which interpolates the seismic data between the seismic lines (Fig. III-2 to III-5). The main seismostratigraphic characteristics of the seven units are represented schematically on figure III-20. The external form of the seismic units clearly exhibits a chronological evolution from a channel-fill shape with complex fill facies (units U1 and U2), over two sand-sheet shapes (thin unit U3 and thicker unit U4), to a lens or bank shape with either buried (unit U5) or present-day morphologically active surface (units U6 and U7). Very high resolution seismic allows us to divide some units in sub-units characterized by different seismic facies. A detailed survey was done on the northern part of the bank. It is showed that the seismic units U4 and U7 may be divided into five sub-units: U4A, U4B and U7A to U7C (Fig. III-25 and III-26) reflecting different growth stages of the bank.

1.2 - Seismic unit boundaries and internal reflectors

The seismic data set allows us to distinguish three main reflectors categories within the study area: 1) the unconformity at the base of the Quaternary deposits, 2) the first order reflectors or unit boundaries, and 3) the second order or internal reflectors.

1.2.1 - The unconformity at the base of the Quaternary deposits

This unconformity is strongly marked on most profiles. It represents the erosional boundary between the Eocene Ieper Clay and the overlying Quaternary deposits. The boundary is dipping slightly toward the North and is marked by incisions or depressions (Fig. III-9). The incisions appear to line up in a bifurcating channel system attributed to the Ostend Valley complex (Fig. III-8).

1.2.2 - The unit boundaries

These reflectors can easily be identified on the seismic data and followed over large distances. They represent unconformities and / or distinct seismic facies boundaries and witness certain long-term stages or drastic variations in the Quaternary evolutionary history of the bank. Six first order reflectors have been distinguished. They correspond to the basis of the seismic units and are labelled U2.b to U7.b (Tab. III-1); they can be observed together in some profiles (Fig. III-10).

1.2.3 - The internal reflectors

These reflectors make up the seismic facies of the units. They often represent directions of progradation. The very high resolution seismics allows one to distinguish prograding surfaces or foresets with angles varying up to 15° (Fig. III-27 and III-28). These foresets define sets grouped into cosets. Horizontal reflectors reflect storm periods which truncate the dune crests. Large slightly dipping ($\pm 1^\circ$) reflectors are the marks of the progradation of large dunes. They divide sometime seismic units in sub-units.

1.3 - Conclusion

As shown by the seismic study, the development of the Middelkerke Bank is clearly polygenetic and therefore much more complicated than former studies had indicated. It results from a succession of phases of erosion and deposition. Seven seismic units have been identified. They may correspond to important changes in sedimentary environments and sometime display different internal reflectors defining different sedimentary processes within the different units.

2 - Structures observed in cores

All the sampled cores except one are vibrocores with lengths ranging from 2.62 to 5.57 meters. The last one is

composed of a 13.55-metre long borehole of Quaternary sediments. They were sampled on different morphological parts of the studied area: on the bank, its flanks and top, and on the adjacent channels.

According to their grain-size, nature of components, sedimentary structure, bioturbation and colors, eleven sedimentary facies are distinguished (Fig. III-31). Sediments range from clay to gravel and the shell content varies from about 0% to more than 50% of the total sediment.

Vertically, there is a high variability of sedimentary facies. The passage from a facies to another can be continuous but is often sharp. It may put in contact clay and gravel (Fig. III-33). A high variability is observed laterally between different cores.

Despite of this high spacial variability, most cores show an upward coarsening trend. This trend is associated with a change of sediment color from grey to beige. There is also an upward simplification of the sediment structure which is less complicated and variable than in the lowest levels. There is a clear opposition between the cores taken on the flanks and those sampled on the top of the bank. The first group consists of cores characterized by fine, grey, clayish and variable sand, whereas the second group is characterized by coarser sediments, beige in color, rich in shell debris and spacially more constant.

3 - Combined use of seismic and lithologic data

3.1 - Physical nature of the seismic reflections

All the vibrocores are sampled at proximity of a seismic profile. This allows to correlate sediment parameters with seismic reflectors (Fig. III-36 to III-38). In most cases, reflectors are marked on vibrocores by important changes in grain-size and density. The reflectors do not coincide with specific layers but with sedimentary changes. In some cases, reflectors are not marked by any sedimentary change. In these cases, reflectors can be related to changes in density or may consist in changes not observed on the cores because of the large distance between the locations of seismic profiles and cores. The globally close relation between seismic and lithologic data enabled us to combine seismic profiles interpretation with core lines descriptions. By this way, it is possible to characterize the seismic units.

3.2 - Main characteristics of the seismic units

3.2.1 - Observations

The four superficial units U4 to U7 were sampled densely by 35 vibrocores. These vibrocores are lined up on four profiles (Fig. III-39 to III-42). The profiles display different seismic facies for each unit but also between the profiles. Seismic units can be divided in different lithologic sub-units characterized by different sediments. Most seismic reflectors seems to correspond to changes in sedimentary facies. Nevertheless, some reflectors cannot be associated with any change in lithology, whereas strong lithologic contrasts are not linked with any seismic

discontinuity. The combination of the two sets of data displays a complex pattern of the internal structure of the bank itself and also within each seismic unit.

3.2.2 - Seismic and lithological facies of the seismic units

The units U1, U2 and U3 are sampled only in one long core. Because of the high variability of seismic facies and lithology identified in the former chapters, the interpretation of these units must be considered with caution.

- Unit U1 found in channels overlies the Tertiary clay with a layer of coarse flint gravels associated with marcssite and humic debris. The shells correspond to marine animals.

- Unit U2 is also a unit with a valley-fill external form. This unit displays various types of bedding: wavy, flaser and herring-bone bedding characterized by an alternation of sandy and muddy layers. The top of the unit consists of oblique alternate layers of these two components, interpreted as the expression of a large dune progradation in a tidally-influenced estuarine channel.

- Unit U3 has a sand sheet external form and displays few internal reflectors dipping westward. The sediment collected is a clean white, well sorted, sand at its base. The two ends of the unit consist of coarse flint gravel layers indicating a strong erosional episode before and after the deposition of U3.

- Unit U4 occurs in 15 cores and is present all over the study area. The seismic profiles display a thick sand sheet external form with a lot of internal reflectors mostly dipping northward. This unit contains all the sedimentary facies defined, which are closely interconnected. Facies are grouped in three facies associations. Association A is characterized by fine grey, silty and muddy sands, mud and gravel, displaying various beddings. Shells are typical of coastal sectors. Association B gathers coarser sediments: medium to fine grey sands, poor in shell debris with few mud clasts and gravels. Shells also characterize coastal sectors. Association C comprises different sedimentary facies with very frequent vertical changes. It occurs in channel-like seismic forms. On seismic profiles, these three associations are often intercalated among themselves. They correspond to distinct sedimentary environments but closely related spatially.

- Unit U5 presents a lens shape on a small sector. It is sampled only in two vibrocores. It consists of grey-brown fine sand, poor in shell debris. The sediment looks like those found presently in the inter-banks channels.

- Unit U6 also presents a lens shape elongated in a NE-SW trend. This direction is not parallel to the Middelkerke Bank axis nor to the Ostende Bank axis, but is parallel to the Utdiep channel axis. It contains numerous sub-parallel internal reflectors dipping toward the SE or SSE with angles frequently steeper than 5°. The corresponding sediment is a medium sand, poor in shell debris. The shells are concentrated in centimetric oblique layers.

- Unit U7 is present in most of the study area. It is characterized by internal reflectors dipping toward the NW, parallel to the steep slope of the bank. This unit is present in numerous vibrocores because of its surficial location.

In some profiles, the seismic and core information allow to divide the unit in sub-units separated by horizontal or slightly dipping reflectors. Commonly, the sediment consists in grey-brown or beige fine to coarse sand. Clay and plant remains are hardly found, in opposition to small gravels and shell debris. The sub-units present different facies corresponding to different evolution in the northern, central and southern part of the Middelkerke Bank.

4 - Synthesis - Evolution of the Middelkerke Bank

The combination of seismic and lithologic data allows to define for each seismic unit a few characteristic features. According to these data and those found in the literature, an attempt is done to reconstruct the depositional environments of the seven units. Then, an age is proposed by combining the sedimentary environment data and the Holocene sea-level curve (Fig. III-49 and III-50).

4.1 - Unit U1

This unit is connected to the Ostend Valley system. The scouring of the channels corresponds to the last glacial stage (i.e., the Weichselian, 70 000 - 10 000 BP; Fig. III-47), but it was perhaps initiated during the Saalian (170 000- 130 000 BP). The scouring is essentially owing to fluvial processes. Nevertheless, the channel-fill deposits contain marine shells and probably correspond to early Holocene estuarine deposits. Figure III-50 enables us to propose a Late Boreal age (8 200 - 7 900 BP) for this unit.

4.2 - Unit U2

The scouring of the unit U2 channels was initiated during the Holocene as they truncate the U1 deposits, which are Holocene in age. The sediments contained in U2 are characteristic of estuarine, tidally influenced environment. They correspond to the filling up of an estuary with an increase in the energy level related to a movement from the upper to the lower estuary. The depth of this unit suggests an age at the limit between the Boreal and the Atlantic stage (8 100 - 7 900 BP).

4.3 - Unit U3

Unit U3 is the last seismic unit found in a very open channel form. Its sand-sheet shape and well sorted sediments indicate the presence of continuous currents with a decreasing upward energy. These characteristics are related to an estuarine delta or to a neighbouring beach. The fining upward sequence corresponds to a continuous deepening of the depositional area. The coarse layers at the top of the unit may be due to strong storms or sediment body migrations after changes in sea-level. Its age is probably Atlantic.

4.4 - Unit U4

The three associations which make up U4 express different environments. The fine, muddy association A is related to a tidal-flat protected by a barrier which allows the deposition of great amounts of clay. This environment

is consistent with the types of shells. The coarser sandy association B is related to a shore-connected ridge prograding toward the NW. This ridge is supposed to have protected the tidal-flats from an open marine influence. The third association C corresponds to free-swinging meanders often found in tidal-flats. U4 is interpreted as a part of the Elbow Deposits. The probable age of U4 is comprised between 7 800 and 6 700 BP. We propose an age corresponding to the Calais Formation (7 000 and 6 700 BP).

4.5 - Unit U5

Unit 5 is poorly characterized because of its small size and the seldom lithologic information available. It is considered to be the trace of an inter-bank channel following the destruction of the ridges forming part of unit U4.

4.6 - Unit U6

The main features of unit U6 make this unit very different from the other. Three environments with these features are considered: storm-generated ridges, flood delta system and coastal banks. The first one must be rejected because of contradictory data from the lithology and seismics. The flood delta system may be envisaged but it points out the problem of the associated bar not found in the area. Moreover, the internal reflector constancy is observed rarely in flood delta. The last hypothesis seems to be closer to the data even if few internal reflectors have been observed in present-day coastal banks. The uncertainty in the depositional environment makes any datation not possible.

4.7 - Unit U7

This uppermost unit consists of a typical offshore tidal sand bank unit. Its internal structure is much more complicated than former studies had shown. Its vertical evolution is interrupted by horizontal discontinuities which express severe storms. The vertical evolution is different when considering the location on the bank. At the southern end, fining upward sediments indicate a slow aggradation process with relative deepening of the area. The rest of the bank displays an opposite evolution marked by a coarsening upward tendency accompanied by a decrease in clay particles compensated by an increase in gravel content. This indicates a vertical building of the bank. At the northern end, the bank is growing Eastward.

4.8 - Conclusion

The recorded story of the Quaternary deposits of the Middelkerke Bank only began in the Weichselian with channel scouring. The filling up of these channels began during the Boreal stage (8 200 - 7 900 BP). Different environments are present successively: estuary, estuarine delta or beach, associated shore-connected ridges and tidal flats, coastal bank and tidal sand bank. This evolution shows that even if most units are tidally influenced, only the very last unit U7 can be named tidal bank. The importance of erosive levels throughout the bank witnesses that the evolution often present disequilibrium states related to changes in sedimentary conditions or environments.

OBJECTIFS ET PRESENTATION

OBJECTIFS ET PRESENTATION

Les bancs sableux sont des corps sédimentaires répartis sur la plupart des plateformes. Ils ont fait l'objet de nombreuses études selon deux axes de recherches.

1) L'origine des bancs sableux demeure controversée. L'interprétation génétique et la mise en place de ces grands corps sédimentaires est un des axes de la recherche pétrolière. Pour cela, il est nécessaire de connaître l'architecture des bancs. L'évolution à long terme des bancs nous donne également des informations sur les effets des changements du niveau marin sur la sédimentation.

2) Leur proximité des côtes en font des zones potentielles pour l'exploitation de sable ou de concentrations de minéraux et des zones importantes pour les activités halieutiques. Cette proximité, en particulier en Mer du Nord, est à l'origine de problèmes pour la navigation côtière. Il est donc important de connaître l'évolution à court terme des bancs et par conséquent la mobilité des sédiments superficiels.

L'objectif du présent travail tend à répondre à certaines de ces questions à partir d'un exemple pris au Sud de la Mer du Nord, le Middelkerke Bank. Ce banc constitue un bon exemple des bancs "tidaux" actuels et peut fournir une référence utile pour divers exemples de bancs reconnus dans les formations géologiques.

Le mémoire est articulé en trois chapitres. Après une brève description du cadre de ce travail, le premier chapitre est consacré à une présentation du domaine d'étude et des techniques utilisées. Le second chapitre rassemble les résultats de l'analyse de la dynamique sédimentaire actuelle. Ces résultats constituent une synthèse des données obtenues grâce à des prélèvements de sédiments superficiels et à l'interprétation de données de sonar à balayage latéral. Le troisième chapitre regroupe les résultats de l'analyse de la structure interne du banc. Il s'appuie sur les données obtenues par les outils de sismique réflexion et par des carottages. Une conclusion générale permet de tirer les principales leçons du travail effectué.

AVANT-PROPOS

Avant-propos

LE PROJET MAST 0025-C : RESECUSED

A - Historique

En Décembre 1988, la Communauté Européenne (CE) décide d'aider financièrement les institutions travaillant dans le domaine de la mer en favorisant des projets internationaux importants. Un des buts de cet appel d'offre est de faciliter la construction européenne au niveau scientifique en incitant des chercheurs de pays différents à travailler ensemble. Il s'agit du programme MAST-1 : MARine Science and Technology. Ce programme est coordonné par la direction générale pour la science, la recherche et la technologie (DG XII, direction E).

En Janvier 1989, à l'initiative et grâce à la coordination du Professeur Guy De Moor de l'Université de Gand (Belgique), sept organismes intéressés aux problèmes sédimentaires en Mer du Nord préparent un projet : le groupe de géographie physique et celui de seismostratigraphie du Renard Centre of Marine Geology (RCMG) pour l'Université de Gand, le centre de recherche sur la mer de l'Université d'Utrecht (Pays-Bas), l'Institut Français pour la Recherche et l'Exploitation de la MER (IFREMER) à Brest, l'école des sciences environnementales de l'Université d'East Anglia (Angleterre), la compagnie privée belge EUROSENSE, et le laboratoire de dynamique sédimentaire et structurale de l'Université de Lille I (URA 719 CNRS). Le groupe propose alors à la CE un projet appelé RESECUSED : RELationship between SEa floor CURrents and SEDiment mobility in the Southern North Sea. Le projet débute en Septembre 1990.

B - Les partenaires

Les participants au projet RESECUSED ont chacun en charge une partie du projet. Le tableau 0-1 donne un aperçu de la répartition des tâches. Dans le cadre de ce travail, seule une partie des résultats du projet a été utilisée. Les autres résultats ont aidé à la réflexion qui a progressé au cours de nombreuses réunions.

Organismes	Intervenants	Tâches principales
Université de Gand (RCMG) Groupe de géographie physique	Guy De MOOR, responsable du projet Jean LANCKNEUS	Coordination, sonar latéral, prélèvement de sédiments, bathymétrie chronoséquentielle.
Université d'Utrecht	Ad STOLK Joos TERWINDT	Carottages courts, lacquer-peels, mesures hydrodynamiques, vibrocarottage.
IFREMER	Serge BERNÉ Tania MARSSET	Sonar latéral, sismique haute et très haute résolution, vibrocarottage.
Université d'East Anglia	Chris VINCENT	Développement d'un tripode de mesures hydrodynamiques.
Eurosense	Rik HOUTHUYS	Bathymétrie fine en hydroglisseur.
Université de Lille	Alain TRENTESAUX Hervé CHAMLEY Bernadette TESSIER	Granulométrie, relations figures sédimentaires/granulométrie, dépouillement et traitement de données d'autres partenaires.
Université de Gand (RCMG) Groupe de sismostratigraphie	Marc De BATIST Tine MISSIAENS	Sismique haute résolution, modélisation tridimensionnelle.

Tableau 0-1 - Répartition des tâches principales au sein du projet RESECUSED.
- *Repartition of the main tasks in the RESECUSED project.*

C - Résumé des opérations à la mer

En collaboration avec nos partenaires, j'ai pu passer plus de deux mois en mer avec les équipes du RCMG, d'Utrecht, et de l'IFREMER. Le tableau 0-2 donne la liste des campagnes effectuées par le projet. Il ne comprend que celles qui intéressent directement notre étude. Les astérisques signalent les campagnes auxquelles j'ai participé.

Période principale	Navire	Campagne	Organismes et responsables	Tâche
Mai 1990	Belgica (Belgique)		RCMG (De Moor et Lanckneus)	Prélèvement de sédiments superficiels (bennes).
Décembre 1990*	Belgica	RESECU1	RCMG (De Batist) et IFREMER (Berné)	Sismique haute résolution.
Avril 1991*	Navicula (Pays-Bas)	N 16-17-18	Utrecht (Stolk) et Lille (Trentesaux)	Carottages courts (box-cores), prélèvements de sédiments superficiels (bennes).
Avril 1991	Volans (Pays-Bas)	V 17	Utrecht (Stolk)	Vibrocarottages.
Mai 1991*	Belgica	BELGICA	RCMG (De Moor) et IFREMER (Berné)	Sismique THR, sonar latéral.
Mai 1991	Belgica	RESECU2	RCMG (De Batist)	Sismique haute résolution.
Septembre 1991	Volans	V 36-37	Utrecht (Stolk)	Vibrocarottages.
Juillet 1992*	Suroit (France)	SANBA	IFREMER (Berné)	Sonar latéral, sismique THR, carottages.
Septembre 1992*	Navicula	N 37-38-39	Utrecht (Stolk) et Lille (Trentesaux)	Carottages courts (box-cores), prélèvements de sédiments superficiels (bennes).

Tableau 0-2 - Extrait des campagnes en mer effectuées dans le cadre du projet RESECUSED.
- *Oceanographic cruises linked to RESECUSED project (extract).*

CHAPITRE I
INTRODUCTION, METHODES
D'ETUDE

CHAPITRE I - INTRODUCTION, METHODES D'ETUDE

A - Zone d'étude

1 - Choix de la zone

Le choix de la zone d'étude résulte de discussions entre les sept équipes de recherche impliquées dans le projet RESECUSED. Les considérations qui ont guidé le choix sont à la fois scientifiques, techniques et pratiques. Le choix des sept partenaires s'est porté sur le Middelkerke Bank. Il est motivé par cinq facteurs principaux :

- Ce banc n'a jamais été étudié en détail. Néanmoins, d'anciennes campagnes sismiques ont montré une structure interne complexe. D'autres études sur les sédiments superficiels des bancs voisins ont révélé des tendances dans leur répartition à préciser. En effet, les études antérieures n'ont jamais eu un objectif suffisamment précis pour être finement échantillonnées.

- Le Middelkerke bank est situé dans une zone où l'extraction de sable par dragage est interdite, ce qui autorise une étude dans des conditions naturelles.

- Les pêcheurs sont peu nombreux dans cette zone située en limite de la voie d'accès au port de Zeebrugge, non loin des routes très fréquentées des ports belges et néerlandais (Anvers, Rotterdam, Amsterdam ...).

- Le banc est situé en dehors du rail de navigation et de la route des ferries trans-Manche.

- Enfin, le Middelkerke Bank est à proximité du port d'Oostende qui offre un abri potentiel et une base de départ, notamment pour les bateaux venant de l'étranger.

2 - Caractères généraux

Les fonds de la Mer du Nord sont modelés de nombreux corps sableux de grande taille (ordre de la dizaine de kilomètres de longueur) que l'on a regroupé en divers ensembles : les Bancs de Norfolk et les Bancs de la Tamise dans la partie anglaise, les Bancs de Zélande au large de la Belgique et des Pays-bas, les Bancs du Hinder, les Bancs de Flandre et les Bancs côtiers en face de la France et de la Belgique (Fig. I-1).

Le Middelkerke Bank appartient au groupe des Bancs de Flandre (Fig. I-2). Il est situé à 15 kilomètres au large du port d'Oostende vers le NW et jouxte deux chenaux : le Negenvaam à l'Ouest et l'Uitdiep à l'Est. Il est centré sur 2°45' Est de longitude et 51°20' Nord de latitude. Relié dans sa partie Sud au banc voisin, l'Oostende Bank, par

l'intermédiaire d'un plateau, c'est un corps sableux allongé d'environ 15 km de long et de 3 à 5 km de large (Fig. I-3).

De même que la plupart des bancs de large décrits comme "tidaux" (Stride 1982), le Middelkerke Bank est fortement asymétrique. Il est constitué d'un flanc raide et d'un flanc doux. Le flanc raide (pente maximale = 3%) est orienté vers le NW en direction du large alors que le flanc le moins déclive (pente maximale = 1%) est orienté au SE : vers la côte. Les parties centrale et septentrionale du banc sont effilées, tandis que vers le Sud la crête du banc présente une forme de crochet. Au Sud, le relief s'estompe progressivement, le banc n'est plus qu'une surface légèrement bombée. Les profondeurs sont comprises entre - 25 m dans les chenaux et - 5 m dans les parties où existent les plus grandes dunes.

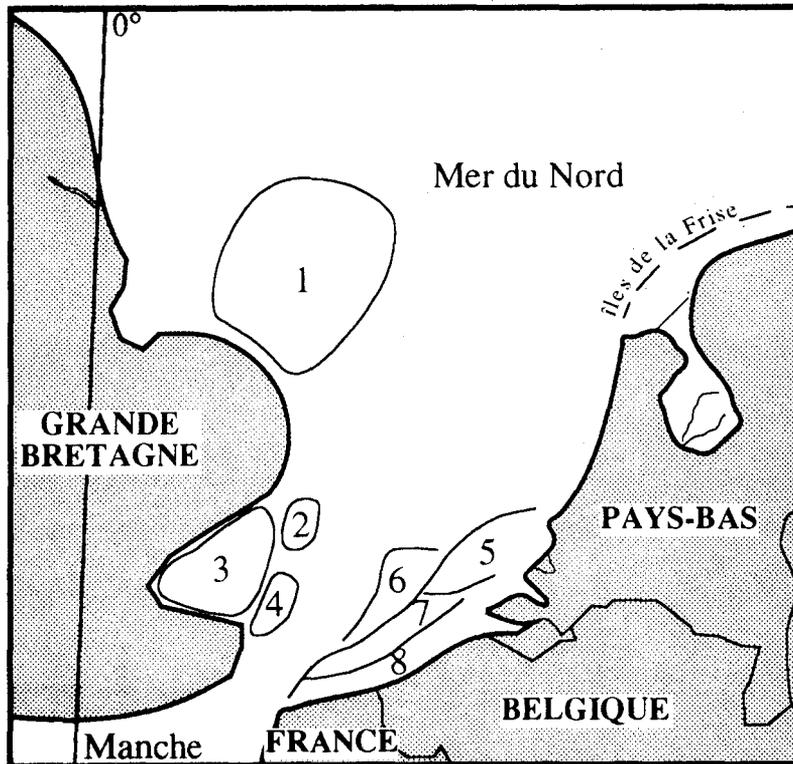


Figure I-1 - Le Sud de la Mer du Nord, carte morphologique.

1. Bancs de Norfolk, 2. Banc Gabbard, 3. Bancs de la Tamise, 4. The Falls, 5. Bancs de Zélande, 6. Bancs de Hinder, 7. Bancs de Flandre, 8. Bancs côtiers d'après Eisma *et al.*, 1979 ; Houthuys, 1990).

- *The Southern Bight of the North Sea, morphologic map.*

1. Norfolk banks, 2. Gabbard banks, 3. Thames banks, 4. The Falls, 5. Zeeland ridges, 6. Hinder banks, 7. Flemish banks, 8. Coastal banks (from Eisma *et al.*, 1979 ; Houthuys, 1990).

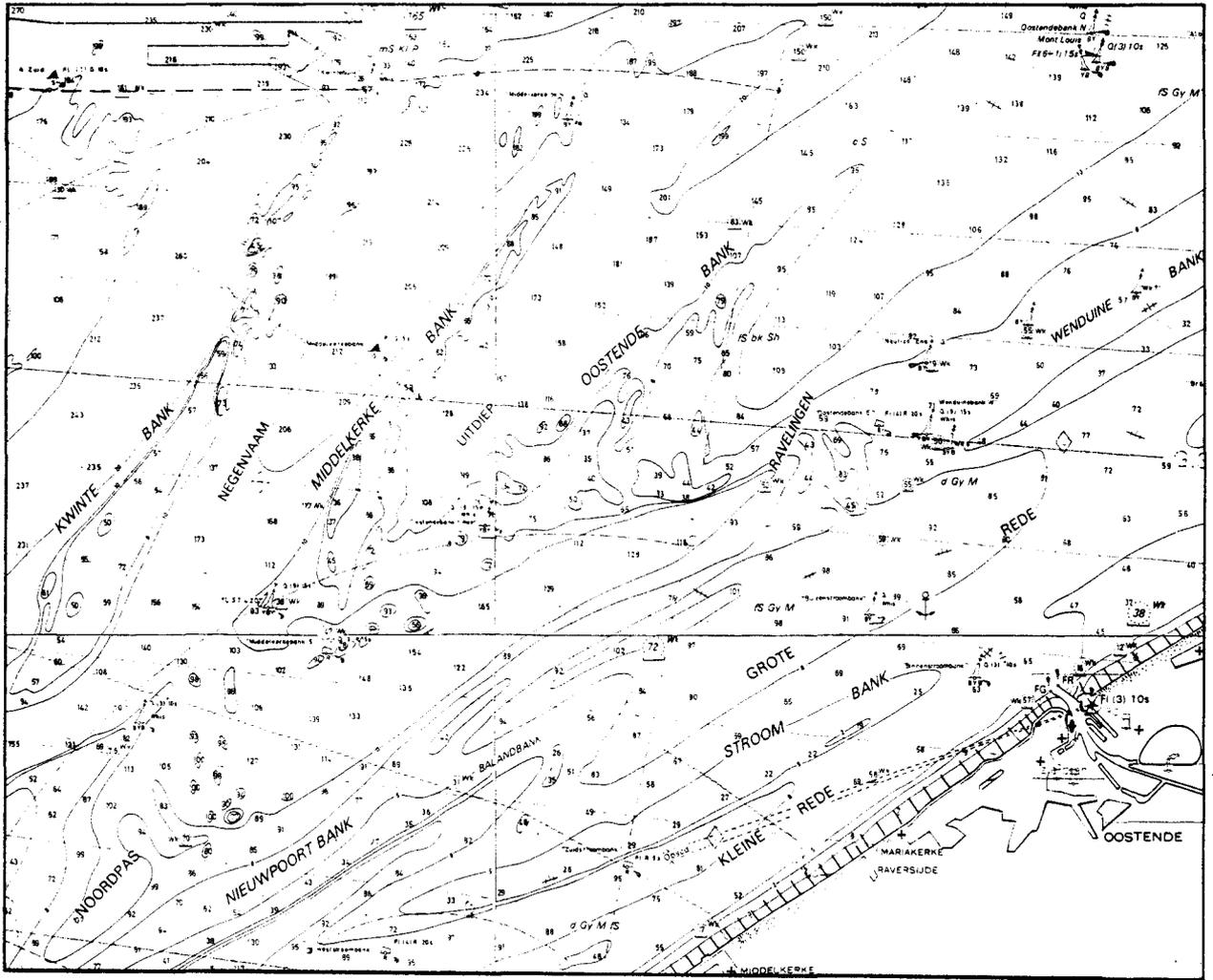


Figure I-2 - Extrait de la carte marine "Vlaamse Banken" avec le Middelkerke Bank et les ensembles morphologiques voisins. Echelle : 1/150 000. Profondeurs en décimètres et courbes de niveau en mètres sous le niveau des plus basses mers (Dienst Der Kust, 1985).
 - Abstract of the "Vlaamse Banken" marine map with the Middelkerke Bank and the surrounding morphological units. Scale : 1/150 000. Depths in decimeters and contour lines in meters below the mean lowest low sea level (Dienst Der Kust, 1985).

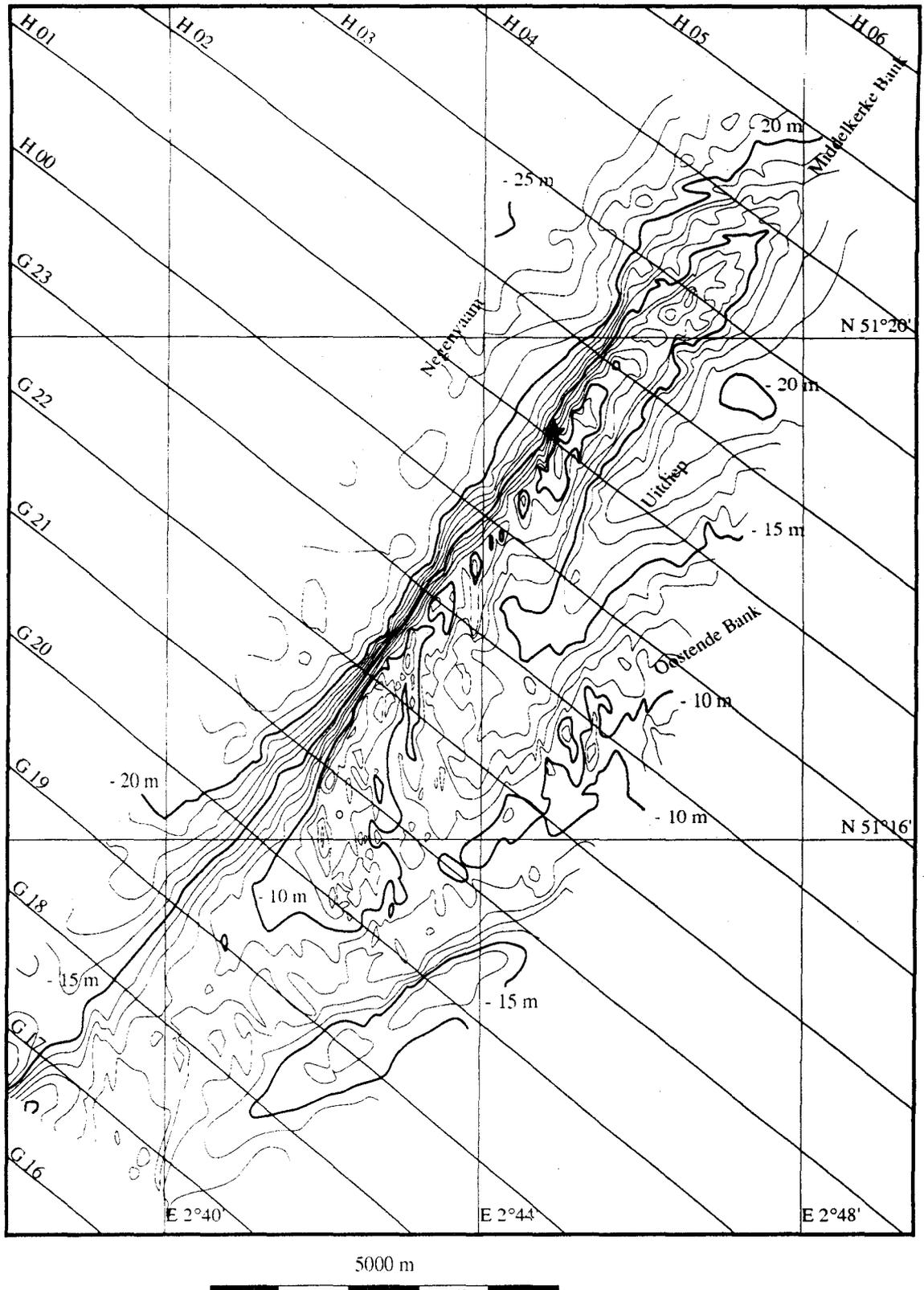


Figure I-3 - Morphologie générale du secteur étudié. L'étoile indique la position des appareils de mesures de courant : figures I-4 et I-5.
 - General morphology of the study area. The star indicates the location of the currentmeters : figures I-4 and I-5.

Le marnage dans la zone des Bancs de Flandre est de type intermédiaire entre méso- et macrotidal. Il atteint 4m en marées de vives eaux. Lors des grandes marées, les courants tidaux mesurés en surface sont élevés et peuvent dépasser 1 m.s^{-1} (Fig. I-4). L'ellipse des courants de marées est allongée. Elle indique un flot qui porte vers le NE et un jusant vers le SW (Fig. I-5). Par rapport à l'allongement du banc, le grand axe de l'ellipse présente une différence angulaire de 25° vers la droite.

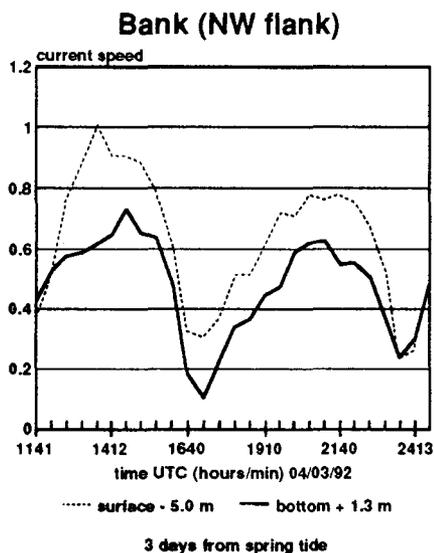


Figure I-4 - Vitesses de courants mesurées lors d'un cycle semi-diurne de marée sur le flanc NW du Middelkerke Bank. Vitesses en m.s^{-1} . position à la figure I-3. (Ad Stolk in De Moor, *et al.*, 1993).
- Current velocities measured during a tidal cycle on the NW slope of the Middelkerke bank. Current speed in m.s^{-1} . Location on figure I-3 (Ad Stolk in De Moor, *et al.*, 1993).

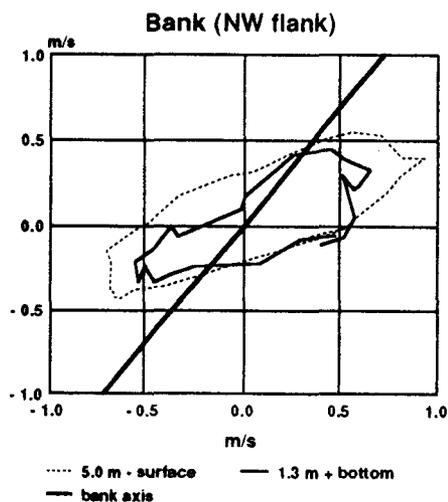


Figure I-5 - Vitesse et orientation des courants lors d'un cycle de marée. Valeurs en m.s^{-1} . position à la figure I-3. (Ad Stolk in De Moor, *et al.*, 1993).
- Current velocities and directions measured during a tidal cycle. Current speed values in m.s^{-1} . Location on figure I-3. (Ad Stolk in De Moor, *et al.*, 1993))

3 - Histoire pré-quadernaire

Le substratum paléozoïque du Sud de la Mer du Nord est constitué par le massif du Brabant et de Londres. Les premiers dépôts post-paléozoïques le recouvrant correspondent aux périodes de haut niveau marin du Crétacé supérieur. Il s'agit de dépôts calcaires, craies et craies marneuses qui sont recouverts par une série Tertiaire complète dont le pendage moyen est de 0.5 à 1° en direction du NE (De Batist *et al.*, 1989 Fig. I-6). Dans la zone d'étude, le substratum est constitué par de l'argile des Flandres, d'âge ypresien. Cette argile est fréquemment affectée par des déformations intraformationnelles donnant naissance à des failles et des blocs isolés. La compaction de l'argile des Flandres pourrait être à l'origine de ces déformations (Henriet *et al.*, 1988).

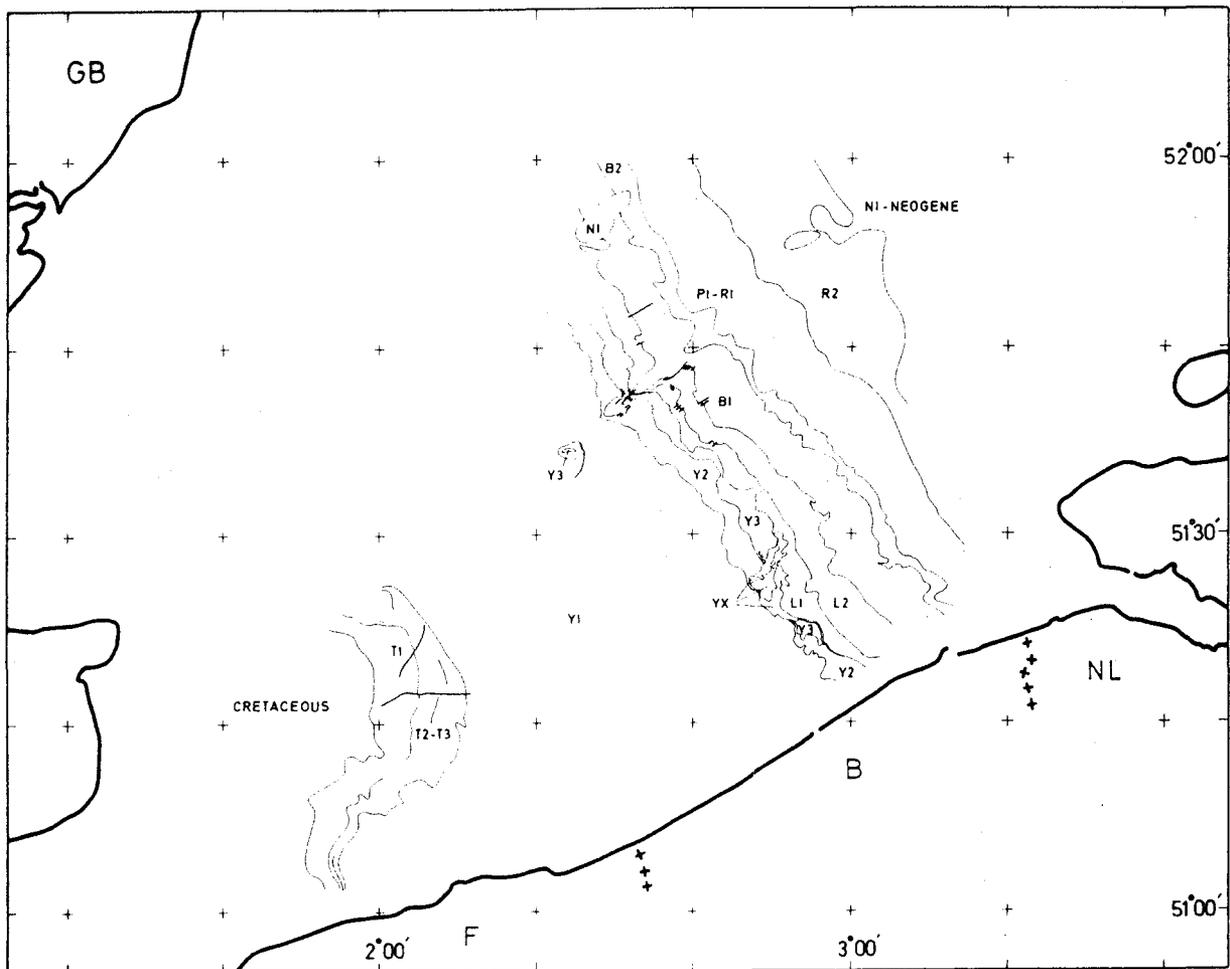


Figure I-6 - Ecorché géologique des dépôts paléogènes du Sud de la Mer du Nord, d'après l'interprétation de profils sismiques (Henriet *et al.* 1989). Les interprétations des profils sismiques du secteur britannique ne sont pas incorporées à la carte. T1 à T3 : Thanétien ; Y1 à Y3 : Yprésien ; L1 et L2 : Lutétien ; B1 et B2 : Bartonien ; P1 : Priabonien ; R1 et R2 : Rupélien.
 - *Seismic-stratigraphic map of the Southern North Bight Paleogene deposits based on interpretation of seismic profiles (Henriet et al. 1989). Interpretations of previous seismic lines in U.K. sector have not been implemented. T1 to T3 : Thanetian ; Y1 to Y3 : Ypresian ; L1 and L2 : Lutetian ; B1 and B2 : Bartonian ; P1 : Priabonian ; R1 and R2 : Rupelian.*

4 - Histoire quaternaire

La limite entre les sédiments quaternaires et les sédiments sous-jacents correspond à une surface d'érosion majeure dans toute la Manche et le Sud de la Mer du Nord. Sur la plateforme continentale belge cette surface, située entre 15 et 40 m sous le niveau marin actuel, est relativement plane et inclinée en pente douce vers la zone centrale ; elle est toutefois incisée par des paléovallées qu'il est possible de suivre à la fois à terre par sondages et en mer grâce aux profils sismiques (Briquet 1930 ; Auffret *et al.*, 1980 ; Liu, 1990 ; Liu *et al.*, 1992). La géométrie d'une partie de cette surface a pu être précisée lors de cette étude (cf. Chapitre III).

4.1 - Courbe de remontée du niveau marin

Du fait de leurs faibles profondeurs, le Pas de Calais et les deux bassins adjacents : Manche et Mer du Nord, ont été particulièrement affectés par les oscillations du niveau marin au cours du Quaternaire (Zagwijn, 1979). Cependant la couverture quaternaire de la zone d'étude est peu épaisse (30 m au maximum) et principalement constituée de sédiments d'âge Holocène recouvrant localement du Pleistocène récent. Les dépôts quaternaires sont d'avantage présents vers le Nord du fait d'une subsidence plus importante.

Chaque transgression tend à remanier tout ou partie des séquences de dépôts antérieures. Il en résulte que la transgression Flandrienne est celle qui a le plus de chances d'être enregistrée dans les dépôts étudiés (Fig. I-7).

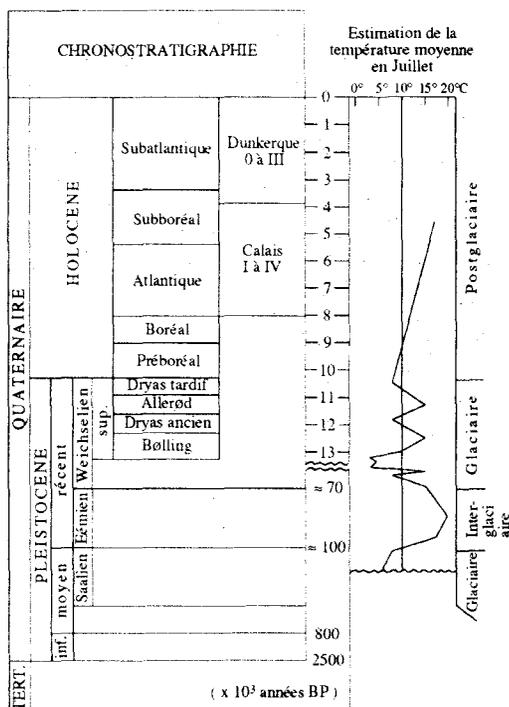


Figure I-7 - Découpage climatique et chronostratigraphique du Quaternaire d'après (Larsonneur, 1971 ; Ters, 1973 ; Zagwijn & Van Staaldunin, 1795 ; Zagwijn, 1985).
- *Quaternary climatic and chronostratigraphic stages. From (Larsonneur, 1971 ; Ters, 1973 ; Zagwijn & Van Staaldunin, 1795 ; Zagwijn, 1985).*

Différents auteurs ont proposé des courbes plus ou moins semblables (Fairbridge, 1961 ; Larssonneur, 1971 ; Ters, 1973 ; Jelgersma *et al.* 1979 ; Köhn, 1988 par exemple). La plus utilisée est celle de Jelgersma (1961) qui est prise en compte dans la courbe de Zagwijn (1985, Fig. I-8). La plupart d'entre elles indiquent une remontée rapide du niveau marin depuis le début de la déglaciation (vers 10000 BP) jusqu'à 7000 BP (stage de l'Atlantique) suivie par un ralentissement. Les deux derniers millénaires sont marqués par une relative stabilité du niveau marin.

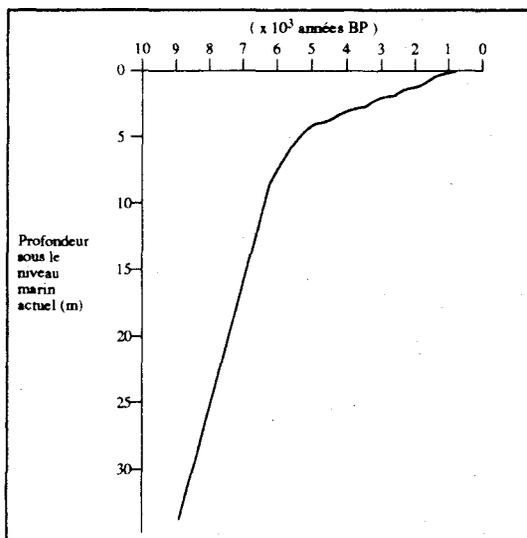


Figure I-8 - Courbe du niveau marin à l'Holocène d'après (Jelgersma, 1961 ; Zagwijn, 1979).
- Holocene sea-level curve. From (Jelgersma, 1961 ; Zagwijn, 1979).

4.2 - conséquences environnementales

Vers 8000 BP, bien que le Sud de la Mer du Nord soit en partie constitué par des estrans de marée (tidal-flat, Jelgersma, 1961), la mer n'avance en direction des terres qu'à la faveur de l'estuaire de l'Yser. La mer pénètre ce qui est l'actuelle plaine côtière à la fin du Boréal (7500 BP, Köhn, 1988). La connexion entre les bassins de la Manche et de la Mer du Nord s'effectue à la limite entre le Boréal et le stade de l'Atlantique (8000 BP, Fig. I-9).

Après 7500 BP, la remontée marine commence à ralentir. La mer continue à progresser vers l'intérieur par l'intermédiaire de vallées côtières : vallée ouest, vallée côtière, vallée d'Oostende et vallée flamande (Liu *et al.* 1992).

Des résultats publiés par Baeteman (1981) suggèrent qu'à l'Atlantique moyen (6000 BP) une barrière côtière se met en place, réduisant les influences marines dans les secteurs plus côtiers. Le ralentissement de la transgression s'accompagne de la formation d'une vaste plaine côtière marécageuse, dans laquelle se forme de la tourbe, s'étendant depuis la frontière franco-belge jusqu'à la Zélande (Briquet, 1930 ; Köhn, 1988).

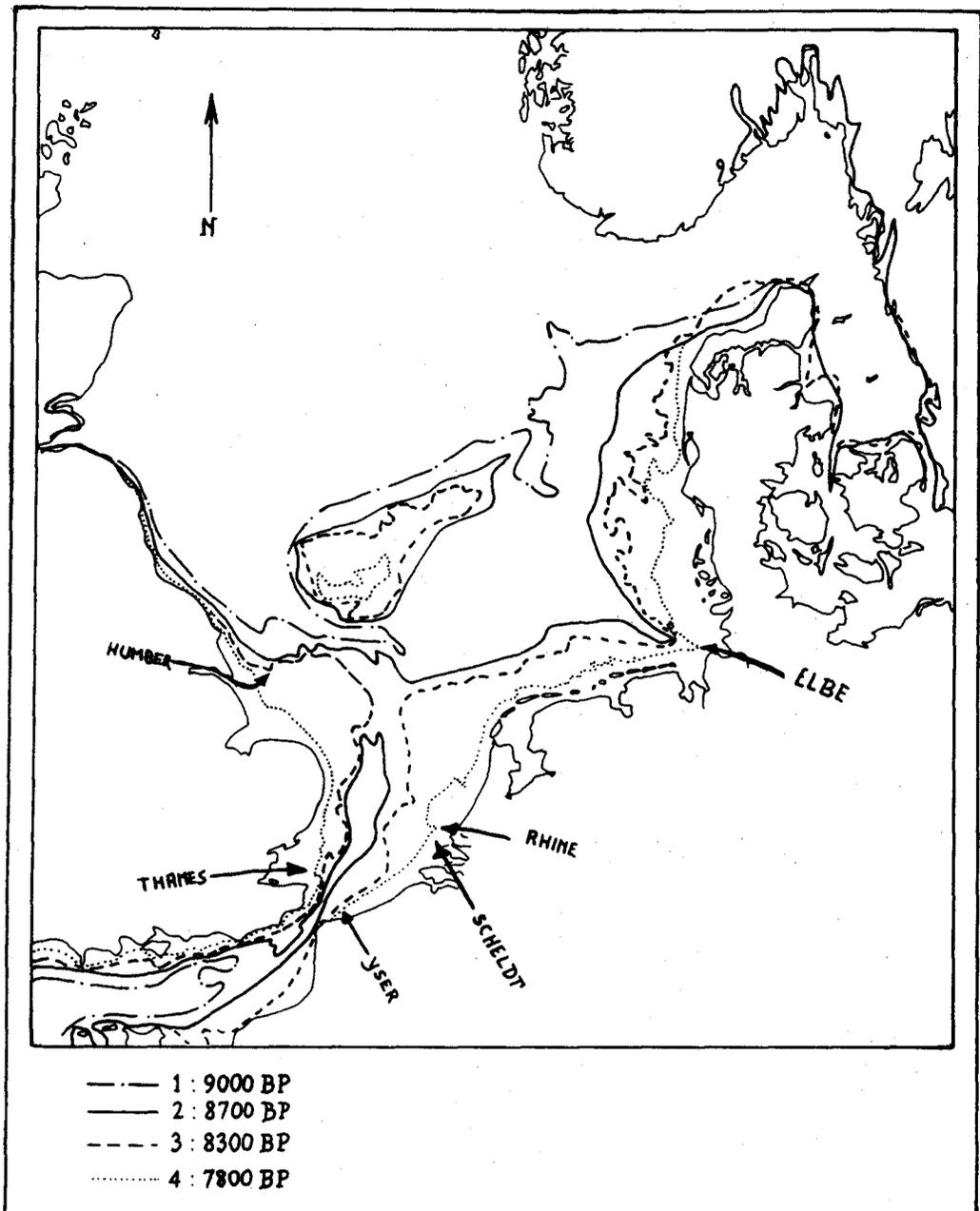


Figure I-9 - Variation hypothétique du trait de côte au cours de l'Holocène dans la Mer du Nord. Age et niveau marin sous le niveau actuel. Compilation de cartes d'après Jelgersma (1979).

1 : 9000 BP, Boréal inférieur, 50 m sous le niveau marin actuel.

2 : 8700 BP, Boréal inférieur, 36 m sous le niveau marin actuel.

3 : 8300 BP, Boréal supérieur, 30 m sous le niveau marin actuel.

4 : 7800 BP, Atlantique inférieur, 20 m sous le niveau marin actuel.

- Hypotetical Holocene shorelines in the North Sea Basin. Age and level below the present sea-level. From Jelgersma, (1979)

1 : 9000 BP, Early Boreal, 50 m below the present sea-level.

2 : 8700 BP, Early Boreal, 36 m below the present sea-level.

3 : 8300 BP, Late Boreal, 30 m below the present sea-level.

4 : 7800 BP, Early Atlantic, 20 below the present sea-level.

Au cours de l'Atlantique terminal, vers 4500 BP, cette barrière est interrompue par des chenaux de marée, transformant une partie des marais d'arrière-barrière en estrans de marée (tidal flat ; Dewez 1988) L'avancée de la mer vers l'intérieur des terres est générale sur la plateforme belge. Cependant, dans la partie occidentale, à l'Est de Dunkerque, le processus de progression de la côte est dominant (Sommé, 1975, 1979 ; Paepe 1979). La transgression se poursuit ensuite jusqu'à l'Actuel avec une vitesse lente. Les dernières modifications importantes ont lieu à partir de 1000 BP, elles sont d'origine humaine et concernent les zones de l'actuelle plaine côtière : celle-ci est endiguée pour les besoins de l'agriculture, donnant naissance aux polders de la Flandre occidentale.

Durant toute la remontée flandrienne, les courants tidaux ont pu remanier les dépôts pléistocènes et tertiaires, les redistribuant dans les divers environnements holocènes : estuaires, estrans, bancs sableux, dépressions inter-bancs et fonds du large. La tendance générale est transgressive mais la formation de barrières côtières peut exprimer des tendances régressives locales, par exemple sous forme de séquences sédimentaires de marais (Dewez, 1988)

Notons que peu d'auteurs se prononcent sur les étapes et l'âge exact de la formation des grands bancs sableux.

4.3 - Évolution du marnage

Grâce à des modèles mathématiques, des auteurs ont tenté de calculer les changements de l'amplitude des marées consécutifs aux phases successives de remontée du niveau marin (Franken, 1987). L'amplitude des marées est considérée comme ayant été croissante au cours du temps, ce qui est interprété comme le résultat de l'accroissement de la surface marine de la Mer du Nord au fur et à mesure de la fonte des glaciers (Franken, 1987). Les simulations indiquent pour la zone située en face des premières îles occidentales de la Frise hollandaise une augmentation du marnage depuis 1,3 m vers 8000 BP à 2,2 m actuellement, soit une différence de 0,9 m ou 70% d'augmentation. Si une augmentation comparable du marnage de 70% est considérée dans la zone du Middelkerke Bank, les valeurs auraient augmenté de 2,40 m (régime mésotidal inférieur) à 4 m (régime macrotidal inférieur) durant le même intervalle de temps.

L'augmentation du niveau marin et du marnage ont entraîné des conséquences importantes dans la nature et l'enregistrement des environnements sédimentaires. Des études essentiellement basées sur l'interprétation de profils sismiques ont permis de proposer le modèle de dépôts suivant : (Fig. I-10).

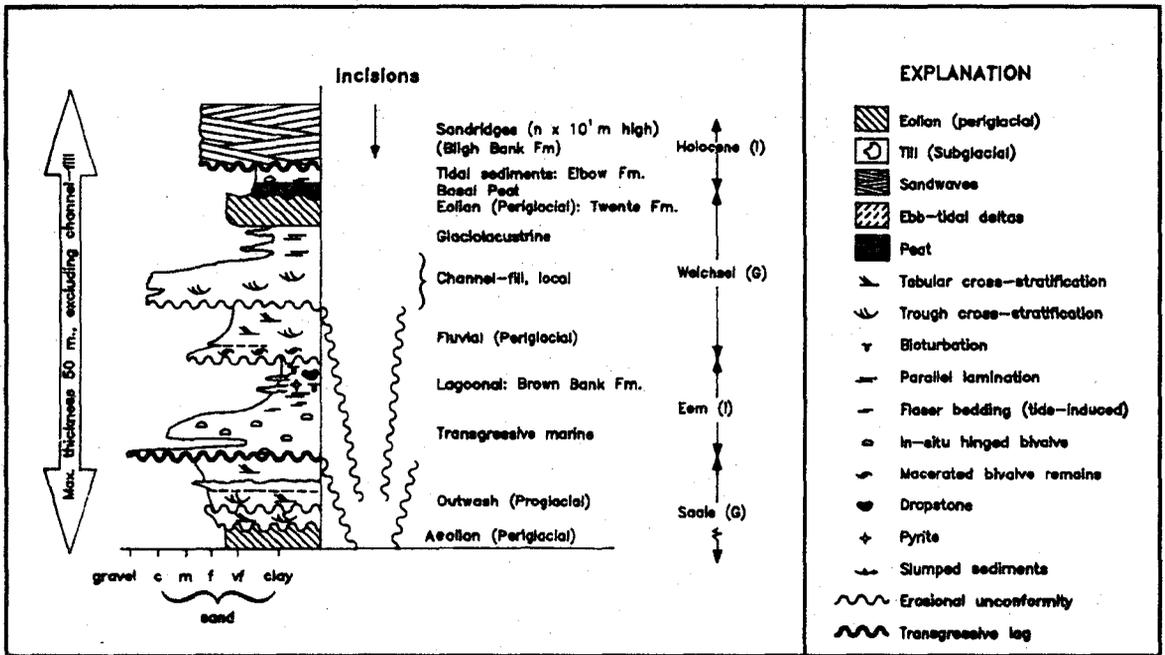


Figure I-10 - Colonne lithologique composite et hypothétique des dépôts du Sud de la Mer du Nord (d'après Cameron et al., 1989 in Kusters et al. 1992).
 - Schematic and hypothetical composite log for the nearshore parts of the Southern Bight of the North Sea (after Cameron et al., 1989 in Kusters et al. 1992).

B - Méthodes d'étude

Les méthodes utilisées sont nombreuses et couvrent la plupart des types de mesures océanographiques applicables à un banc sableux. Dans le cadre du projet européen MAST I-RESECUSED, l'étude a bénéficié non seulement des résultats des recherches au laboratoire de Lille mais également d'un grand nombre de données acquises par chacun des partenaires et utilisant des techniques très diverses. Les paragraphes suivants décrivent succinctement les différents outils employés et les méthodes de traitement qui leur sont associées.

1 - Positionnement

Un positionnement radioélectrique précis est indispensable en mer où les repères pouvant exister à terre n'existent pas. Une précision élevée est particulièrement indispensable lors des études chronoséquentielles, pour la confection de mosaïques sonar, pour l'assemblage des images ainsi que pour l'interprétation des profils sismiques se recoupant les uns les autres.

Le système SYLEDIS (SYstème LÉger de mesure de DIStance (Van Cauwenberghe & Denduyver, 1993), du réseau de balises de la côte Belge a été utilisé en mode hyperbolique. Il permet d'obtenir une précision pouvant atteindre un mètre. Les données sont stockées en temps réel sur disquette.

2 - Etude des sédiments superficiels

2.1 - Mode de prélèvement

Les prélèvements de sédiment sont destinés à l'étude des paramètres lithologiques et granulométriques de la zone d'étude, ainsi qu'au calibrage des images de sonar latéral (cf. Chapitre II). Les échantillons sont prélevés à l'aide d'une benne Van Veen à bord du Belgica et du Navicula. Cet engin permet d'obtenir un échantillon ponctuel de sédiment peu perturbé, peu lessivé au cours de la remontée et de dimension $4 \text{ dm}^2 \times 1 \text{ dm}$.

Figure I-11 - Localisation des 85 points de prélèvement à la benne en Mai 1990 et Avril 1991. Les indications G 16 - G 20 et H 00 - H 04 correspondent aux lignes rouges du réseau DECCA de positionnement.
 - *Location of the 85 grab-sampling points in May 1990 and April 1991. The marks G 16 - G 20 and H 00 - H 04 correspond to the DECCA net red lines.*

Figure I-12 - Localisation des points de prélèvements à l'extrémité Nord du banc. Septembre 1992. Mission N 39.
 - *Location of the grab-sampling points on the Northern end of the bank. September 1992. N 39 survey.*

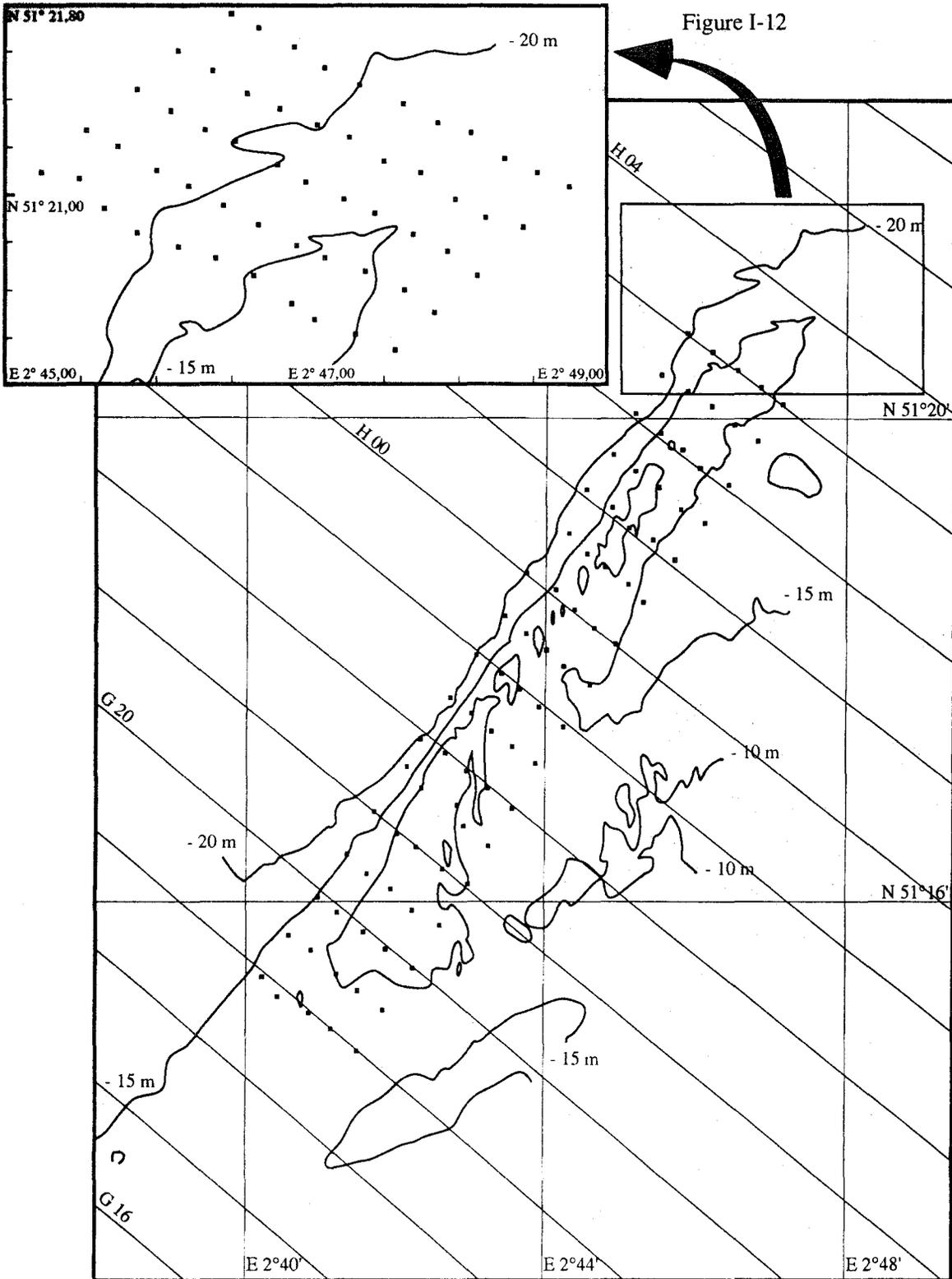
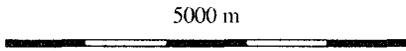


Figure I-12



Deux stratégies de prélèvement ont été suivies :

- Une reconnaissance générale de l'ensemble du banc par le RCMG, laboratoire de géographie physique de Gand, en Mai 1990, selon une grille allongée dans le sens du banc (SW-NE) et comprenant $17 \times 5 = 85$ points d'échantillonnage (Fig. I-11). La maille choisie est de 350 x 750 m.

Cette reconnaissance générale a été complétée par le Navicula en Avril 1991 par un second échantillonnage aux mêmes 85 points de prélèvement définis.

- Un échantillonnage plus dense a été effectué en Septembre 1992 sur une zone d'extension réduite située au Nord du banc. Les sédiments prélevés ont servi à calibrer les images sonar de cette partie du banc. Cet échantillonnage a été effectué à bord du Navicula (Fig. I-12).

2.2 - Techniques et méthodes d'étude

Les échantillons, d'une masse de 1 à 2 kg sont séchés dans une armoire chauffante et subissent, après retrait des organismes vivants (oursins, ophiures, mollusques, etc.) une série d'analyses.

- Pesée de 100 g de sédiment duquel ont été retirées les coquilles vides entières (peu abondantes) ne participant manifestement pas ou que peu à la dynamique sédimentaire.

- Lavage sous l'eau du sédiment sur un tamis à maille de 63 μm . Ce premier tamisage permet de séparer la fraction sableuse de la fraction silto-argileuse.

- Pesée de la fraction silto-argileuse. Si celle-ci dépasse 1%, elle est analysée par sédigraphie. Cette opération permet d'établir la distribution granulométrique des particules inférieures à 63 μm (Calatayud, 1981).

- Tamisage à sec sur colonne de tamis à mailles carrées de progression géométrique et de raison $\sqrt[10]{10}$ de la fraction supérieure à 63 μm . Cette fraction correspond le plus souvent à la fraction sableuse car les particules supérieures à 2 mm sont très rares dans les échantillons prélevés sur le Middelkerke Bank.

- Pesée de chacun des refus de tamis. En ajoutant le cas échéant les données obtenues par sédigraphie, les paramètres granulométriques du sédiment total sont calculés.

- Calcul de la teneur en CaCO_3 de chacun des échantillons par le calcimètre de Bernard.

- Pour mesurer les caractéristiques des échantillons sans tenir compte des particules carbonatées, une série de manipulations supplémentaires telles que les a décrites (Lanckneus, 1989) ont été effectuées :

- Décalcification à l'acide chlorhydrique dilué de 100 g d'échantillons.

- Tamisage à sec sur colonne de tamis de la fraction supérieure à 63 μm .

- Pesée de chacun des refus de tamis. Les paramètres granulométriques sur échantillon décalcifié sont ainsi obtenus.

- Pour 32 échantillons de la première campagne, l'analyse de la fraction argileuse (<2 µm) par diffraction des Rayons X selon la méthode employée au laboratoire de Lille (Holtzapffel, 1985) a été effectuée.

Les données des refus de tamis ont été traitées grâce au logiciel GRANULO développé par J. Patouillard et S. Dewez (1985), et qui a été modifié. Ce logiciel est capable de tracer les courbes granulométriques, d'en extraire les valeurs graphiques des percentiles et de calculer divers paramètres : grain moyen, médiane, asymétrie, classement, etc.

Les paramètres utilisés pour cette étude sont ceux définis par Folk (1957) :

$$\text{- Médiane : } M = \frac{Q_{84} + Q_{50} + Q_{16}}{3}$$

$$\text{- Classement ou "Sorting index" : } S_o = \frac{Q_{84} - Q_{16}}{4} + \frac{Q_{95} - Q_5}{6,6}$$

$$\text{- Asymétrie ou "Skewness index" : } S_k = \frac{Q_{16} + Q_{84} - 2Q_{50}}{2(Q_{84} - Q_{16})} + \frac{Q_5 + Q_{95} - 2Q_{50}}{2(Q_{95} - Q_5)}$$

Les paramètres sont calculés dans le système métrique et les valeurs de la médiane sont données en µm. Par contre, les valeurs du classement et de l'asymétrie sont donnés en unités PHI (Φ) car cette échelle logarithmique exprimée de manière arithmétique permet des comparaisons plus aisées entre les échantillons et entre les différentes classes d'un échantillon.

	µm	Φ	
gravel	2000	-1	gravier
very coarse sand	1000	0	sable très grossier
coarse sand	500	1	sable grossier
medium sand	250	2	sable moyen
fine sand	125	3	sable fin
very fine sand	63	4	sable très fin
silt	2	9	silt
clay			argile

Tableau I-1 - Définition du nom d'un sédiment selon la valeur de sa médiane (d'après Folk, 1957).
- Udden & Wenworth size classe according to their mean grain-size (from Folk, 1957).

Les valeurs de médiane et de classement définissent un sédiment selon des valeurs largement acceptés par la communauté scientifique (Tableaux I-1 et I-2).

	Φ	
very well sorted		très bien classé
	0,35	
well sorted		bien classé
	0,50	
moderately well sorted		moyennement bien classé
	0,71	
moderately sorted		moyennement classé
	1,0	
poorly sorted		mal classé
	2,0	
very poorly sorted		très mal classé
	4,0	
extremely poorly sorted		extrêmement mal classé

Tableau I-2 - Echelle des classements selon Folk (1957).
- *Verbal scale for graphic size parameters after Folk (1957).*

3 - Imagerie acoustique

3.1 - Introduction

La description de ce paragraphe tire en partie son contenu de l'expérience acquise en mer et des ouvrages suivants : Berné *et al.* 1986 ; Braud, 1986 ; Dewez, 1988 ; Augris *et al.* 1990 et Berné, 1991).

L'application du sonar latéral à des fins civiles, et en particulier pour la géologie marine, date de 1958 (Chesterman *et al.*, 1958). Le principe de cet appareil réside dans l'utilisation de deux transducteurs (émetteurs / récepteurs) montés sur un poisson remorqué par le navire. Ils émettent un signal de très courte durée d'impulsion dont le lobe d'émission est très étroit en gisement (plan horizontal) et très large en site (plan vertical). C'est le signal rétrodiffusé sur le fond marin et capté par les transducteurs qui produit, par juxtaposition des réceptions, une image au fur et à mesure de l'avancement du navire. Les caractéristiques de cette image dépendent de la topographie sous-marine et de la nature du fond (Fig. I-13). Belderson *et al.* (1982) donne des informations générales sur le sonar latéral et de nombreuses illustrations de ses utilisations possibles.

Deux types de problèmes apparaissent à l'utilisateur de telles images :

- Une incertitude concernant la valeur à accorder à une zone plus ou moins rétrodiffusante. Une zone plus rétrodiffusante qui apparaît en noir sur les enregistrements peut correspondre soit à un sédiment plus grossier soit à une zone en pente sur laquelle les ondes acoustiques ont une incidence qui s'approche de la normale. Toutes choses étant égales par ailleurs, un sédiment plus grossier est plus rétrodiffusant qu'un sédiment fin.

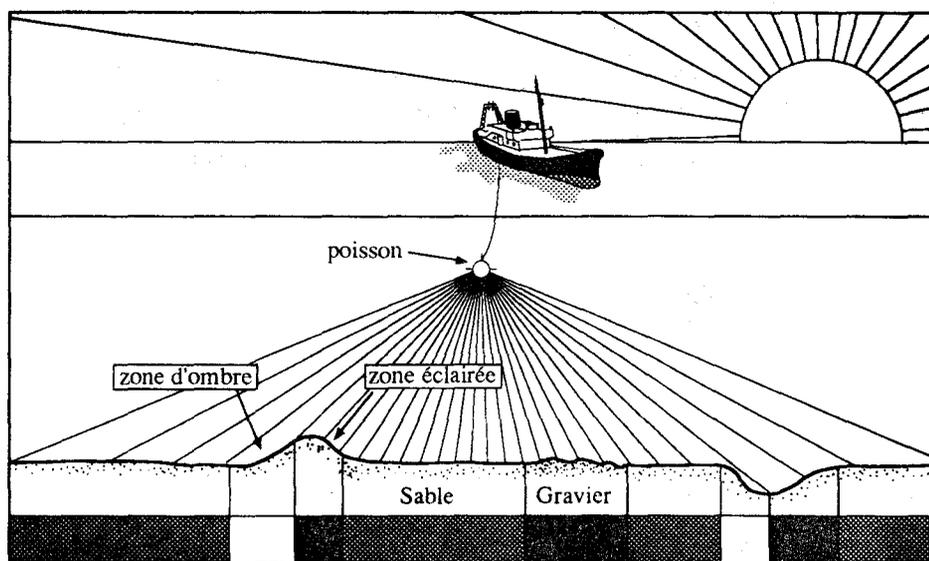


Figure I-13 - Schéma de principe de formation d'une image de sonar latéral. D'après un document EG&G.
- Formation conditions of a side-scan sonar picture. From a EG&G document.

- Une déformation des images due à divers paramètres tels que position du poisson, roulis, tangage. Des distorsions de l'image dues à des variations de vitesse du navire, des changements dans la profondeur d'immersion du poisson ou à des différences d'échelle.

Pour chacun de ces problèmes, une série de traitements électroniques du signal permet de trouver une solution satisfaisante (Berné, 1991).

3.2 - Description de l'équipement utilisé

Le principal outil d'acquisition est un sonar latéral EG&G SMS 960 de l'IFREMER. Il se compose d'un poisson, d'un câble électroporteur, d'un enregistreur graphique et d'un enregistreur numérique.

- Le poisson est équipé de deux transducteurs émettant latéralement des signaux de 105 kHz avec une durée d'impulsion de 0.1 ms et une cadence (T) variable en fonction de la portée (P) : $T=0,0015 \times P$. Le lobe d'émission est étroit en gisement ($1,2^\circ$) et large de 20 à 50° en site (Fig. I-14). Du fait des faibles profondeurs de la zone d'étude, la portée minimale de 100 m et une cadence de tir de 0,15 s ont été utilisées.

Le poisson est relié au navire par l'intermédiaire d'un câble électroporteur passant dans une poulie compte-tour. La poulie permet, grâce à un treuil télécommandé, de connaître et de faire varier la profondeur du poisson. Berné *et al.* (, 1986) indiquent que la hauteur du poisson au dessus du fond (H) doit satisfaire la relation suivante :

$$0,47 \times P > H > 0,0714 \times V \times P$$

avec P : portée, et V : vitesse en $m.s^{-1}$ (Fig. I-14).

Dans la cas de cette étude, pour une vitesse moyenne de 4 nœuds (2.05 m.s^{-1} ou 7.4 km.h^{-1}) et une portée de 100 m, la hauteur devrait être comprise entre 47 et 11 m. Etant données les faibles profondeurs (entre - 20 et - 4 m en basse mer de vive eau) et pour éviter que l'appareil ne heurte le fond, nous nous sommes souvent trouvés dans des conditions limites d'utilisation. Dans la pratique, la hauteur choisie a été d'environ la moitié de la profondeur d'eau.

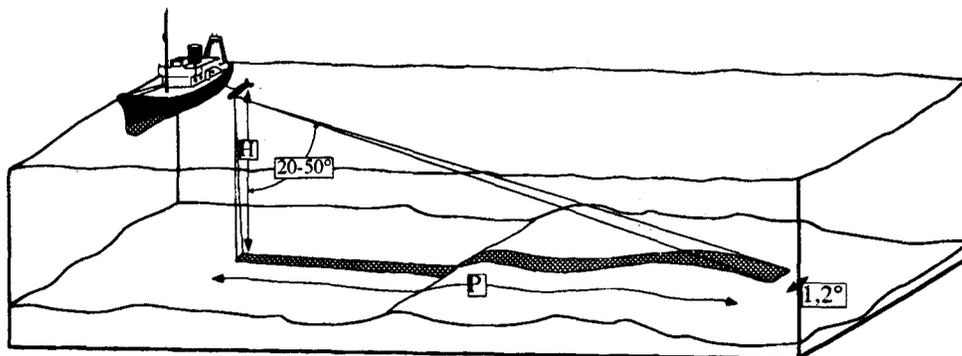


Figure I-14 - Angles couverts par le sonar à balayage latéral. Les paramètres H et P correspondent à l'altitude du poisson et à la portée choisie de l'appareil.
 - Angular coverage of the side-scan sonar. The H and P parameters correspond to the fish altitude and to the selected range of the equipment.

- L'enregistreur graphique associe cinq fonctions

- . Amplification électronique de gain et de contraste.
- . Asservissement du défilement du papier à la vitesse du navire.
- . Détection du fond qui permet de calculer la hauteur du poisson. A partir de cette hauteur, la position réelle de chaque point élémentaire de l'enregistrement (pixel) est calculée.
- . Visualisation des données, corrigées dans un repère orthonormé, sur le papier électrosensible de la table traçante numérique à 16 niveaux de gris et 2048 pixels par ligne.
- . Entrée d'informations telles que la date, l'heure, la vitesse, le cap et le numéro de profil, de façon manuelle ou automatique dans le cadre du système ADOP (Acquisition de Données Océanographiques du Plateau continental).

- L'enregistreur magnétique est un dérouleur de bandes qui reçoit les données brutes après traitement électronique, mais sans correction géométrique. La quantité de données stockées est énorme, une minute d'enregistrement pour la portée utilisée correspond à $4.32.10^6$ bits (527 Ko) de données. Grâce au formatage, la capacité de stockage d'une bande est de 42 minutes ce qui équivaut pour cette étude à deux profils perpendiculaires au banc. L'enregistreur magnétique n'a été utilisé que dans la partie Nord du banc afin de confectionner une mosaïque des images de sonar latéral.

3.3 - Traitement des images sonar

Lors de la reconnaissance générale du banc, la qualité des données fournies par l'enregistreur graphique est suffisante pour décrire et cartographier les figures sédimentaires. Par contre, pour la réalisation d'une mosaïque de détail, il est indispensable d'effectuer 1) des corrections géométriques : vitesse, dérive due au courant, changements de direction, obliquité due à la pente du terrain ; 2) des corrections d'image par réglage des contrastes et élimination des zones d'ombre pouvant exister lorsque le poisson est trop proche de la surface du banc.

Le traitement de ces diverses corrections est effectué grâce au logiciel TRIAS développé au département informatique de l'IFREMER par J.M. Augustin (1985 ; Le Drezen, 1988). Il permet, grâce à un recouvrement de 50 m entre les profils, de reporter les images dans un repère cartographique par collage informatique des meilleures images. Les mosaïques obtenues sont restituées grâce à des traceurs à des échelles sélectionnées qui, dans le cas de notre étude, sont 1/2500 et 1/5000.

3.4 - Interprétation

La rétrodiffusion des signaux acoustiques est une fonction de la nature du sédiment et du relief sous-marin. Ceci est illustré par la figure I-15 qui donne une représentation d'un sonogramme. L'enregistrement est composé de deux parties distinctes :

- La partie gauche constitue le sonogramme au sens strict : il s'agit d'une vue du fond de la mer dans un repère orthonormé. La ligne du milieu est la trace du poisson et les deux côtés sont les images associées à chacun des deux transducteurs. Chaque intervalle entre deux "L" représente 25 m.

- La partie droite donne la profondeur d'eau sous le poisson. Sont présentes également dans cette partie les données de cap, heure, vitesse et numéro de profil.

L'imprécision existant dans la reconnaissance sur les sonogrammes de la nature du sédiment d'une part et l'aspect du relief sous-marin d'autre part est donc partiellement solutionnée grâce à la connaissance de la profondeur sur la partie droite du sonogramme. Toutefois, l'analyse lithologique et granulométrique des sédiments superficiels lève l'incertitude.

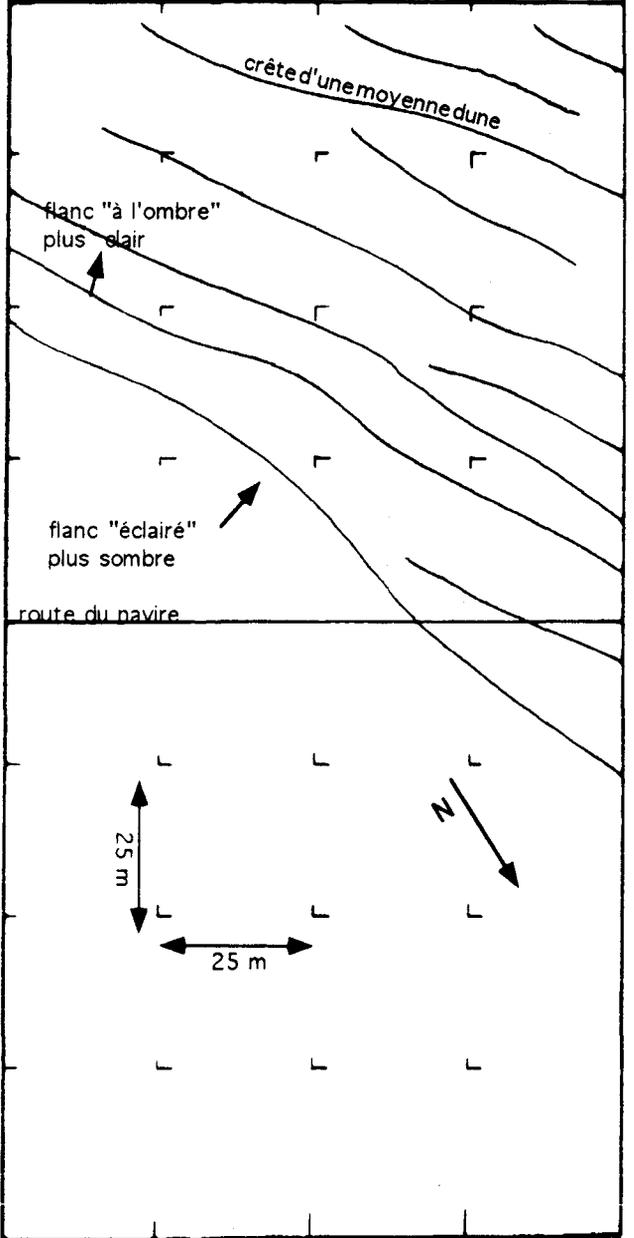
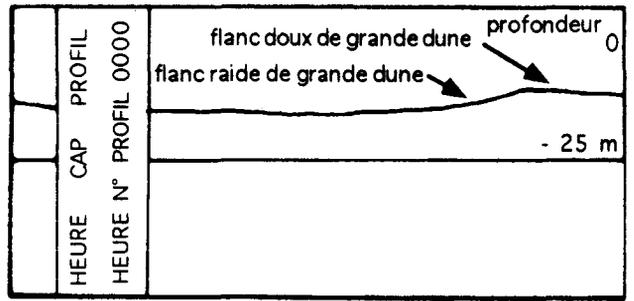
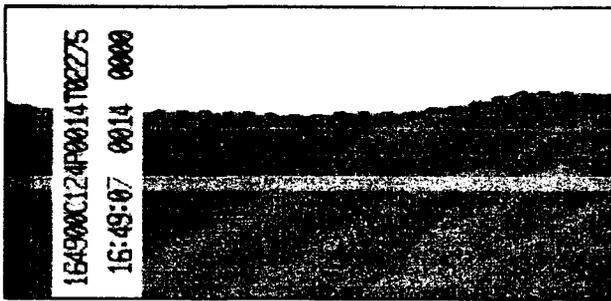


Figure I-15 - Exemple de sonogramme. Profil N°14, mission SANBA. Juillet 1992.
Example of sonogram Profile 14 SANBA -ruse July 1992

3.5 - Couverture par sonar latéral de la zone d'étude

Dans le cadre du contrat MAST 1-RESECUSED, la zone du Middelkerke Bank a été reconnue avec le sonar latéral par l'Université de Gand et par l'IFREMER. L'Université de Gand a étudié l'ensemble du banc à l'aide de 62 profils espacés de 200 m. En l'absence d'enregistrement numérique, il n'a pas été possible de fabriquer une mosaïque d'images sonar. Néanmoins, cette reconnaissance d'ensemble du banc nous a permis de disposer d'une carte complète du banc.

L'IFREMER a également participé au lever par sonar latéral du banc entre le 29 Avril et le 8 Mai 1991 : la reconnaissance de l'ensemble du banc a été effectuée le long de 31 profils espacés en moyenne de 500 m (Fig. I-16) et une zone restreinte a donné lieu à l'établissement d'une mosaïque. La mosaïque est constituée de 16 profils espacés de 100 m. Elle est située à la terminaison septentrionale du banc (Fig. I-17). C'est dans cette zone qu'ont été repérées les figures sédimentaires de plus grande taille.

La zone ayant donné lieu à l'élaboration d'une mosaïque d'images sonar a de nouveau été étudiée entre le 2 et le 13 Juillet 92 pour observer les changements de position et de forme des corps sédimentaires.

4 - Sismique haute et très haute résolution

Les méthodes sismiques, dans leurs applications marines, ont subi des progrès considérables grâce au développement de la prospection pétrolière offshore. Dans la plupart des cas, la résolution de la sismique pétrolière est insuffisante pour résoudre les problèmes posés par l'étude des processus marins actuels, lors des reconnaissances géotechniques pour la pose d'ouvrages en mer, ou lors de prospections de minerais et granulats. Pour ces études spécifiques, des outils à haute définition ont été développés en même temps que des outils intégrés de traitement (Cf. Berné, 1991).

Les appareils utilisés concernent la sismique réflexion. Leur principe repose sur le fait qu'une onde acoustique émise par une source est partiellement réfléchiée par les discontinuités lithologiques successives qu'elle rencontre (Fig. I-18). Les signaux réfléchis sont transmis à un enregistreur graphique. La géométrie des différentes discontinuités, matérialisées par des réflecteurs, est obtenue sous forme d'une coupe-temps, convertie ensuite en coupe-profondeur.

Dans le cadre de notre étude, deux appareils de résolutions différentes ont été utilisés.

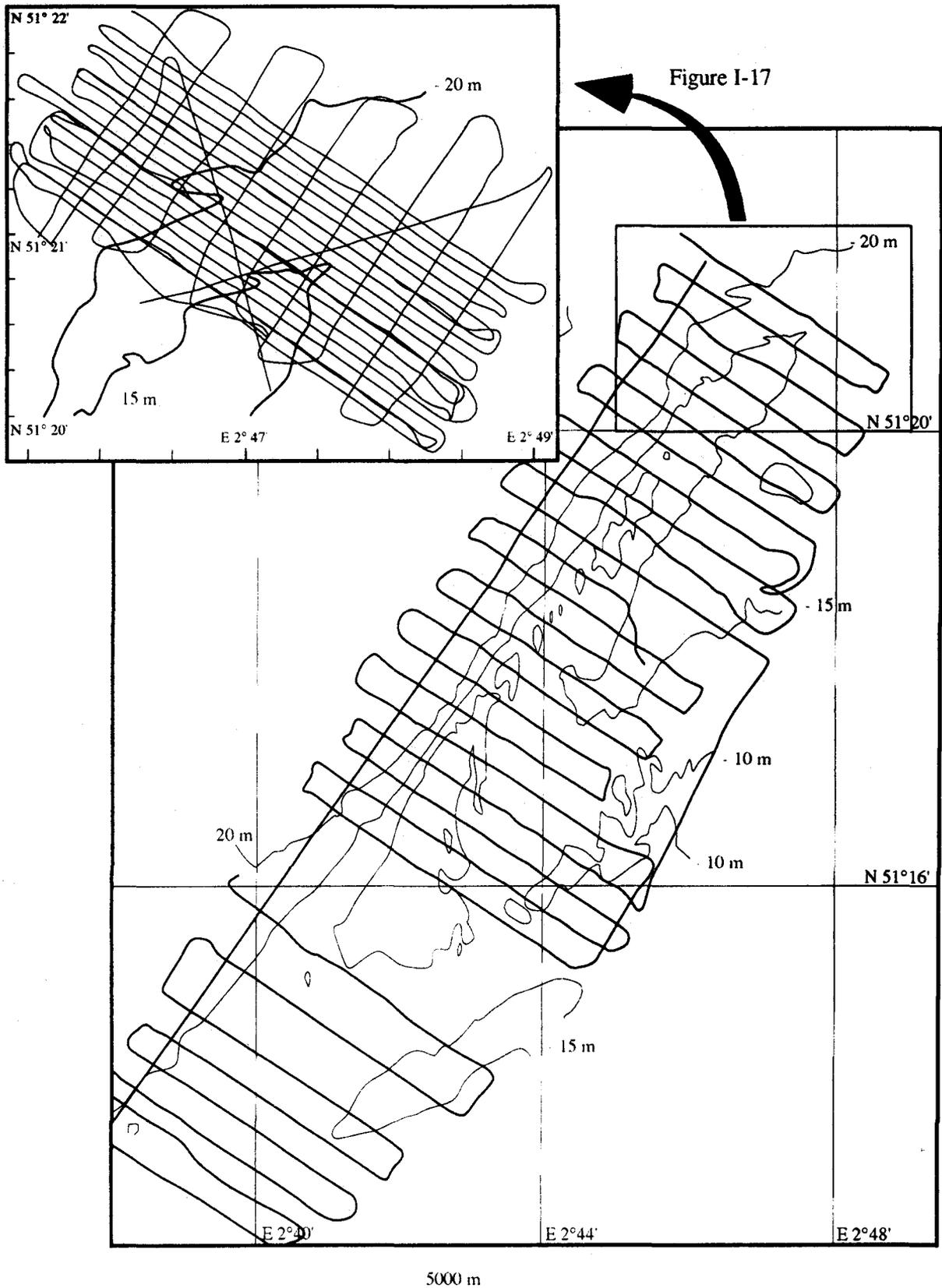


Figure I-16 - Couverture sonar latéral du banc lors de la mission du Belgica en Mai 1991.
 - Side-scan sonar coverage during the Belgica survey, May 1991.

Figure I-17 - Couverture par sonar latéral de la zone de la mosaïque. Mission du Belgica, Mai 1991.
 - Side-scan sonar coverage on the mosaic area. Belgica survey, May 1991.

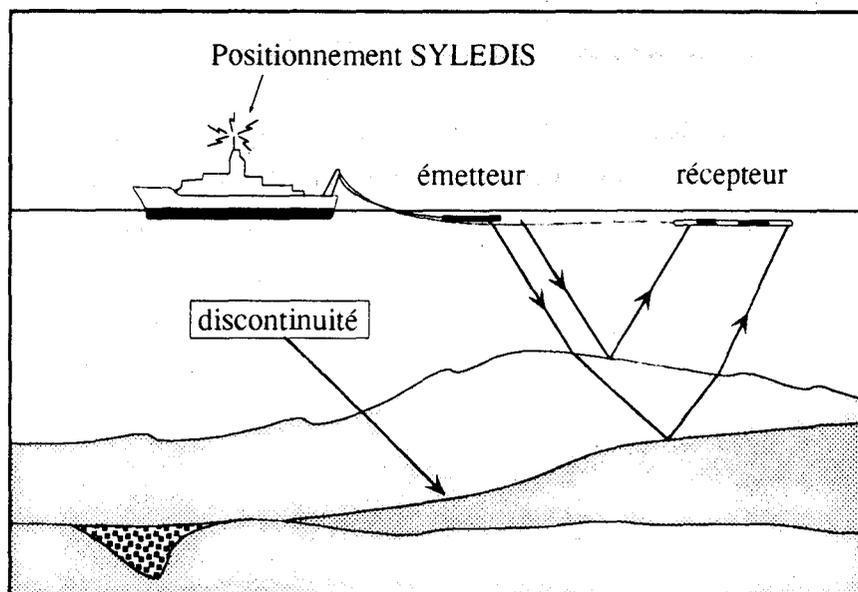


Figure I-18 - Principe de fonctionnement de la sismique réflexion marine. D'après Clabaut (1988).
 - Principle of the marine reflexion seismics. From Clabaut (1988).

4.1 - La chaîne d'acquisition haute résolution (H.R.) du RCMG

L'émetteur est un étinceleur (sparker) en peigne. Pour ce type d'appareil, l'onde acoustique est créée par un arc électrique émis dans l'eau à partir d'une série d'électrodes disposées parallèlement : en peigne. C'est un outil de sismique H.R. de type CENTRIPEDE de 600 Joules développé par le RCMG à Gand. Associé à un récepteur monocanal composé de huit hydrophones répartis dans une flûte de 4,5 m, il a une pénétration qui dépasse 100 m pour les réflecteurs puissants. Dans certains profils enregistrés numériquement et traités, il a été possible de détecter le toit du Massif paléozoïque du Brabant, à une profondeur supérieure à 100 m sous la surface sédimentaire. Dans la zone du Middelkerke Bank, la pénétration utile dépasse 50 m ce qui est largement suffisant pour étudier l'ensemble du Quaternaire.

Les données sont enregistrées simultanément sous forme analogique et digitale sur un système d'enregistrement EG&G ES 2420, et stockées sur deux lecteurs de bandes.

L'interprétation des profils sismiques est digitalisée et combinée avec le fichier de navigation afin de produire des représentations à différentes échelles.

Sur la base des données de sismique multitrace (Marc De Batist, comm. pers., 1992), et d'un forage proche d'un de nos profils sismiques (cf. chapitre III), la vitesse de propagation des ondes sismiques utilisée pour la conversion temps/profondeur a été de 1600 m.s^{-1} dans les sédiments quaternaires. Cette valeur est également celle employée par Liu (1990) dans la même région.

4.2 - La chaîne d'acquisition très haute résolution (T.H.R.) de l'IFREMER

La source émet un son dont la fréquence est de 2,5 kHz. Il s'agit d'un sondeur de sédiment. L'émetteur et le récepteur sont montés sur un poisson remorqué par un câble électroporteur. Cet appareillage permet une pénétration d'une quinzaine de mètres, avec une précision pouvant atteindre 0,5 m. Les données sont enregistrées sur papier électrostatique à partir d'une table traçante Bell et Howell. Du fait de la grande cadence de tir (1 à 6 coups par seconde), l'échelle horizontale est très dilatée et les profils ne peuvent pas être traités comme ceux du RCMG. Simultanément, les données sont enregistrées sur support magnétique pour traitement ultérieur par le système SINUP (Sismique NUMérique Plateau, Lericolais *et al.* 1988).

Après interprétation, les profils sismiques sont reportés manuellement sur des profils bathymétriques et combinés à la navigation. La correction de marée appliquée est faite à partir des mesures du niveau marin à Oostende extrapolées au Middelkerke Bank grâce aux tableaux de correction communiqués par l'Université de Gand (Jean Lanckneus, comm. pers.).

Cette chaîne d'acquisition complète celle du RCMG (Tableau I-3). La sismique H.R. permet de reconnaître les grandes lignes de l'architecture interne sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Grâce à la sismique T.H.R., il est possible de retrouver ces grandes lignes et de détailler l'architecture de la dizaine de mètres supérieurs.

	RCMG, Gand	IFREMER, Brest
Appareil	sparker 600 J	sondeur de sédiment
Pénétration efficace	50 m	15 m
Résolution	1 m	0,5 m
Zone aveugle sous la surface topographique	2,5 m	1,25 m
Hauteur d'un profil	100 ms	60 ms
L. moyenne d'une minute d'enregistrement sur papier	6 cm	24 cm
Vitesse du bateau	4 nœuds	4 nœuds
Enregistrement numérique	non	oui
Digitalisation manuelle	oui	non
Traitements	conversion ms⇒m	changements d'échelle et de contraste, correction de houle
km levés	450	350

Tableau I-3 - Caractéristiques techniques des appareils utilisés pour les relevés de sismique.
- *Technical characteristics of the seismic devices.*

4.3 - Mode d'interprétation des données sismiques

L'essentiel des dépouillements a été effectué sur des profils analogiques non traités. La démarche suivie est celle couramment utilisée en stratigraphie sismique (Mitchum *et al.* 1977). Elle se décompose en trois étapes principales :

- Séparation des réflecteurs principaux. Ces réflecteurs doivent avoir une extension latérale suffisante pour être suivis d'un profil à l'autre.
- Définition d'unités sismiques, délimitées par les réflecteurs principaux et caractérisées par leur faciès acoustique, leur localisation, leur épaisseur et la présence ou non de réflecteurs internes.
- Dénomination des unités et des réflecteurs dans un ordre chronologique.

Au cours de chaque étape de travail, deux directions perpendiculaires de profils permettent de s'assurer en permanence de la continuité des objets décrits. Les grands traits architecturaux du banc ont été définis à partir des profils H.R., les profils T.H.R. servant à lever les ambiguïtés de position des réflecteurs proches de la surface et à définir plus précisément le comportement des réflecteurs internes au sein de chaque unité.

4.4 - Traitement des données

Les progrès de la sismique T.H.R. sont surtout rendus possibles grâce à l'acquisition numérique et à la disposition de logiciels de traitement de données. Ces logiciels permettent d'améliorer la qualité des profils ou d'effectuer des corrections de houle.

Le logiciel SITHERE (Sismique Très Haute REsolution ; Lericolais & Berné, 1990 ; Marsset & Ollagnon, 1992), permet de visualiser et de traiter les données issues de la chaîne SINUP. Il fonctionne sur le même principe, modulaire et interactif, que le logiciel TRIAS utilisé pour les données du sonar latéral. Les modules sont destinés aux corrections géométriques, au traitement du signal, à la visualisation des données et à leur stockage sur disque optique.

La houle est un facteur limitant dans la zone d'étude. Son importance lors de la campagne de Mai 1991 justifie l'utilisation d'un programme de correction de houle. Développé par Bruno Marsset de l'IFREMER, il élimine les déformations dues à la houle, redonnant aux réflecteurs rectilignes une forme plus proche de la réalité (Fig. I-19).

Le programme GEOFOX développé au RCMG par Mark Verschurren permet la reconstitution et la visualisation tridimensionnelle de surfaces ou d'unités sismiques (Verschurren, 1992). Il a été utilisé pour reconstruire les unités principales obtenues lors de l'étude de sismique H.R. C'est un logiciel interactif qui met en évidence des erreurs possibles d'interprétation. En vérifiant sur les profils sismiques et en faisant intervenir des critères géologiques définis par l'utilisateur, le programme est non seulement un outil de représentation fidèle et esthétique (cf. Chapitre III) mais aussi un moyen de progresser dans l'interprétation des résultats. Lors de mon utilisation, le logiciel était en

phase de développement. Le travail en parallèle avec son auteur a permis d'ajouter au programme, prévu au départ pour des tectoniciens, des routines et des modules plus utiles au sédimentologiste ou au stratigraphe.

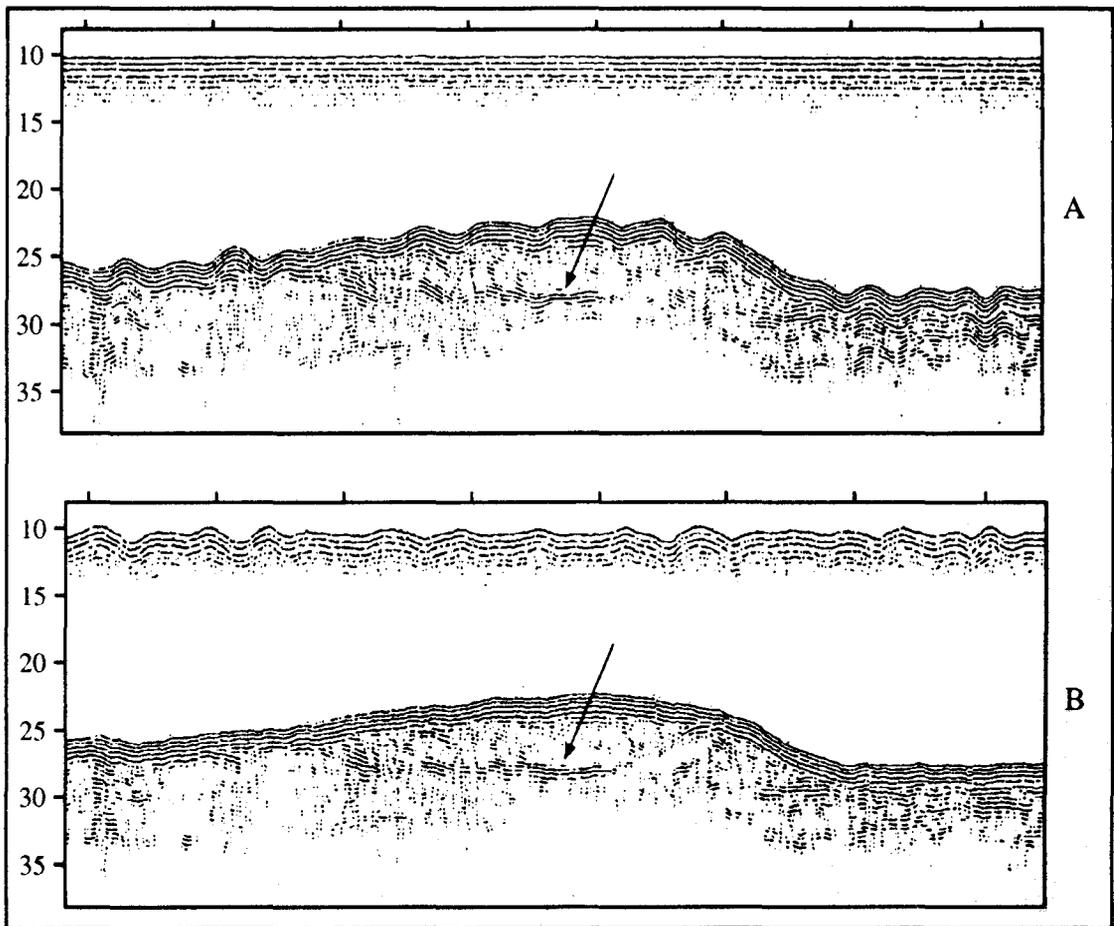


Figure I-19 - Exemple de filtre de houle réalisé sur un profil de sondeur de sédiment (logiciel SITHERE). A : avant traitement. B : après traitement. Mission Belgica. Extrémité Nord du banc. Noter la forme du réflecteur pointé par la flèche. Mission Belgica.
 - Example of swell filtering applied to a very high resolution seismic profile (SITHERE software). A : before processing, B : after processing. Belgica cruise. Northern end of the bank. Notice the shape of the reflector pointed by the arrow. Belgica survey.

4.5 - Couverture sismique

Les premières campagnes d'acquisition de données H.R. ont été effectuées par le RCMG et l'IFREMER, en deux fois pour cause de mauvais temps. La première en Décembre 1990 et la seconde en Mai 1991. Afin d'obtenir une couverture suffisante pour la reconstitution tridimensionnelle, une grille sismique a été établie. Elle comprend 72 profils perpendiculaires au banc (NW-SE), espacés de 200 m, et 6 profils en long, soit au total plus de 450 km de profils (Fig. I-20).

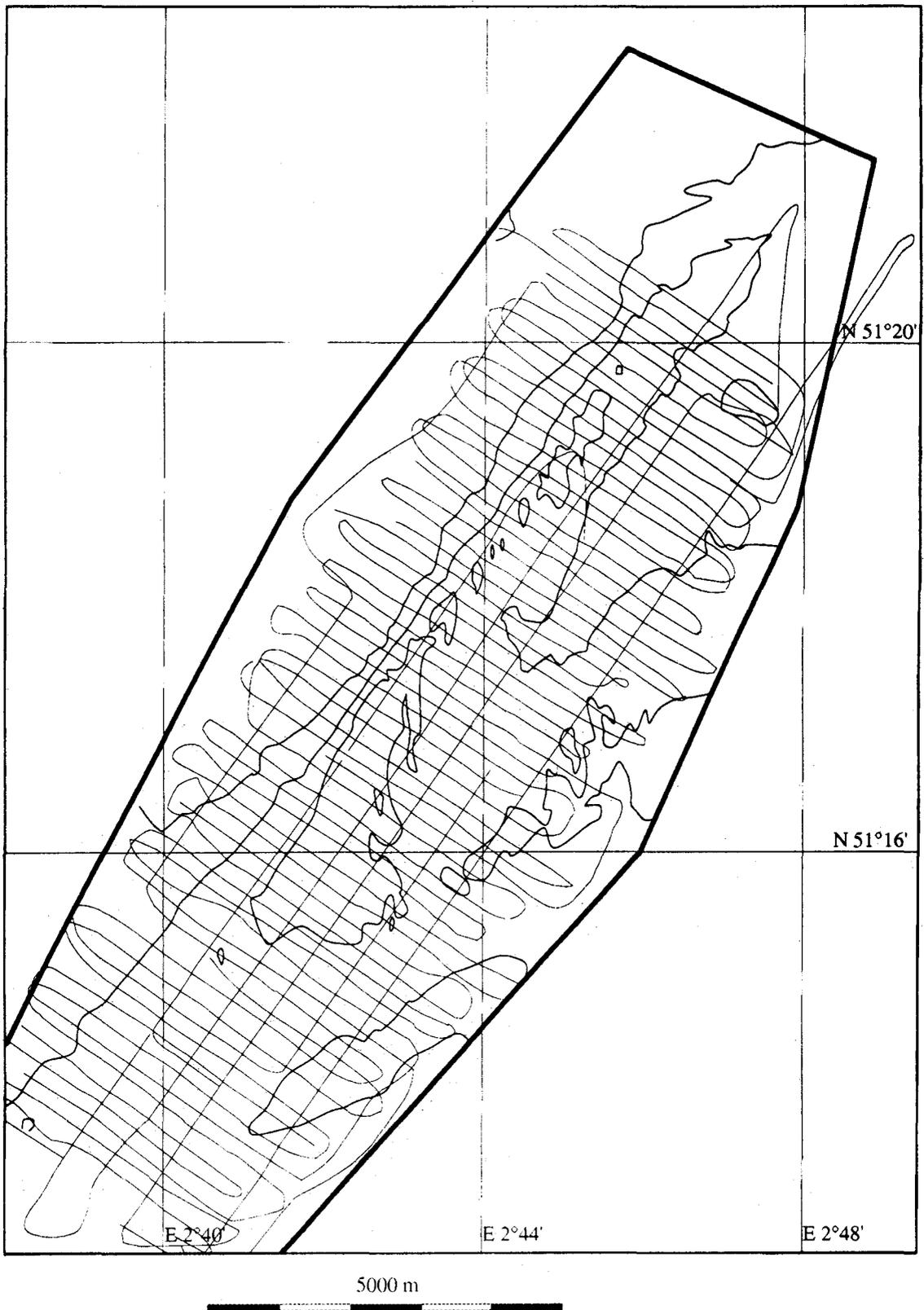


Figure I-20 - Couverture sismique haute résolution réalisée par le RCMG. Mission RESECU1 et RESECU2.
- High resolution seismic coverage realised by the RCMG, Gent. RESECU1 and RESECU2 surveys.

La grille couvre une surface totale de 112 km² (16x7 km), qui comprend le Middelkerke Bank, ses dépressions voisines, Uitdiep et Negenvaam, et le flanc occidental de l'Oostende Bank (Fig. I-3). Ces campagnes ont permis une reconnaissance générale de l'architecture du banc.

La campagne de sismique T.H.R. a été réalisée dans les zones reconnues lors des missions précédentes sur l'ensemble du banc mais également dans une zone d'intérêt particulier. Cette zone est caractérisée par des dunes sous-marines de grande taille et constitue la terminaison nord du banc. Son interprétation a donné lieu à la confection d'une mosaïque de sonar latéral. Le plan de position des profils est le même que celui du sonar latéral (Fig. I-15 et I-16). L'ensemble totalise une distance de plus de 200 km pour la première campagne et de 150 pour la deuxième.

5 - Carottages

Si la sismique très haute résolution donne des indications précieuses sur les discontinuités et l'architecture des bancs sableux, l'observation effective des sédiments est fondamentale pour caractériser les successions lithologiques et rechercher les modes de mise en place des corps sédimentaires. Ce contrôle est rendu possible grâce aux carottages et autres sondages.

5.1 - Prélèvements

Le carottage est une opération relativement lourde qui nécessite de bonnes conditions de mer. Les appareils utilisés sont des vibrocarottiers. Un vibrocarottier est un appareil capable de prélever des sédiments non perturbés, sableux ou argileux. L'énergie hydraulique lui donne une meilleure pénétration que celle obtenue avec les carottiers utilisant la gravité comme force de pénétration. Le carottier utilisé "Trilflip" a été élaboré et construit par le service géologique des Pays-Bas (Hoogendoorn & Kluwer, 1990) Il prélève des carottes de 10 cm de diamètre sur une longueur pouvant atteindre 5,5 m. Une carotte peut être obtenue en moins de 15 secondes ce qui permet d'en prélever un grand nombre à chaque mission. Une fois remontées à bord, les carottes sont mesurées et annotées. Certaines ont fait l'objet d'une étude de gamma densimétrie. Cette étude a pour but la mesure de la densité des sédiments en prenant l'eau (densité = 1) comme référence. Les résultats sont fonction de la teneur en eau des sédiments ce qui donne une indication de la taille du sédiment et de son état de compaction. Le sédiment des carottes étant meuble, les chercheurs de l'Université d'Utrecht ont modifié une technique de préservation par imprégnation d'une laque sur le sédiment (lacquer-peel ; Bouma, 1969). Cette technique permet de conserver les structures intactes, augmente les contrastes de granulométrie et rend les descriptions sédimentologiques sur tranches fines plus aisée (Fig. I-21). La description des carottes comprend une analyse 1) de la taille moyenne des sédiments par comparaison avec l'échelle de Wenworth (Lowe & Walker, 1984), 2) des figures sédimentaires et biogéniques et 3) d'autres paramètres tels que la couleur ou la nature des éléments figurés.

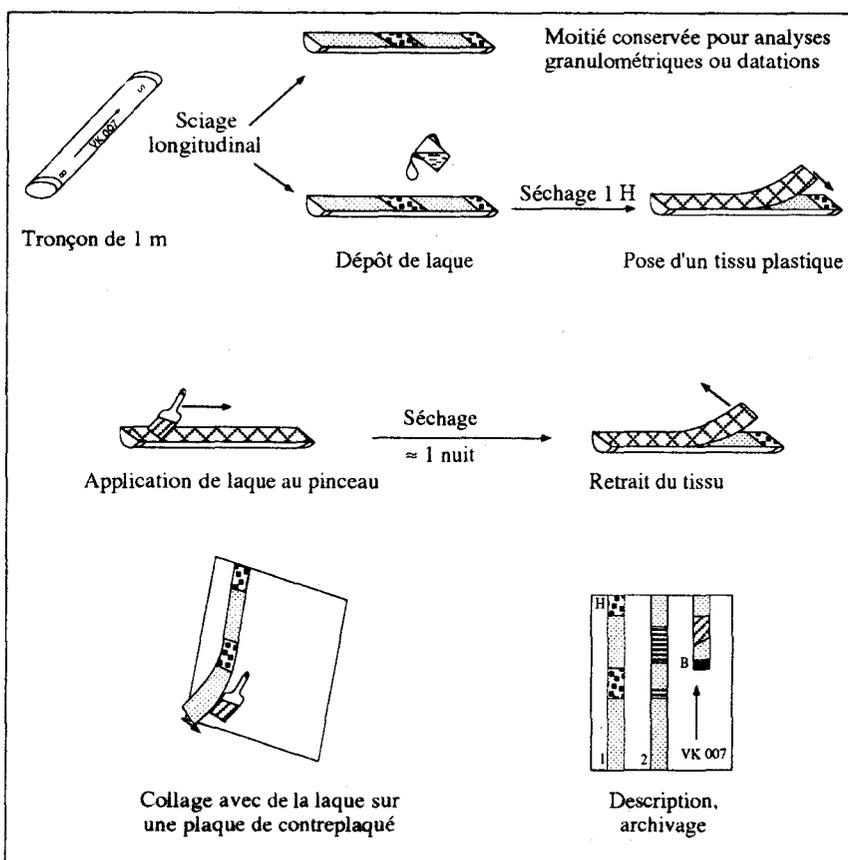


Figure I-21 - Technique des empreintes à la laque.
- Lacquer-peel techniques.

5.2 - Localisation des carottages

Le présent travail s'appuie sur les résultats de trois campagnes de carottages (Tableau 0-2). Deux d'entre elles ont été réalisées par Ad Stolk d'Utrecht. Elles ont permis de recueillir 61 carottes d'une longueur moyenne de 4 m, réparties selon 5 radiales (Fig. I-22). La troisième campagne de courte durée (mission SANBA en 1992), n'a permis de prélever que 3 carottes.

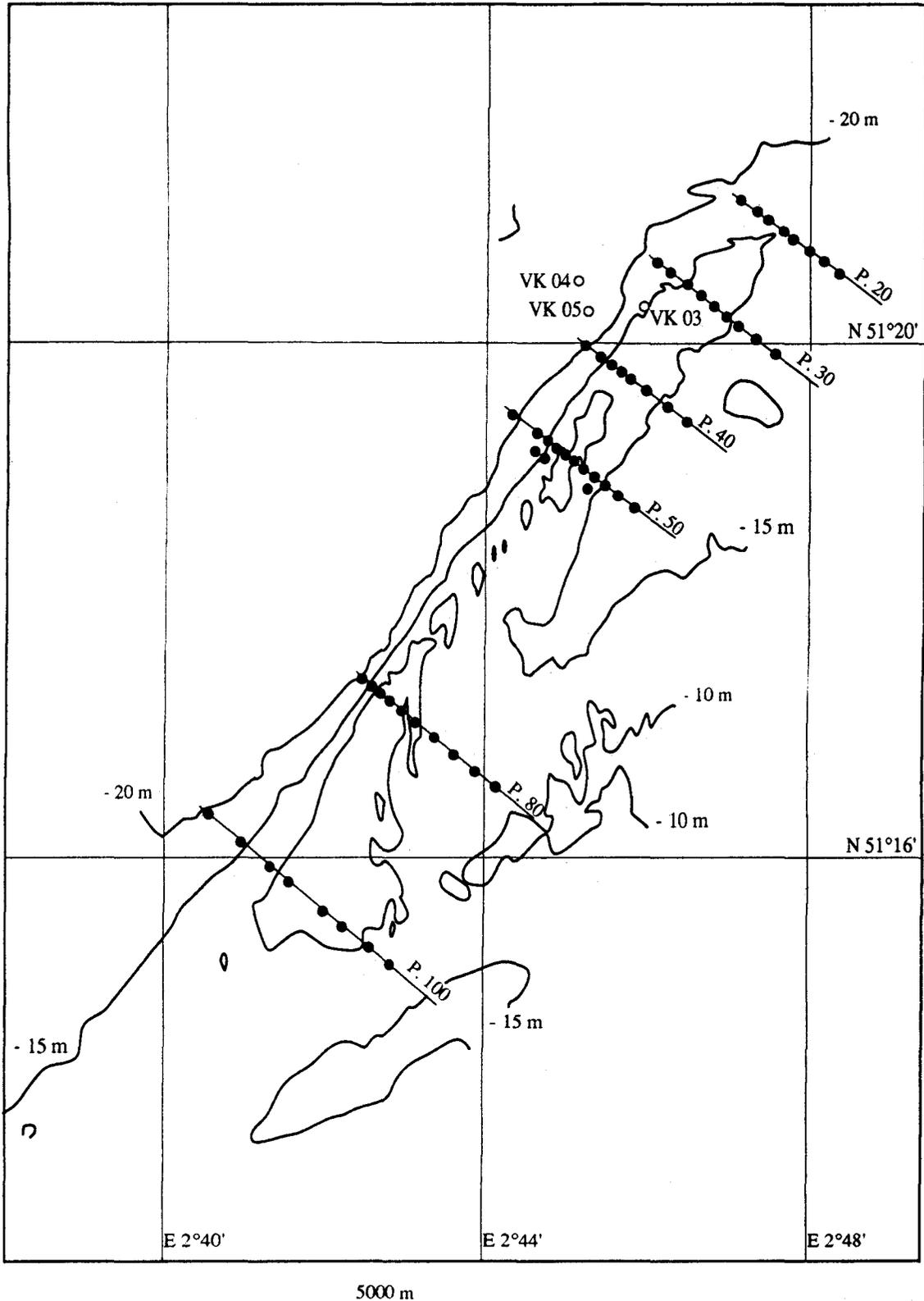


Figure I-22 - Localisation des carottages. Points noirs : prélèvements de l'Université d'Utrecht le long des profils 20, 30, 40, 50, 80 et 100. Missions V 17, 36 et 37. Points blancs : prélèvement de l'IFREMER (VK 03, 04 et 05). Mission SANBA.
 - Location of the vibrocores. Black dots : University of Utrecht sampling along profiles 20, 30, 40, 50, 80 and 100. V 17, 36 and 37 cruises. Open circles : IFREMER sampling (VK 03, 04 and 05). SANBA cruise.

6 - Limites météorologiques

La qualité des enregistrements est grandement influencée par les conditions météorologiques surtout dans le cas des campagnes géophysiques.

- La houle induit des déformations des profils sismiques et des réflecteurs, diminue la résolution et perturbe la propagation du signal.

- Le bruit engendré par le déferlement de la houle en surface est enregistré sur les profils sonar sous forme de bandes plus ou moins sombres superposées à l'image du fond marin.

- Un temps calme et un courant faible sont indispensables pour prélever des carottes car l'appareillage est lourd et doit rester en station sans que le navire ne s'éloigne de trop pendant le carottage.

La région Sud de la Mer du Nord est réputée pour ses dangers dus aux faibles fonds et au temps instable. Nous avons pu le constater souvent. Par exemple, pour une durée programmée de 8 jours en Mai 1991, nous n'avons pu travailler que 72 heures !

7 - Intégration des données

Pour gérer le nombre élevé de capteurs géophysiques et de positionnement, l'IFREMER a mis au point le système ADOP (système d'Acquisition des Données Océanographiques du Plateau continental, Berné *et al.*, 1986).

Ce système a des fonctions d'acquisition :

- du positionnement (Sylédis),
- du cap et de la vitesse du navire,
- des données bathymétriques,
- des données de l'imagerie sonar,
- et des données de sismique.

Grâce à cette intégration, il est possible de combiner les résultats des différents capteurs et de disposer de documents établis à la même échelle.

CHAPITRE II
DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE
ACTUELLE

CHAPITRE II - DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE ACTUELLE

Deux approches permettent d'appréhender la dynamique sédimentaire actuelle :

- Une approche directe consiste à poser différents appareils de mesure (courantomètres, turbidimètres, houlographes ...) sur l'ensemble du banc ou à des emplacements représentatifs du milieu étudié. Dans le cadre du projet RESECUSED, des appareils ont été posés sur le fond et ont donné des indications ponctuelles sur les courants à différentes profondeurs ainsi que sur les teneurs en particules en suspension (Stolk, 1993a ; Stolk et Haak, 1993 ; Vincent et Stolk, 1993). D'autres méthodes directes utilisent des traceurs fluorescents ou radioactifs (Beck *et al.*, 1991).

- Une approche indirecte consiste à mesurer ou observer des paramètres directement fonction de la dynamique sédimentaire. La granulométrie des sédiments superficiels ainsi que l'orientation et les caractéristiques des dunes sous-marines font partie de ces paramètres.

Dans la présente étude, la seconde approche a été employée grâce aux données de l'analyse des sédiments et du sonar à balayage latéral. La confrontation des informations provenant de ces outils a été ensuite étudiée et comparée avec les résultats des approches directes ponctuelles.

A - Analyse de la couverture sédimentaire

Le Sud de la Mer du Nord a fait l'objet de nombreuses études de sédiments par diverses institutions anglaises, belges, hollandaises ou françaises. Outre le travail de Van Veen (1936) sur l'ensemble du Sud de la Mer du Nord, les études ont été ciblées sur des groupes de bancs, (Van Mierlo, 1899 ; Gilson, 1900 ; De Maeyer et Wartel, 1988 ; Lanckneus et DeMoor, 1990) ou sur des points particuliers pour des besoins de génie civil. Par opposition à ces études pionnières ou plus récentes, l'étude sur le Middelkerke Bank consiste en un échantillonnage serré afin d'avoir une bonne couverture de sa surface. Le but est d'y reconnaître la répartition des sédiments non plus à l'échelle du Sud de la Mer du Nord mais à l'échelle réduite d'un banc sableux. Les prélèvements consistent en deux séries de 85 échantillons répartis sur l'ensemble du banc selon une grille de 350x750 m, ainsi que 55 selon un pas de 300x450 m sur une zone plus réduite située à l'extrémité septentrionale du banc (voir le plan de prélèvement au chapitre I, figures I-11 et I-12).

1 - Caractéristiques générales des sédiments

Les sédiments de la zone d'étude correspondent tous à des sables (Udden, 1898 ; Wenworth, 1922). Leur médiane est comprise entre 63 et 2000 μm . Cependant, chaque sédiment est composé par l'assemblage de diverses fractions granulométriques aux caractéristiques spécifiques (Figure II-2). Les rubriques suivantes (de 1.1 à 1.8) récapitulent la composition moyenne de chacune des fractions.

1.1 - Fraction argileuse ($< 2 \mu\text{m}$, 9Φ)

Elle est très peu abondante sur la zone d'étude et n'atteint jamais plus de 1% du poids total de l'échantillon. Afin d'étudier sa composition minéralogique, un groupe de 32 échantillons contenant plus de 0,3% de matériel inférieur à 63 μm a été étudié. Le cortège argileux est composé de six minéraux : illite, smectite, kaolinite, chlorite, interstratifiés irréguliers 14-14Å et 10-14Å. Le quartz est systématiquement présent dans cette fraction. Il n'y a pas d'évidence de limonite ou de goëthite bien qu'une coloration brun-rouge ait été observée lors de la décarbonatation. Cette coloration résulte sans doute de la présence d'oxydes de fer amorphes en très faible quantité.

Sur tout le domaine étudié, l'assemblage minéralogique est assez constant : chlorite 5%, illite 35%, interstratifiés 10%, smectite, 35% et kaolinite 15%.

Ces résultats sont proches de ceux obtenus sur la façade maritime du Nord-Pas de Calais, de la baie de l'Authie à Dunkerque : chlorite 5%, illite 30%, interstratifiés 5%, smectite 40% et kaolinite 20% (Dewez, 1985 ; Clabaut, 1988 ; Dewez, 1988 ; Vicaire, 1991).

En dépit de ces faibles variations d'ensemble, 3 tendances s'observent dans les proportions relatives des minéraux argileux.

- La teneur en smectite décroît légèrement vers le SE pendant que la teneur en illite augmente.
- La smectite est plus abondante dans les zones déprimées représentées par les chenaux.
- L'illite est globalement plus abondante dans les zones les plus hautes.

La décroissance légère des teneurs en smectite vers le SE du Middelkerke Bank est à opposer avec la présence d'assemblages plus riches en smectite au Nord de la Manche (Dewez, 1988 e.g.). Ces gradients ne permettent donc pas de caractériser une provenance particulière des minéraux argileux. Il semble par contre y avoir un mélange de provenances diverses, du Nord et du Sud.

La localisation préférentielle des particules de smectite dans les chenaux pourrait s'expliquer par une faculté plus importante de ces minéraux à décanter dans les zones relativement moins agitées (Gibbs, 1977 ; Chamley, 1989).

Huit des 32 échantillons précédents répartis sur l'ensemble du banc (4 sur le bas du flanc occidental et 4 le long d'une ligne transversale), ont été sélectionnés pour apprécier les différences minéralogiques pouvant exister entre les fractions inférieures à 2, 4 et 8 μm (Fig. II-1).

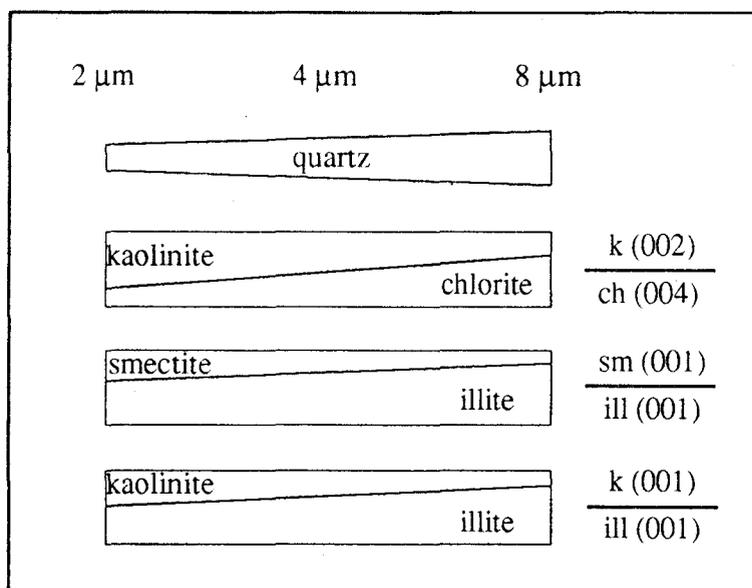


Figure II-1 - Variation des abondances relatives des minéraux argileux et de la teneur en quartz de la fraction < 2 μm à la fraction < 8 μm . La valeur en \AA indique le pic dont la hauteur a été mesurée pour le calcul.
 - Distribution of the mineralogic components (clay minerals and quartz) of different size fractions (From < 2 μm to < 8 μm). The values in \AA indicate the peak on which the measurements have been done.

La figure II-1 met en évidence une décroissance des teneurs en kaolinite et smectite vers les fractions les plus grossières au profit de la chlorite et surtout de l'illite. Cette évolution indique que les particules de smectite et de kaolinite sont de plus petites tailles que celles de chlorite et d'illite. Les illites passent vers les grandes tailles à des petits micas que nous avons du reste observés dans la fraction fine lors des opérations de tamisage.

Le faible nombre d'échantillons étudiés explique peut-être le fait que la profondeur ne semble pas modifier les variations des assemblages silto-argileux dans les différentes classes granulométriques.

1.2 - Silts (2 - 63 μm , 9 - 4 Φ)

En général, la fraction silteuse est très rare voire absente. Néanmoins, dans les sédiments des zones les plus profondes, cette fraction peut atteindre 7% du sédiment total. Cette fraction est de couleur grisâtre et pauvre en CaCO_3 .

1.3 - Sables très fins (63 - 125 μm , 4 - 3 Φ)

Ils sont de couleur gris-verdâtre ou "poivre et sel" et représentent de 0,3 à 6% du sédiment total. Il s'agit essentiellement de grains de quartz anguleux et translucides, émoussés luisants ou ronds mats par ordre d'importance décroissante. La couleur grise est déterminée par la présence d'environ 10% de minéraux colorés très variés et parfois automorphes que nous n'avons pas déterminés. Selon Baak (1936), les bancs de Flandre seraient caractérisés par une association de minéraux lourds dominée par la saussurite (mélange d'épidote et de lawsonite) et l'augite. Cette association reflèterait une origine rhénane des minéraux. La fraction bioclastique est très peu abondante. Il s'agit de spicules siliceux d'éponges et de débris de piquants d'échinodermes.

1.4 - Sables fins (125 - 250 μm , 3 - 2 Φ)

Ils sont de couleur gris beige et représentent de 1 à 65% du sédiment. Ils s'agit de 90 à 95% de quartz anguleux translucides, émoussés luisants et, pour quelques uns de grains ronds mats. Environ 5% de minéraux colorés divers sont également présents. Les restes d'origine biogène sont représentés par des fragments très usés de coquilles de lamellibranches, des piquants d'échinodermes, des foraminifères et des spicules siliceux d'éponges.

1.5 - Sables moyens (250 - 500 μm , 2 - 1 Φ)

Ils sont de couleur beige-jaune. Ils représentent de 25 à 93% du sédiment et se composent d'environ 80% de quartz. Les grains sont ronds brillants ou anguleux et translucides. La fraction biogénique augmente et atteint 15%. Elle est constituée de coquilles brisées, très usées et arrondies provenant de divers organismes : lamellibranches, échinodermes, foraminifères et spicules siliceux d'éponges. Le reste est composé par divers minéraux colorés parmi lesquels la glauconie.

1.6 - Sables grossiers (500 - 1000 μm , 1 - 0 Φ)

Ils sont de couleur brune et représentent de 0,1 à 21 % du sédiment. La part des débris bioclastiques qui dominent (50% en moyenne) est composée de coquilles, pour la plupart brisées, usées et brillantes de lamellibranches, gastéropodes, échinodermes et foraminifères. Le quartz constitue en moyenne 40% du sable grossier. Il s'agit pour l'essentiel de grains émoussés luisants, anguleux luisants et dans une faible proportion ronds mats. Le reste est dominé par les débris de silex bruns associés à des minéraux colorés globuleux et de rares lithoclastes.

1.7 - Sables très grossiers (1000 - 2000 μm , 0 à -1 Φ)

Ils sont de couleur brune et sont constitués pour environ 80% du total par des coquilles. Cette fraction représente de 0 à 16% du sédiment. Les coquilles sont brisées, plus rarement entières, et appartiennent aux mêmes organismes que dans les sables grossiers. La fraction minérale est représentée par des fragments de silex, bruns ou blancs, des grains de quartz très usés et brillants, et quelques fragments de roches : grès siliceux, grès à ciment calcaire et roches endogènes.

1.8 - Graviers (>2000 μm , < -1 Φ)

Cette fraction est généralement peu abondante (de 0 à 8%) bien que certains échantillons comprennent de gros graviers isolés dont la teneur est difficile à évaluer. Elle possède une couleur variée selon la couleur des éléments qui la composent. Il s'agit pour l'essentiel (> 80%) de coquilles le plus souvent brisées et très usées bien que certaines soient entières et recouvertes de bryozoaires. Les débris appartiennent à des lamellibranches et, dans une moindre mesure, à des gastéropodes et à des échinodermes. A ces débris sont associés des silex soit bruns à cassure esquilleuse, soit blancs rugueux à nodosités. Les grains de quartz et les débris lithoclastiques (grès et roches endogènes) composent le reste de la fraction. Un échantillon prélevé dans le chenal occidental (Negenwaam) comporte un galet de silex de plus de 10 cm. Il s'agit de la seule trace observée pouvant être attribuée au "cailloutis de base" (Beck *et al.*, 1991 ; Boillot, 1964 ; Vicaire, 1991) typique de la Manche et du Sud de la Mer du Nord.

La figure II-2 montre l'évolution de la composition moyenne des fractions de sédiment.

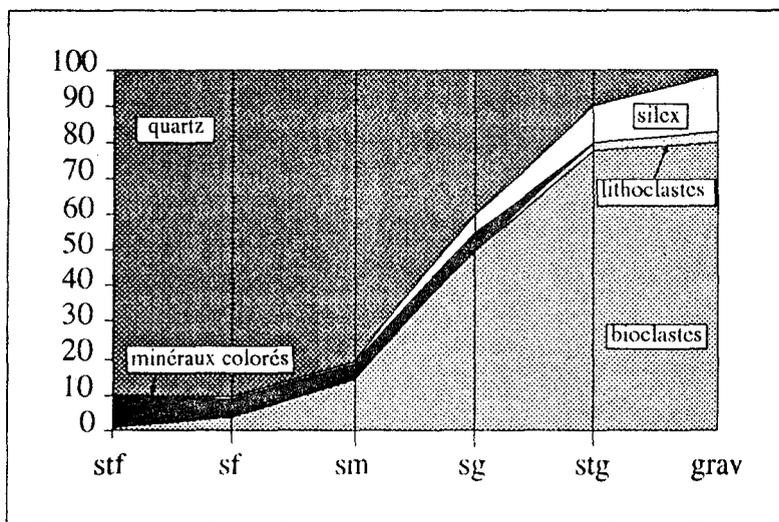


Figure II-2 - Distribution des fractions de sédiment en fonction de la classe granulométrique.
- Nature of the different sedimentary fractions as a function of the grain-size distribution.

L'observation à la loupe binoculaire, effectuée pour toutes les classes granulométriques d'un grand nombre d'échantillons, montre que les valeurs données ci-dessus correspondent à des moyennes mais sont relativement stables quel que soit le type de sédiment. Cependant les fractions des sables fins, moyens et grossiers, sont plus clairs dans les sédiments grossiers et plus gris dans les sédiments fins. Ceci correspond à une plus grande quantité de CaCO_3 dans les premiers sédiments. Les autres variations sont d'ordre biologique : compte-tenu des milieux de vie des différentes espèces, les sédiments les plus fins comportent systématiquement plus de débris d'échinodermes que les grossiers, qui sont eux même plus riches en débris de mollusques. Les échinodermes et notamment *Echinocardium cordatum* sont des animaux fouisseurs qui se nourrissent de particules fines trouvées au sein du sédiment. Par contre, la plupart des bivalves observés se nourrissent de particules organiques présentes en suspension dans l'eau.

2 - Répartition des sédiments superficiels en Mai 1990

Le Middelkerke Bank a été échantillonné successivement en Mai 1990 et en Avril 1991. Pour ces deux campagnes, 85 échantillons couvrant le banc et ses flancs ont été prélevés (voir plan de prélèvement figure I-11 du chapitre I). L'essentiel des résultats est présenté sous forme cartographique.

2.1 - Répartition granulométrique

Les échantillons, selon l'importance relative de chacune des fractions granulométriques, prennent des colorations différentes. Des plus fins gris-verdâtre aux plus grossiers beige-jaune, il existe toute une série d'intermédiaires. La diversité des sédiments rencontrés est représentée sur la figure II-3 où ont été reportées les courbes granulométriques cumulées de tous les échantillons.

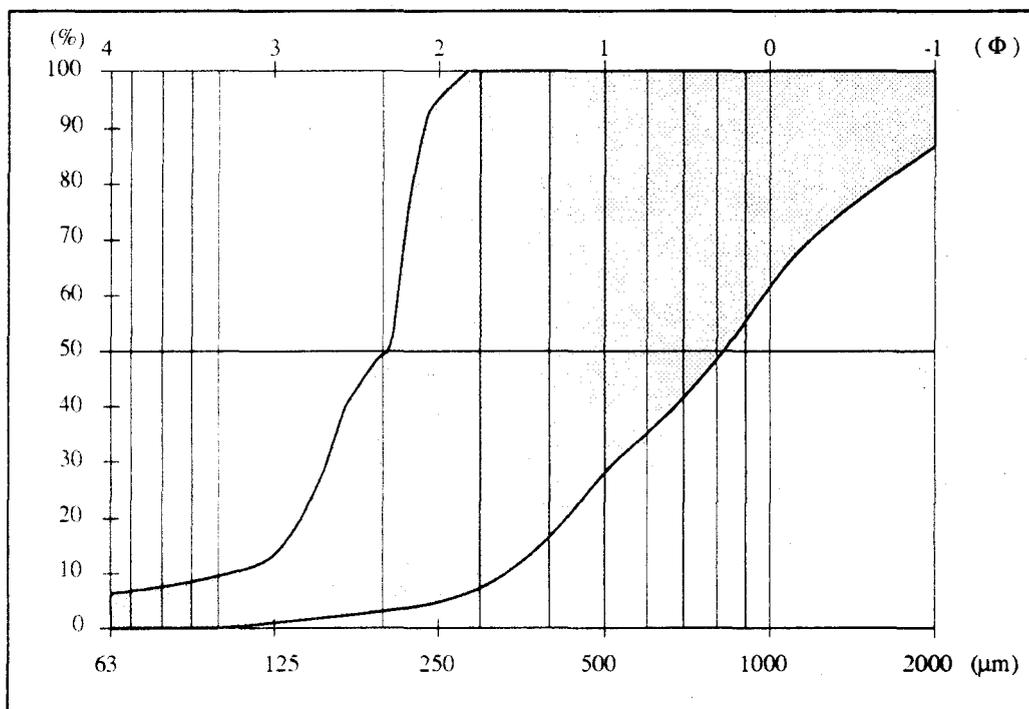


Figure II-3 - Fuseau granulométrique de l'ensemble des sédiments de la zone d'étude.
- *grain-size distribution of all sediments from the study area.*

Deux cartes de répartition des valeurs de la médiane de Folk ont été construites (Fig. II-4 et II-5). Les formules de calcul des différents paramètres sont données chapitre I.

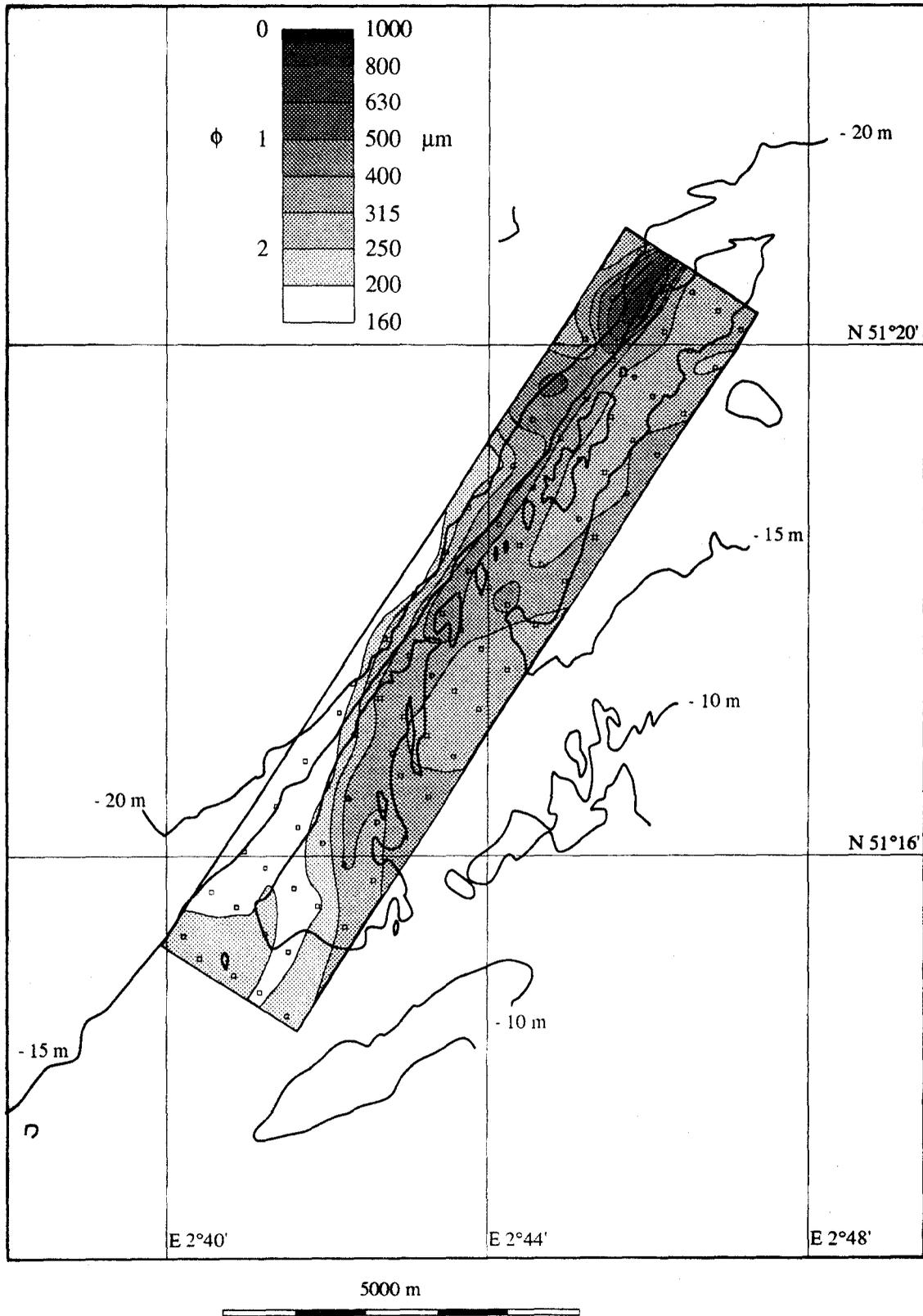


Figure II-4 - Répartition de la médiane calculée sur l'échantillon brut. Première campagne, Mai 1990.
 - Distribution of the mean calculated on bulk sediment. First campaign, May 1990.

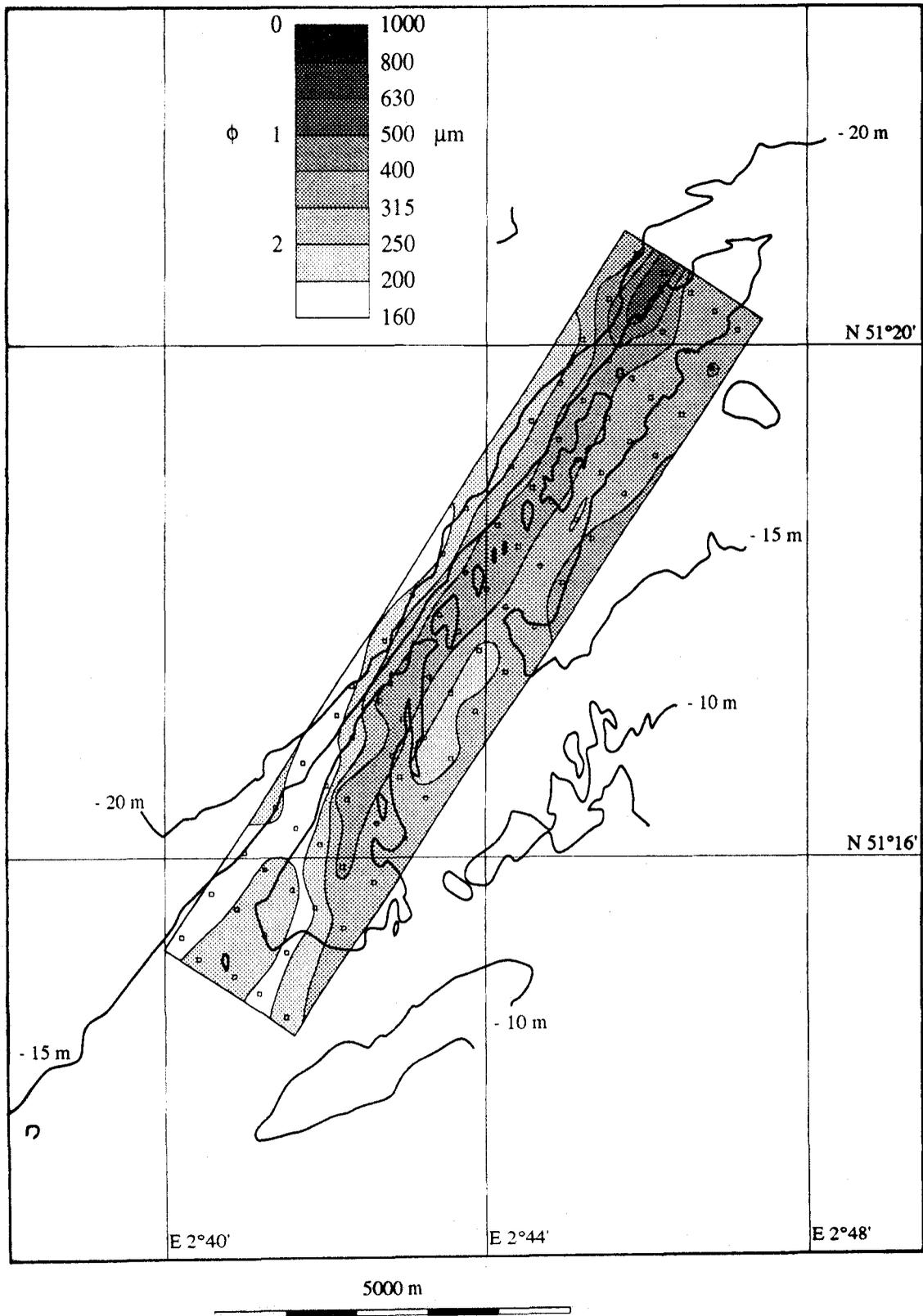


Figure II-5 - Répartition de la médiane calculée sur l'échantillon décalcifié. Première campagne, Mai 1990.
 - Distribution of the mean calculated on decalcified sediment. First campaign, May 1990.

La figure II-4 montre que la distribution des valeurs de la médiane sur les échantillons bruts suit la forme générale du banc. Les sédiments les plus fins (jusqu'à $175 \mu\text{m}$; $2,5 \Phi$) sont localisés dans les zones les plus profondes ainsi que dans la partie sud, tandis que les sédiments les plus grossiers (jusqu'à $884 \mu\text{m}$; $0,2 \Phi$) se trouvent au voisinage de la crête du banc et soulignent les parties les plus hautes. Ce premier résultat est la traduction d'un gradient hydrodynamique net en relation avec la profondeur. Les zones les plus hautes sont en effet les plus énergétiques et de ce fait sont caractérisées par des sédiments plus grossiers.

Le classement (Voir définition sur le tableau I-4 chapitre I) est corréllé avec le grain moyen : les sédiments les plus grossiers sont les plus mal triés (Fig. II-6).

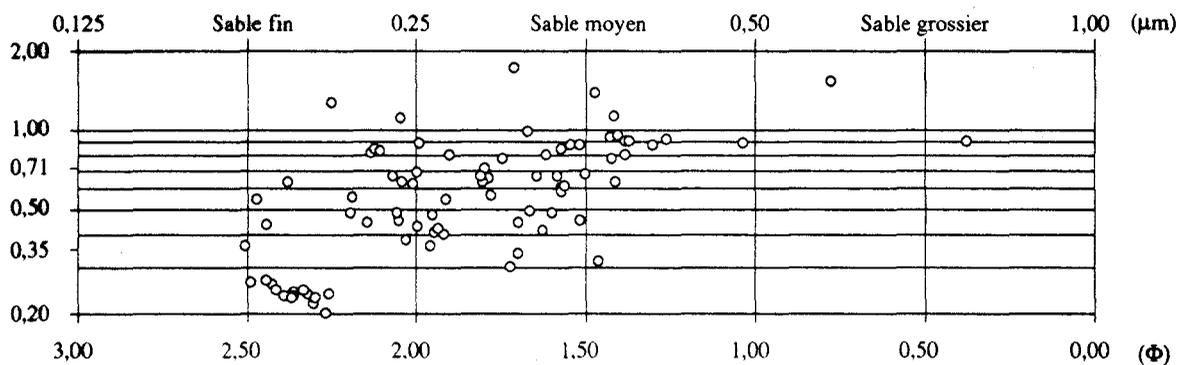


Figure II-6 - Relation entre le classement et la médiane. Première campagne, Mai 1990.
- Relationship between the sorting index and the graphic mean. First campaign, May 1990.

La distribution des valeurs de la médiane calculée sur les échantillons décalcifiés souligne encore davantage la forme générale du banc, avec notamment sa courbure caractéristique dans la partie sud (Fig. II-5). Les valeurs de la médiane s'échelonnent entre $181 \mu\text{m}$ et $611 \mu\text{m}$ ($2,45$ à $0,7 \Phi$). Une bonne corrélation existe entre les médianes calculées sur échantillons bruts et décalcifiés.

2.2 - Répartition de la teneur en carbonate de calcium

Le carbonate de calcium est présent essentiellement sous forme de débris d'organismes. Les éléments lithoclastiques de grès à ciment carbonaté sont, avec de rares fragments de craie ou de calcaire, les seuls autres éléments à contenir du CaCO_3 mais leur quantité peut être considérée comme négligeable. Les organismes sont variés mais peu d'individus sont rencontrés vivants. Seuls quelques mollusques dans les sédiments grossiers, des oursins dans les sédiments fins et des ophiures en surface ont pu être observés en vie. Ces organismes vivants, dont le comportement aux agents hydrodynamiques ne peut être correctement apprécié, ont été écartés pour mesurer le teneur en CaCO_3 .

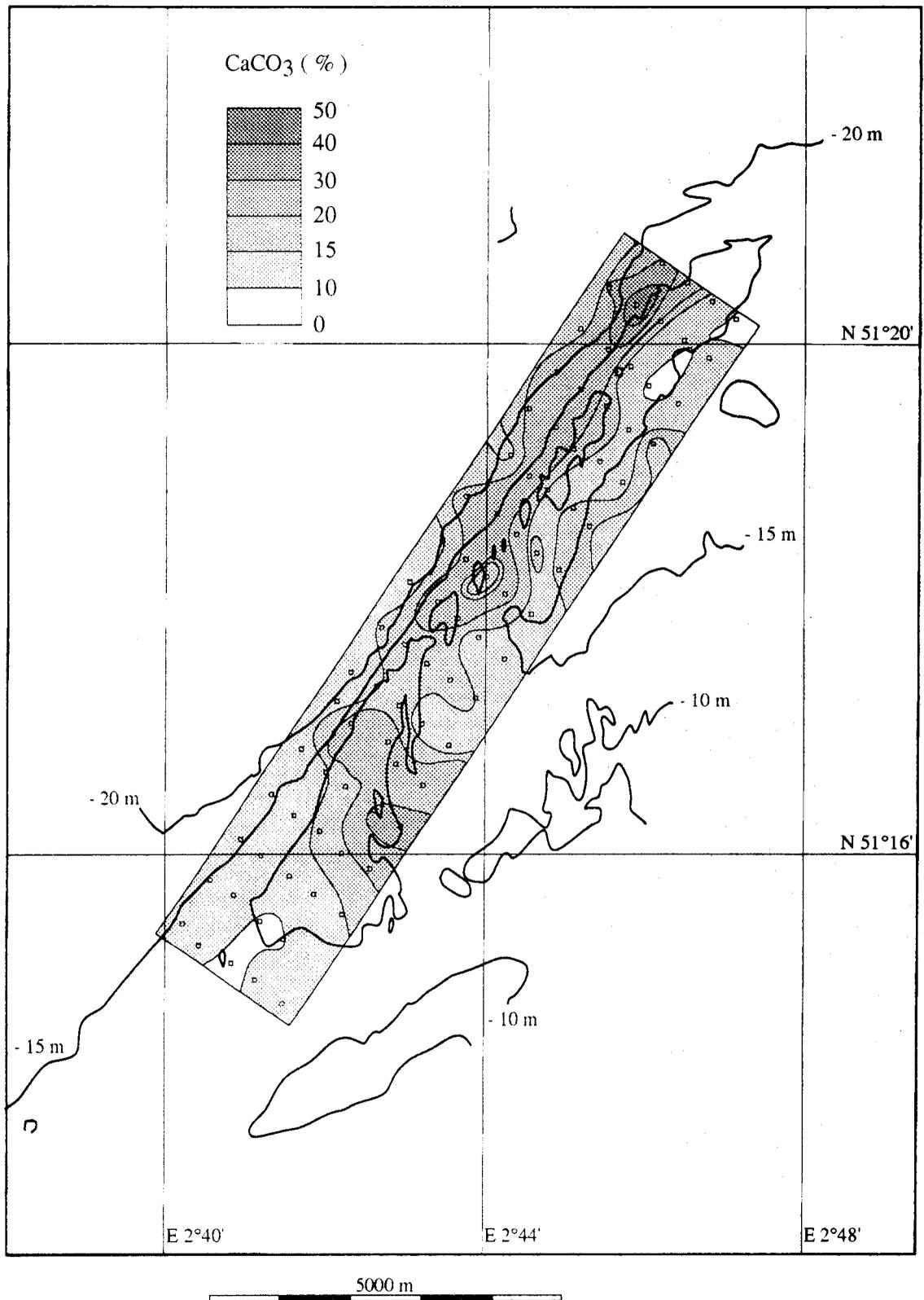


Figure II-7 - Teneur en CaCO₃ dans les sédiments. Première campagne. Mai 1990
 - CaCO₃ contents of the sediments. First campaign, May 1990.

La teneur en CaCO_3 varie entre 8 et 47% (Fig. II-7). Sa répartition suit la forme générale du banc, mais de façon moins nette que pour la granulométrie.

Cette moins bonne corrélation avec la topographie suggère que la teneur en CaCO_3 ne dépend pas uniquement de paramètres bathymétriques mais également, de manière indirecte, de paramètres biologiques. Les organismes se répartissent en fonction des éléments nutritifs qui leur sont nécessaires (échinodermes dans les sédiments fins, majorité des bivalves dans les sables plus grossiers (Wilson, 1982). De plus, les coquilles, et en particulier les plus grandes, sont plus ou moins plates et de ce fait ont une portance différente des grains quartzeux.

2.3 - Relation granulométrie/carbonate de calcium

Les figure II-4, II-5 et II-7 montrent que les paramètres des médianes et de la teneur en CaCO_3 soulignent la profondeur. Il existe donc une bonne corrélation entre la granulométrie et la teneur en carbonates (figure II-8).

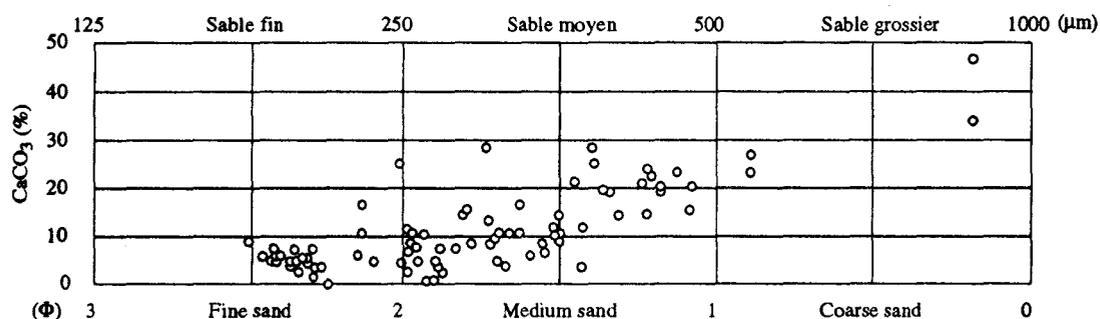


Figure II-8 - Relation entre la teneur en CaCO_3 et la granulométrie (Médiane). Première campagne, Mai 1990.
- Relationship between CaCO_3 content and the graphic mean. First campaign, May 1990.

Quelque soit le type de sédiment, la teneur en CaCO_3 d'une fraction granulométrique donnée est quasiment constante. Par contre, les valeurs sont différentes selon la fraction considérée (Fig. II-2). De ce fait, ce sont les pourcentages de chacune des fractions qui déterminent la teneur globale en CaCO_3 du sédiment. Ces relations conduisent à une bonne corrélation entre granularité et teneur en carbonate.

Lanckneus (1989) souligne que pour la zone des bancs de Flandre, il existe sur chaque banc un accroissement de la médiane relative du sédiment décalcifié vers le NW où peu de CaCO_3 est observé, et qu'il existe un accroissement en débris de coquilles de grande taille vers le SE. Ces deux tendances induisent une grande similitude de position

pour les deux médianes. De plus, il observe que le taux de CaCO_3 est très bien corrélé (0,89) avec la médiane naturelle. Il en conclut que la médiane naturelle ne peut être utilisée pour approcher les paramètres hydrodynamiques.

Les résultats des rubriques précédentes indiquent que les observations de Lanckneus (1989), qui excluaient le Middelkerke Bank, y sont confirmées. Selon ses conclusions, il serait donc préférable d'utiliser les données des sédiments décalcifiés pour les comparer avec l'hydrodynamisme. La démarche suivie dans cette étude a consisté à conserver la fraction carbonatée sur les conseils de plusieurs auteurs (Chamley, Tessier et McLaren, communications personnelles). Il semble en effet qu'en règle générale, et ceci malgré leur forme, les particules carbonatées ont un comportement voisin de celles des quartz. De plus, la plupart des études concernant la répartition ou le transport des sédiments s'appuient sur les données des sédiments bruts. Pour pouvoir comparer avec ces études, il est donc indispensable de connaître la répartition des paramètres granulométriques sur les échantillons bruts.

2.4 - Comparaison d'ensemble entre médiane, CaCO_3 et profondeurs

Un examen détaillé conduit à noter un décalage entre la carte bathymétrique et les cartes d'isovaleurs des médiane et teneurs en CaCO_3 . Ce décalage s'exprime par la position des lignes de crêtes des différents paramètres.

Une ligne de crête est la courbe joignant les valeurs maximales d'une valeur. Cette règle est appliquée pour les trois variables.

Les deux crêtes numériques, médiane et teneur en CaCO_3 , sont approximativement confondues (Fig. II-9). Par contre, leur relation avec la crête topographique montre un décalage et une nette opposition entre la partie nord et la partie sud du banc. Au Nord, les crêtes numériques sont décalées vers le large, à environ 600 m de la ligne de crête topographique ; les sédiments les plus grossiers et les plus riches en CaCO_3 sont situés sur le flanc raide du banc. Dans la partie sud, le décalage s'opère vers la côte : les sédiments les plus grossiers et les plus carbonatés sont respectivement situés à 300 et 700 m à l'Est de la crête topographique, sur le flanc doux du banc. Ce déplacement des crêtes peut être décrit comme une rotation antihoraire par rapport à l'axe du banc.

Ce phénomène est sans doute à rattacher au modèle de circulation générale des sédiments autour des bancs tidaux (Caston, 1972 ; Houbolt, 1968). Selon ce modèle, les deux flancs sont affectés principalement par l'un ou l'autre des courants de marée, l'ellipse de ces derniers possédant un allongement oblique par rapport à celui du banc. Sur le Middelkerke Bank, la dynamique du flanc NW est dominée par le flot tandis que le flanc SE subit une action prédominante du jusant. Cette différence est amplifiée aux extrémités du banc, où les courants sont peu affectés par la faible topographie. Le transit sédimentaire est donc accru dans ces zones qui correspondent aux emplacements des décalages les plus importants avec la position des crêtes numériques. Cette conclusion ne renseigne en rien sur l'état d'équilibre hydrodynamique de ces sédiments qui peuvent être plus grossiers à cause d'un vannage des particules les plus fines "lag deposit". Elle sera confrontée avec d'autres méthodes permettant d'appréhender le transit sédimentaire (méthodes granulométriques et sonar latéral dans ce chapitre, rubriques A5 et B2).

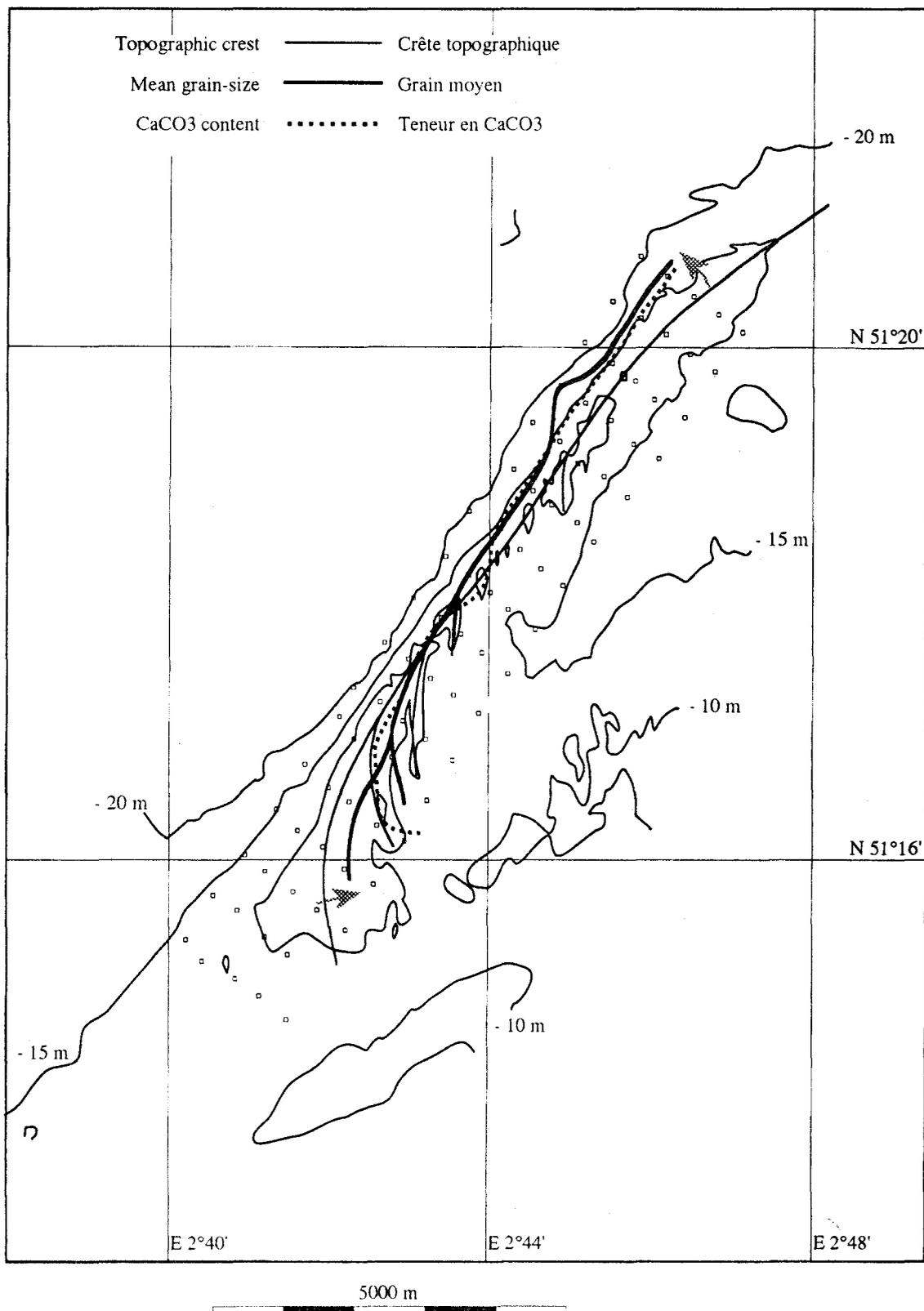
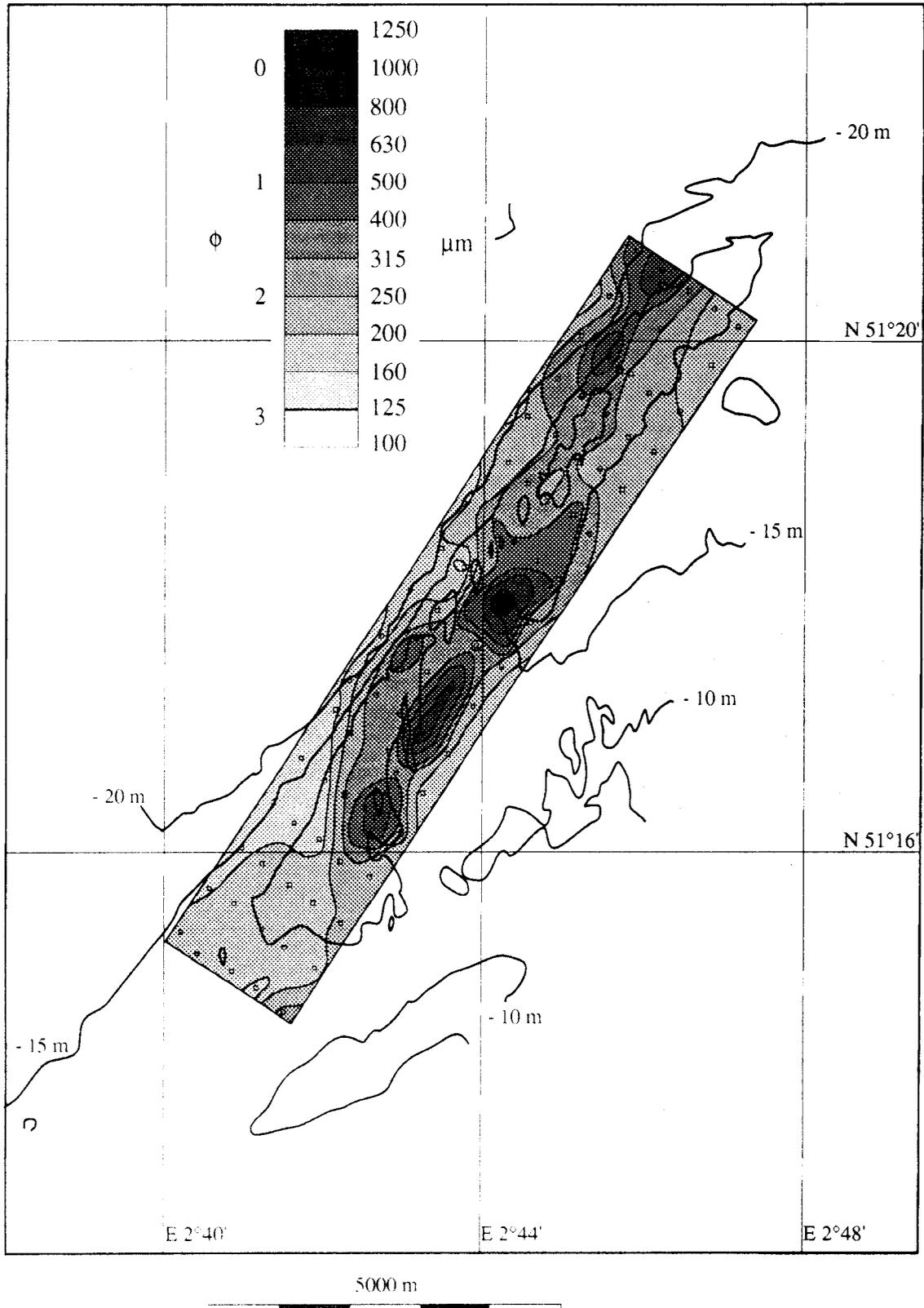


Figure II-9 - Position des crêtes sur les cartes de bathymétrie, médiane et teneur en CaCO₃. Première campagne, Mai 1990.
 - Location of the bathymetric, mean and CaCO₃ content crests. First campaign, May 1990.

3 - Résultats de la campagne d'Avril 1991

La seconde campagne a eu lieu le 25 Avril 1991, et a permis de recueillir 85 échantillons localisés aux mêmes emplacements que ceux de la première campagne (cf. Fig. I-11, chapitre I). Des cartes de répartition des divers paramètres granulométriques ont également été établies.



3.1 - Répartition granulométrique

Les figures II-10 et II-11 montrent des caractéristiques similaires aux résultats obtenus lors de la première campagne : la répartition des valeurs suit la forme générale du banc, les sédiments les plus grossiers sont situés préférentiellement dans les zones les plus hautes du banc. Cela s'observe également, mais de façon moins nette, pour les sédiments décalcifiés.

Des différences, qui seront discutées plus loin (dans ce chapitre, rubrique 4), doivent néanmoins être signalées. L'écart entre les sédiments les plus fins et les plus grossiers est plus important pour les mesures de la seconde campagne et, surtout, la relation entre la bathymétrie et la granulométrie semble moins nette.

3.2 - Répartition du carbonate de calcium

Les teneurs en carbonate sont du même ordre de grandeur que celles mesurées lors de la première campagne : 7 à 42% (Fig. II-12). Le CaCO_3 est présent essentiellement sous forme de coquilles de lamellibranches, de gastéropodes ou tests d'échinodermes ainsi que, dans une plus faible proportion, par des fragments de grès à ciment calcaire.

Il y a une bonne corrélation entre les teneurs en CaCO_3 et les valeurs de la médiane pour les mêmes raisons que celles invoquées à propos de la première campagne (coquilles essentiellement localisées dans la fraction grossière, quartz dans les fractions plus fines ; Fig. II-2).

4 - Variations granulométriques à un an d'intervalle

Les valeurs mesurées et calculées des différents paramètres granulométriques des deux campagnes d'échantillonnage révèlent des différences sensibles. La plus évidente concerne la répartition de la médiane qui semble plus aléatoire et moins en accord avec la forme générale du banc lors de la seconde campagne (Fig. II-13).

Pour expliquer cette différence, deux facteurs peuvent être évoqués : le positionnement et les facteurs hydrodynamiques.

4.1 - Le positionnement

Lors de chacune des campagnes, le système de positionnement, bien que très précis, autorise des décalages de quelques mètres. De plus, compte tenu du fait qu'il est difficile pour un navire de se repositionner exactement sur un précédent point de prélèvement, il est envisageable que deux échantillons comparés aient été prélevés à une distance décamétrique ou pluridécamétrique l'un de l'autre.

Figure II-10 - Répartition de la médiane calculée sur l'échantillon brut. Seconde campagne, Avril 1991.
- *Distribution of the graphic mean calculated on bulk sediment. Second campaign, April 1991.*

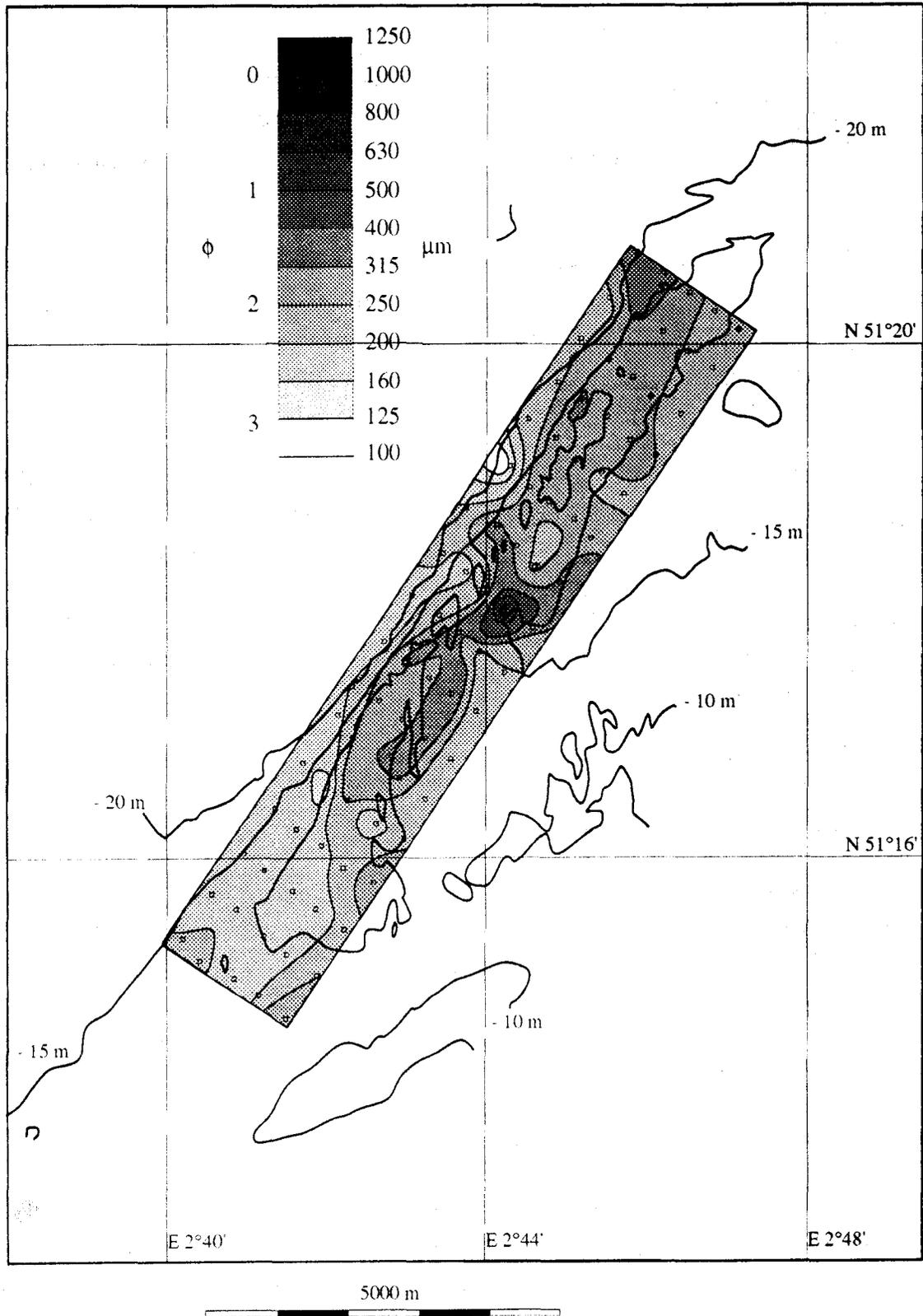


Figure II-11 - Répartition de la médiane calculée sur l'échantillon décalcifié. Seconde campagne, Avril 1991.
 - Distribution of the graphic mean calculated on decalcified sediment. Second campaign, April 1991.

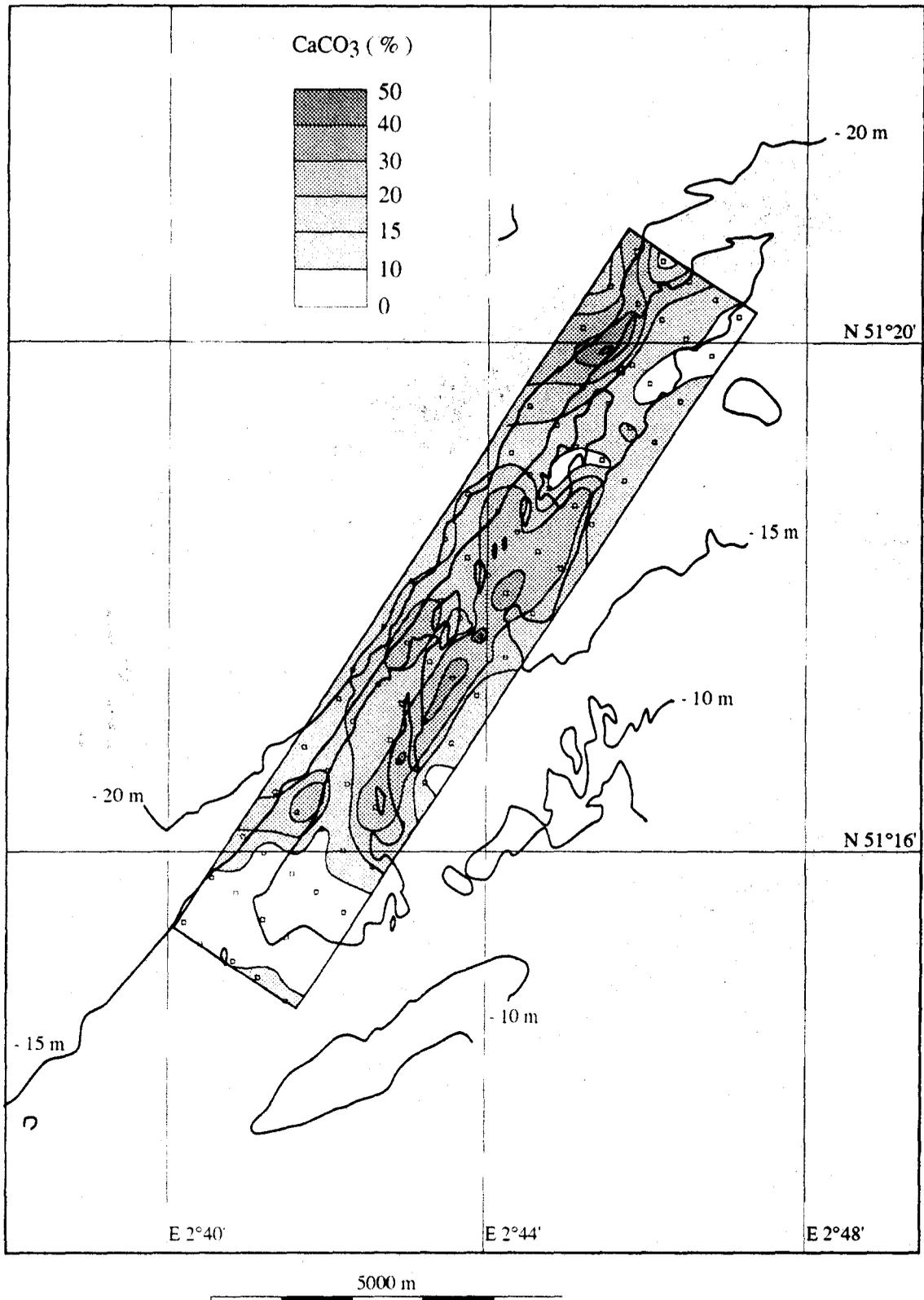


Figure II-12 - Teneur en CaCO₃ dans les sédiments superficiels. Seconde campagne, Avril 1991.
 - CaCO₃ contents in the surface sediments. Second campaign, April 1991.

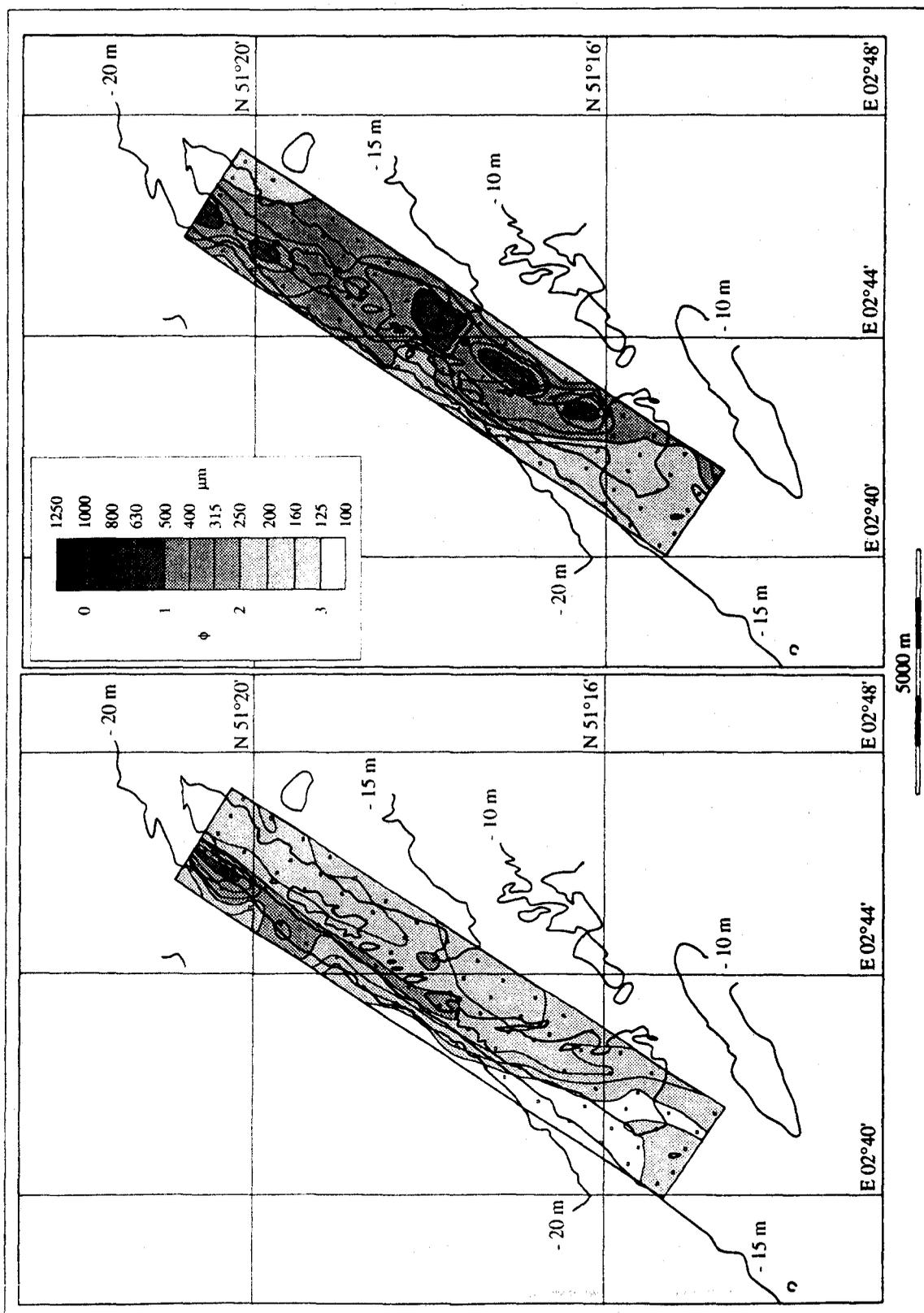


Figure II-13 - Comparaison entre la médiane pour la première et la seconde campagne.
 - Comparison of the mean for the 1st and the 2d campaigns.

Cependant, la grille de prélèvement a une maille (350 x 750 m) de taille largement supérieure à l'incertitude de positionnement absolu. Même si la position relative des échantillons (crête, flanc ou creux de dune) peut avoir changé d'une mission à l'autre, les changements induits par cette incertitude doivent déterminer dans la répartition des sédiments un "bruit de fond" identique pour les deux campagnes considérées. Il ne saurait expliquer la très bonne répartition des sédiments en 1990 et la répartition relativement moins bonne en 1991.

Il faut donc chercher un autre mécanisme.

4.2 - Facteurs hydrodynamiques

Les deux missions ont eu lieu en marées de moyennes vives-eaux mais aucune mesure de houles ni de courants n'est disponible sur le Middelkerke Bank au moment des deux campagnes. Par conséquent, aucune information concernant les conditions hydrodynamiques précises qui sont à l'origine des deux situations n'a pu être utilisée. Cependant, les conditions climatiques ayant une grande influence sur les facteurs hydrodynamiques d'un secteur donné, les relevés météorologiques des 15 jours précédant chaque campagne ont été analysés. Ces données sont celles enregistrées au port de Dunkerque situé à 40 km au SW de la zone (Tableau II-1, Fig II-14 et II-15). Les données météorologiques relevées au port de Dunkerque concernent essentiellement l'anémométrie, la pluviométrie et la nébulosité. Pour les houles, seule une estimation visuelle de l'état de la mer est donnée toutes les trois heures.

4.2.1 - Conditions météorologiques générales

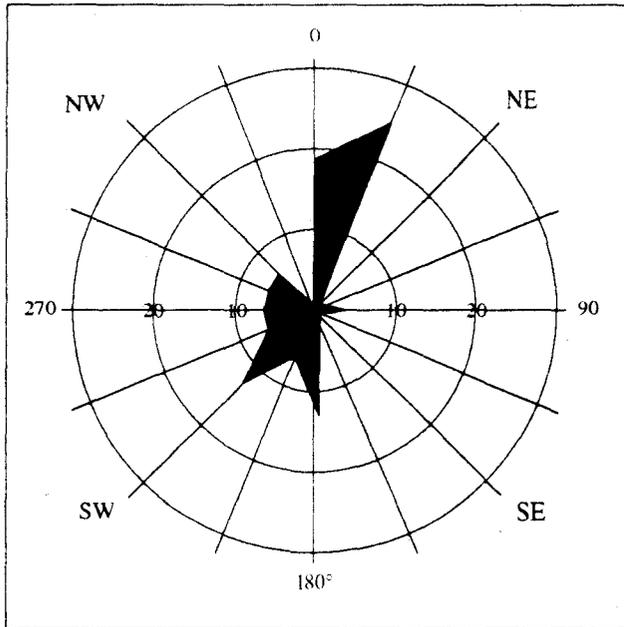
Les vents les plus fréquents dans le Sud de la Mer du Nord sont de secteur SW. Ce sont également les plus forts. Cependant, à cause de l'obstacle que constitue le détroit du Pas de Calais, leur fetch n'est jamais très long (< 100 km). De plus, leur direction s'approche de celle du flot, courant dominant, dans la zone du Middelkerke Bank. Ces vents sont donc en harmonie avec les conditions normales de marée et, malgré leur force, ils ne sont pas les plus destructeurs. En effet, des constatations faites à terre indiquent que les vents causant le plus de dommages sont les vents de secteur nord, même si leurs vitesses sont globalement plus faibles. Au niveau des Bancs de Flandre, ils ont un très long fetch¹ (> 2000 km) car aucun obstacle ne vient les atténuer. De plus, leur direction ne correspond pas au grand axe de l'ellipse des marées. Ils viennent donc perturber le mécanisme "normal" de l'hydrodynamisme local.

4.2.2 - Météorologie avant la première campagne (01-16 Mai 1990)

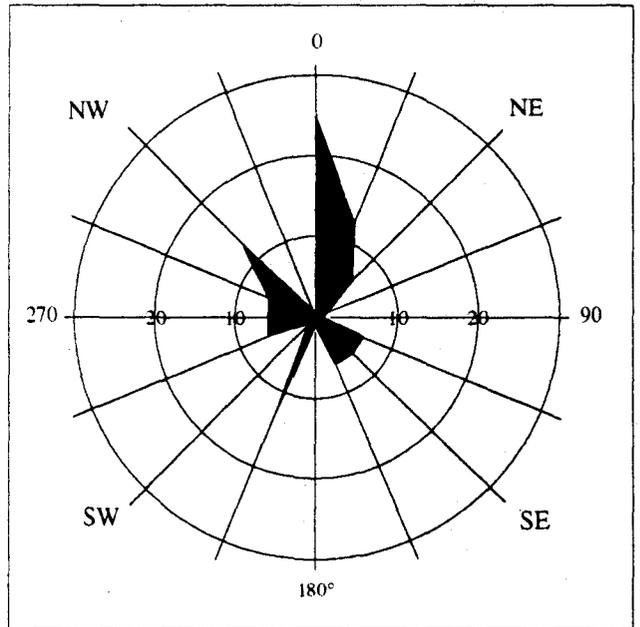
Le mois de Mai 1990 a été un mois particulièrement sec et chaud par rapport aux normales saisonnières. Les 15 jours précédant la mission se sont passés en conditions anticycloniques avec des vents venant du NNE et SW (Fig. II-14 a). La vitesse instantanée de ces vents était faible et a rarement atteint 15 m.s^{-1} . Les vents les plus forts venaient du SW (Fig. II-15 a). Pendant cette période, la mer était calme à peu agitée ce qui correspond à des valeurs

¹ Fetch : longueur sur laquelle s'applique un vent capable d'engendrer de la houle.

comprises entre 1 et 3 sur l'échelle de Beaufort qui comprend 10 paliers (Open University Oceanography Course Team, 1991 : Tab. II-1).

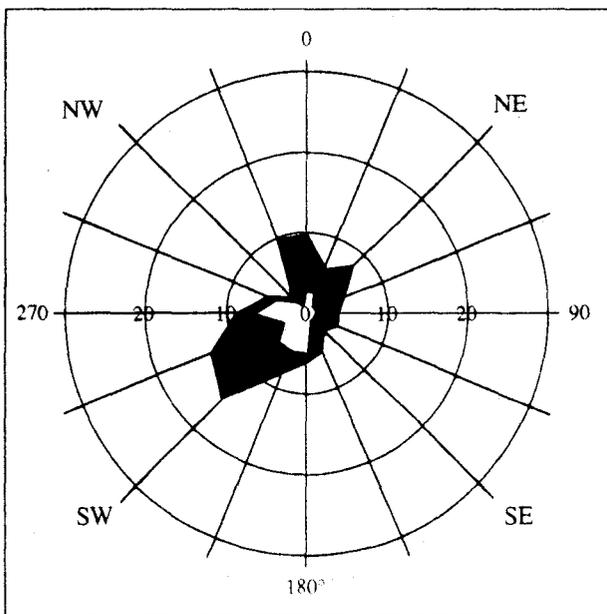


Grand cercle : 30%
Mai 1990

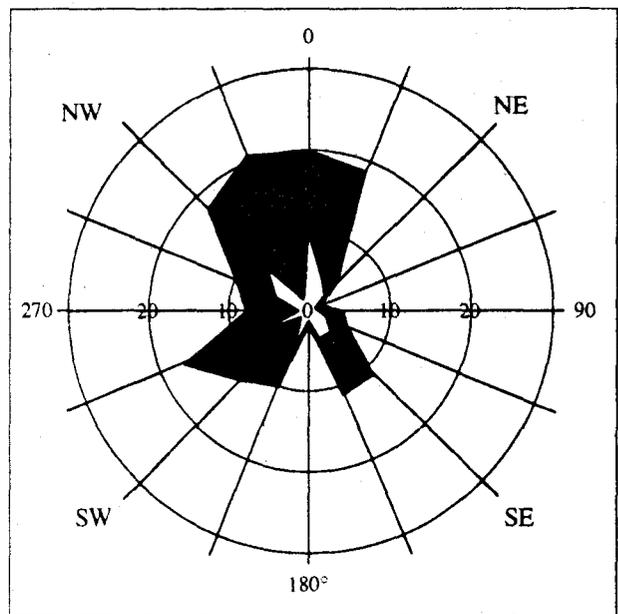


Grand cercle : 30%
Avril 1991

Figure II-14 - Fréquence des vents à Dunkerque les 15 jours précédant les deux campagnes (en %).
- Wind direction frequency recorded at Dunkerque the 15 days before the two campaigns. (values in %).
a : 01-16 Mai 1990. May 1990.
b : 09-24 Avril 1991. April 1991.



Grand cercle : 30 m.s⁻¹
Mai 1990



Grand cercle : 30 m.s⁻¹
Avril 1991

Figure II-15 - Vitesse des vents à Dunkerque les 15 jours précédant les deux campagnes (en m.s⁻¹).
- Wind velocity at Dunkerque the 15 days before the two campaigns. (Values in m.s⁻¹).
a : 01-16 Mai 1990. May 1990.
b : 09-24 Avril 1991. April 1991.

J - 15	J - 14	J - 13	J - 12	J - 11	J - 10	J - 9	J - 8	J - 7	J - 6	J - 5	J - 4	J - 3	J - 2	J - 1	Jour J		
5.3	3	3.4	3	1.4	1.1	2.9	2	4.5	5.1	5.4	6.6	4.3	2.1	4.6	4.9	Vitesse moyenne	Mai 1990
N	N	NE	N	N	W	W	W	SW	SW	SW	SW	W	N	SW	S	Direction	
10	7	8	9	5	5	10	6	10	15	13	13	9	6	13	13	Vitesse maximale	
N	N	NE	N	N	W	W	W	SW	SW	SW	SW	W	N	SW	SW	Direction	
3	2	2	2	1	1	1	1	2	2	3	3	2	2	2	3	État de la mer	
4	3.5	3.8	2.3	4.3	10.6	7.1	11	11.6	7	8.5	4.4	4.6	7.4	5.5	2.5	Vitesse moyenne	Avril 1991
S	S	SE	SE	N	N	N	N	N	NW	N	NW	S	NW	SW	N	Direction	
10	10	11	8	17	16	14	21	20	14	19	14	13	18	10	7	Vitesse maximale	
S	S	SE	SE	N	N	N	N	N	N	N	N	S	NW	NW	SW	Direction	
2	2	2	2	4	3	4	5	4	4	3	3	3	3	3	2	État de la mer	

Tableau II-1 - Vitesse, direction du vent et état de la mer pendant les 15 jours précédant les deux campagnes.

Etat de la mer, échelle de Beaufort à 10 échelons. 1 plate, 2 calme, 3 belle, 4 peu agitée, 5 agitée, 6 forte.

- Velocity and direction of the wind and sea status during the 15 days before the two campaigns. 1 plane, 2 small wavelets, 3 large wavelets, 4 small waves, 5 moderate waves, 6 large waves.

4.2.3 - Météorologie avant la seconde campagne (09-24 Avril 1991)

Contrairement au mois de Mai 1990, le mois d'Avril 1991 a été particulièrement froid. Les précipitations ont été abondantes, donnant même de la neige en faible quantité. Les conditions dépressionnaires responsables de ce temps ont induit des vents principalement de secteur nord mais également de NW et de SE (Fig. II-15 b). La période correspondant aux vents les plus rapides s'est écoulée entre dix et un jour avant la mission. Les vents étaient alors majoritairement de secteur nord (Fig. II-14 b et Tableau II-1). Pendant cette période, la mer était belle à forte. Cet état a d'ailleurs retardé la mission de 2 jours!

4.3 - Conclusion

Les deux campagnes ont suivi deux semaines de conditions météorologiques très différentes qui ont certainement eu des répercussions sur la distribution granulométrique des sédiments à la surface du banc.

Durant les périodes de temps calme, la zone du Middelkerke Bank est dominée par les courants de marée. Ils produisent une répartition du sédiment qui est en accord avec la forme extérieure du banc.

Durant les périodes de tempêtes, la faible profondeur d'eau et des vents de secteur nord augmentent considérablement les effets de la houle. Dans ces conditions, l'impact de la houle combiné avec les courants de marée conduit à une situation de déséquilibre du sédiment par rapport à la topographie générale du banc. Des sondages bathymétriques de haute précision ont pu montrer que les périodes de tempête pourraient être responsables de changements importants dans la position et la forme des grandes dunes (Houthuys, 1993). Les mouvements remobilisent de grandes quantités de sable.

5 - Évaluation du transit sédimentaire par une approche numérique

5.1 Introduction

Les prélèvements de sédiments et les analyses granulométriques sont des opérations relativement aisées à mettre en œuvre et nettement moins coûteuses que la fabrication et la mise en place d'appareils de mesure des paramètres hydrodynamiques. C'est pourquoi de nombreux auteurs ont cherché à reconnaître, au moyen des données granulométriques, l'origine des différents sédiments et les relations pouvant exister entre eux.

Folk et Ward (1957) s'appliquent à définir et à harmoniser des valeurs caractéristiques d'un sédiment pouvant être utilisés mondialement. En France, Rivière (1977) en développant la méthode des moments linéaires, essaie de caractériser l'origine et l'état d'équilibre d'un sédiment. Middelton (1976) définit le mode de transport des sédiments (suspension, traction, ...) à partir de leurs paramètres granulométriques. Plus récemment, sont apparues des méthodes statistiques dont le but est d'extraire un sens de transit sédimentaire au sein d'un "bruit de fond" qui serait dû à une distribution aléatoire des sédiments.

A partir d'exemples pris dans la littérature et de ses propres études, McLaren (1981) développe une méthode qui porte son nom permettant de reconnaître des filiations entre les sédiments. Pour tester sa méthode, il compare ses résultats avec des données d'environnements pour lesquels il n'y a pas d'ambiguïté dans le sens de transport des particules : plage soumise à l'action d'une dérive littorale et cours d'eau d'une rivière. Cette méthode verra son champs d'application élargi grâce à des études dans d'autres environnements : estuaire de la Severn et détroit de Bristol en Angleterre (McLaren *et al.*, 1993), transition estuaire-large en Chine (Gao et Collins, 1992), plage du détroit de Juan de Fuca au Canada (McLaren et Bowles, 1985), bancs côtiers de Belgique (De Maeyer et Wartel, 1988), corps marins sableux australiens (Harris *et al.*, 1990).

La méthode est encore en cours de discussion, de validation et de développement (Gao et Collins, 1992 ; Lanckneus *et al.*, 1992 ; Masselink, 1992 ; McLaren *et al.*, 1993).

Selon d'autres auteurs, le mode des représentations classiques log-normales des sédiments ne serait pas capable d'exprimer aussi bien les caractéristiques d'un sédiment que les fonctions hyperboliques. Ils préfèrent utiliser cette forme de représentation et calculer d'autres paramètres de distribution (Hartmann et Christiansen, 1992 ; Krank et Milligan, 1992). Ce mode de raisonnement appliqué au Middelkerke Bank conjointement avec les auteurs précédemment cités pourrait donner lieu à une interprétation du transit sédimentaire. Leur interprétation actuelle confirmerait dans ses grandes lignes les résultats de la rubrique suivante (5.2, et (Hartmann *et al.*, 1994)).

5.2 - Application de la méthode de McLaren : principes et limites

L'observation de nombreux échantillons en milieu naturel ou dans des bassins d'expérimentation montre que, lors de son transport, le sédiment résultant est mieux classé que le sédiment d'origine (McLaren, 1981). Considérant les paramètres de médiane (mean) et d'asymétrie (skewness) de la courbe de distribution d'un sédiment (voir chapitre I pour la définition des variables), quatre possibilités se présentent :

Un dépôt peut être relativement

1) plus fin	asymétrie plus négative	cas I (McLaren, 1981)
2) plus grossier	asymétrie plus négative	cas II
3) plus fin	asymétrie plus positive	cas IIIa
4) plus grossier	asymétrie plus positive	cas IIIb

que le sédiment source (Fig. II-16).

A la suite de ces premiers travaux, McLaren et Bowles (1985) restreignent les possibilités de filiation. Ils ne conservent que deux cas possibles, nommés B et C :

- Cas B : le dépôt est plus fin, mieux classé et possède une asymétrie plus négative. Ce cas est abrégé sous la forme FB- (Finer, Better sorted, more negatively skewed).

- Cas C : le dépôt est plus grossier, mieux classé et possède une asymétrie plus positive. Ce cas est abrégé sous la forme CB+ (Coarser, Better sorted, more positively skewed).

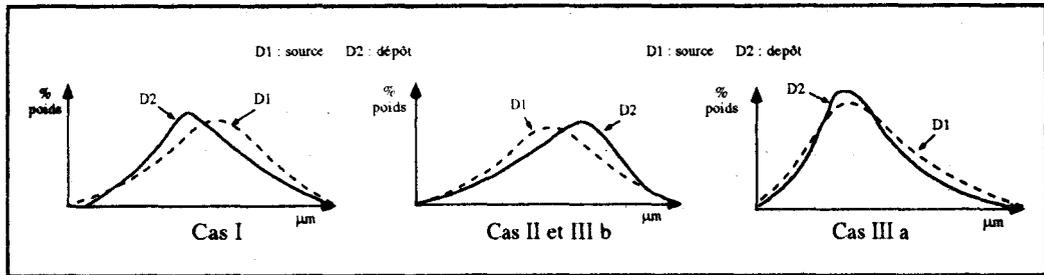


Figure II-16 - Courbes de distribution du sédiment source (D1) et dépôt (D2) et cas de transport correspondant. Les valeurs de taille croissent vers la droite.
 - Distribution of the source (D1) and deposit (D2) sediment and the related transport case. Size-values increase to the right.

Dans le cadre de notre étude, une démarche en cinq étapes a été suivie :

- Définition de classes de sédiments. Chacune des classes regroupe des sédiments dont les valeurs de médiane, asymétrie et classement sont voisines (De Maeyer et Wartel, 1988).
- Etude de la répartition des différentes classes à la surface du banc.
- Evaluation, d'après Mc Laren et Bowles (1985) des filiations possibles entre les classes de sédiment.
- Répartition superficielle des relations inter-sédiments
- Discussion des résultats.

5.2.1 - Définition de classes de sédiments

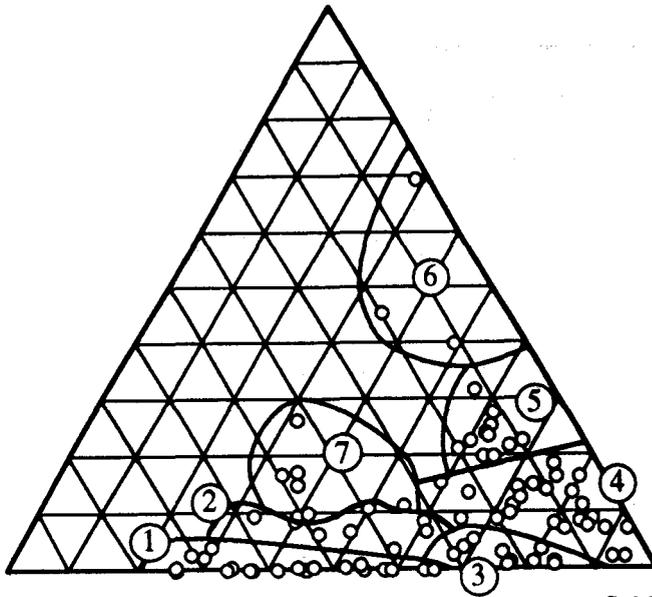
Une première approche consiste à comparer entre elles des classes de sédiments. Le problème consiste alors à définir des classes de sédiments significativement différentes.

En plaçant les sédiments de la première campagne de prélèvement sur le Middelkerke Bank dans un diagramme triangulaire (sable fin, sable moyen, sable grossier, Fig. II-17), et en comparant l'allure des courbes granulométriques (pente, bimodalité ..., fig. II-18), il est possible de distinguer sept types de sédiments (Tableau II-2)

classe class	nombre number	valeur moyenne de la médiane Mean (Med)		Classement moyen Sorting (So)	Asymétrie moyenne Skewness (Sk)	Mode			Pourcentage des fractions sableuses Sandy fractions (%)			CaCO ₃ %
		µm	Φ			Φ	Φ	µm	Φ	%	fin fine	
1	21	195	2,37	0,3	0,12	160-200	2,6-2,3	35-63	35-72	25-65	0-4	8-15
2	8	246	2,11	0,74	-0,35	160-200	2,6-2,3	30-40	31-56	32-60	7-11	12-29
3	10	270	1,98	0,44	0,03	250	2	30-40	15-29	65-83	1-5	8-15
4	22	339	1,63	0,57	-0,13	250-315	2-1,6	30-40	1-26	29-87	2-18	11-32
5	13	414	1,46	0,91	-0,27	250-315	2-1,6	20	9-25	55-66	13-31	20-33
6	3	770	0,73	1,12	-0,05	1000	0	10-20	2-17	26-47	38-66	30-47
7	7	335	1,90	1,06	-0,40	160	2,6	20-30	33-46	28-53	7-24	15-30

Tableau II-2 - Définition des sept classes de sédiment en fonction de la médiane, du classement, de l'asymétrie, du mode, des différentes fractions granulométriques et de la teneur en CaCO₃.
- *Definition of the seven sedimentary classes in function of the values of the mean, sorting, skewness, mode, granulometric fractions content and CaCO₃ content.*

Sable grossier



Sable fin

Sable moyen

Figure II-17 - Position des échantillons dans un diagramme sable fin, sable moyen, sable grossier et localisation de sept types sédimentaires

Sediments location on a fine sand, medium sand, coarse sand diagram. Location of the seven sedimentary types.

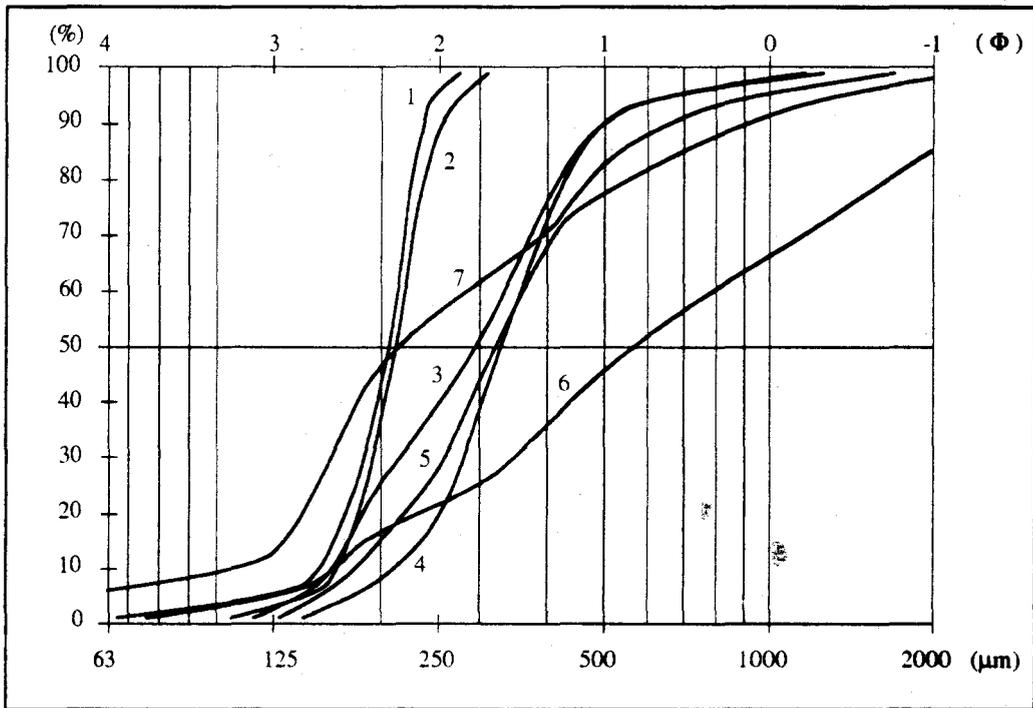


Figure II-18 - Courbes granulométriques typiques des sept classes de sédiments.
- *Typical grain-size curves for the seven classes.*

Les classes se répartissent sous forme de tâches assez bien définies sur le banc (Fig. II-19). Leur répartition suit la forme générale du banc. En particulier la classe 4 épouse la crête et forme une courbure dans la partie Sud, mimant la rotation de la crête du banc.

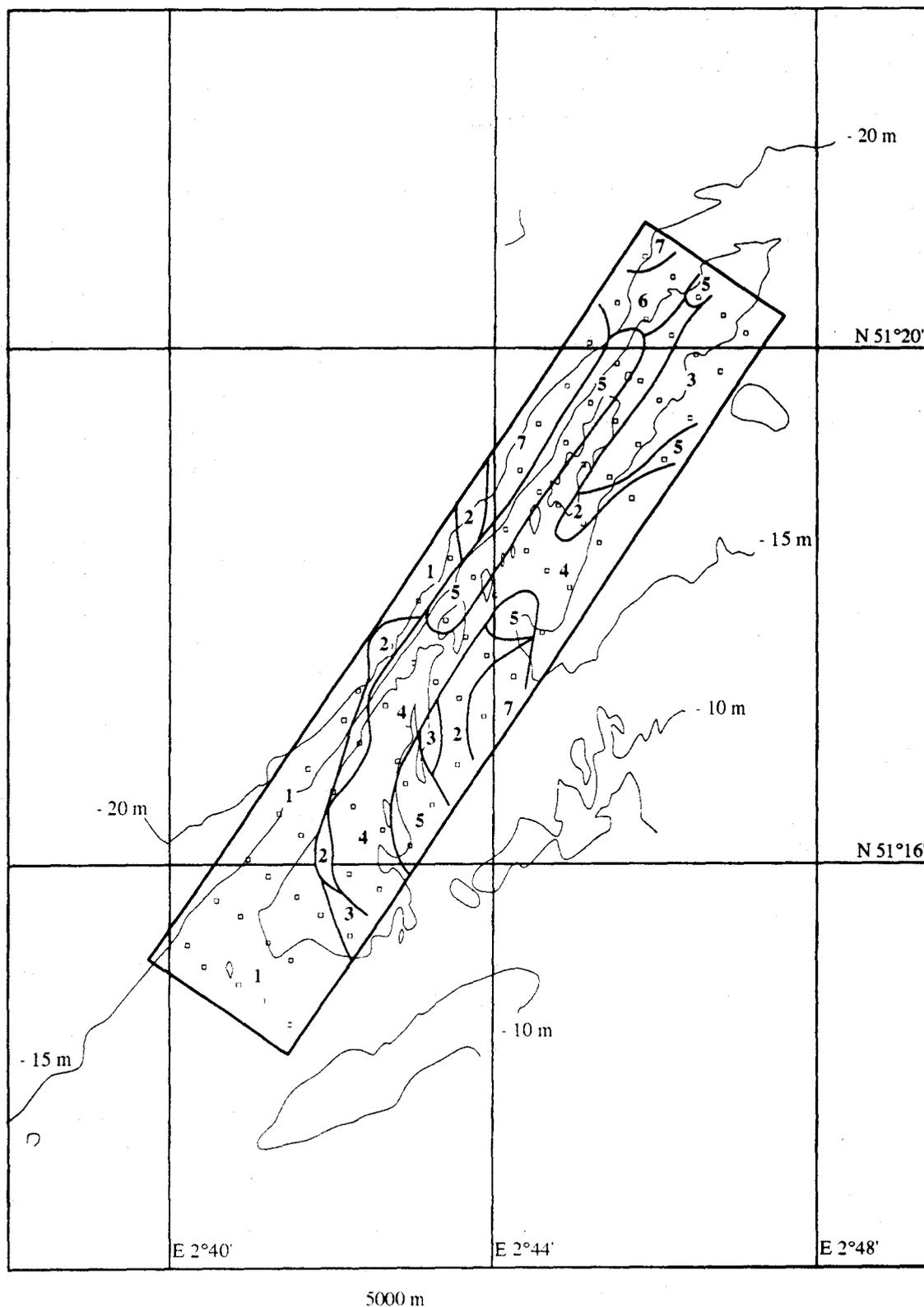


Figure II-19 - Répartition des différents types sédimentaires à la surface du banc.
 - Distribution of the sedimentary types on the bank.

5.2.2 - Filiations interclasses

Pour être comparées, les classes d'échantillons sont placées dans une matrice carrée avec pour chacune d'elle les valeurs des paramètres de médiane, classement et asymétrie qui les caractérisent (Tableau II-3).

		SOURCE SEDIMENTS																				
		1			2			3			4			5			6			7		
D E P O S I T S		2,37	0,30	0,12	2,11	0,74	-0,35	1,98	0,44	0,03	1,63	0,57	-0,13	1,46	0,91	-0,27	0,73	1,12	-0,05	1,90	1,06	-0,40
	1				F	B	+	F	B	+	F	B	+	F	B	+	F	B	+	F	B	+
	2	C	P					F	P		F	P		F	B		F	B		F	B	+
	3	C	P		C	B	+				F	B	+	F	B	+	F	B	+	F	B	+
	4	C	P		C	B	+	C	P					F	B	+	F	B		C	B	+
	5	C	P		C	P	+	C	P		C	P					F	B		C	B	+
	6	C	P		C	P	+	C	P		C	P	+	C	P	+				C	P	+
7	C	P		C	P		C	P		F	P		F	P		F	B					

Tableau II-3 - Comparaison entre les paramètres granulométriques pour les sept classes sédimentaires. Chaque classe est comparée avec les autres en prenant en compte successivement les paramètres suivants : la médiane (plus grande C, plus petite F), le classement (meilleur B, moins bon P) et l'asymétrie (plus positive +, plus négative -). Les cases entourées de lignes épaisses correspondent aux relations possibles : FB- ou CB+.

- Comparison between the granulometric parameters for the seven classes of sediments. Each class is compared with the other classes. Successively the mean grain-size (coarser C, finer F), the sorting index (better B, poorer P) and the skewness (more positive +, more negative -) are considered. The cells outlined by thick lines correspond to possible relations: FB- or CB+.

La synthèse des filiations possibles entre les échantillons est donnée par la figure II-20. Certaines relations ont été éliminées car elles correspondent à des sédiments qui ne sont jamais en contact. Par exemple, la classe 6 n'est jamais au contact avec la classe 3 alors qu'il était possible d'y voir une filiation.

Par la suite, les relations entre les types sont symbolisées par des vecteurs situés sur les contacts inter-types. Une orientation parallèle à l'allongement de l'ellipse de marée peut être considérée comme la direction dominante des transits sédimentaires. C'est pourquoi les vecteurs sont caractérisés par un point d'origine (la source), un point d'arrivée (le dépôt), une longueur (unitaire) et un sens (parallèle au grand axe de l'ellipse de marée quand cela est possible ; Fig. II-21).

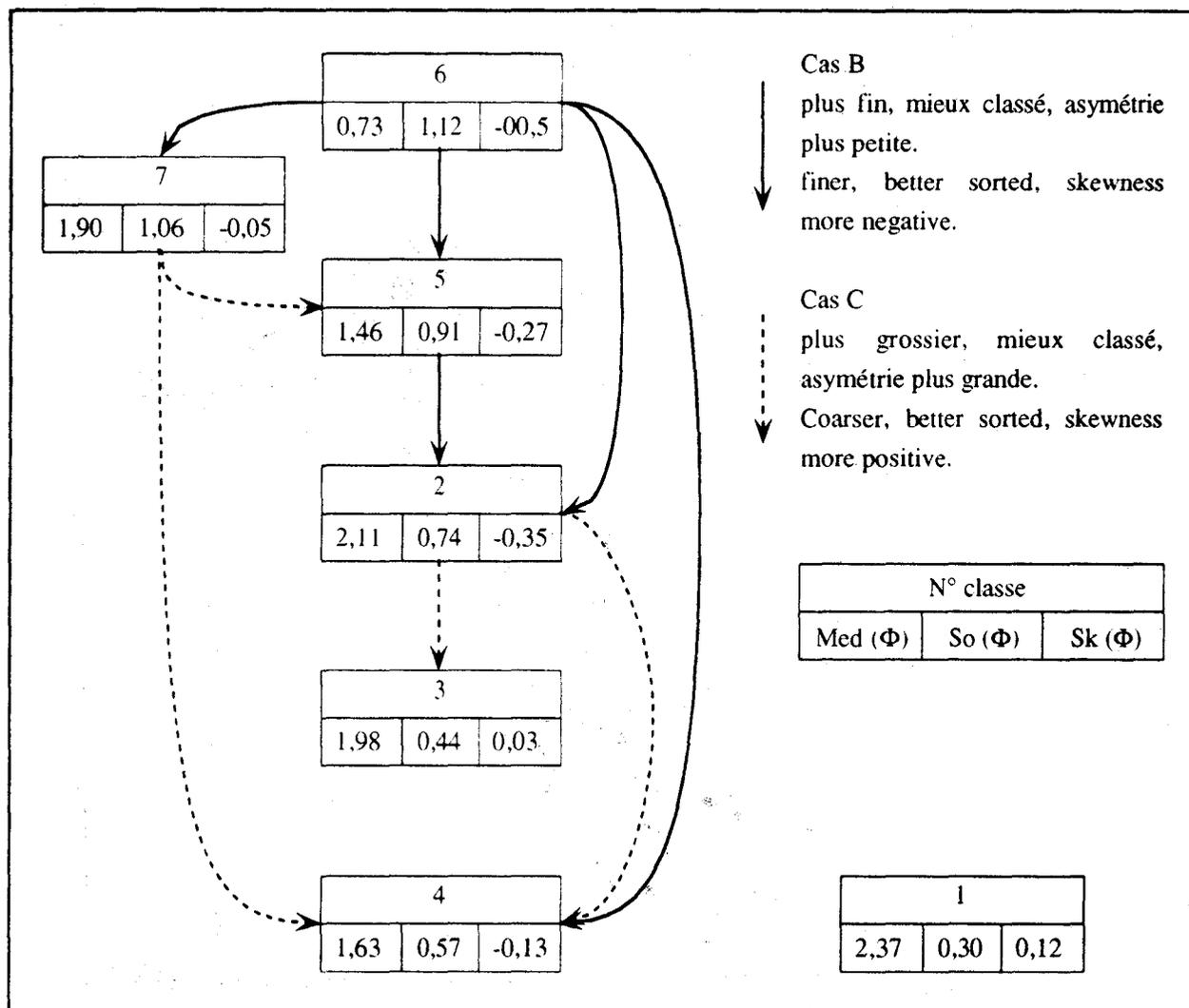


Figure II-20 - Filiations possibles (Source → dépôt) entre les différents types de sédiments.
- Possible relations (Source → deposit) between the sedimentary types.

A ce stade, encore préliminaire, les sens de transit sédimentaires ne doivent être considérés que comme des relations probables entre deux sédiments. Néanmoins, ces premiers résultats semblent montrer l'existence de deux types de transport :

- Un transport en direction de la crête du banc. Cette relation est le fait d'un transport de type C (CB+). Il correspond à l'accroissement de la taille du grain des sédiments en direction des zones hautes du banc, comme cela avait été démontré dans les rubriques précédentes.

- Un transport plus aléatoire. Ce type de transport correspond essentiellement au cas B (FB-). Il est observé au Nord à partir de la zone de sédiment de type 6, particulièrement grossier et mal classé ainsi qu'en d'autres zones réparties sur les flancs du banc.

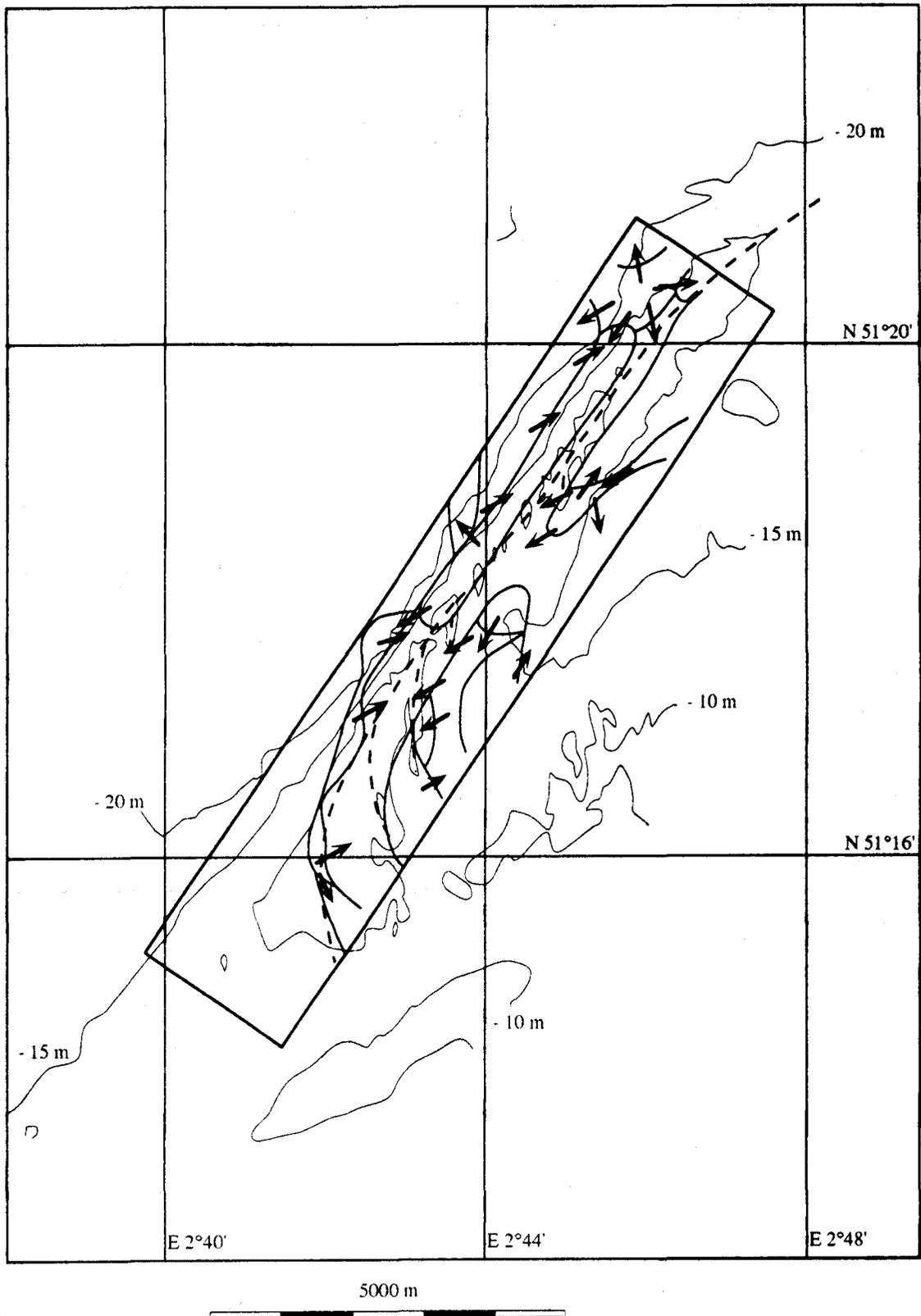


Figure II-21 - Directions possibles des transits sédimentaires déduites des relations entre les paramètres granulométriques des types de sédiments.
 - Possible sedimentary transit directions deduced from the relationship existing between the parameters of the sedimentary types.

5.2.3 - Conclusion

La méthode de McLaren est supposée fournir un sens possible de transit sédimentaire résiduel. Dans le cas du Middelkerke Bank, les résultats sont contrastés et indiquent à la fois une tendance préférentielle au déplacement des sédiments vers la crête et des zones au sein desquelles les directions sont plus dispersées. Cette dispersion pose le problème de la validité de la méthode de McLaren appliquée à un banc sableux tel que le Middelkerke Bank. Les directions dispersées ne peuvent pas être expliquées clairement. Elles créent un flou peut-être d'origine statistique autour des résultats de la méthode.

En règle générale, sur l'ensemble du banc, l'application de cette méthode montre une cohérence importante avec les modèles de circulation générale établis pour le Sud de la Mer du Nord qui indiquent un sens de transit général vers le Sud dans la zone des Bancs de Flandre (Johnson *et al.*, 1982 ; Stride *et al.*, 1982 e.g.). L'opposition décelée entre les deux flancs va dans le sens des travaux de (Kenyon *et al.*, 1981). De plus, les résultats obtenus dans notre étude contrastent avec ceux de Lanckneus *et al.* (1992) sur le banc voisin, Kwinte Bank, qui conduisaient à douter fortement de la validité de la méthode.

Le stade suivant de l'étude (ce chapitre, rubrique C) consiste à comparer ces premiers résultats avec ceux déduits de l'interprétation des images de sonar latéral.

6 - Analyse détaillée de la partie nord du banc

6.1 - Résultats

6.1.1 - Granularité

Les valeurs de la médiane calculée sur la fraction sableuse des sédiments, varient entre 205 μm (2.3 Φ) et 704 μm (0.52 Φ). Elles correspondent à des sables fins à grossiers (Fig. II-22). Ces valeurs sont cohérentes avec celles relevées lors des campagnes englobant tout le banc. Les sédiments les plus grossiers sont situés au NW de la crête topographique tandis que les plus fins sont au voisinage des deux chenaux adjacents : Uitdiep et Negenwaan. Les sédiments du premier chenal (au SE) sont plus fins que ceux du second.

6.1.2 - Teneurs en calcaire

Les teneurs en CaCO_3 varient entre 6,5 et 45,5 %, et sont également en accord avec les résultats des deux autres campagnes (Fig. II-23). En comparant les figures II-22 et II-23, il apparaît que, de même que sur la totalité du banc, les sédiments les plus grossiers sont les plus carbonatés sur la terminaison nord.

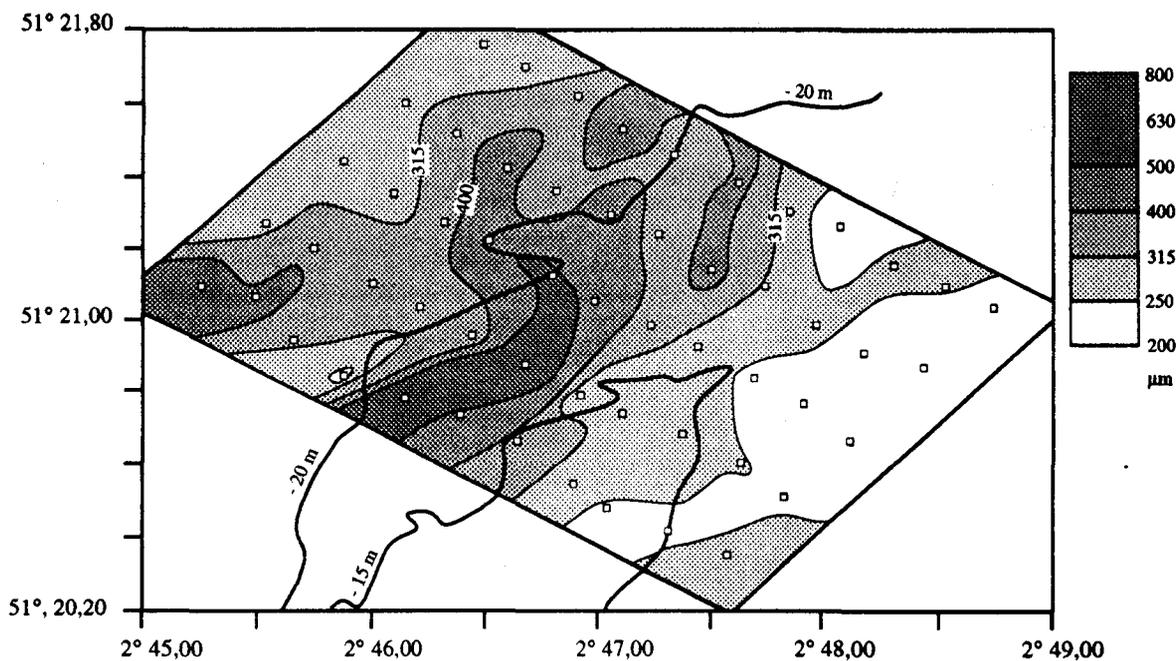


Figure II-22 - Répartition de la médiane à la terminaison nord du banc.
 - Distribution of the graphic mean at the northern end of the bank.

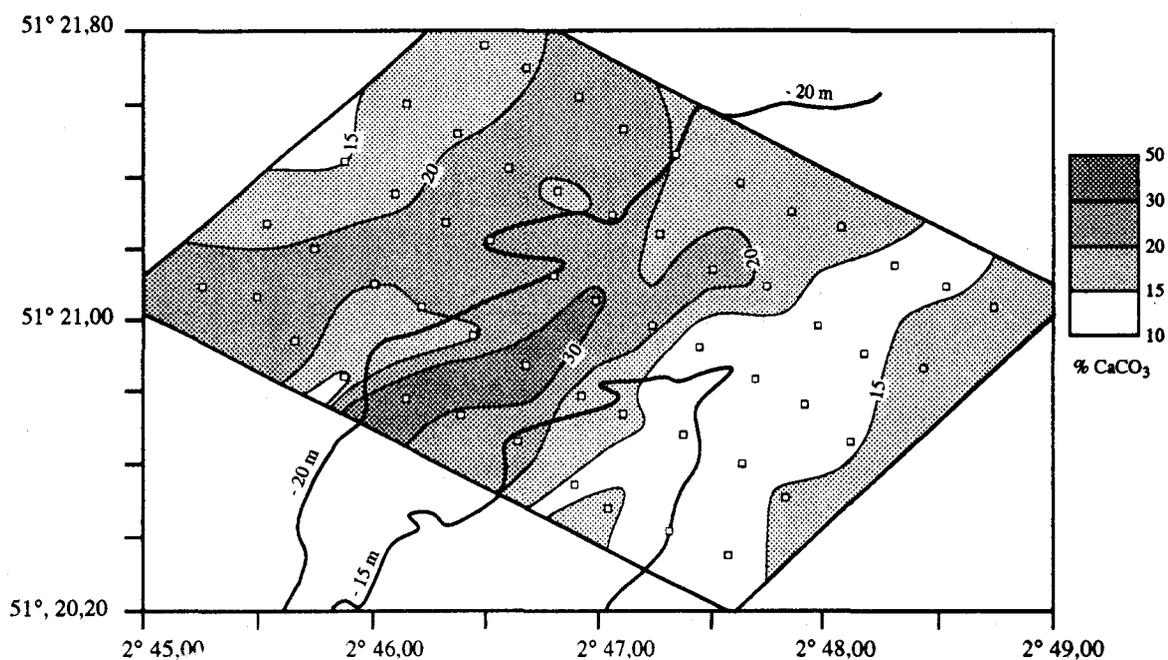


Figure II-23 - Répartition de la teneur en CaCO_3 à l'extrémité nord du banc.
 - Distribution of the CaCO_3 content at the northern end of the bank.

6.1.3 - Classement

Le classement mesuré à partir des valeurs mesurées en millimètres montrent des valeurs comprises entre 0,34 : sédiment très bien trié et 1,20 : sédiment très mal classé (Fig. II-24). De même que pour l'ensemble du banc, le classement est directement en relation avec les paramètres granulométriques de médiane et de teneur en CaCO_3 . Les sédiments plus grossiers, plus carbonatés et moins bien triés, sont observés au SW de la crête du banc.

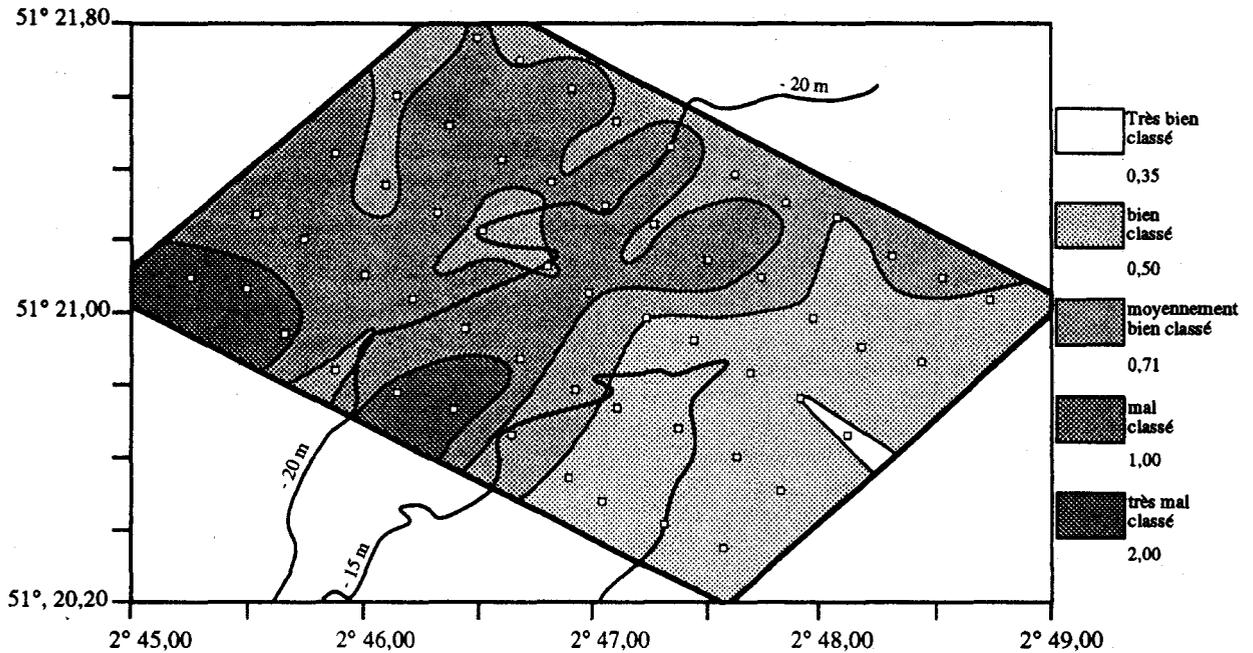


Figure II-24 - Répartition du classement à l'extrémité nord du banc.
 - Distribution of the sorting index at the northern end of the bank.

7 - Conclusion

Les résultats des différentes campagnes de prélèvement de sédiment superficiel font apparaître que deux facteurs influencent la répartition des sédiments et de leurs paramètres granulométriques.

- Il existe une relation nette entre grain moyen, teneur en CaCO_3 , classement et profondeur d'eau. Les principaux agents responsables de cette répartition sont les courants tidaux qui s'accroissent lorsque la tranche d'eau diminue. L'opposition flot/jusant sur chacun des flancs entraîne une asymétrie dans la répartition du sédiment au niveau des terminaisons du banc.

- L'action combinée des houles de tempêtes et des courants de marée peut fortement perturber l'équilibre "tidal" et remobiliser une quantité importante de sédiment.

Les tentatives de modélisation des transports sédimentaires à partir des données granulométriques indiquent une opposition entre les deux flancs du banc, et permettent de distinguer des zones de départ et d'arrivée de sédiment.

B - Morphologie des fonds marins

Le banc de Middelkerke constitue un relief sous-marin notable sur les cartes marines. Dans le détail, la surface de ce corps sédimentaire est façonnée par toute une série de figures de tailles diverses. Dans un premier temps reconnues sur les relevés bathymétriques ces figures ont fait l'objet d'une analyse détaillée grâce au sonar à balayage latéral.

1 - Classification

1.1 - Généralités

Les figures sédimentaires sableuses sont classées en trois grandes familles différenciées par leur orientation par rapport aux courants (Belderson *et al.*, 1982).

- Les structures transverses ont leur grand axe perpendiculaire au transport des particules : dunes et rides.
- Les structures longitudinales sont allongées parallèlement au transport des particules : rubans sableux, traînées sableuses et figures d'obstacles.
- Les autres structures sont intermédiaires entre les deux premières familles ou sont sans orientation privilégiée : tâches de sable.

Sur le Middelkerke Bank, seules les formes sédimentaires transverses ont été étudiées.

Avec la multiplication des études sédimentologiques dans les environnements récents, ces figures sédimentaires ont fait l'objet de toute une série de nomenclatures parfois ambiguës, voire contradictoires. A l'initiative de la SEPM (Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists), un grand nombre d'auteurs se sont mis d'accord sur des termes bien définis en anglais (Ashley, 1990) ou équivalents en français (Berné *et al.*, 1989). Les figures sédimentaires sont caractérisées par leur longueur d'onde et leur amplitude (Fig. II-25).

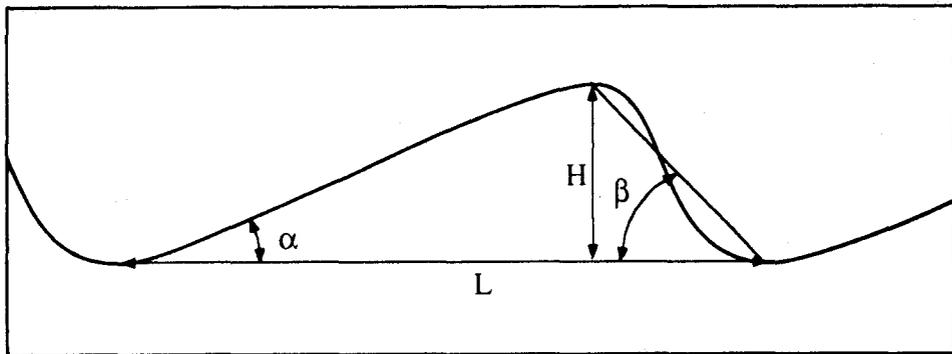


Figure II-25 - Caractéristiques géométriques d'une figure sédimentaire transverse. H : amplitude ; L : longueur d'onde ; α : pente du flanc doux ; β : pente du flanc raide.
 - Geometric characteristics of a transverse bedform. H : height ; L : wavelength ; α : stoss side angle ; β : lee side angle.

Seules les dunes hydrauliques sont visibles sur les sonogrammes. Parmi celles-ci, les plus petites ont une longueur d'onde mesurable tandis que leur amplitude est difficile à évaluer à cause de l'incertitude de mesure normale qui peut augmenter fortement à cause de la houle. Il s'agit des petites et moyennes dunes (PMD dans la suite du texte), souvent appelées mégarides, dont l'amplitude maximale est de 0,5 m. Pour les formes de plus grande taille, grandes dunes et très grandes dunes (GD dans la suite du texte), la longueur d'onde devient difficile à mesurer car elle peut changer d'une dune à la suivante. Elles sont donc caractérisées par leur amplitude (Tableau II-4). Pour lier l'amplitude et la longueur d'onde des dunes, la relation proposée par Flemming (1990) est utilisée : $H = 0,0677 \times L^{0,8098}$. Les GD ont souvent été nommées dunes sableuses (ou sandwaves en anglais), ridens dans le Nord de la France ou ridins en Mer Celtique (Bouysse *et al.*, 1976) tandis que les PMD correspondent aux formes fréquemment appelées mégarides.

Ashley, 1990	ripples	Subaqueous			dunes			
	L (m)	0,6	small	5	medium	10	large	100
H (m)	0,06		0,25		0,5		3	
Berné, 1989	rides	dunes,	petites	moyennes		grandes		très grandes

Tableau II-4 - Définition des figures sédimentaires transversales en fonction de leur amplitude et de leur longueur d'onde en mètres (Ashley, 1990 ; Berné *et al.*, 1989).
 - *Transverse bedform definitions according to their wavelength and amplitude in meters (Ashley, 1990 ; Berné et al., 1989).*

1.2 - Figures observées

1.2.1 - Figures sédimentaires naturelles

Les figures sédimentaires rencontrées sur le Middelkerke Bank sont essentiellement des formes transverses. Des formes longitudinales telles que les rubans sableux ne sont observées que sur des zones très réduites. Les sonogrammes présentent tous les types de dunes, depuis les petites jusqu'aux très grandes. L'existence de rides superposées aux dunes est probable mais leur trop petite taille fait qu'elles ne sont pas décelables sur les enregistrements. Pour les dunes moyennes, la longueur d'onde maximale mesurée est décimétrique. Pour les très grandes dunes, l'amplitude maximale mesurée est de 5 m.

Très fréquemment, il y a superposition des figures. Les PMD tapissent les flancs des GD (Fig. II-26). De plus, même si la longueur d'onde est une variable souvent difficile à apprécier, le banc montre sur ses flancs un passage progressif depuis les petites jusqu'aux très grandes dunes en passant des chenaux à la crête. Bien qu'elles aient été décrites par Lanckneus et DeMoor (1993) dans le cadre de notre projet, aucune dune symétrique n'a pu être observée sur les sonogrammes.

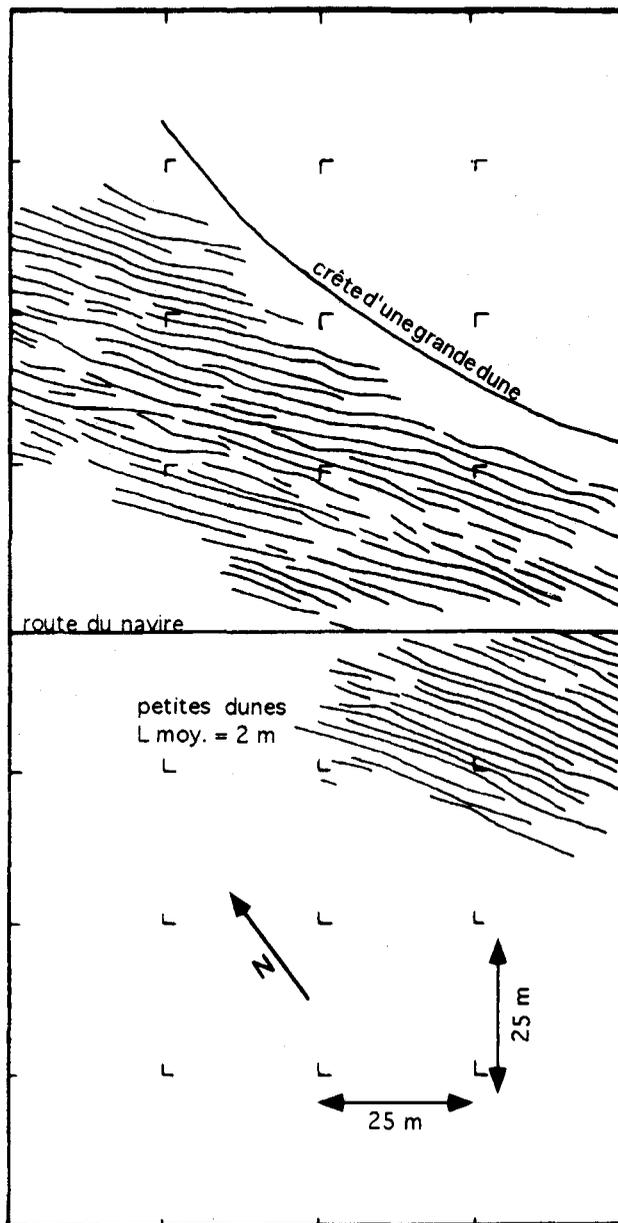
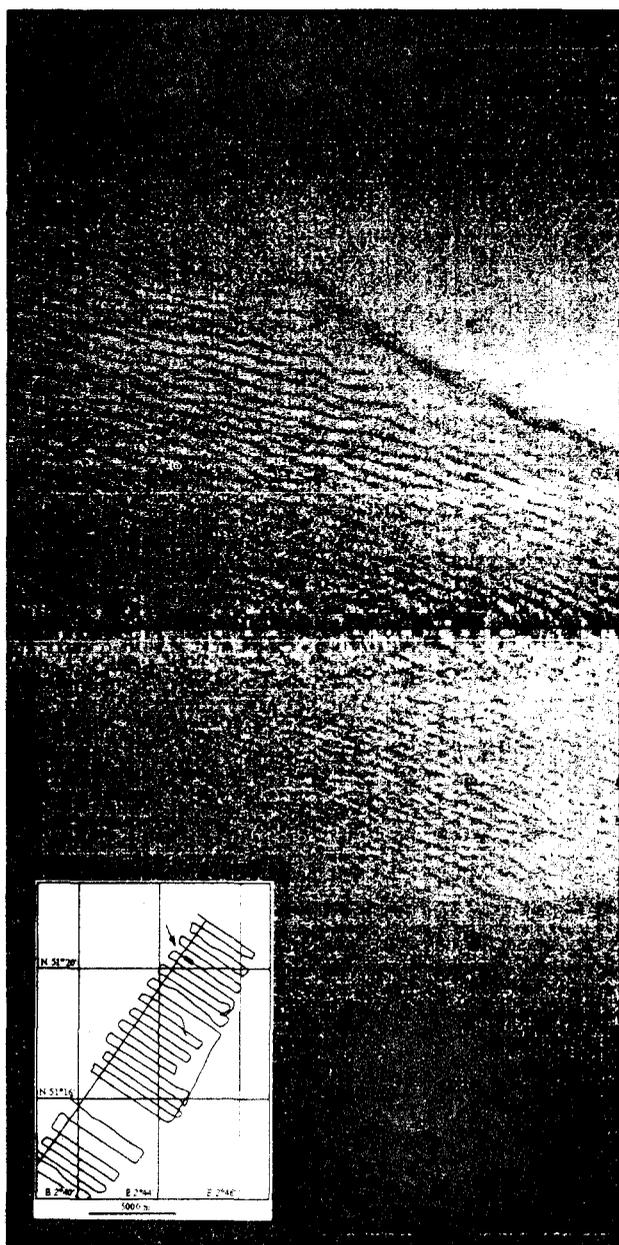
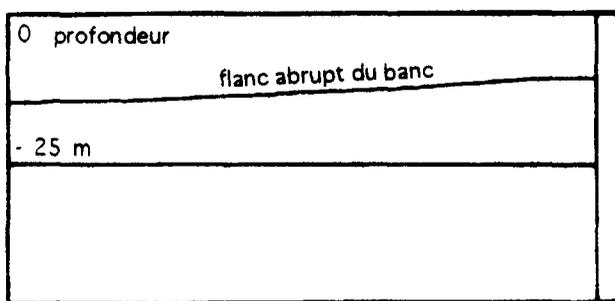
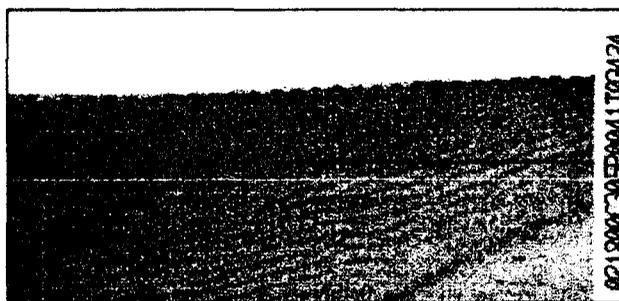


Figure II-26 - Exemple de superposition de dunes d'amplitudes différentes. Profil N°41, mission SANBA.
 - Example of dunes superimposition. Profile 41, SANBA survey.

La forme des crêtes est généralement rectiligne sur la largeur d'un sonogramme. Dans certains cas toutefois, cette crête est sinueuse et correspond à des formes en trois dimensions dites 3D dans la zone de la mosaïque. Elles correspondent au type "subrectiligne et anastomosé" (Berné, 1991).

1.2.2 - Figures artificielles

Bien que le Middelkerke Bank soit une zone où la pêche et le dragage sont interdits, il est possible d'observer des traces de chalutage et de dragage. Ces traces sont peu fréquentes et concernent essentiellement les chenaux pour les chalutages et un secteur limité à l'extrémité nord pour les dragage.

Dans le Negenvaam, une épave de 70 m de long a pu être reconnue. Il s'agit d'un navire anglais du début du siècle, le Waverley, coulé le 29 Mai 1940 par les allemands.

La partie sud du banc appartient à une zone d'exercices de l'armée belge. C'est donc à une trace d'impact d'engin explosif que nous attribuons l'origine de la figure II-27. L'impact a un rayon d'une quinzaine de mètres ; sa profondeur mesurée au point de passage du bateau est d'au moins 1,5 m. L'orientation du panache (N 245) correspond à un courant de jusant lors de l'épandage.

2 - Répartition des dunes à la surface du banc

2.1 - Localisation

La couverture totale du banc a été effectuée au sonar à balayage latéral par nos partenaires du projet RESECUSED (De Moor et Lanckneus, 1991). De plus, lors de la première campagne "Belgica", en Mai 1991, l'Ifremer a effectué une série de profils qui permettent d'avoir une bonne idée de la répartition des figures sédimentaires du banc. La mission s'étant déroulée par mauvais temps, la largeur utile des sonogrammes était souvent réduite à 50 m. De ce fait, seulement 10 à 20% de la totalité du banc ont été étudiés.

L'examen de ces sonogrammes permet de distinguer deux zones :

- Des zones sans dune : il s'agit essentiellement des chenaux;
- Des zones ornées à la fois de PMD et GD : il s'agit du haut des flancs et du sommet du banc, ainsi que du haut des chenaux à l'extrémité nord du banc. La limite entre les deux zones est assez nette sur le flanc NW du banc et correspond à l'isobathe - 12 m. Sur le flanc SE, cette limite est moins bien marquée.

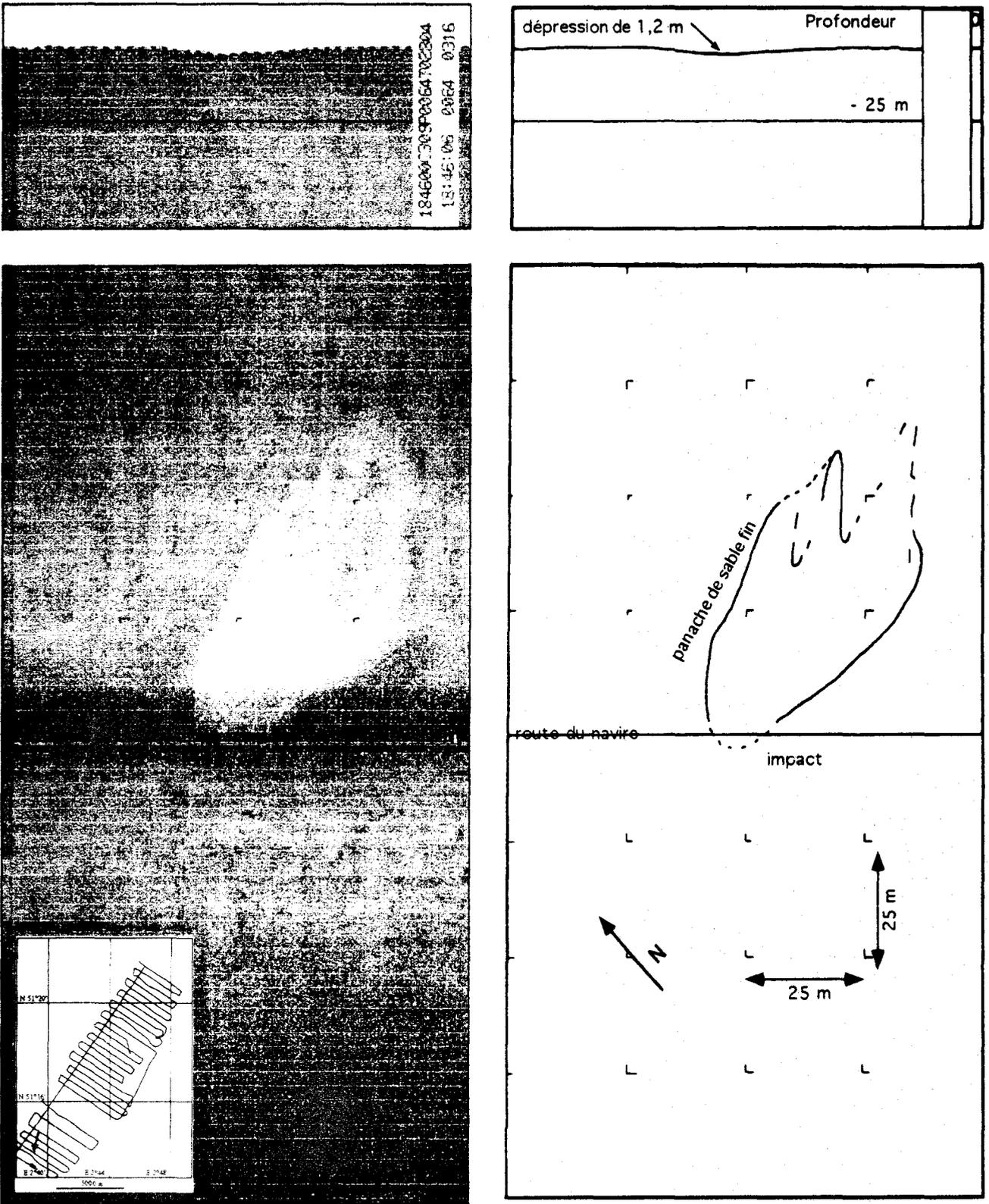


Figure II-27 - Trace d'impact d'un engin explosif pendant le jusant : panache vers l'WSW. Profil N°64, mission Belgica, Mai 1991.
 - Impact mark of a submarine explosion during the ebb : plume toward the WSW. Profile 64, BELGICA survey, May 1991.

2.2 - Direction des crêtes des dunes

La direction des crêtes et le flanc raide des dunes ont été reportés sur la figure II-28. Ce qui apparaît immédiatement est l'opposition entre les deux flancs du banc. Le flanc NW se caractérise par des figures orientées dans le quadrant NE et le flanc SE, par des figures orientées dans le quadrant SW. Cette opposition est valable pour les dunes de toutes tailles. Plusieurs types de rotation dans la direction des dunes sont également observables.

- En montant vers le sommet du banc, les crêtes des dunes tendent vers une direction plus parallèle à l'allongement du banc (voir la partie SW du banc). Cette rotation des dunes s'accompagne d'une augmentation de leur longueur d'onde et de leur amplitude. Depuis les chenaux vers la crête le passage, qui est progressif, se fait depuis un champ de petites dunes jusqu'à une succession de grandes ou très grandes dunes.

- Dans la partie Nord, les grandes dunes subissent une rotation de près de 90° dans le sens horaire en suivant la terminaison du banc, pour devenir approximativement parallèles entre elles dans la zone de la mosaïque.

L'amplitude et l'asymétrie des PMD sont souvent difficiles à mesurer sur les sonogrammes et sur les profils bathymétriques. Cependant, des observations répétées ont montré que si l'asymétrie des PMD peut varier au cours de l'année (Lanckneus *et al.*, 1993), elle ne s'inverse pas au cours d'un cycle de marée (Lanckneus, comm. pers.).

3 - Classes de dunes

L'observation globale du banc indique l'existence de zones dans lesquelles les dunes ont des caractéristiques comparables. Afin d'étudier plus précisément l'orientation de ces dunes, le banc a été divisé en six ensembles appelés "boîtes" (Fig. II-29).

- La boîte 1 concerne la partie nord du banc.
- La boîte 2 est située directement au Sud de la boîte 1.
- La boîte 3 est limitée au SE par la crête du banc.
- La boîte 4 est située au SE de la boîte 3.
- La boîte 5 est limitée par la crête du banc et concerne la partie sud du flanc le plus abrupt.
- La boîte 6 est située sur le flanc doux du banc, dans une zone relativement plane.

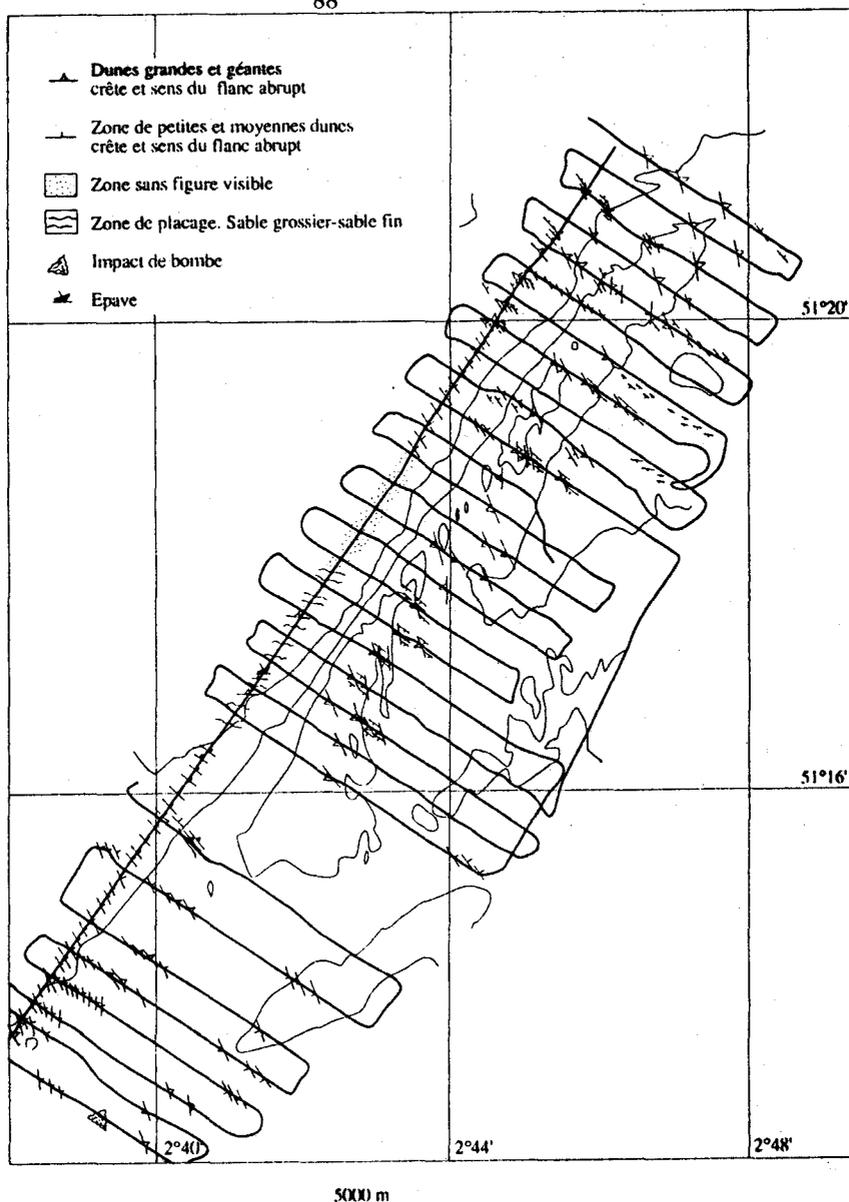


Figure II-28 - Orientation des dunes et indication de leur flanc raide (pointe des triangles). La position des symboles des dunes n'indique pas une figure sédimentaire mais un groupe de dunes aux mêmes caractéristiques. Mission BELGICA, Mai 1991.

- Dunes orientations. The triangles indicate the direction of the steep slope. The location of the dunes symbols does not correspond to a single bedform but to a group of dunes with the same characteristics. BELGICA cruise, May 1991.

Les sonogrammes relatifs aux boîtes 3 et 6 ne montrent que très peu de figures sédimentaires. De ce fait, aucun calcul de direction n'a été entrepris sur ces boîtes.

Les dunes ont été séparées en deux familles distinctes qui coexistent souvent : les petites et moyennes dunes d'une part, les grandes et très grandes dunes d'autre part. Cette distinction correspond à la différence entre mégarides et vagues de sable. Le tableau II-5 indique pour chaque boîte le nombre de figures mesurées, la valeur moyenne de l'azimut du flanc raide des dunes ainsi que l'écart type (σ).

boîte	grandes et très grandes dunes			petites et moyennes dunes			obliquité
	Nb	azimut	σ	Nb	azimut	σ	
1	21	68	22	38	57	10	11
2	12	254	11	11	229	8	25
3	1	-	-	9	-	-	-
4	19	253	11	19	235	7	18
5	8	61	12	29	61	12	1
6	7	-	-	8	-	-	-

Tableau II-5 - Valeur de l'azimut des dunes sur les différentes parties du banc. Pour les deux classes de dunes (PMD et GD) sont reportés le nombre de mesures (Nb), l'azimut moyen et l'écart type (σ) qui donne une idée de la dispersion des azimuts dans la boîte. La dernière colonne indique la différence d'orientation entre les deux classes de figures. Les valeurs d'azimut, d'écart type et d'obliquité sont en degrés.

- *Dunes directions on the different parts of the bank. Nb the number of measures, azimut the mean azimut, σ the standard deviation are considered. The last column gives the angular shift between the two classes. Values are in degrees.*

4 - Obliquité des figures entre elles.

Dans trois des 6 boîtes (1, 2 et 4), l'obliquité entre la direction des mégarides et celle des vagues de sable varie entre 11 et 25°. La figure II-29 rend compte de cette obliquité ainsi que de l'opposition existant entre les deux flancs du banc.

Les PMD sont situées sur le flanc doux des GD. Elles ne sont donc pas développées à l'abri de l'obstacle au courant constitué par les GD. Malikides *et al.* (1989) avaient en effet montré que dans ce cas, les plus grandes dunes influençaient fortement l'orientation des plus petites. Les deux types de figures étant de taille différentes, il est probable, qu'elles soient les réponses à des processus d'échelles différentes. Les plus grandes figures sont les indicatrices des processus à plus long terme.

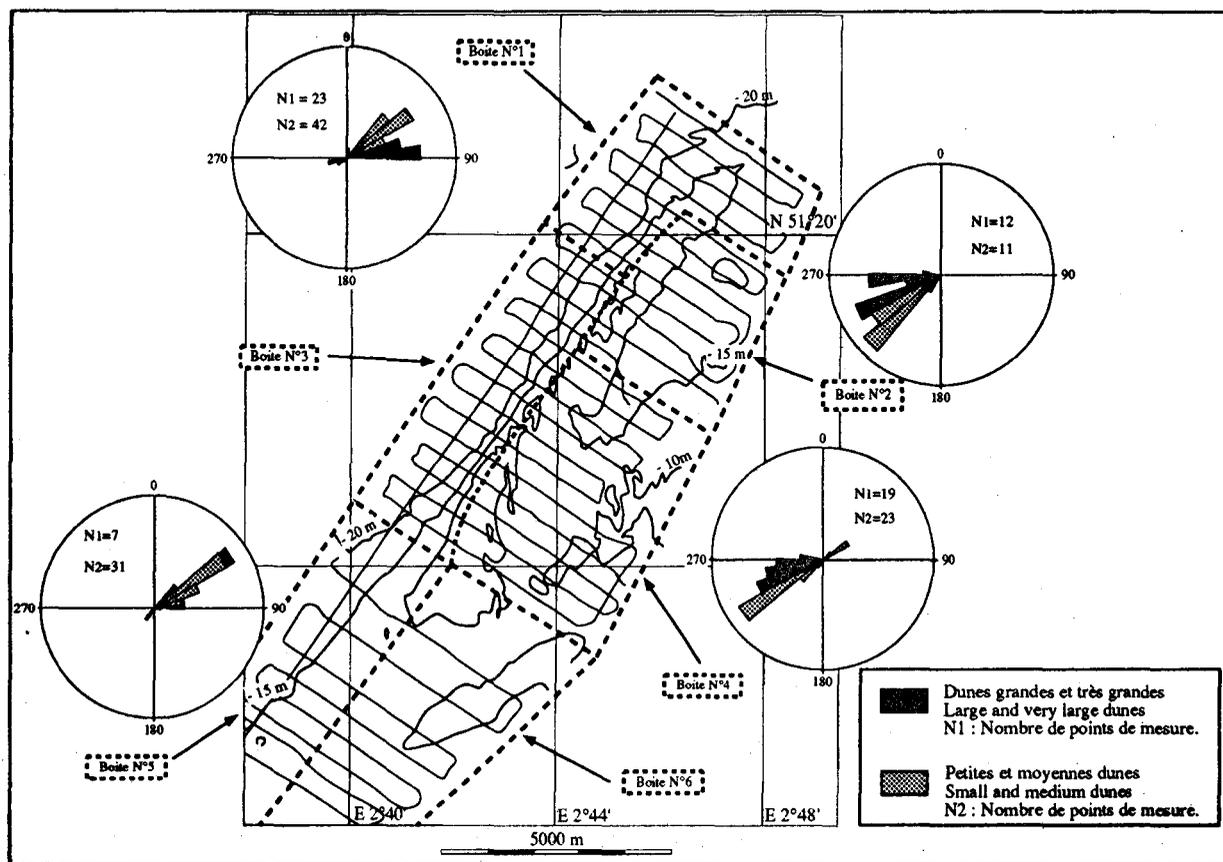


Figure II-29 - Localisation des six boîtes. Directions de progradation des dunes déduites de leur asymétrie en fonction de leur localisation sur le banc.

- Location of the six "boxes" containing small to very large dunes. For all boxes the supposed progradation direction of the dunes deduced from their asymmetry is plotted. Notice the opposition existing between small-medium and large-very large dunes and the difference marking the two flanks of the bank.

5 - Étude détaillée de la terminaison septentrionale du banc

Les plus grandes dunes sont observables à la terminaison nord du Middelkerke Bank. Pour cette raison, ce secteur du banc a été choisi comme zone-atelier à haute résolution ce qui a conduit à la confection d'une mosaïque d'images sonar latéral. Les résultats d'une première campagne effectuée en Mai 1991 indiquent une zone très dynamique. Elle a donc fait l'objet d'une seconde campagne en Juillet 1992. La comparaison de ces deux campagnes ainsi que la confrontation avec des résultats de granulométrie des sédiments superficiels (Voir la rubrique A-6) sont des voies possibles pour reconnaître la dynamique sédimentaire de la terminaison d'un banc.

5.1 - Mosaïque du 6 Mai 1991

La mosaïque (Fig. II-31) présente les deux types de figures citées précédemment : PMD et GD.

- Les PMD sont généralement des formes droites ou faiblement sinueuses. Elles correspondent au type "subrectiligne et anastomosé" (Berné, 1991). Leur extension latérale peut dépasser 30 m et leur longueur d'onde varie entre 5 et 27 m. Les PMD sont présentes sur toute la mosaïque : flancs et sommet du banc, chenaux adjacents. Sur le flanc doux des GD, la longueur d'onde des PMD augmente en direction de la crête. Sur le flanc raide, elles sont présentes ou absentes. Le changement dans la longueur d'onde est le signe de l'influence de la morphologie des grandes dunes sur celle des plus petites. Cependant, cette influence est marquée dans la longueur d'onde et non pas dans l'orientation des dunes. Cela est particulièrement bien visible dans la partie SW de la mosaïque (figure II-30). Compte tenu du mauvais temps et de l'incertitude des mesures, il n'a pas été possible de trouver une relation entre l'amplitude des PMD et leur position sur les GD.

- Les GD n'existent quasiment pas dans les chenaux. Sur le banc, elles sont rectilignes mais leur crête peut être interrompue. Elles ont une grande extension latérale, parfois supérieure à 2 km. Leur longueur d'onde varie entre 100 et 250 m pour une amplitude de 1 à 5 m. La figure II-32 constitue une représentation interprétative de la mosaïque sur laquelle ont été reportées la position des crêtes des GD et les isobathes. Il est possible d'identifier 15 grandes dunes avec pour chacune d'elles un relais longitudinal des crêtes. D'Ouest en Est, l'amplitude et la longueur d'onde des dunes diminuent, puis réaugmentent après le passage de la crête du banc. Il y a donc une relation entre la position des dunes, leur amplitude et leur profondeur. Cela a également été observé en baie de Fundy (Dalrymple *et al.*, 1978) ou en baie de San Francisco (Rubin et McCulloch, 1980). Intervient également une influence du facteur de taille de sédiment sur les caractéristiques des dunes. L'étude conjointe de ces divers paramètres sera entreprise dans la rubrique II-C.

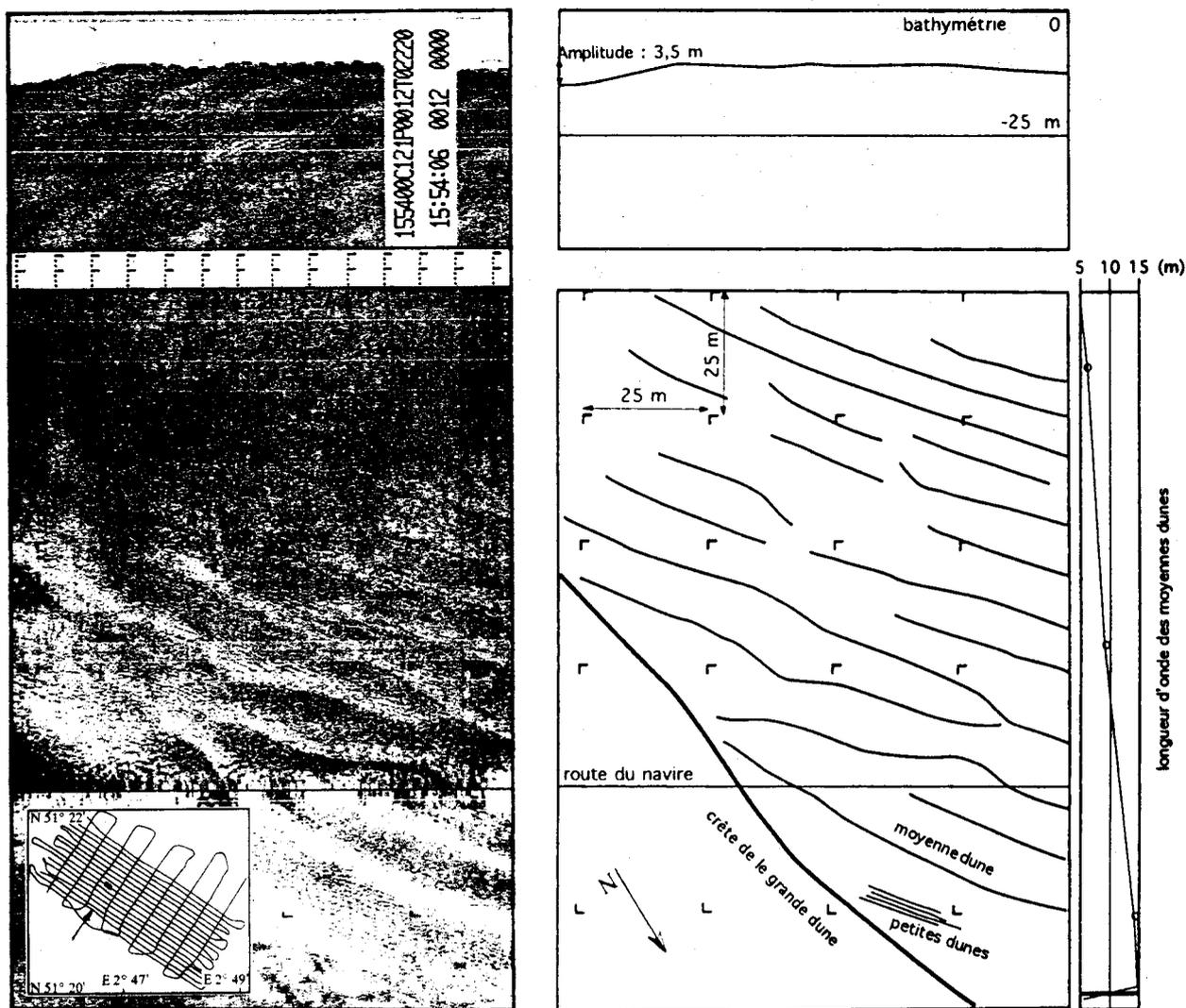


Figure II-30 - a) Exemple de sonogramme montrant l'évolution de la longueur d'onde des PMD en fonction de leur position sur les GD. b) Interprétation de l'image. Profil N°12, mission SANBA.
 - a) Example of a sonogram showing the wavelength evolution of small and medium dunes according to their location on the large dunes. b) Side-scan sonar picture interpretation. Profile 12, SANBA survey.

5.2 - Mosaïque du 2 Juillet 1992

Les figures sédimentaires observées en Juillet 1992 sont de même type que celles relevées en Mai 1991.

- Les PMD sont de type subrectiligne et anastomosé.

- Les GD sont au nombre de 15, comme en Mai 1991. Elles sont subrectilignes et anastomosées. Leur amplitude maximale est de 5 m.

Les figures II-33 et II-34 donnent respectivement l'image et l'interprétation de cette mosaïque.

-
- Légendes des figures des quatre pages suivantes
 - *Figure caption for the next four pages*

- Figure II-31** - Mosaïque sonar de l'extrémité nord du Middelkerke Bank, traitée par le logiciel "TRIAS". Etat du 6 Mai 1991. La crête des dunes apparaît en clair, essentiellement à cause de la faible distance existant entre le poisson du sonar et la crête des dunes. La zone située en aval du flanc raide est constituée d'un sédiment plus grossier, plus rétrodiffusant et apparaît en sombre. Mission BELGICA.
 - *Side-scan sonar mosaic of the northern end of the Middelkerke Bank, May 6, 1991. "TRIAS" processing. The dune crests appear in light grey essentially due to the short distance between the sonar and the dune. The area located at the bottom of the lee-side is composed by a coarser, more retrodiffusing sediment, and therefore is darker. BELGICA survey.*
- Figure II-32** - Interprétation de la mosaïque sonar en Mai 1991. Les traits épais représentent les crêtes des dunes et leur polarité. La bathymétrie a été calculée par des méthodes géostatistiques à partir des profils. Elle a ensuite été interprétée en fonction de la position des grandes dunes. La crête des petites et moyennes dunes n'est pas représentée. Mission BELGICA.
 - *Side-scan sonar mosaic interpretation, May 6, 1991. Heavy lines indicate the dune crests and their lee-side. The bathymetric map has been calculated by geostatistical methods from the profile data. It has been further interpreted according to the location of the large dunes. The small and medium dune crests are not located. BELGICA survey.*
- Figure II-33** - Mosaïque sonar de l'extrémité nord du Middelkerke Bank, traitée par le logiciel "TRIAS". Etat du 2 Juillet 1992. Les chiffres indiquent l'amplitude des dunes en mètres. Mission SANBA.
 - *Side-scan sonar mosaic of the northern end of the Middelkerke Bank, July 2, 1992. "TRIAS" processing. The numbers indicate the dune-height measured in meters. SANBA cruise.*
- Figure II-34** - Interprétation de la mosaïque sonar en Juillet 1992. Les traits épais représentent les crêtes des dunes et leur polarité. Les valeurs indiquent l'amplitude des dunes en mètres. Les crêtes des petites et moyennes dunes ne sont pas représentées. Mission SANBA.
 - *Side-scan sonar mosaic interpretation, July 2, 1992. Heavy lines indicate the dunes crests and their lee-side. The values indicate the dune-height measured in meters. The small and medium dune crests are not indicated. SANBA cruise.*

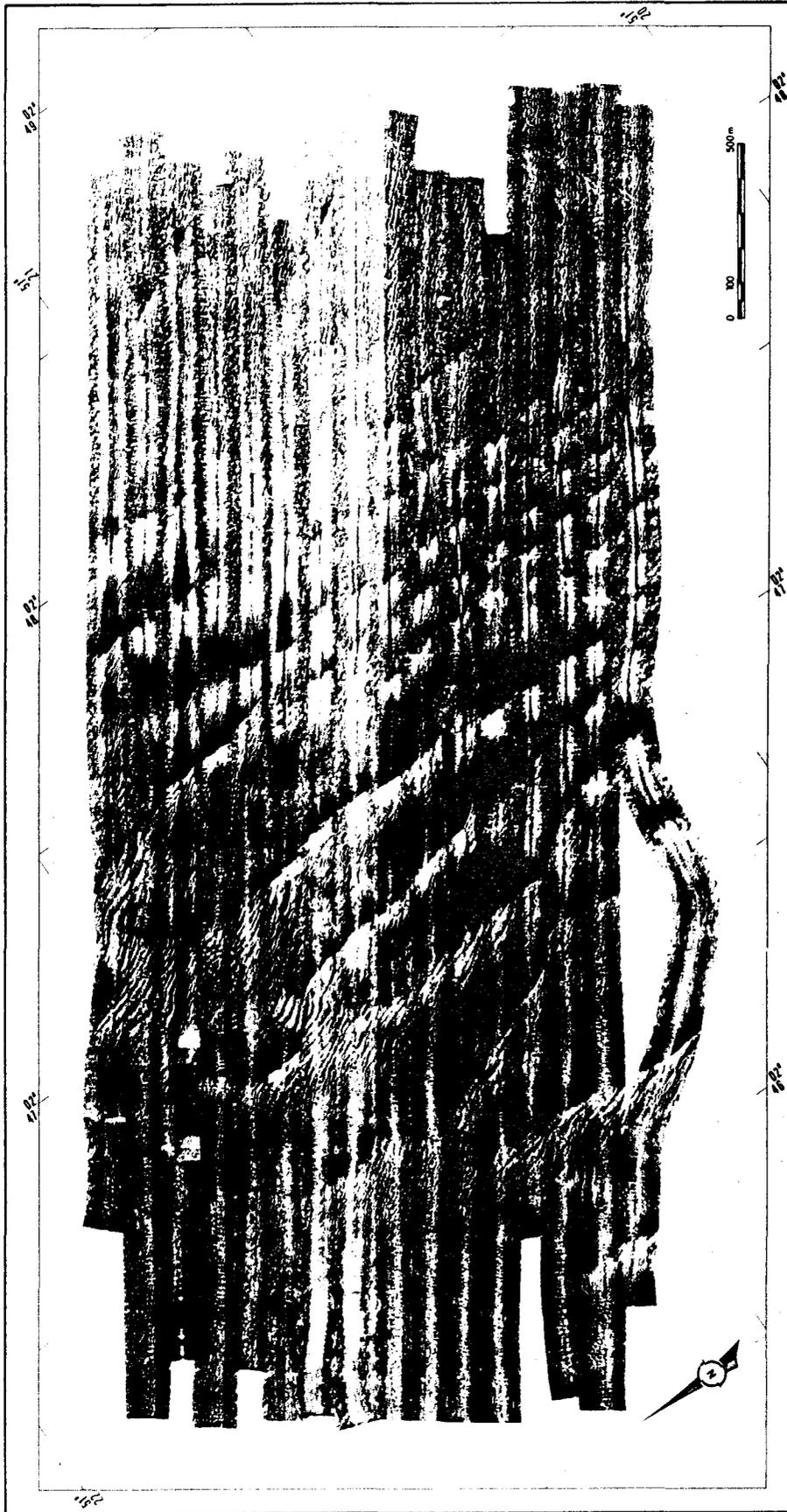


Figure II-31 : 06/05/1991

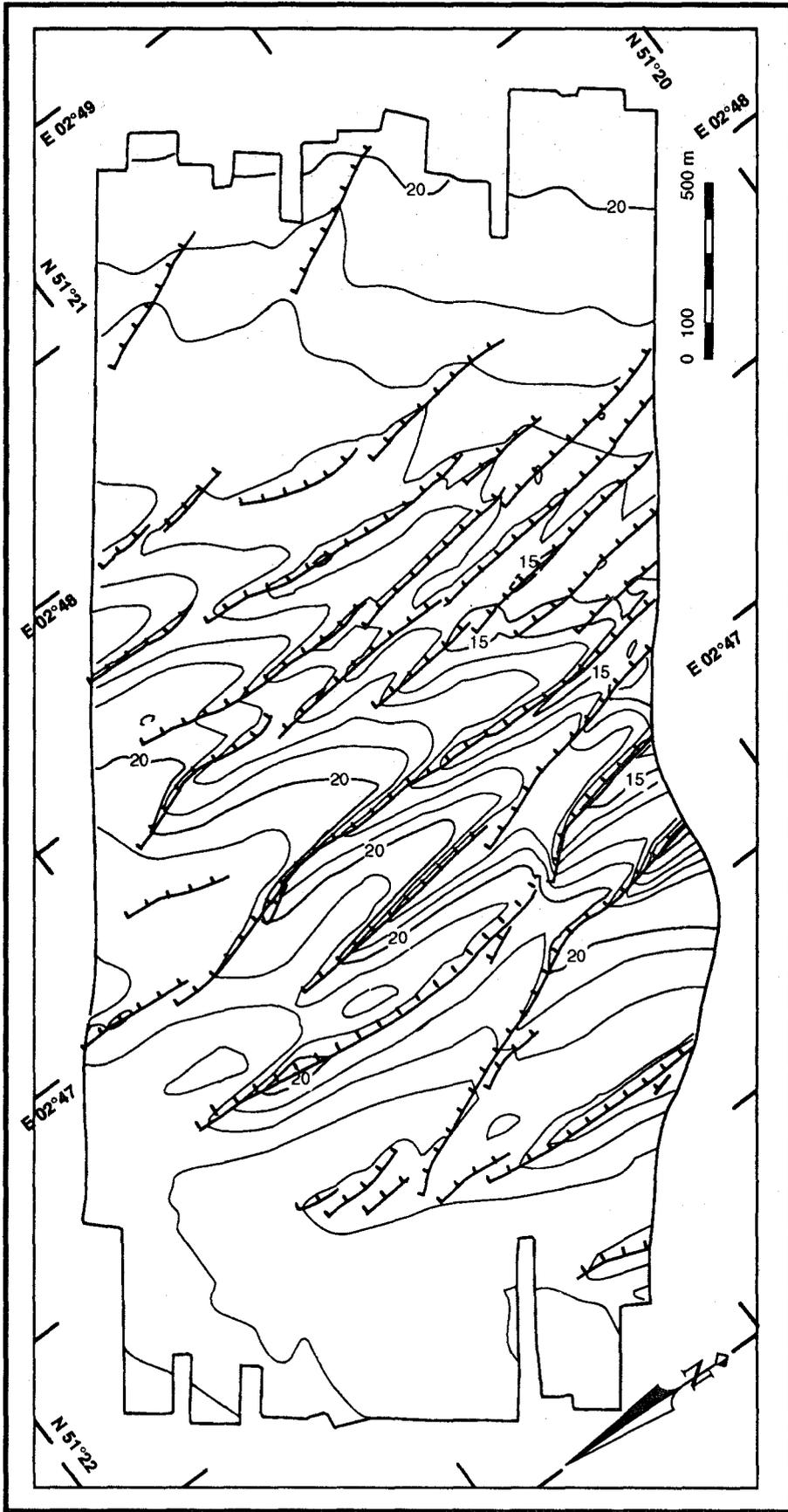


Figure II-32 : 06/05/1991

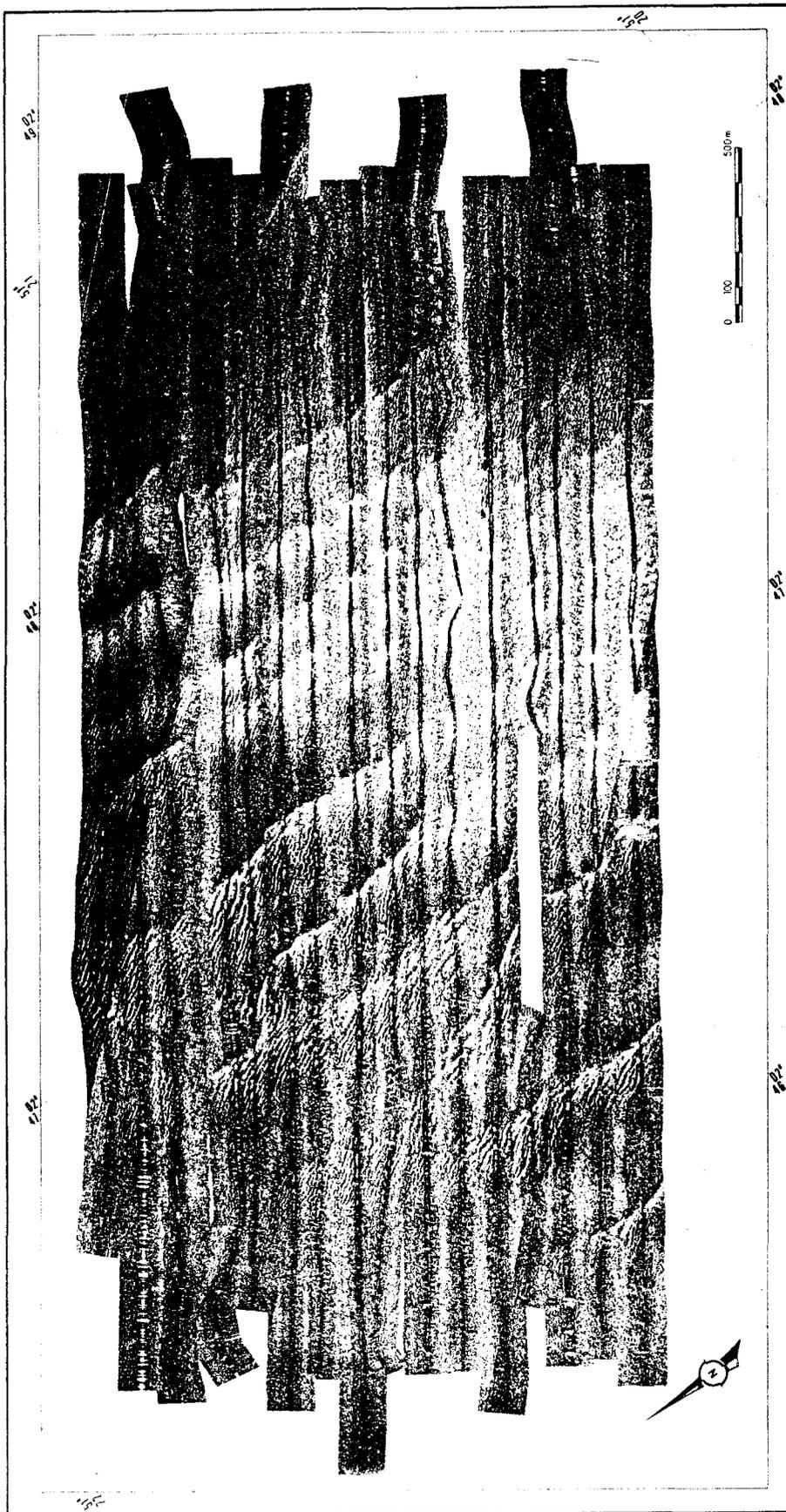


Figure II-33 : 02/07/1992

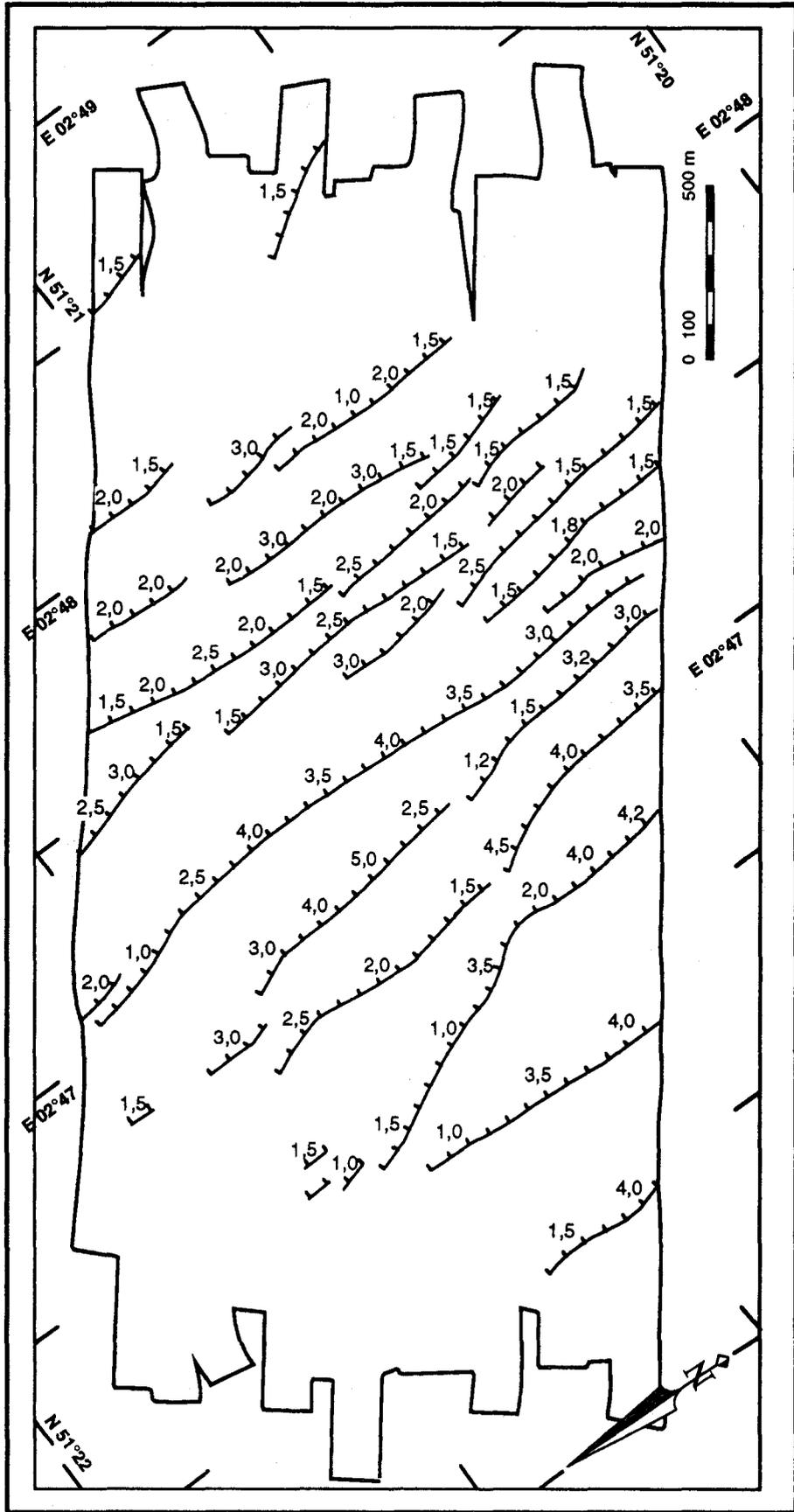


Figure II-34 : 02/07/1992

5.3 - Etude comparative des deux mosaïques

La comparaison entre les deux mosaïques, celle de Mai 1991 et celle de Juillet 1992, a été rendue possible grâce à l'utilisation de moyens identiques de positionnement. La figure II-35 rend compte de cette comparaison et des déplacements observés entre les deux campagnes.

5.3.1 - Similitudes

Aux nuances de gris près, les deux images montrent la superposition de deux familles de corps sédimentaires qui sont 1) les petites et moyennes dunes elles même disposées sur 2) les grandes et très grandes dunes. Pour les deux campagnes, les caractéristiques géométriques de ces dunes sont voisines :

- Pour les GD : - amplitude maximale 5 m,

- longueur d'onde comprise entre 75 et 250 m,

- extension latérale maximale supérieure à 2 km,

- forme et positions relatives conservées, en particulier celles des dunes arquées au SW.

- Pour les PMD, des similitudes importantes sont également observées dans l'orientation, la forme et la longueur d'onde.

Le résultat des traitements donne des teintes différentes pour les deux campagnes. Cette différence n'indique pas une modification généralisée de la distribution granulométrique mais est due aux traitements et peut-être à l'utilisation de câbles et poissons sonar différents. Pour deux appareils du même modèle, il apparaît en effet que les connections et les composants électroniques peuvent être différentes et ainsi créer des transmissions différentes à l'origine de teintes plus ou moins claires sur les sonogrammes.

5.3.2 - Différences

Ces similitudes ne sauraient masquer les différences qu'il existe entre les deux campagnes. Grâce au positionnement radioélectrique précis, il est possible de replacer avec exactitude la localisation des dunes lors des deux campagnes. Il ressort de cette comparaison qu'il s'est produit un déplacement moyen des grandes et très grandes dunes de 100 m vers l'Est, les valeurs variant entre 50 et 150 m. L'intervalle de temps entre les deux campagnes étant de 14 mois, le déplacement moyen annuel peut être estimé à 86 m. Bien qu'un mouvement oscillatoire ne semble pas impossible, il est peu probable. En effet, la direction de l'Est correspond à la face la plus déclive des dunes. De plus, des études répétées au cours d'une année sur d'autres parties du banc montrent que le mouvement des grandes dunes n'est pas continu mais s'effectue toujours dans le même sens, celui du flanc le plus déclive (Lanckneus, comm. pers.).

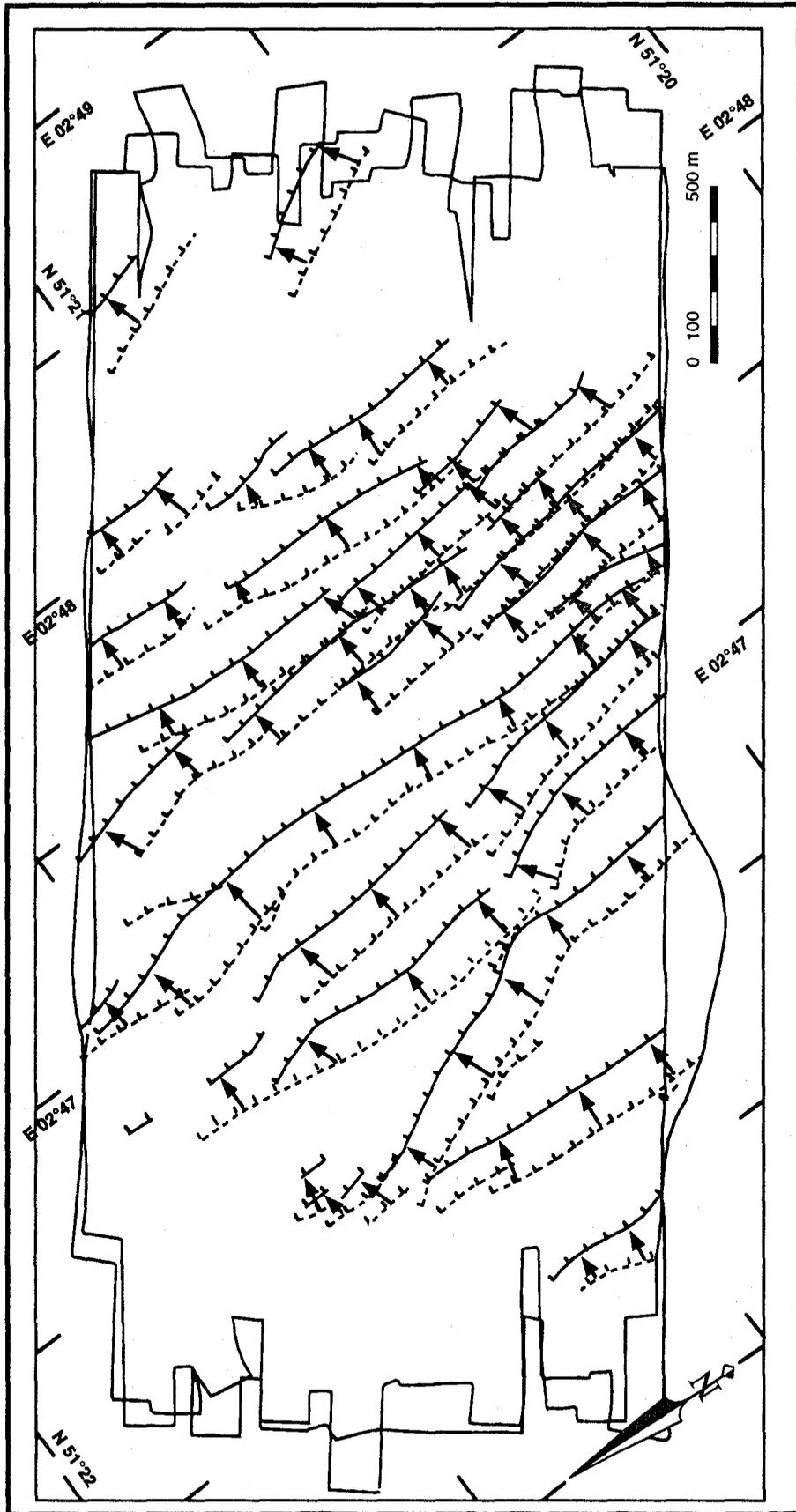


Figure II-35 - Déplacement des crêtes des grandes et très grandes dunes entre Mai 1991 et Juillet 1992.
 - Movement of the large and very large dune crests between May 1991 and July 1992.

6 - Mobilité des grandes et très grandes dunes

L'intérêt d'étudier la mobilité des formes transverses que sont les dunes est de replacer, dans un contexte dynamique, les observations tirées du sonar latéral et de quantifier le recyclage de matériel sédimentaire qu'entraîne le déplacement des dunes.

6.1 - Etudes antérieures

Du fait des incertitudes dans le positionnement des navires, soulignée notamment par Terwindt (1971), les études sur la mobilité des dunes ont longtemps été l'objet de controverses. La position des dunes a pu être considérée comme stable soit autour d'un point d'équilibre soit complètement immobiles car elles se seraient formées dans des conditions de niveau marin plus bas (Nio, 1976). D'autres auteurs considèrent par contre que la mobilité des dunes est une réalité mesurable. Les vitesses de migration reportées dans la littérature varient entre 0 et 150 m par an (Tableau II-6).

Auteur	Vitesse mesurée	Vitesse m/an	Lieu d'observation
(Stewart et Jordan, 1964)	103 m/an		Georges Shoal, USA
(Jones <i>et al.</i> , 1965)	37-73 m/an		Banc de Warts, île de Man
(Salsman <i>et al.</i> , 1966)	1,35 cm/jour	5	Baie de St Andrews, USA
(Ludwick, 1972)	35-150 m/an		Chesapeake bay, USA
(Langhorne, 1973)	25 m/an		Embouchure de la Tamise, Mer du Nord
(Stride et Chesterman, 1973)	150 m/an		Mer du Nord
(Pasenau et Ulrich, 1974)	60 m/an		German Bight, Mer du Nord
(Kelland et Bailey, 1975)	pas de transit résiduel		Start Bay
(Bokuniewicz <i>et al.</i> , 1977)	63 m/an		Long Island, USA
(Langhorne, 1982)	extrapolation impossible		Start Bay, Manche
(Shepherd et Hails, 1984)	2 m/an		Spencer Gulf, Australie
(Berné <i>et al.</i> , 1989)	70 m/an		Sangatte, Détroit du Pas de Calais
(De Moor, 1989)	>150 m/an		Kwinte Bank, Mer du Nord
(Lanckneus et De Moor, 1990)	équilibre	0	Kwinte Bank, Mer du Nord
De Moor et Lanckneus, comm.pers.	50 m/6 mois	100	Middelkerke Bank
Présent travail	100 m/14 mois	86	Middelkerke Bank

Tableau II-6 - Exemples de vitesses de migration de dunes.
- *Examples of dunes migration speeds.*

La plupart de ces études utilisent comme moyen d'investigation le sonar ou le sonar latéral en comparant les données d'une campagne avec celles d'une autre ou les données de cartes marines plus anciennes. Langhorne (1982) quant à lui a procédé à des mesures in-situ grâce à des barres métalliques verticales régulièrement observées par des plongeurs.

6.2 - Apports de la présente étude

Etant donnée la bonne précision de nos mesures et l'intervalle de temps suffisamment grand entre les deux levés, nous pouvons estimer la valeur de 86 m.an⁻¹ comme plutôt élevée par rapport aux études antérieures. Cette valeur s'accorde avec les vitesses maximales observées par d'autres auteurs. Un déplacement aussi important entraîne un certain nombre de conséquences.

6.2.1 - Masse déplacée

En considérant que les dunes sont triangulaire dans un plan vertical, que tout le transport est effectué par charriage et que le sable érodé sur le flanc doux s'accumule sur le flanc raide, les équations de conservation (Simons *et al.* 1965) indiquent que :

$$J = \frac{1}{2} \gamma \times U_B \times H$$

avec J : transport de sédiment par mètre linéaire

γ : poids spécifique du sédiment : environ 1600 kg.m⁻³ pour un sable

U_B : vitesse de déplacement de la dune

H : amplitude de la dune

Ainsi, pour une dune de 4 m d'amplitude se déplaçant de 86 m par an, une valeur de 9 g.m⁻¹.s⁻¹ est obtenue, soit 275 tonnes.m⁻¹.an⁻¹.

Un tel calcul a été effectué par Berné (1991) sur les dunes de Surtainville qui sont des édifices de taille plus grande. Le résultat qu'il obtient est de 98 tonnes. Par une autre méthode de calcul qui utilise la vitesse du courant, le profil de vitesse et différents coefficients correcteurs, il obtient une valeur de 277 tonnes, proche de la valeur obtenue sur le Middelkerke Bank.

La quantité de sable transportée est donc considérable. Elle peut même être considérée comme plus élevée que la valeur de 275 tonnes.m⁻¹.an⁻¹. En effet, le mode de calcul utilisé ne considère qu'un transport par charriage. Si l'on ajoute le transport en suspension non négligeable (Stolk, 1993a ; Vincent et Stolk, 1993) capable de déplacer des particules de plus d'une dune, la valeur est à majorer.

6.2.2 - Renouvellement des sédiments

La comparaison entre la longueur d'onde des dunes et leur avancement suggère qu'en un temps relativement court, les dunes sont totalement détruites et reconstruites plus loin vers l'Est. Compte tenu des tailles des dunes, ce temps peut être estimé à moins d'une année pour les dunes de faible amplitude et de courte longueur d'onde et à moins de 3 ans pour les dunes les plus grandes (jusqu'à 5 m d'amplitude pour une longueur d'onde de l'ordre de 250 m).

Cette mobilité explique le fait que dans la partie nord du banc, les sédiments soient en moyenne bien classés (la moyenne de classement est égale à 0,67 ce qui correspond à des sédiments moyennement bien classés) et caractérisés par des débris usés de coquilles. Le renouvellement des sédiments est également attesté par la présence d'un fragment de bouteille de détergent datant tout au plus de quelques décennies trouvé en carottage à 3,4 m sous la surface d'une très grande dune (Stolk et Trentesaux, 1993).

Il faut cependant remarquer que les carottages courts (box-cores) effectués sur la partie septentrionale du banc montrent un sédiment de subsurface complètement bioturbé pour 5 emplacements sur 11 (Stolk, 1993b). Certains secteurs du banc doivent donc être considérés comme beaucoup moins dynamiques que d'autres.

6.3 - Conclusion à l'étude détaillée de la partie nord

La mobilité des dunes, mesurée avec précision sur la terminaison septentrionale du banc, indique une valeur moyenne de 86 m.an^{-1} . Ce déplacement est un facteur perturbateur lors des études qui ne peuvent être conduites en une seule mission (ou en un temps suffisamment court pour pouvoir considérer le déplacement des dunes comme négligeable). Ceci est valable pour les études de bathymétrie ou de sonar latéral. Il est illusoire de vouloir faire une représentation tridimensionnelle fine de la surface du banc si les missions de reconnaissances sont espacées de plusieurs mois. Ce problème est également patent lors des études couplées de sismique et de carottage. Il importe en effet que les carottages soient localisés précisément sur les profils sismiques afin de déterminer la nature des réflecteurs que l'on corrèle. Lorsque les campagnes sont espacées dans le temps, le calage est rendu extrêmement difficile.

Sur une courte période, les dunes étant très mobiles, il faut interpréter la position des dunes et la forme du banc sous un angle dynamique. Sur une période plus longue, le banc peut être interprété d'un point de vue stratigraphique en considérant la superposition des corps sédimentaires. Cet aspect est développé dans le chapitre III.

7 - Transit sédimentaire déduit des données morphologiques

7.1 - Introduction

De même que la face abrupte des dunes indique le sens du transit sédimentaire, tous les corps sédimentaires asymétriques (de la ride au banc sableux) peuvent être considérés comme des indicateurs du déplacement de particules, et cela malgré l'obliquité pouvant exister entre les directions de chacune des figures.

Selon les auteurs, différents paramètres et corps sédimentaires sont pris en considération :

- l'asymétrie des bancs par Kenyon *et al.* (1981) sur l'ensemble de la Mer du Nord ou Harris et Jones (1988) à partir de photographies aériennes dans la Baie de Moreton, Australie.
- l'asymétrie des GD seules pour Caston et Stride (1970) sur les bancs de Norfolk en Mer du Nord, Caston (1972) également en Mer du Nord et Twichell (1983) sur le Georges Bank, côte Atlantique des USA.
- l'asymétrie des GD associée à celle des bancs pour Harris et Jones (1988).
- l'asymétrie des GD associée à celle des PMD pour Langhorne (1977) en Mer du Nord, McCave et Langhorne (1982) sur le Haisborough sand en Mer du Nord, De Moor et Lanckneus (1989 ; 1988) tous deux en Mer du Nord ou Malikides *et al.* (1989) dans le détroit de Baas en Australie.

Si les auteurs ne précisent pas toujours l'utilisation de l'une ou l'autre famille de corps sédimentaires, ils s'accordent à dire que l'échelle de temps du transport résiduel est directement fonction de la taille du corps sédimentaire. Les PMD expriment des transports actifs à évolution rapide (depuis le demi cycle de marée et au delà) et les GD un transport résiduel à plus long terme. Sur le Middelkerke Bank, l'asymétrie du banc seule ne peut être utilisée comme indicatrice d'un transport à plus long terme comme le montre l'étude des profils sismiques (cf. Chapitre III).

7.2 - Résultats

La carte II-36 représente les transits sédimentaires sur le Middelkerke Bank déduits de l'orientation des deux familles de dunes.

Les deux flancs du banc sont le siège de transits sédimentaires différents. Sur le flanc NW, le plus penté, le transit montre un sens préférentiel vers le NE avec une rotation horaire du transport en montant vers la crête du banc. Sur le flanc SE, le moins déclive, le transit montre un sens préférentiel vers le SW avec également une rotation horaire en allant vers la crête.

Les extrémités du banc sont le siège de transits sédimentaires différents. Au NE et sur les deux flancs du banc, une rotation généralisée conduit à une réorientation vers l'Est de toutes les figures. Au niveau de l'extrémité SW, l'opposition entre les deux flancs est moins nette et les transits sont globalement orientés vers le NE.

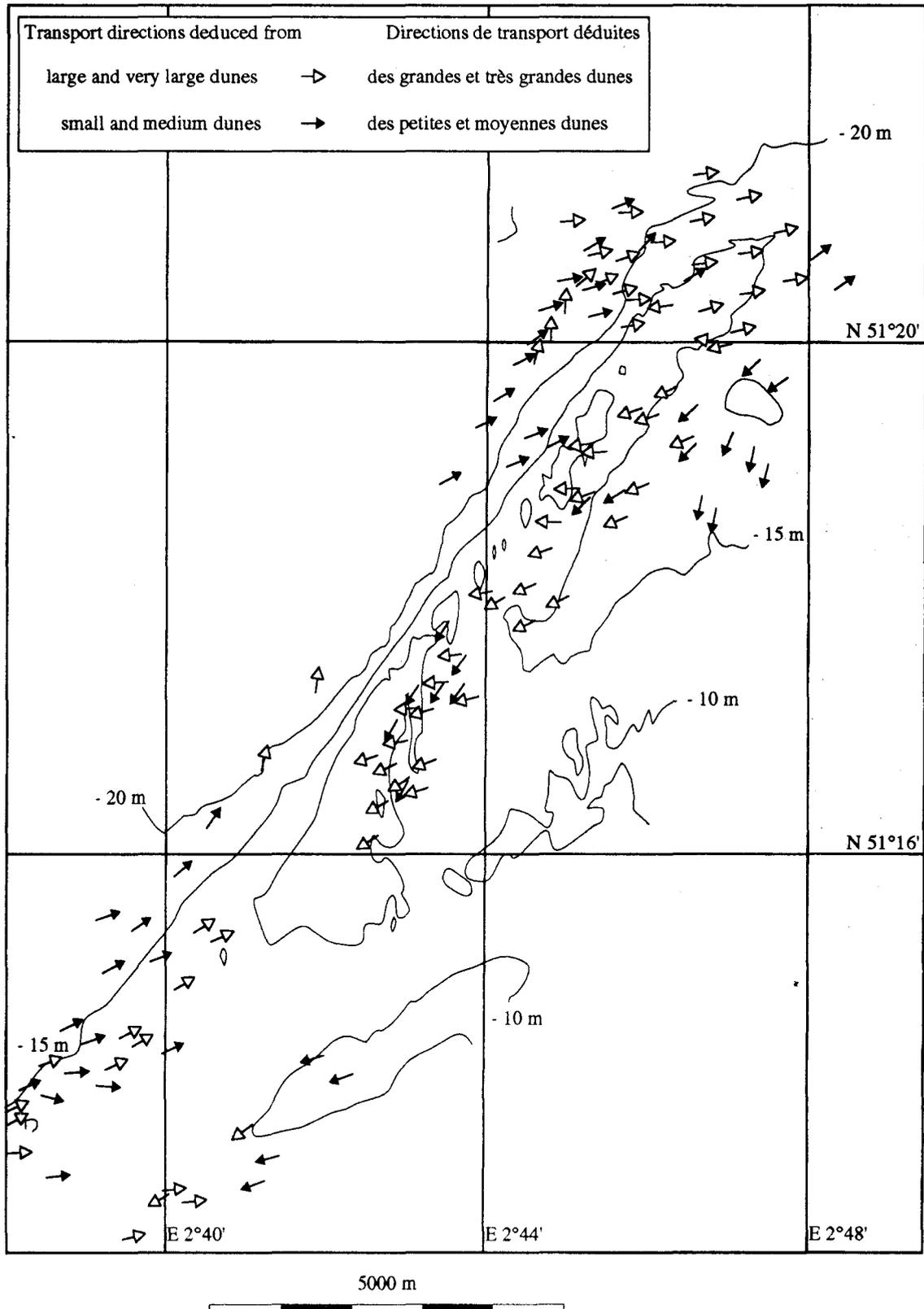


Figure II-36 - Sens des transits sédimentaires déduits de l'asymétrie des petites aux grandes dunes.
 - Sedimentary transit directions deduced from the orientation and asymetry of small to very large dunes.

7.3 - Interprétation

Le schéma de circulation des sédiments dans la zone du Middelkerke Bank indique globalement une rotation horaire (Kenyon *et al.*, 1981, Fig. II-37) autour de celui-ci. Il s'agit d'une situation tout à fait différente de celle observée sur les bancs sableux du large du Pas-de-Calais tels que la Bassure de Baas et le Battur (Clabaut, 1988 ; Dewez, 1988). Sur ces derniers, les grandes dunes sont toutes orientées vers le Nord, il n'y a pas d'opposition marquée entre les deux flancs.

Par contre, la rotation des directions de transport au niveau des terminaisons du banc ainsi que celle des dunes le long des flancs impliquent une circulation horaire qui correspond à celle observée sur la majeure partie des bancs de la Mer du Nord (Caston, 1972 ; Houbolt, 1968 ; Houthuys, 1990 ; Kenyon *et al.*, 1981). Le sens des transits le long des flancs peut être comparés aux modèles présentés par ces auteurs, pour lesquels il existe une asymétrie entre un côté plus exposé au flot et un autre plus exposé au jusant. Dans le cas du Middelkerke Bank, cela correspond respectivement au flanc abrupt orienté au NW et au flanc plus doux orienté au SE.

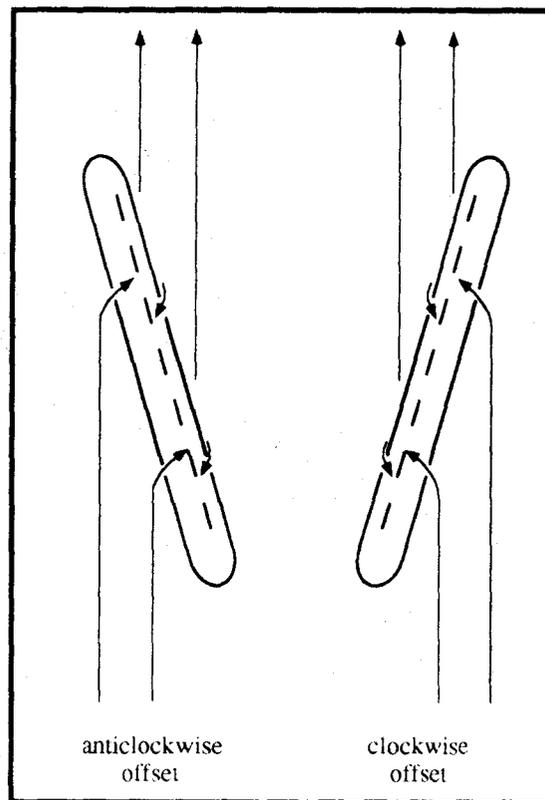


Figure II-37 - Diagramme indiquant la direction de migration d'un banc sableux en fonction de l'angle entre le courant tidal principal et la crête du banc. D'après Johnson *et al.* (1982). Le cas correspondant au Middelkerke Bank est celui qui présente une rotation horaire (clockwise).

- Diagram showing the direction of sand bank migration with respect to the angle of the main tidal flow with the bank crest. After Johnson *et al.* (1982). The Middelkerke Bank situation is characterized by a clockwise sense of rotation.

Huthnance (1982) donne une explication en termes de mécanique des fluides pour l'hypothèse de Caston (1972). Pour eux, l'obliquité existant entre la direction des courants de marée et le banc est suffisante pour induire la formation et l'accroissement d'un banc si du matériel est suffisamment disponible. Sans entrer dans les détails de la formulation mathématique, le cas du Middelkerke Bank peut entrer dans ce modèle. Selon ce modèle, l'asymétrie des bancs serait un bon indicateur du transit résiduel. Cependant, ne pouvant quantifier les volumes de sédiment transportés par le flot et le jusant, il ne nous est pas possible de dire si le transit résiduel est effectivement orienté vers le SW comme le suggère le schéma de partition de Kenyon *et al.* (1981, Fig. II-38) ou, comme semble l'indiquer la figure III-37, vers le NE.

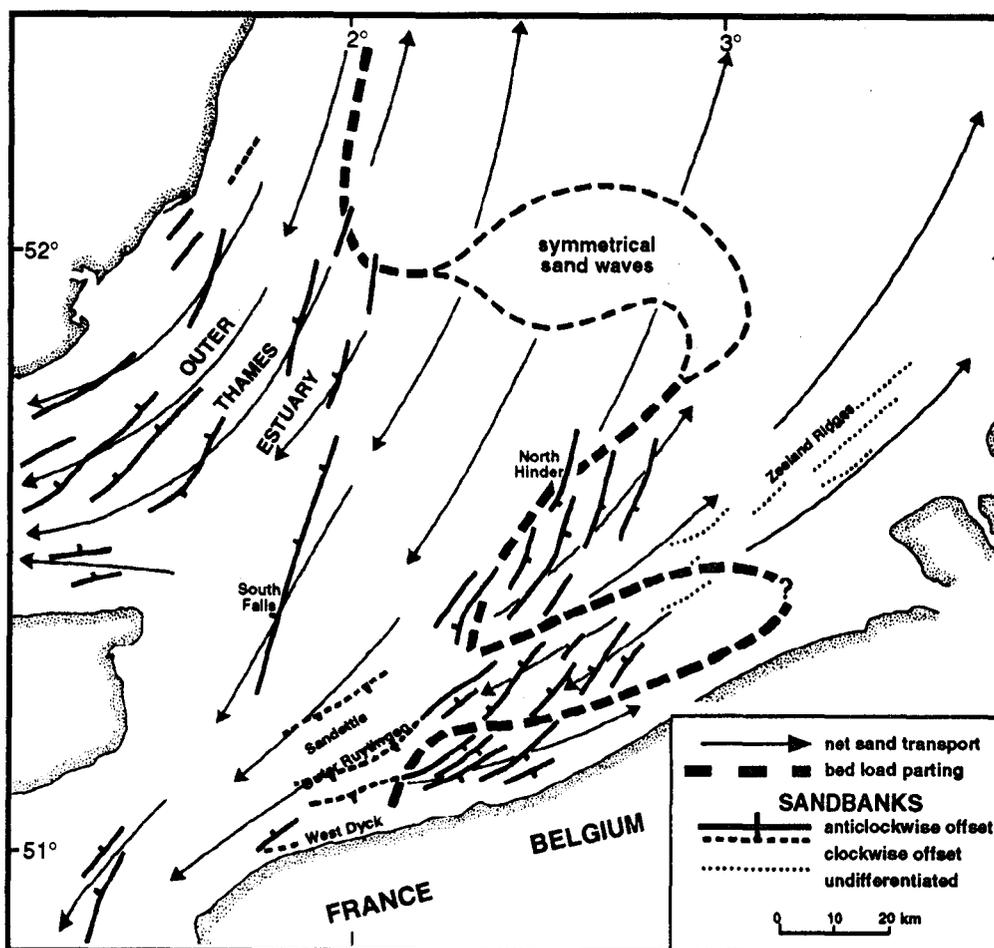


Figure II-38 - Transit sableux en Mer du Nord (Kenyon *et al.*, 1981).
 - Offshore tidal sand banks and net sand transport directions in the Southern Bight of the North Sea (Kenyon *et al.*, 1981).

C - Utilisation combinée des données de la granulométrie et du sonar latéral.

Conclusion.

1 - Nature des sédiments superficiels

Une des applications les plus courantes de l'utilisation combinée des données de la granulométrie et de sonar latéral concerne le calibrage des images sonar. Toutes choses étant égales par ailleurs, il existe en effet une relation entre la rétrodiffusion d'un sédiment et son grain moyen (Augris *et al.*, 1990). Dans le cas de notre étude, les images prises sur le banc montrent des teintes plus sombres que dans les chenaux, ce qui correspond à la présence de sédiments plus grossiers dans les zones les moins profondes. Par contre, dans la zone de la mosaïque réalisée à la terminaison septentrionale du banc, il n'existe que peu de variations dans la teinte des sonogrammes, malgré la variété reconnue par prélèvement dans la nature des sédiments (Voir dans ce chapitre, la rubrique A-6). La zone de la mosaïque est couverte de petites et moyennes dunes ce qui peut expliquer la non corrélation entre la teinte des sonogrammes et la taille des sédiments comme étant due à un effet prédominant du relief par rapport au sédiment. La relation entre la rétrodiffusion et le relief est interprétée comme étant l'effet dominant par rapport à la relation entre la rétrodiffusion et le grain moyen des sédiments. Ainsi, les zones de teinte claire au sommet des plus grandes dunes ne sont pas interprétées comme dues à la présence d'un sédiment plus fin. Elles correspondent à des zones d'ombre à l'abri des petites et moyenne dunes dont l'amplitude augmente vers le sommet des grandes dunes.

2 - Transit sédimentaire

Les résultats des rubriques A et B qui concernent la granulométrie et le sonar latéral ont montré que ces deux techniques permettaient de déduire des sens de transit sédimentaire. Les résultats sont comparés sur la figure II-39.

Les deux études n'ont pas été réalisées sur des zones de tailles équivalentes ce qui limite légèrement la portée de la comparaison. Selon la zone considérée, les deux méthodes montrent ou non des résultats voisins.

2.1 - Cas où les sonogrammes et la méthode numérique indiquent la même direction

Les directions des flancs raides des dunes (GD ou PMD) mettent en évidence l'opposition existant entre les deux côtés du banc. Globalement, cette opposition est retrouvée par la méthode numérique. Il y a un transport convergent en direction du sommet du banc. Sur le flanc doux, le transport se fait vers le NW et sur le flanc le plus déclive, ils se font vers le SE. A l'extrémité nord, les deux méthodes indiquent des changements dans les sens de transport sur les deux flancs.

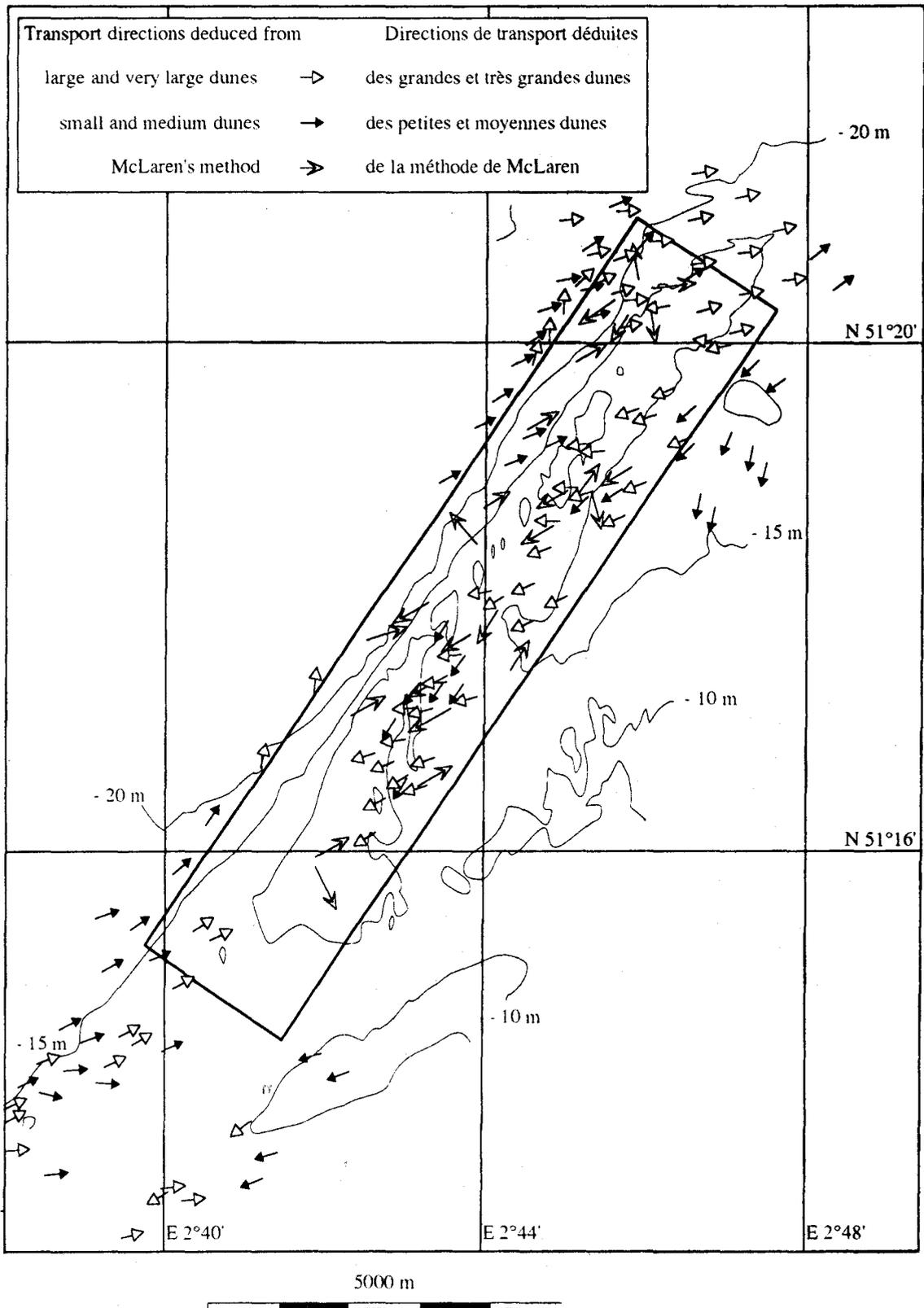


Figure II-39 - Comparaison des transits sédimentaires déduits de la méthode de McLaren et de l'interprétation des sonogrammes.
 - Comparison of the sedimentary transits of the surficial sediments deduced from the McLaren method and from the sonograms interpretation.

2.2 - Cas où les sonogrammes et la méthode numérique n'indiquent pas la même direction

Malgré le schéma global identique reconnu pour les deux approches, quelques différences sont observables :

- Bien que les deux approches indiquent une opposition marquée entre les deux flancs du banc, et un transit vers l'Est à la terminaison septentrionale, les changements de direction sont plus progressifs sur les sonogrammes qu'à partir de la méthode de McLaren. Par cette dernière, des zones au transit dispersé peuvent être voisines comme c'est le cas dans la partie nord du banc.

- Tout au Nord de la zone d'étude, les deux directions sont au moins à 90° l'une de l'autre.

- Dans le Negenvaam, les figures sédimentaires indiquent une direction dominée par le flot, contrairement aux conclusions de la méthode numérique.

2.3 - Conclusion

En dépit de quelques similitudes, les deux méthodes aboutissent à des conclusions en grande partie différentes. Dans l'état actuel de nos connaissances, il faut privilégier les déductions tirées des données issues de l'étude des figures sédimentaires et ceci pour plusieurs raisons :

- La méthode de McLaren est très sensible à tous les problèmes d'échantillonnage surtout sur des fonds accidentés couverts de dunes. Le Middelkerke Bank présente trop de variations internes par rapport à sa taille relativement petite.

- Pour pallier à ces inconvénients, une zone d'étude plus large englobant les chenaux adjacents et comprenant un nombre significativement plus grand d'échantillons semble nécessaire.

- Le nombre d'échantillons n'est peut-être pas suffisant.

- Le classement des échantillons en plusieurs catégories ne correspond pas toujours à des coupures nettes.

- La méthode de McLaren ne rend compte que des sens possibles mais non obligatoires du transit sédimentaire. La réflexion en cours pour affiner la méthode, en prenant tous les échantillons un à un par exemple, doit être poursuivie pour mieux correspondre aux observations in-situ.

Par rapport aux modèles de circulation des sédiments autour des bancs sableux, les observations faites sur le Middelkerke Bank semblent compliquer les modèles proposés jusqu'à présent :

- Les terminaisons Nord et Sud du banc montrent une certaine rotation des transports marquée par le changement dans l'orientation des crêtes des grandes dunes ; mais cette rotation n'est pas complète ($\neq 180^\circ$).

- Le décalage entre la crête du banc et celle de la médiane indique qu'aux extrémités nord et sud du banc, le sédiment n'est pas localisé au sommet mais respectivement au NW et au SE.

La compilation des données nouvelles obtenues sur le Middelkerke Bank permet de proposer un mécanisme de mouvement des sédiments dans la zone du banc, voisin de celui décrit par les auteurs précédemment cités (Fig. III-40). Les directions de transport déduites de cette étude indiquent qu'il n'y a pas de réelle rotation autour du banc comme le laissait penser le schéma de Caston *et al.* repris par Howard et Hutnance (1984). Il ne remet pas en cause le modèle de Hutnance (1973) qui peut fonctionner sans faire nécessairement appel à une rotation complète. La disposition reconnue sur le Middelkerke Bank s'approche plus du schéma proposé par Houthuys (Houthuys, 1990) sur d'autres bancs de Flandre qui avait noté l'opposition entre les deux flancs mais ne s'était pas précisément penché sur le transport aux terminaisons des bancs.

Le modèle de Johnson *et al.* (1982 ; Fig. II-37) semble indiquer que le Middelkerke Bank possédant un flanc plus abrupt orienté vers le NW est soumis à un transport résiduel dominé par le jusant et orienté vers le SW. Les tailles respectives des zones dominées par les courants de flot et de jusant ainsi que les hauteurs des dunes de ces deux zones ne nous permettent pas de trancher définitivement.

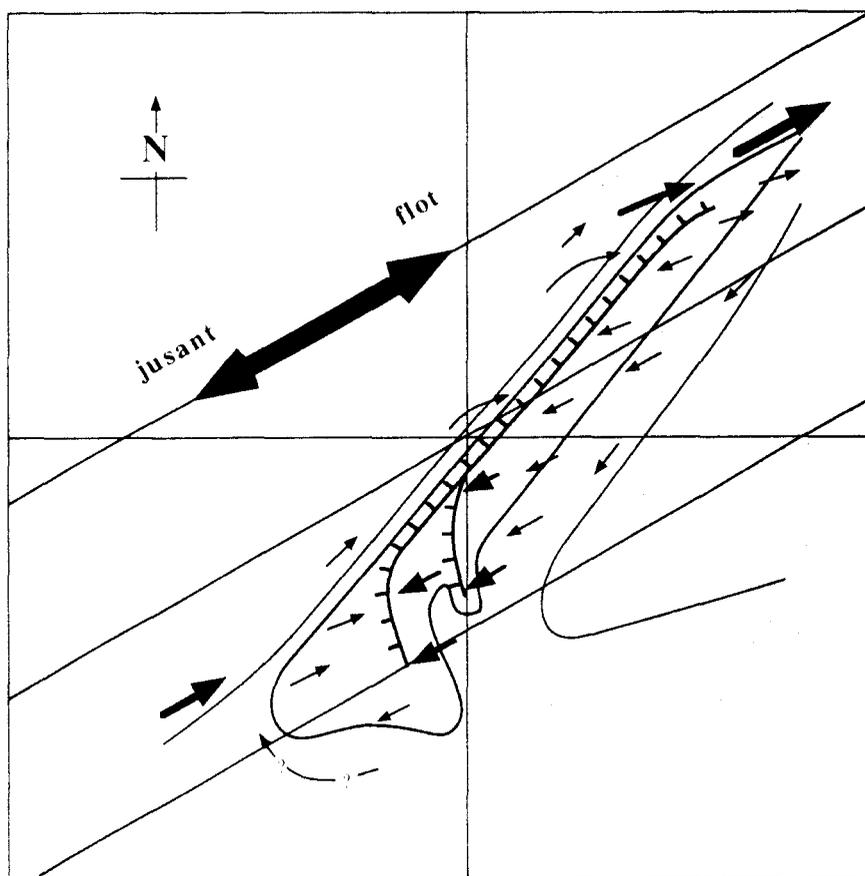


Figure II-40 - Mouvements schématiques de déplacement des sédiments dans la zone du Middelkerke Bank. L'épaisseur des flèches est proportionnelle à l'importance du transit.
 - Schematic movements of the sediment displacements in the Middelkerke Bank area. The arrows thickness is proportional to the transit importance.

3 - Conclusion sur la mobilité des sédiments

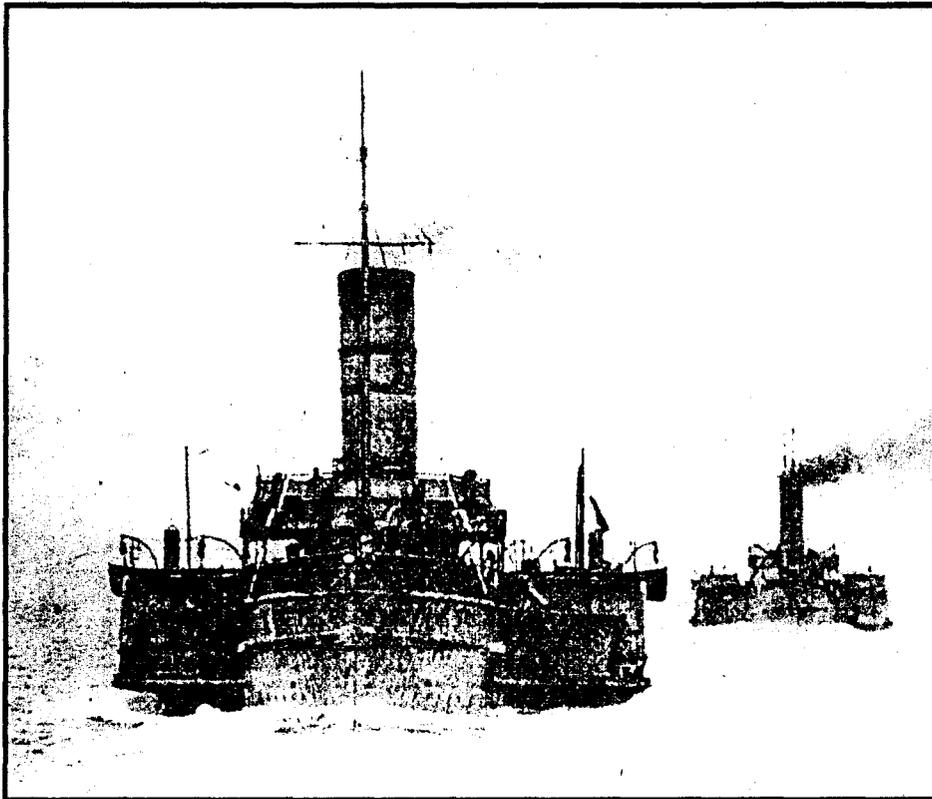
L'utilisation combinée des techniques de granulométrie et d'imagerie acoustique par sonar à balayage latéral donne des indications sur la dynamique sédimentaire de la zone du Middelkerke Bank :

- A court terme, les effets des tempêtes sont identifiables par les résultats de la granulométrie. En effet, les tempêtes conduisent à mobiliser une grande quantité de matériel, ce qui entraîne des déséquilibres importants au niveau du sédiment superficiel.

- A un an d'intervalle, la superposition de deux mosaïques effectuées dans la terminaison septentrionale du banc conduit à estimer des vitesses de migration des grandes et très grandes dunes de l'ordre de 86 m par an.

- A plus long terme, la direction des flancs raides des dunes indique une opposition nette entre les deux flancs du banc ainsi qu'un schéma complet de circulation des sédiments. Les méthodes numériques d'évaluation du transit résiduel sont parfois en désaccord avec les observations déduites des données du sonar latéral.

- A très long terme, il est difficile de savoir quelle est la mobilité résultante du banc en tant que corps sédimentaire. Seule la connaissance de sa structure interne peut nous apporter des éléments de réponses. C'est dans cet objectif qu'une étude par sismique réflexion et carottage a été menée sur le banc. Cet aspect des recherches est développé au chapitre III.



Le 29 Mai 1940. Le Waverley, navire construit en 1899 pour la "North British Steam Packet Company", est coulé par l'aviation allemande.



Le 7 Mai 1991, lors de la mission "Belgica", le Waverley est repéré sur un profil de sonar latéral. Il gît par 20 mètres de fond en bas du flanc NW du Middelkerke Bank.

CHAPITRE III
STRUCTURE INTERNE

CHAPITRE III - STRUCTURE INTERNE

Afin d'appréhender les conditions de formation d'un édifice sableux tel que le Middelkerke Bank, il est indispensable de connaître sa structure interne ainsi que la nature et les environnements de dépôt qui le caractérisent. En ajoutant cette troisième dimension aux recherches, il doit être possible de relier ces environnements aux variations du niveau marin et à l'histoire régionale quaternaire.

Dans le cadre de cette étude, deux techniques complémentaires ont été employées : 1) La sismique réflexion haute et très haute résolution, qui permet d'identifier l'architecture du banc et de définir les événements principaux de son histoire. 2) Le carottage, qui offre la possibilité de caractériser d'un point de vue sédimentologique l'architecture précédemment définie et de dater les phases principales.

Ce chapitre est divisé en trois parties. Dans la première, les résultats de la sismique haute et très haute résolution précisent le bâti du banc. Dans la seconde, les données lithologiques sont extraites de l'étude des carottes. Dans la troisième les résultats des deux types d'observation sont combinés afin de préciser la nature sédimentologique des discontinuités des unités sismiques. L'ensemble des informations acquises contribuera à retracer l'histoire quaternaire de la zone d'étude.

A - Étude de l'architecture du Middelkerke Bank par les techniques de sismique réflexion

Des études antérieures de sismique réflexion ont montré que les bancs de la plate-forme continentale belge en général, et les Bancs de Flandre en particulier, possèdent en leur sein des discontinuités importantes et parfois corrélables d'un profil sismique à l'autre ou d'un banc à son voisin (De Maeyer *et al.*, 1983 ; De Moor, 1989 ; Henriet *et al.*, 1978 ; Liu, 1990 ; Maréchal et Henriet, 1983).

Grâce à un maillage géophysique dense sur la zone du Middelkerke Bank, il est relativement aisé de suivre les discontinuités. Ceci permet d'envisager leur reconstitution tridimensionnelle ainsi que la visualisation des unités sismiques qu'elles limitent.

1 - Interprétation des profils - Méthode d'étude

Deux types d'appareils aux résolutions différentes ont été utilisés lors de cette étude. Sur l'ensemble du banc, l'architecture générale a été étudiée d'une part grâce aux profils Haute Résolution (HR) obtenus avec l'étinceleur ou

sparker du RCMG, d'autre part à ceux obtenus avec le sondeur de sédiment (sismique Très Haute Résolution, THR) de l'IFREMER. Ces derniers permettent de préciser les informations de la sismique HR : litages internes, troncatures, position des réflecteurs proches de la surface... Dans le cadre de la réalisation de la mosaïque de sonar latéral (voir chapitre II, Fig. II-31), la sismique THR a été utilisée seule à la terminaison septentrionale du banc. Le dépouillement des profils s'est fait en appliquant les principes de base de la stratigraphie sismique (Mitchum *et al.*, 1977).

La définition des réflecteurs s'effectue en parcourant les profils. Les discontinuités matérialisées par des lignes sont annotées et retrouvées sur les profils perpendiculaires. En retrouvant les réflecteurs dans les polygones ainsi définis, il est possible de connaître de proche en proche la position des réflecteurs en tout point des profils.

Les limites des unités sismiques sont identifiées sur les profils comme des surfaces de discordance ou "unconformities". Elles se marquent par des "onlaps", des troncatures, des "toplaps" ou des "downlaps" (Fig. III-1). Les toplaps sont rarement observés sur les profils sismiques HR. Par contre, la résolution du sondeur de sédiment peut les mettre en évidence (ex. figure III-26, profil N°47)

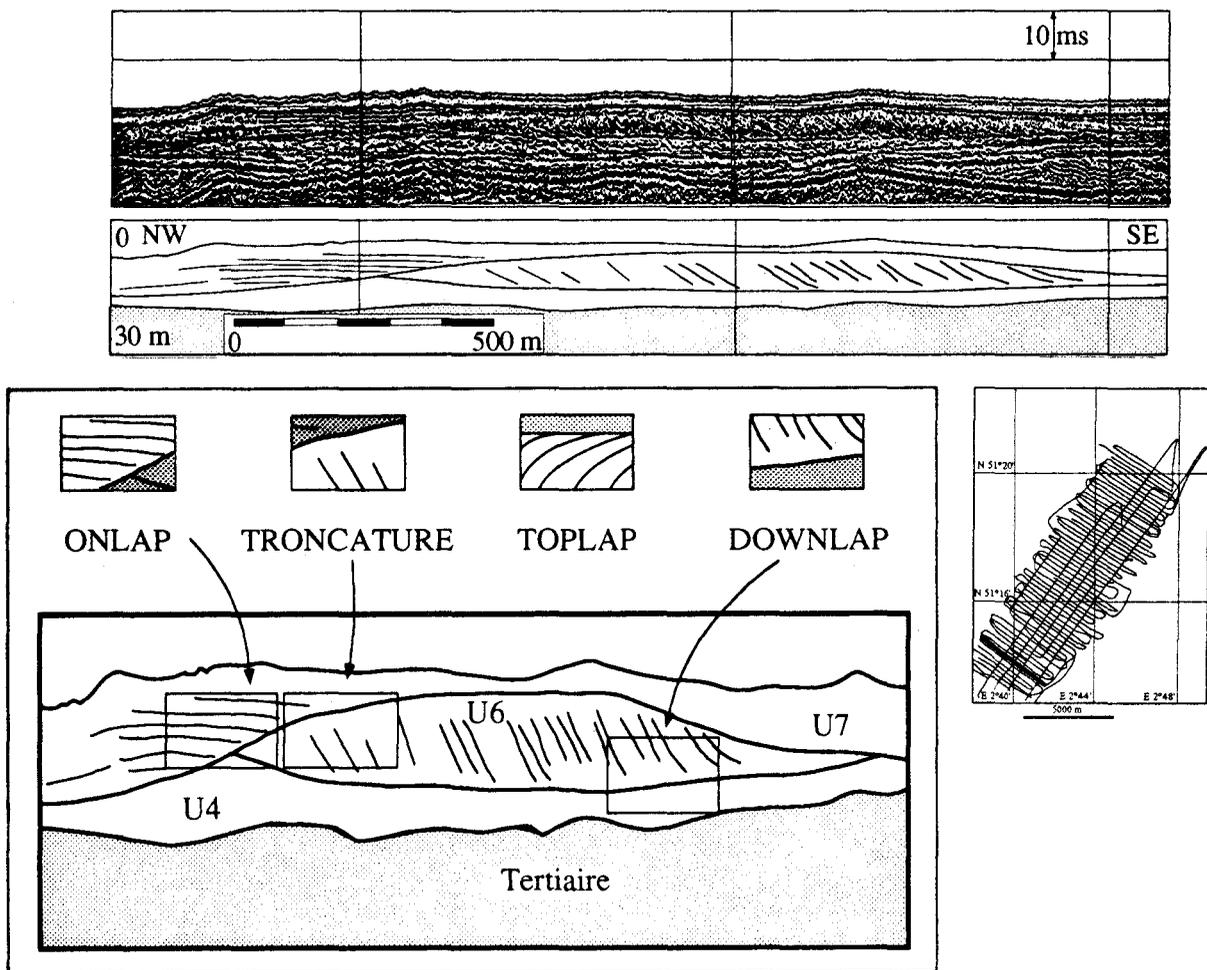


Figure III-1 - Relations entre les réflecteurs et les limites des séquences de dépôt. U4, U6 et U7 correspondent aux unités sismiques définies au chapitre III. Profil N° 48 du RCMG, mission RESECU2.
 - Relations of strata to boundaries of depositional sequences. U4, U6 and U7 correspond to seismic units defined in this chapter. Profile 48 of RCMG, RESECU2 cruise.

Chaque unité sismique délimitée par des discordances de premier ordre est caractérisée par un faciès sismique, variable ou non, qui peut être un indice des conditions de dépôt des unités. Le faciès est défini par une énergie plus ou moins forte (aspect plus ou moins sombre sur les profils) ainsi que par l'abondance et le type de réflecteurs de second ordre internes à l'unité.

2 - Modélisation tridimensionnelle

L'interprétation des profils sismiques HR est digitalisée manuellement et les données sont introduites dans le système NORDATABASE, gestionnaire de données géologiques et sismiques développé par le RCMG.

Ce système permet de transformer les données des profils en une série de points parfaitement définis dans l'espace (latitude, longitude et altitude). Il utilise les données de navigation, les conditions de marée et fait la conversion temps/profondeur. La vitesse de propagation utilisée pour les sédiments est de 1600 m.s^{-1} (cf. Chapitre I, rubrique 4.1). Les points obtenus sont utilisés dans le programme GEOFOX de modélisation tridimensionnelle du RCMG (Verschuren, 1992).

Le travail de modélisation sur GEOFOX se divise en 5 étapes :

- La très forte densité de points le long des profils et l'hétérogénéité de la répartition des points demandent une opération de filtrage. Cette opération ne conserve que les points significatifs en termes de changement d'altitude (Fig. III-2) ;

- Entre chaque point et ses voisins, une triangulation automatique est appliquée ;

- Après cette opération, il est possible de modifier de façon interactive les triangles en privilégiant les observations ou les interprétations. Les modifications obligent le processus automatique de triangulation à respecter des surfaces de discontinuités telles que des failles ou des flancs raides de dunes. Il est également possible de corriger légèrement les défauts de conversion et/ou d'interprétation en faisant varier l'altitude des points afin d'avoir un schéma cohérent du point de vue géologique (Fig. III-3) ;

- Une grille est ensuite superposée à la surface triangulée et une surface lissée est calculée en tenant compte des surfaces de discontinuité pré-définies. Le choix de la maille et les procédures d'illumination de la surface, de réflexion de la lumière, d'ombrage et de masquage des surfaces cachées conduisent à la fabrication d'une surface tridimensionnelle qui peut être observée sous n'importe quels angle et distance ;

- Enfin un mode de visualisation, en carte contournée (Fig. III-4) ou en vue à trois dimensions (3D ; Fig. III-5), est sélectionné.



Figure III-2 - Points significatifs conservés après filtrage pour la reconstitution de la surface bathymétrique du banc. Logiciel GEOFOX.
 - *Colour contoured relevant reflector points of the bank surface after filtering. Geofox software.*

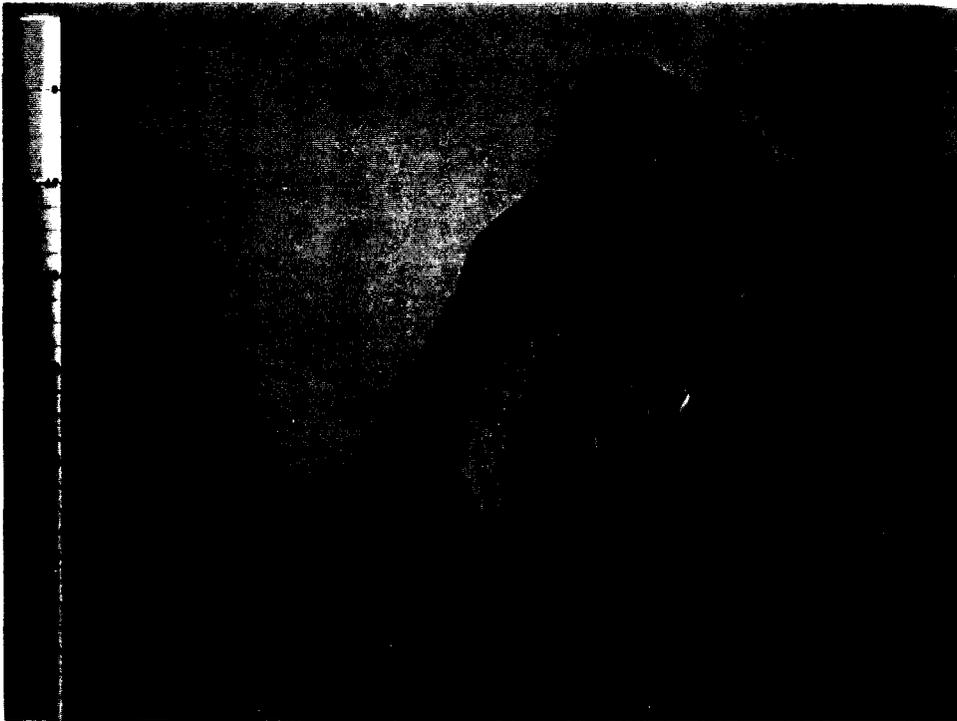


Figure III-3 - Triangulation entre les points significatifs de la surface du banc. Noter les surfaces de discontinuités aux lignes plus épaisses le long des grandes dunes. Logiciel GEOFOX.
 - *Triangulated reflector points of the bank surface. Notice the discontinuity surfaces with thicker lines along large dunes. Geofox software.*

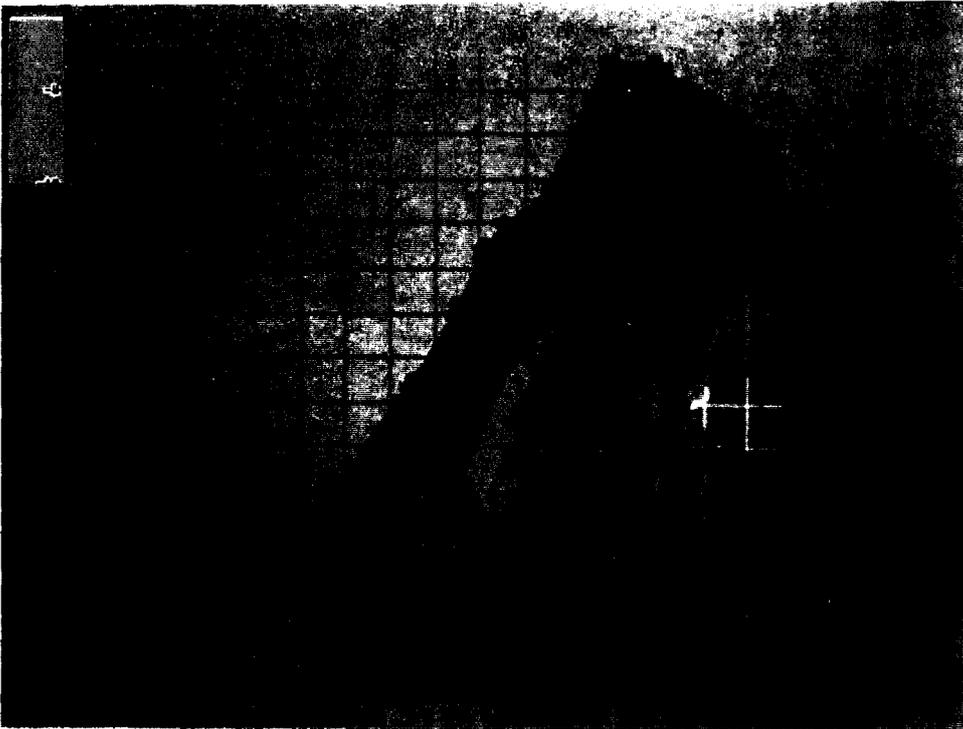


Figure III-4 - Exemple de représentation de la surface du banc. Logiciel GEOFOX.
- *Map view of the bank surface. Geofox software.*



Figure III-5 - Exemple de représentation 3D de la surface du banc. Logiciel GEOFOX.
- *3D view of the bank surface. Geofox software.*

3 - Définition des réflecteurs

3.1 - Introduction

Le principe de la sismique réflexion repose sur l'enregistrement des discontinuités entre deux terrains possédant des impédances acoustiques différentes. Cette interface rend visible un passage entre deux matériaux de vitesse et/ou de densité différentes. La nature de l'interface et des unités sismiques ne peut être caractérisée sur les profils, ce qui rend nécessaire la réalisation de carottages.

Deux grands types de réflecteurs peuvent être distingués : les réflecteurs de premier et de second ordre.

3.2 - Les réflecteurs de premier ordre, Limites des unités sismiques

Les réflecteurs de premier ordre ont une extension latérale suffisamment importante pour qu'ils puissent être suivis d'un profil à l'autre. Ils délimitent des unités sismiques aux caractéristiques géométriques et faciologiques différentes. Parmi les sept réflecteurs de premier ordre définis sur la zone du banc, celui situé le plus profond est corrélé avec la base des sédiments quaternaires. Cette corrélation est effectuée grâce aux données lithologiques d'une carotte (carotte "Uitdiep" ; Baeteman et Maenhaut Van Lemberge, 1989) et en comparant le réflecteur avec la surface décrite par Liu (1990). Ce premier réflecteur est traité à part. Tous les autres sont intra-quaternaires.

3.2.1 - La discontinuité Tertiaire/Quaternaire

La limite entre les terrains tertiaires et quaternaires est particulièrement bien marquée sur les profils sismiques. Elle correspond en effet au passage entre deux ensembles lithologiques très différents.

3.2.1.1 - Nature des terrains tertiaires

Alors que le Quaternaire peut être considéré comme globalement sableux, le Tertiaire est constitué d'argile d'âge éocène. Il s'agit de la Formation de l'Argile des Flandres d'âge yprésien qui correspond au faciès lithostratigraphique Y1 (De Batist *et al.*, 1989).

Dans la zone du Middelkerke Bank, cette formation présente un faciès caractérisé par de nombreuses déformations internes (Fig. III-6).

La cause de ces déformations est à rechercher dans l'histoire de l'enfouissement de l'Argile des Flandres. Durant cette phase, les terrains qui encadrent l'argile (sables landéniens en-dessous, sables yprésiens au-dessus) expulsent rapidement l'eau interstitielle. Au contraire, l'argile moins perméable la conserve. Il en résulte un état de déséquilibre dans le gradient normal des pressions, caractérisé par une sous-compaction des niveaux argileux. Le rétablissement d'un gradient normal des pressions se fait brutalement sous l'effet de la libération des contraintes. Il entraîne une rupture en blocs le long de failles subverticales dans l'argile (Henriet *et al.*, 1989). La flèche de ces failles peut atteindre 4 m (Liu, 1990).

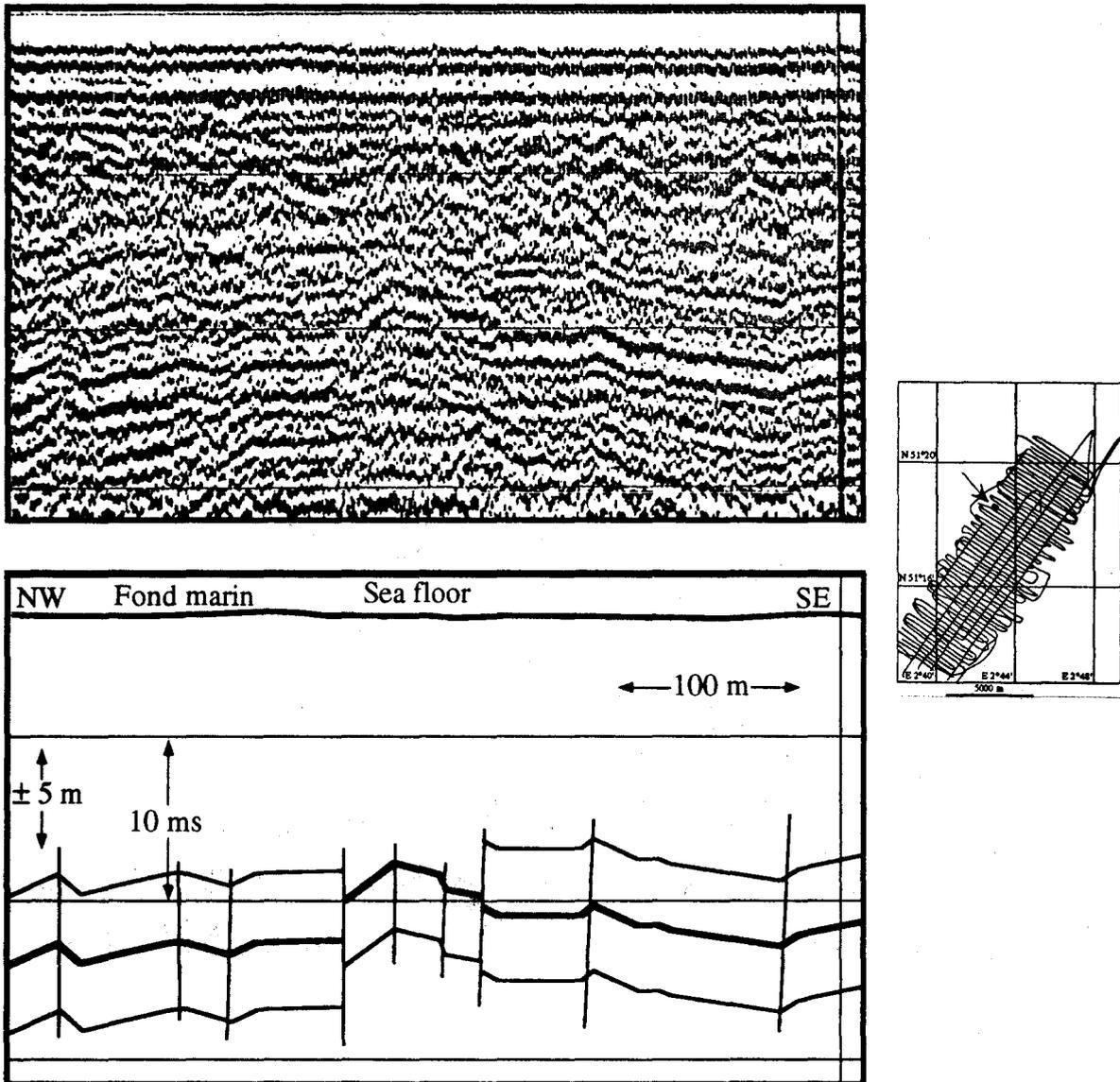


Figure III-6 - Profil sismique analogique et interprétation montrant les déformations intra-ypésiennes. Profil N° 18, mission RESECU2.
 - Analog seismic record and interpreted line-drawing showing clay-tectonic deformations in the Ypresian clay. Line 18, RESECU2 cruise.

3.2.1.2 - Modelé général de la surface anté-quaternaire

Le modelé de la limite Tertiaire/Quaternaire sur la plateforme continentale belge est bien connu à terre grâce aux travaux de nombreux chercheurs (Baeteman, 1981 ; De Batist *et al.*, 1989 ; De Moor et De Breuck, 1973 ; Depret, 1983 ; Devos, 1984 ; Mostaert, 1985 ; Sommé, 1979). La partie marine a été reconnue par le RCMG (Mostaert *et al.*, 1989) et l'interprétation générale a été effectuée par Liu *et al.* (1990 ; 1992 ; 1993). La compilation par ce dernier de tous les travaux effectués a permis de réaliser une carte générale de la surface de base du Quaternaire (Fig. III-7).

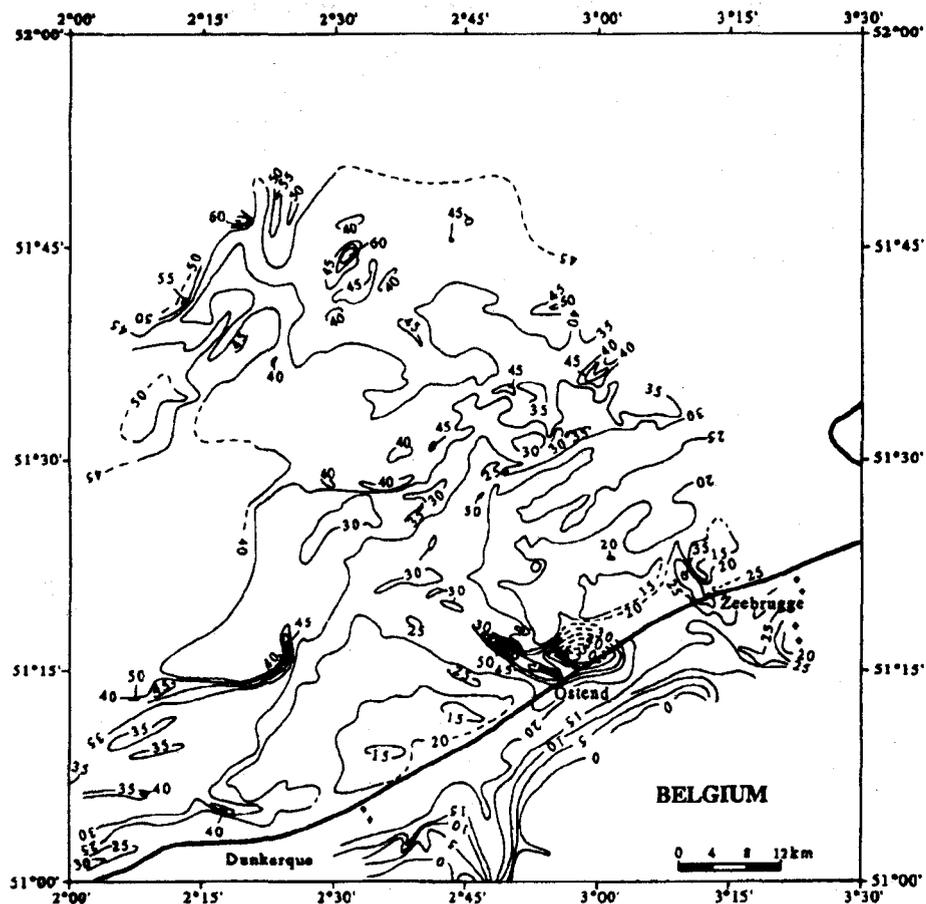


Figure III-7 - Carte des isobathes du toit du Tertiaire de la plateforme continentale belge. (d'après Liu *et al.*, 1992).
 - Isobath map of the top-Tertiary erosion surface on the Belgian continental shelf from (Liu *et al.*, 1992).

Cette surface est constituée de divers ensembles morphologiques : plateformes, pentes, escarpements et vallées. Le Middelkerke Bank est situé au-dessus de la paléovallée d'Oostende (Ostend valley, Fig. III-8).

L'ensemble de la surface tertiaire présente des reliefs faibles comparables à ceux observés aujourd'hui dans la plaine côtière franco-belge. Les pentes sont localement accentuées au niveau d'escarpements le long des paléovallées. La vallée d'Oostende est une zone faiblement creusée qui présente un versant très peu incliné au SW et un peu plus abrupt au NE. Elle réalise la jonction entre la vallée côtière qui est le réceptacle du système de drainage des vallées flamandes, et la Fosse Centrale située au centre du Détroit du Pas de Calais. Dans cette fosse se seraient écoulées les eaux de certains fleuves de l'Europe du Nord : Rhin, Meuse, Escaut, Tamise... La vallée d'Oostende présente des dépressions de forme circulaire qui peuvent atteindre 20 m sous la surface environnante. Leur origine exacte est attribuée à des surcreusements ayant pour cause les fleuves ou les courants tidaux (Liu *et al.*, 1993).

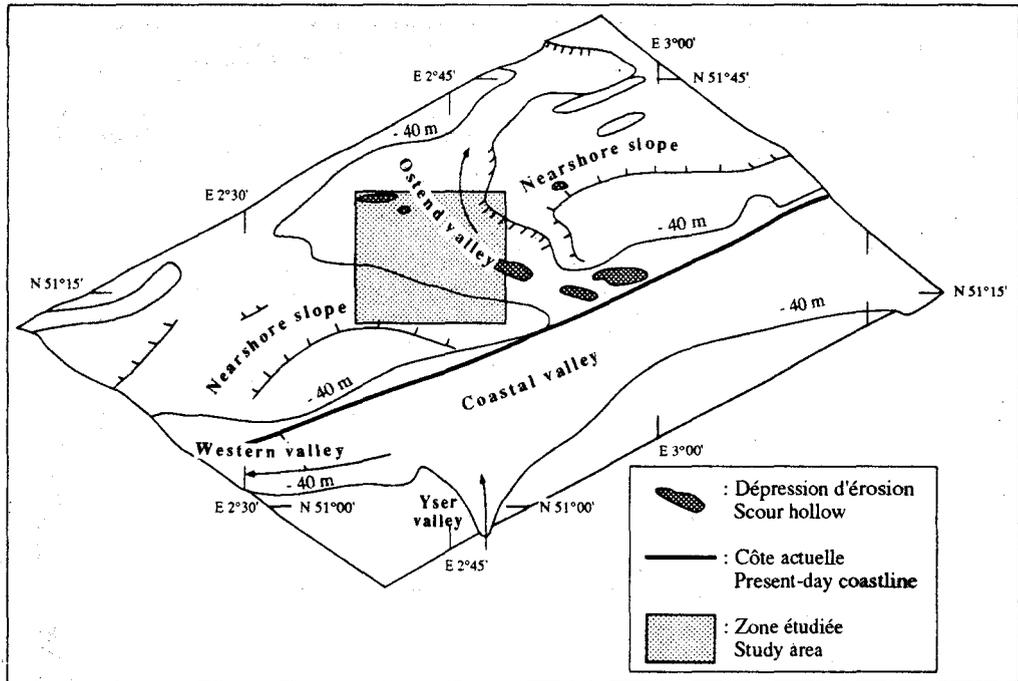


Figure III-8 - Unités morphologiques du toit de Tertiaire aux environs du Middelkerke Bank. D'après Liu *et al.* (1992). Le carré central correspond à la zone d'étude.
 - Morphological units of the top-Tertiary surface in the Middelkerke Bank area. From Liu *et al.* (1992). The central square represents the study area.

3.2.1.3 - Précisions sur la base du Quaternaire dans la zone du Middelkerke Bank

La grande densité de profils dans la zone d'étude permet d'obtenir un canevas très détaillé de la surface limite entre Tertiaire et Quaternaire. La figure III-9 représente cette surface en perspective tridimensionnelle.

Il s'agit d'une discontinuité angulaire qui ne possède qu'une pente très faible d'environ 0,06 % vers le Nord. Sa profondeur moyenne est comprise entre -12,5 m dans la partie Sud du banc et -35 m dans les incisions situées au Nord.

De telles incisions ont été observées dans le Mer du Nord ou en Manche par de nombreux auteurs (Auffret *et al.*, 1980 ; Jansen *et al.*, 1979 ; Liu *et al.*, 1992 ; Wingfield, 1990). Elles ont, dans la zone du Middelkerke Bank, probablement une origine fluviale (Liu *et al.*, 1992). Elles apparaissent comme des traces de chenaux qui se bifurquent dans deux directions : NW-SE et E-W respectivement sous les parties septentrionale et centrale du banc. Ce système de chenaux est à associer au complexe de la vallée d'Oostende.

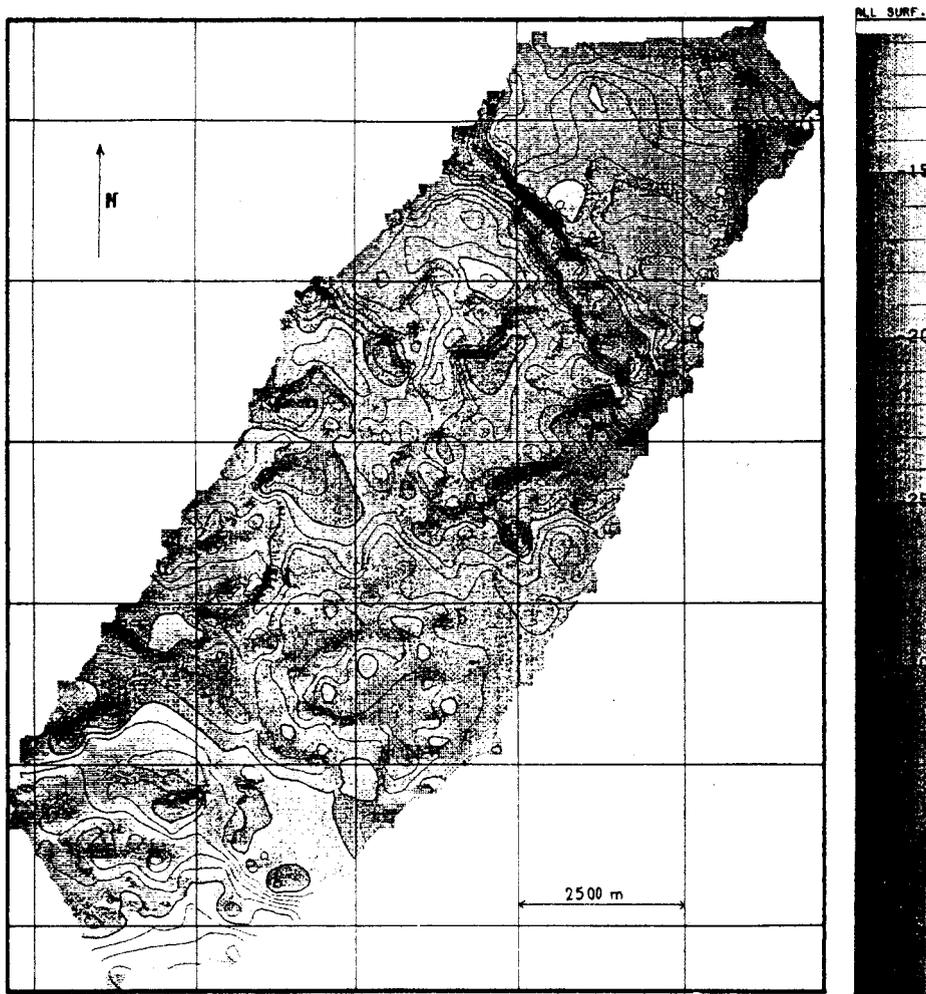


Figure III-9 - Isobathes de la surface anté-quaternaire dans la zone d'étude. Logiciel GEOFOX.
 - Isobath map of the pre-quaternary surface in the study area. Geofox software.

3.2.2 - Les limites intra-quaternaires des unités sismiques

Au-dessus du réflecteur de premier ordre représentant la limite Tertiaire/Quaternaire, six autres réflecteurs majeurs ont pu être distingués au sein du complexe sédimentaire qui correspond au Middelkerke Bank. Ces réflecteurs limitent les unités sismiques. Ils ont été nommés dans un ordre chronologique U1.b à U7.b car ils constituent les bases des unités U1 à U7 définies à la rubrique A-4 du chapitre III.

Le réflecteur U1.b coïncide avec la base du Quaternaire puisque U1 constitue la première unité au-dessus du Tertiaire. Les caractéristiques des autres réflecteurs sont données dans le tableau III-1. Parmi ces six autres réflecteurs, U2.b, U3.b, U4.b et U7.b recoupent localement de manière plus ou moins large la discontinuité Tertiaire/Quaternaire. Les données du tableau correspondent à celles observées lorsque le réflecteur est strictement intra-quaternaire.

réflecteur	caractéristiques principales	localisation
U7.b	Fortement ondulé. Limite inférieure d'une unité à grands réflecteurs obliques. Recoupe localement le Tertiaire.	Sous la majeure partie de la zone d'étude. Affleure dans les deux chenaux.
U6.b	Recoupé fréquemment par U7.b.	Sud du Middelkerke Bank et sous l'Oostende Bank. Affleure dans le chenal Uitdiep.
U5.b	Faible réflectivité.	Zone réduite entre le Middelkerke et l'Oostende Bank.
U4.b	Quasi horizontal, réflexion puissante et continue. Recoupe le Tertiaire et n'est recoupé par aucun réflecteur de 1 ^{er} ordre.	Quasi-totalité de la zone d'étude.
U3.b	Quasi horizontal. Est recoupé localement par U4.b. Recoupe le Tertiaire.	Partie centrale du Middelkerke Bank. Recouvre des dépôts de remplissage de chenaux.
U2.b	Forte réflectivité. Recoupe le Tertiaire.	Au-dessus des zones de paléochenaux, au Nord du banc.

Tableau III-1 - Caractéristiques et localisation des six réflecteurs de premier ordre. Du plus ancien au plus récent : U2.b à U7.b.
- *Characteristics and location of the six first order reflectors. U2.b to U7.b from the older to the younger.*

Quelques profils réalisés au centre de la zone d'étude présentent la majeure partie des réflecteurs à la fois (Fig. III-10). La définition précise de chaque réflecteur est importante car ce sont eux qui définissent l'architecture du banc et qui sont soulignés sur les profils sismiques lors de l'interprétation. Il ne s'agit toutefois que d'une étape préliminaire car ce sont les unités sismiques qui sont particulièrement utiles pour la reconstitution de la géométrie du banc. C'est pourquoi dans le reste du travail, il est rarement fait allusion à ces réflecteurs.

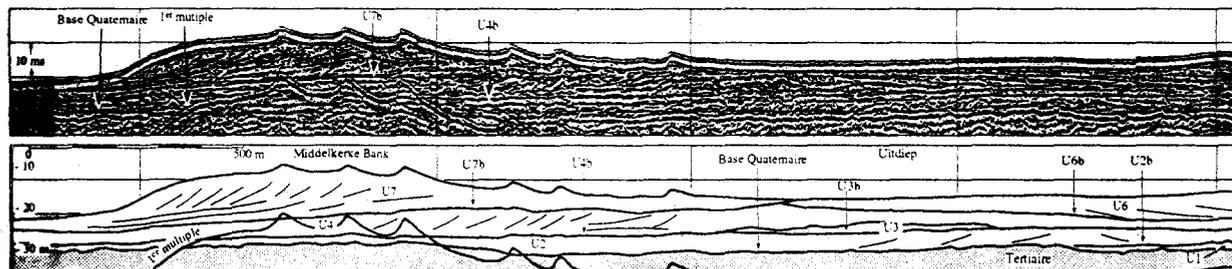


Figure III-10 - a : profil sismique analogique sur lequel cinq réflecteurs intra-quaternaires peuvent être distingués. Profil 18, mission RESECU2.
b : Interprétation.
- *a : Analog record of a seismic section showing five intra-Quaternary reflectors. Profile 18, RESECU2 Survey.*
- *b : Interpreted line-drawing.*

3.3 - Les réflecteurs de second ordre : Réflecteurs internes

En fonction de leur abondance et de leur type, les réflecteurs internes caractérisent le faciès sismique des unités majeures (Fig. III-1). Leur continuité latérale est faible et il n'est pas possible de les suivre d'un profil à l'autre.

Ces réflecteurs peuvent être horizontaux ou obliques (Fig. III-11). Dans le second cas, ils sont associés à la genèse de l'unité qui les contient :

- Lorsque les réflecteurs de second ordre sont en "downlap" et en "toplap", ils représentent une direction de progradation de l'unité sismique.

- Dans certaines unités, ils montrent des angles voisins de 5° : ils sont comparables aux réflecteurs décrits par Houbolt (1968) et interprétés comme les traces de la migration du banc ou de celle de grandes et très grandes dunes.

- Entre ces réflecteurs, il est possible d'observer d'autres réflecteurs fortement pentés (jusque 15°). Ils peuvent être interprétés comme des marques de la progradation de grandes dunes.

- Quand ils sont recoupés par des réflecteurs de premier ordre en troncature, ils indiquent qu'une phase d'érosion a suivi la mise en place de l'unité.

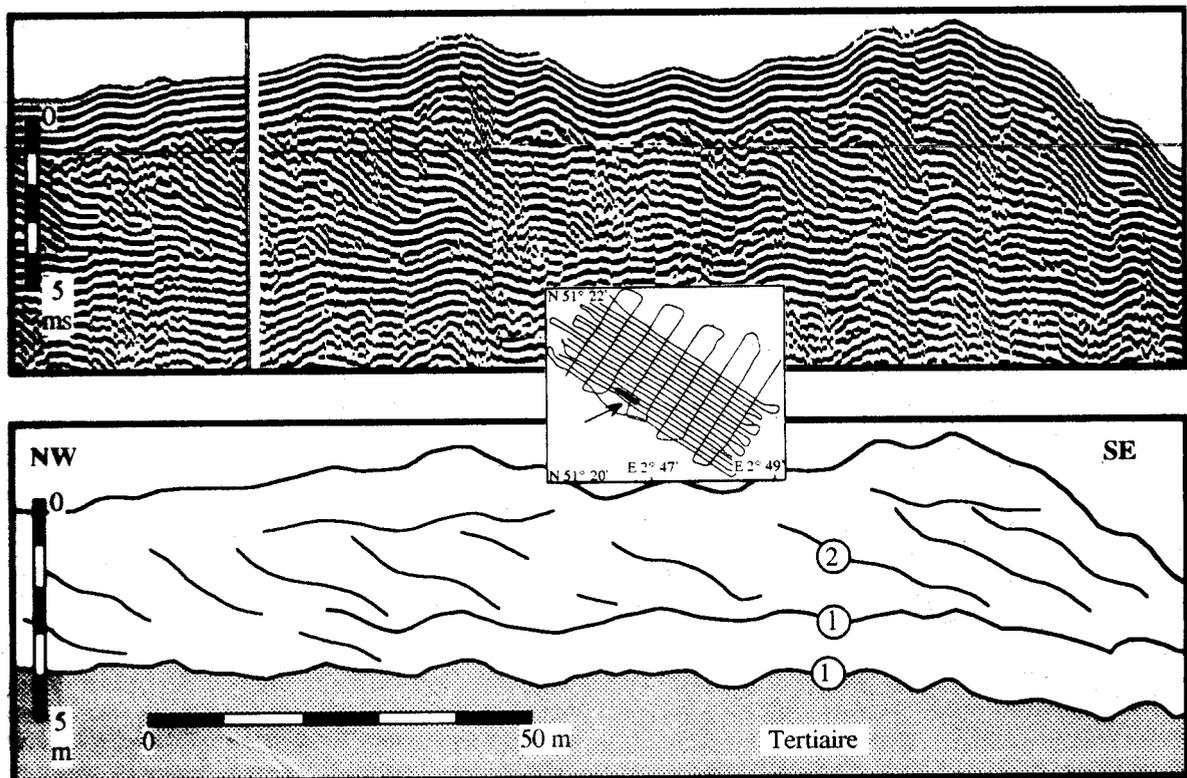


Figure III-11 - Exemple de relations entre les réflecteurs de premier et de second ordres. L'échelle verticale (ms) est donnée en temps double. Sondeur de sédiment, profil N°40, mission BELGICA.

- Analog record and interpreted line-drawing showing the two types of reflectors: first and second order reflectors. Vertical scale in ms (two way-time). Subbottom profiler, profile 40, BELGICA survey.

4 - Les unités sismiques définies par la sismique haute résolution

4.1 - Introduction

Sur la base des profils sismiques, sept unités ont été définies. Une unité sismique est un volume corrélable d'un profil à l'autre et délimité par des discontinuités majeures. Les critères utilisés pour les définir sont les réflecteurs de premier ordre qui les limitent, leur forme externe (Mitchum *et al.*, 1977), leur faciès sismique ainsi que les relations géométriques existant entre les réflecteurs internes. Elles ont été nommées dans un ordre chronologique U1 à U7. Pour chaque unité et grâce au logiciel GEOFOX, il a été possible de reconstituer la surface de base (Fig. III-12 a à Fig. III-18 a) et la carte en isopaques de l'unité (Fig. III-12 b à Fig. III-18 b). En utilisant les profils perpendiculaires, une carte d'orientation des réflecteurs internes a pu être construite (Fig. III-12 c à Fig. III-18 c).

4.2 - Description des unités

La description des sept unités est donnée dans chacune des sept pages suivantes (voir la légende ci-dessous).

Figure III-12 à III-18 - Représentation des unités sismiques U1 à U7. Pour chacune des unités :

- a : Profondeur de la surface de base. Logiciel GEOFOX, l'échelle est différente selon l'unité considérée.
- b : Epaisseur de l'unité sismique. Logiciel GEOFOX.
- c : Directions et pendages des réflecteurs internes. Pendages en dixièmes de degrés.

Tirés : limites de l'unité sismique en dehors de la zone d'étude.

- *U1 to U7 seismic unit Maps. For each unit :*

- a : Depth of the basis surface. GEOFOX software. The scale is different for each seismic unit.*
- b : Thickness of the unit. GEOFOX software.*
- c : Internal reflectors directions and dips. Dips in tenth of degrees.*

Dashed lines : limits of the seismic units out of the study area.

4.2.1 - Unité U1 (Fig. III-12 a, b et c)

L'unité U1 est strictement confinée au niveau des chenaux. Elle est présente sous le Middelkerke Bank et également sous l'Oostende Bank, ainsi que sous les deux dépressions actuelles que constituent le Negenvaam et l'Uitdiep mais uniquement au Nord de la zone d'étude. L'unité est transparente sur les profils et ne montre quasiment pas de réflecteurs internes. Cela correspond à un faciès acoustique de faible énergie. L'épaisseur de l'unité atteint 10 m au niveau des chenaux les plus profonds. Sa forme externe correspond à un remplissage de chenaux.

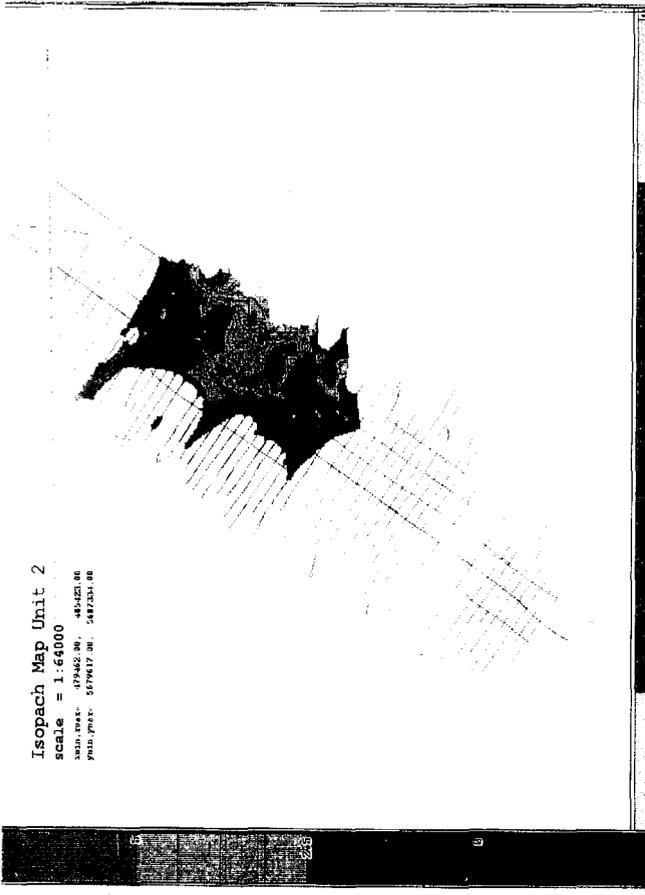
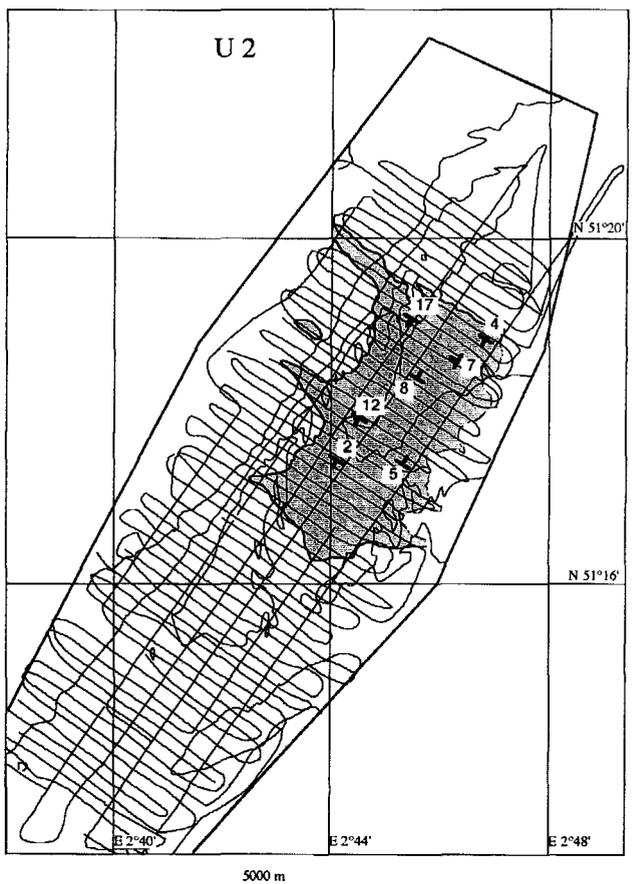
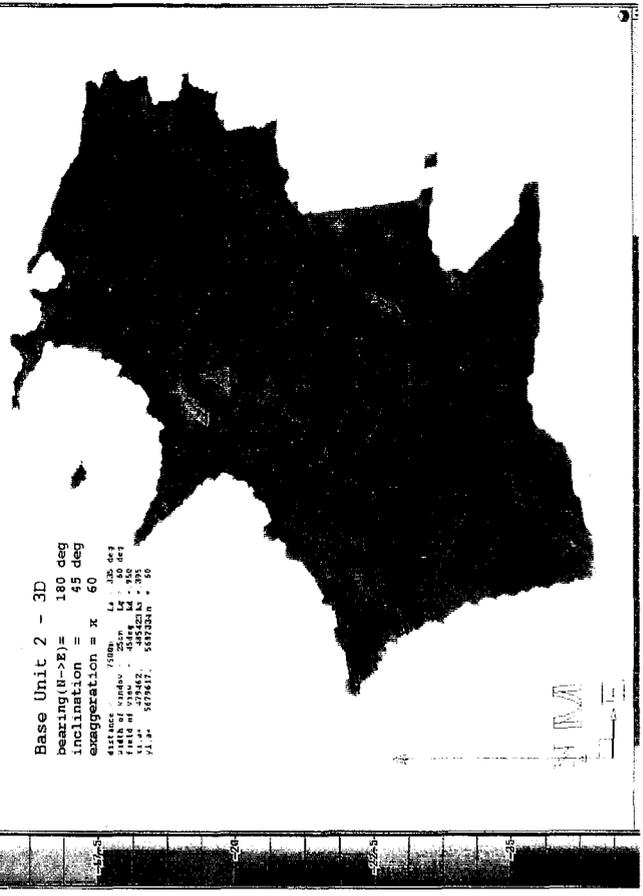


a
b c



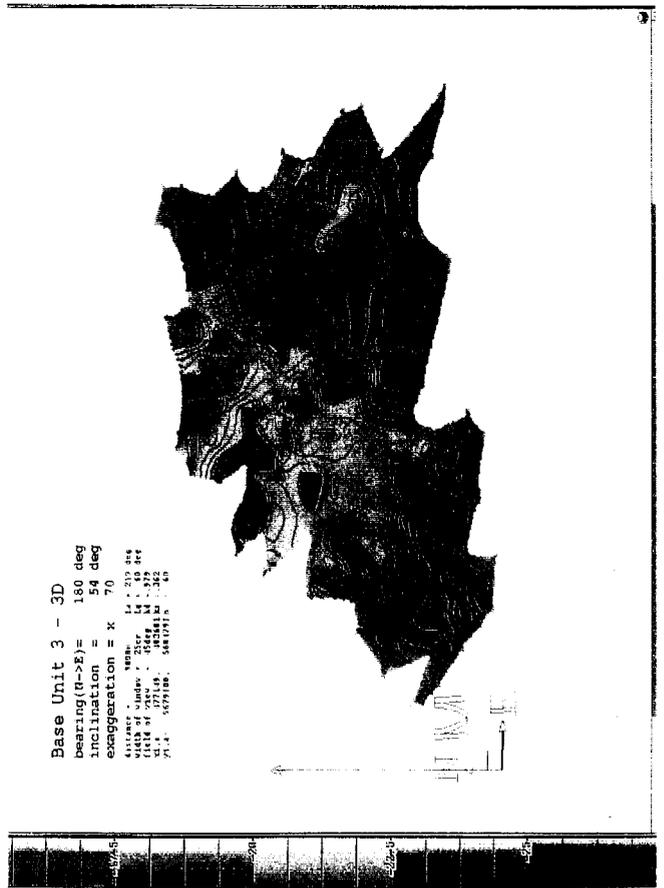
4.2.2 - Unité U2 (Fig. III-13 a, b et c)

L'unité U2 contribue également au remplissage de chenaux, mais uniquement sous l'Uitdiep et l'Oostende Bank, dans la partie NE. Les réflecteurs internes sont peu nombreux et ont des pendages aux directions variées. Le faciès sismique est de moyenne énergie. La surface de base, U2.b, est située jusqu'à près de - 35 m. Elle entre en contact avec le Tertiaire et tronque fréquemment l'unité U1. Dans les zones où les paléochenaux sont les plus profonds, l'épaisseur de U2 peut atteindre 6 m. La géométrie de l'enveloppe de cette unité est celle d'un remplissage de chenaux.

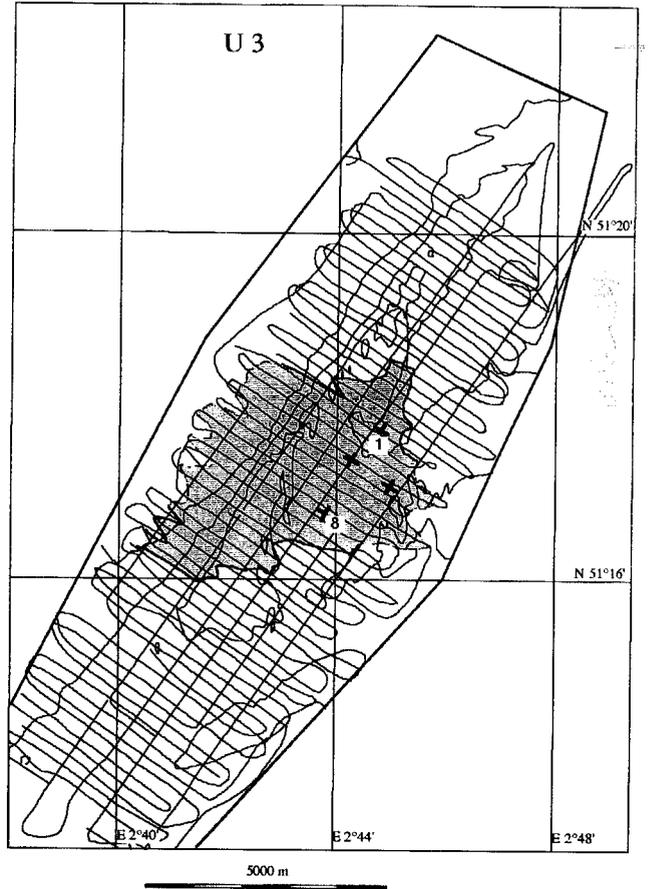


4.2.3 - Unité U3 (Fig. III-14 a, b et c)

L'unité U3 traverse d'Est en Ouest la partie centrale de la zone d'étude. Les réflecteurs internes sont peu nombreux mais présentent parfois un pendage voisin de 1° vers le Nord-Ouest. Ils suggèrent un faciès de faible énergie. La base de U3 (U3.b) tronque U2 et entre souvent en contact avec le Tertiaire. C'est une surface relativement plane, en pente douce vers l'Ouest (0,13%) depuis une profondeur de 17 m jusqu'à 25 m. L'épaisseur de U3 est en moyenne de 5 m mais atteint 7 m localement. Sa forme correspond à une intercalation sableuse ("sand sheet"). Cette unité est recoupée exclusivement par la surface U4.b.

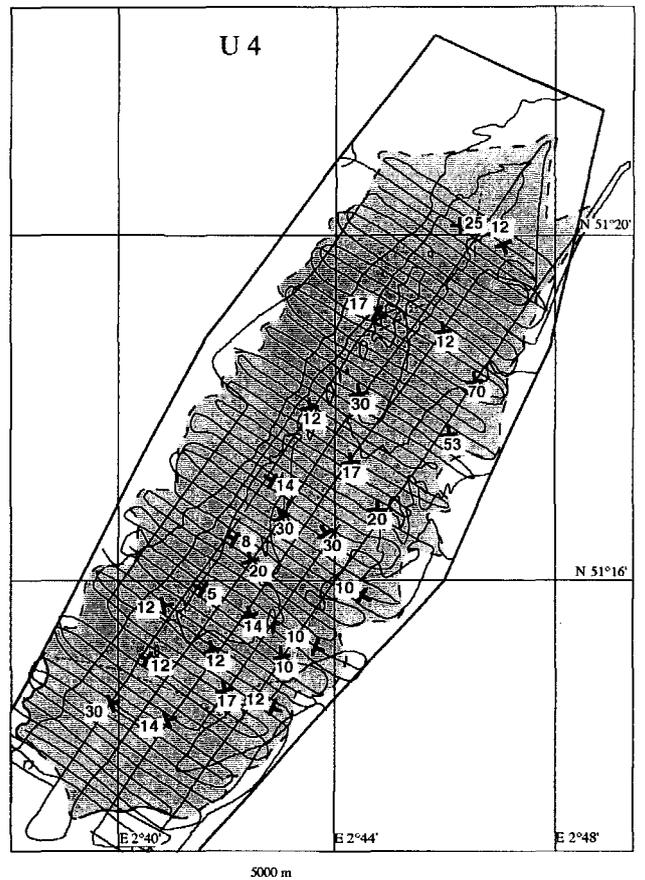
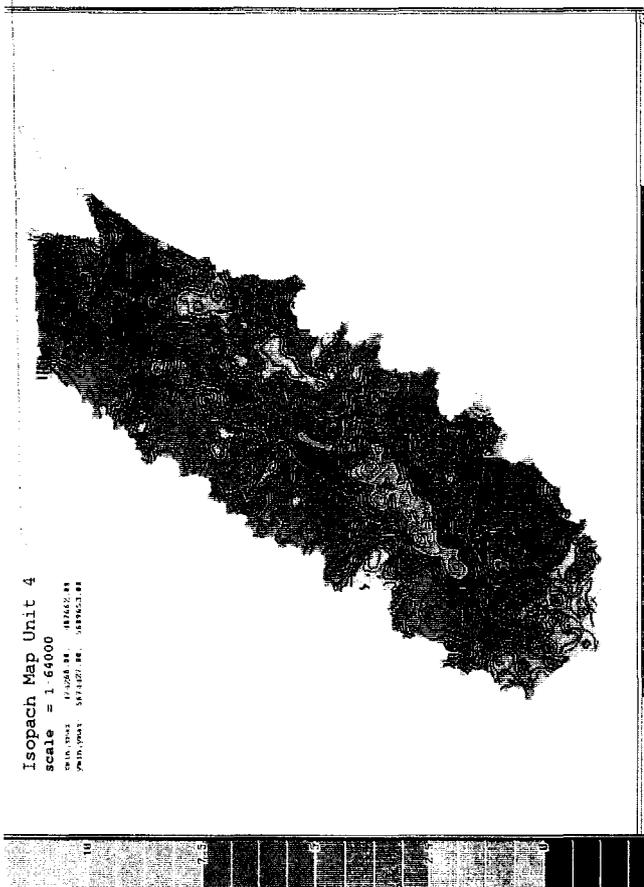
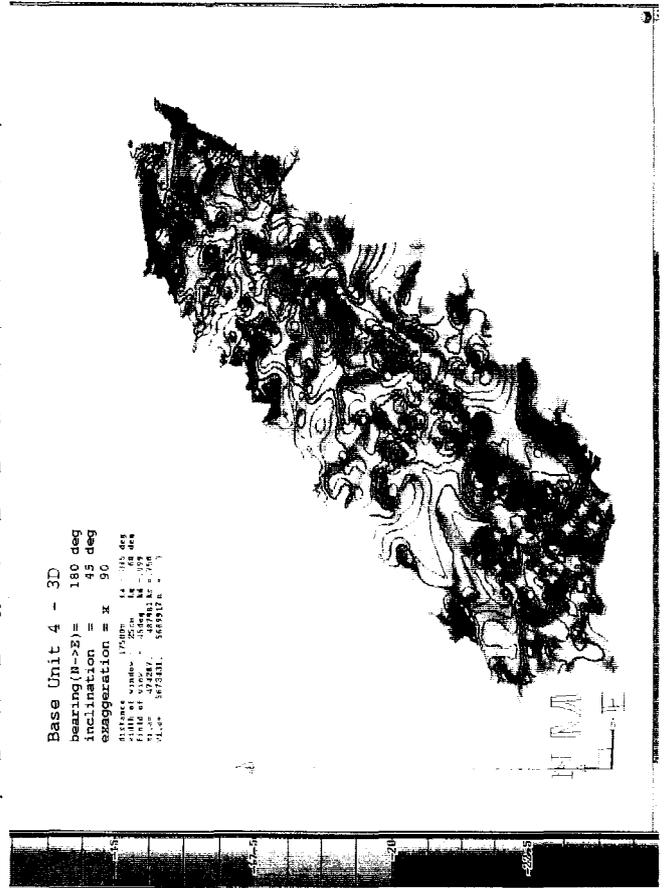


a
b
c



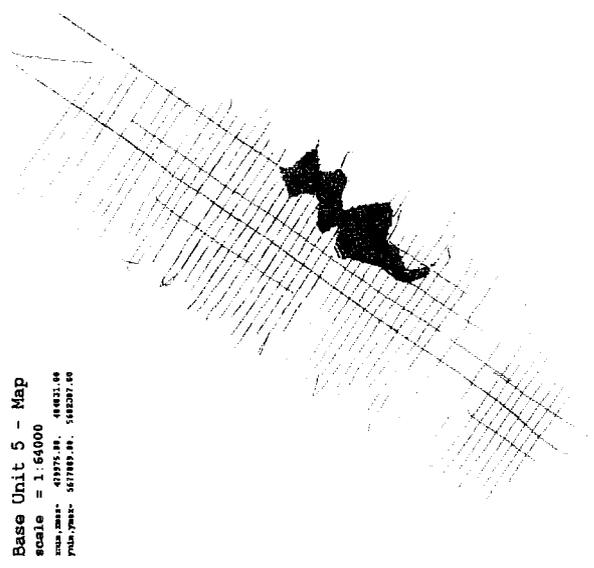
4.2.4 - Unité U4 (Fig. III-15 a, b et c)

U4 couvre la quasi-totalité de la zone d'étude. Les réflecteurs internes sont nombreux et sont orientés préférentiellement vers le Nord avec un pendage qui peut dépasser 5°. Au Sud de l'unité, là où son épaisseur diminue, des pendages de 2 à 3° s'orientent vers l'ENE. Dans le Nord, deux zones possèdent des pendages orientés vers l'Ouest ou vers le Sud. En comparant la disposition des réflecteurs et l'isobathe de la base de U4, il semble que les pendages sont orientés vers le Nord dans les zones les plus hautes. Dans les autres zones, le pendage suit approximativement la ligne de plus grande pente. U4,b est au contact de U3 ou du Tertiaire. Il se trouve à des profondeurs comprises entre 14 et 23 m, plus importantes au Nord. U4 est l'unité la plus épaisse du banc puisqu'elle atteint 14 m. La forme de son enveloppe et la présence de nombreux réflecteurs conduisent à la décrire comme une **intercalation sableuse épaisse**. La comparaison des figures III-15 a et b montre que l'épaisseur de l'unité ne dépend pas de la profondeur de sa base.

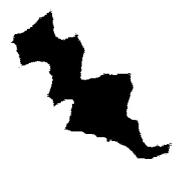


4.2.5 - Unité U5 (Fig. III-16 a, b et c)

L'unité U5 est de petite taille. Elle couvre une surface de 2 x 5 km et ne se trouve que sous la partie centrale de l'Oostende Bank. Les réflecteurs internes sont peu nombreux et indiquent des pentes de moins de 1° vers le SE. L'énergie acoustique de cette unité est moyenne à forte. La surface de base (U5.b) est faiblement concave avec des profondeurs comprises entre 8 et 16 m, et entaille l'unité U4. L'épaisseur de U5 est faible, 2 m en moyenne et 5 m au maximum. Cette unité possède une forme de lentille allongée dans le sens SW-NE.



a
b c

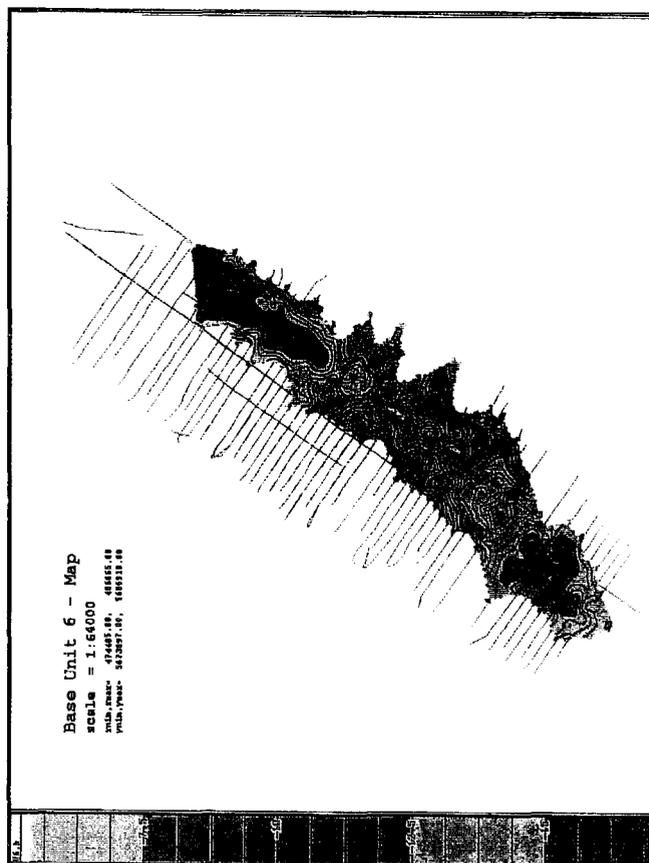


isopach Map Unit U5
scale = 1:45000
NAD, 1983 - 47375.84, 44821.46
PNA, 1983 - 587183.81, 555237.46

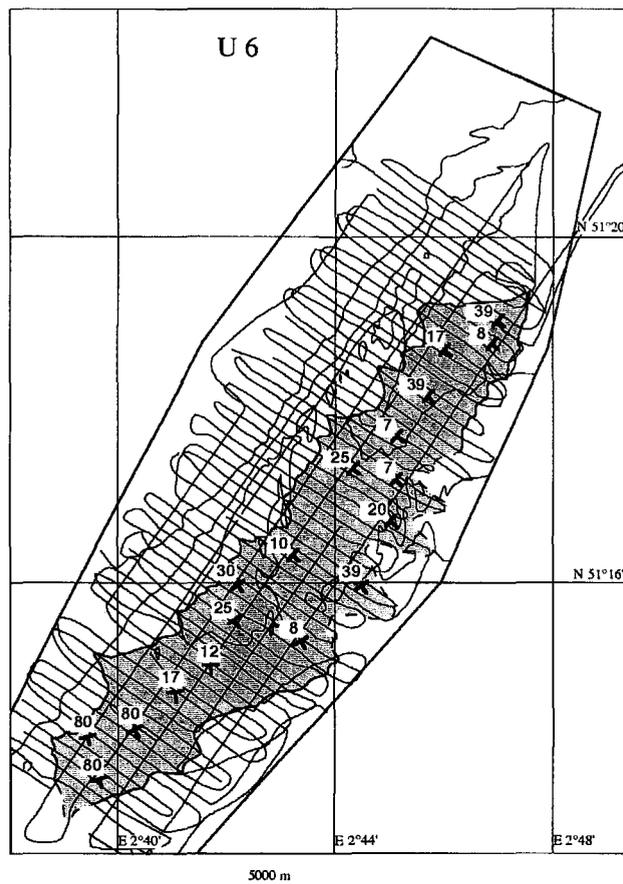
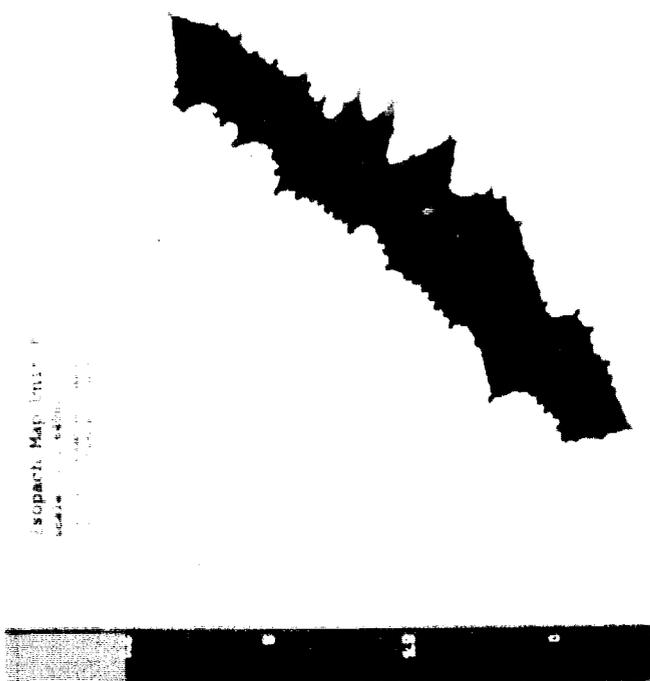


4.2.6 - Unité U6 (Fig. III-17 a, b et c)

U6 recouvre partiellement U4 et la totalité de U5. Il s'agit d'une unité allongée SW-NE, donc oblique par rapport aux directions actuelles des Middelkerke et Oostende Banks. U6 occupe la majeure partie de l'Oostende Bank et de l'Uitdiep ainsi que l'extrémité Sud du Middelkerke Bank. L'énergie du faciès acoustique est moyenne, les réflecteurs internes y sont très nombreux et bien marqués. Ces réflecteurs présentent les pendages homogènes les plus élevés observés au sparker ($> 5^\circ$) en direction du SE ou du SSE, dans le Sud de l'unité. De plus, leur forme est fréquemment de type sigmoïdal, rappelant l'allure de faisceaux de progradation. La surface de base, concave, est plus haute dans la partie centrale du banc (jusqu'à - 8 m) qu'aux deux extrémités NE et SW (jusqu'à - 17 m). L'épaisseur de U6 atteint 8 m dans la partie centrale, ce qui lui confère une forme de lentille allongée. Elle est tronquée par le réflecteur U7.b et affleure largement dans l'Uitdiep.

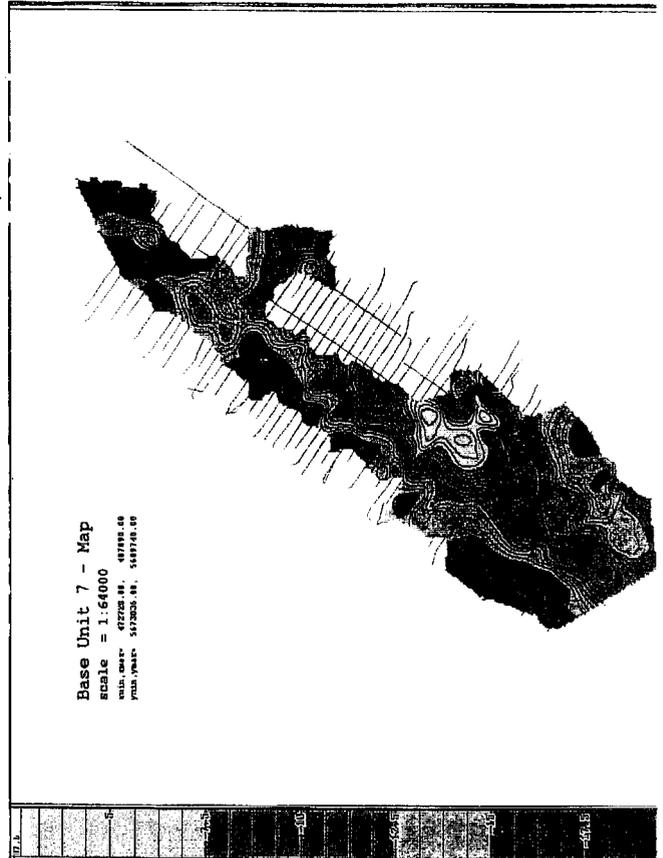


b c

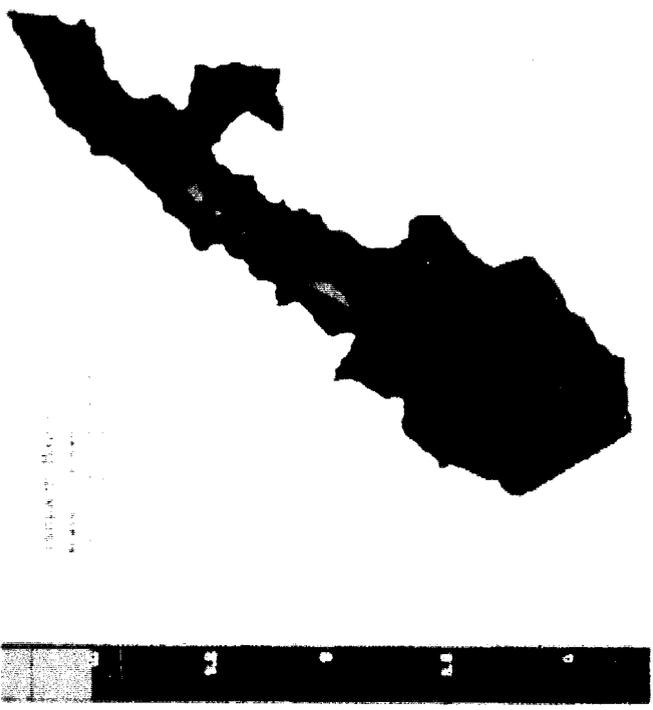


4.2.7 - Unité U7 (Fig. III-18 a, b et c)

U7 est l'unité supérieure du banc. Il semble parfois qu'elle pourrait être divisée en deux sous-unités ou davantage car de grands réflecteurs horizontaux la traversent fréquemment. Ces réflecteurs s'observent dans la partie la plus épaisse du banc, ainsi qu'au Nord. Néanmoins, la difficulté de les suivre sur de grandes distances ne nous a pas permis de diviser l'unité. U7 constitue la majeure partie du relief actuel du banc. Elle existe donc partout mais est quasiment absente au niveau des chenaux adjacents. Elle est caractérisée par un faciès d'énergie faible à moyenne. Les réflecteurs internes y sont nombreux et peuvent caractériser deux zones : 1) Au Nord et dans toute la partie où le banc présente une asymétrie marquée, les valeurs de pendage se situent entre 1 et 5° vers le NW. Ils sont du type de ceux décrits par Houbolt (1968) sur le Well Bank dans la Mer du Nord. 2) L'extrémité Sud de l'unité est marquée par des



a
b c



Suite du texte de la page 132 :

réflecteurs internes horizontaux se terminant en "onlap" sur la surface U7.b (Fig. III-1). Cette surface de base est convexe. Les profondeurs varient entre 5 m au centre et 18 m sur les bords de l'unité. L'épaisseur de U7 atteint 13 m sans tenir compte des grandes et très grandes dunes à sa surface. Elle est maximale dans la zone la plus haute et la plus étroite du banc.

4.3 - Récapitulatif

Dans la partie médiane du banc, une dizaine de profils permet d'observer les sept unités sismiques reconnues (ex. profil N°27 ; Fig. III-19), dont les caractéristiques peuvent être décrites.

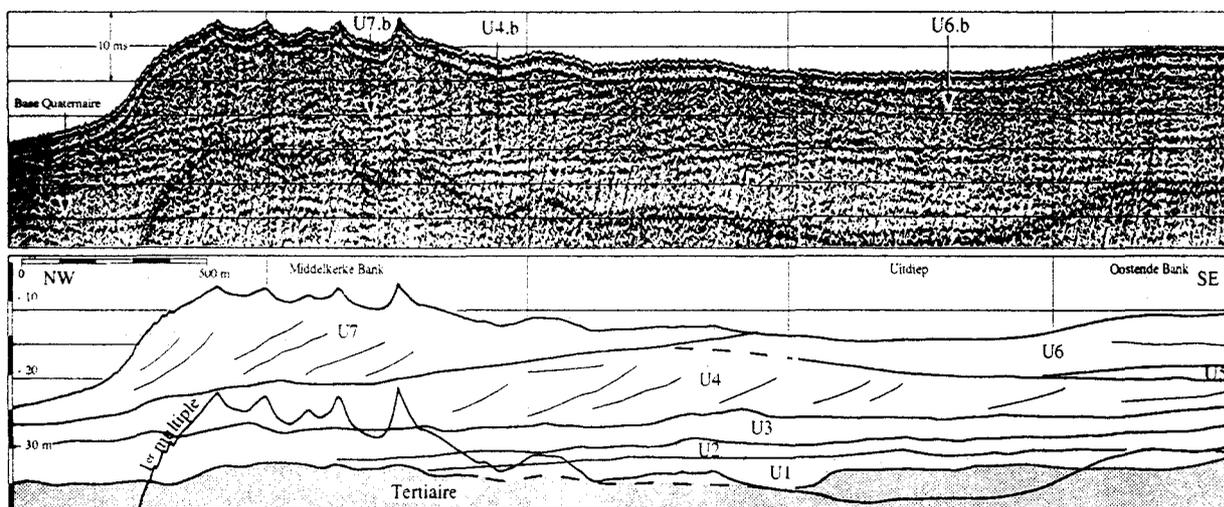


Figure III-19 - Profil analogique et interprétation d'un profil présentant les sept unités sismiques. Profil N°27, mission RESECUI.

- Analog record and interpreted line-drawing showing the seven seismic units. Profile 27, RESECUI survey.

Une sélection de dix profils interprétés est donnée en annexe. Elle met en évidence la variabilité latérale des unités sismiques du Nord au Sud du banc. Sur l'ensemble de la zone d'étude, les variations des principales caractéristiques des sept unités sismiques sont illustrées par la figure III-20. Les directions indiquées pour les pendages correspondent à la synthèse des observations des figures III-12 c à III-18 c. Dans certaines unités (U4, U5, U7), les directions sont variables. Elles indiquent des processus de sédimentation ou des sens différents au sein d'une même unité. La définition de la forme externe suit le principe de stratigraphie sismique (Mitchum *et al.*, 1977). De la base vers le haut, trois phases principales sont observées :

- Les unités U1 et U2 occupent des chenaux creusés dans le Tertiaire. Elles correspondent à des phases d'érosion/remplissage de ces chenaux en milieu probablement fluviatile ou estuarien.

- L'unité U3 paraît correspondre au passage entre un milieu estuarien et un milieu de banc sableux, dans le cadre de la remontée du niveau marin. Sa forme en feuillet sableux ainsi que les réflecteurs internes qu'elle contient suggèrent en effet un estran soumis aux courants de marée.

- L'unité U4, marquée par de nombreux réflecteurs internes, semble caractériser un corps progradant globalement vers le NW. Il pourrait s'agir d'une unité correspondant à un banc tidal car son aspect sur les profils sismiques ressemble à celui observé dans l'unité U7. Lors d'une reconnaissance préliminaire de la plateforme continentale belge, Maréchal *et al.* (1983), ont mis en évidence au sein du Middelkerke Bank une unité sismique que l'on peut assimiler à U4. Ils considéraient alors cette unité comme un paléobanc sur lequel se serait développé le Middelkerke Bank actuel. La structure révélée par la présente étude indique que l'architecture de U4 peut effectivement correspondre à un banc, mais les zones aux pendages orientés différemment montrent qu'elle résulte de processus différents d'accumulation sédimentaire.

- L'unité U5 dont l'extension latérale est très faible peut difficilement être rapprochée à un milieu de dépôt particulier. Sa forme de lentille résulte essentiellement du caractère érosif de son sommet.

- Les caractéristiques de U6 en font une unité différente des autres grandes unités telles que U4 ou U7. Ses réflecteurs internes sont de sens opposé (SE, au lieu de NW dans U4 et U7) et sa forme externe est celle d'une lentille. Le grand axe de la lentille correspond à une direction intermédiaire entre celle du Middelkerke et de l'Oostende Bank. Les pendages vers le SE indiquent que cette unité correspond à un corps progradant latéralement vers le SE au cours du temps.

- L'unité U7 possède les caractéristiques sismiques d'un banc tidal (Stride, 1982), c'est-à-dire de grands réflecteurs obliques orientés dans le même sens que son flanc raide et des discontinuités horizontales.

L'épaisseur maximale des unités est le plus souvent observée dans leur partie centrale. Dans le cas des unités affleurantes (Unités U4, U6 et U7), la présence de dunes à leur surface peut faire varier leur épaisseur de façon relativement importante puisque les dunes atteignent des hauteurs de 2 à 3 mètres et exceptionnellement 5 m dans la partie nord (cf. Chapitre II, rubrique B-1.2).

La carte des unités affleurantes (Fig. III-21) donne une image correspondant à une carte géologique de la zone d'étude. L'unité U7, la plus récente, couvre la majeure partie du banc et constitue le relief morphologique appelé "Middelkerke Bank" sur les cartes marines. Les unités U4 et U6 affleurent à la faveur des deux dépressions que constituent les chenaux Negenvaam et Uitdiep.

Unité	localisation et direction des réflecteurs internes	énergie moy. des faciès acoustiques	forme externe	épaisseur maximum	milieu de dépôt
U 7		moyenne, faible	 banc ss	13 m + dunes	banc tidal
U 6		moyenne	 lentille	8 m + dunes	barre progradante vers le SE
U 5		moyenne, forte	 lentille	5 m	?
U 4		forte	 feuillet "sheet"	14 m	barre progradante vers le NW
U 3		faible	 feuillet "sheet"	7 m	estran de marée
U 2		moyenne	 chenaux	6 m	remplissage de chenaux, estuarien ou fluvialite
U 1		faible	 chenaux	10 m	

Figure III-20 - Caractéristiques de chacune des unités sismiques. Dans la colonne de gauche, les grilles représentent 1) de gauche à droite, le chenal Negenvaam, le Middelkerke Bank, le chenal Uitdiep et l'Oostende Bank ; 2) de haut en bas, les parties NE, centrale et SW.

- Main characteristics of the seven seismic units. On the left, the grids present the Negenvaam, the Middelkerke Bank, the Uitdiep and the Oostende Bank, respectively from left to right ; the NE, central and SW parts of the study area, respectively from top to bottom.

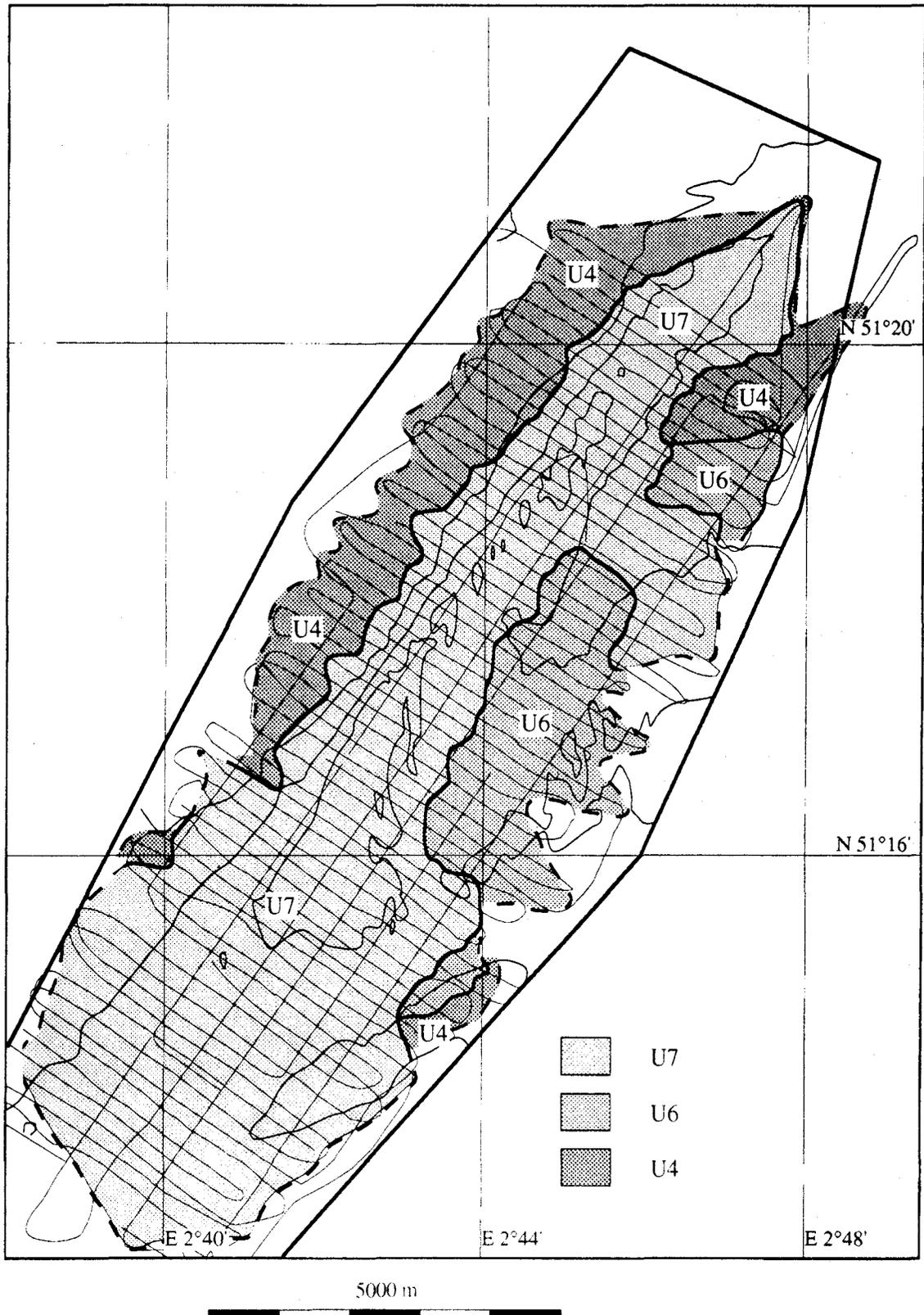


Figure III-21 - Carte des affleurements des différentes unités sismiques.
 - Map of seismic units cropping out.

Le lien entre ces unités à l'affleurement et la nature des sédiments superficiels prélevés à la surface du banc n'apparaît pas clairement. La répartition des sédiments superficiels semble en effet être majoritairement due à la dynamique actuelle (cf. Chapitre II, A) plutôt qu'à la nature lithologique des unités sismiques directement sous-jacentes. La résolution verticale des moyens sismiques mis en œuvre ne permet pas de dire s'il existe une fine couche de dépôts superficiels contrôlés par la dynamique actuelle et indépendants des unités sismiques sub-affleurantes, ou si les sédiments les plus superficiels sont les produits directs du remaniement de ces unités sismiques.

Cinq unités ont des réflecteurs basaux qui touchent la surface sommitale du Tertiaire : U1 à U4, et U7 (Fig. III-22). La comparaison entre la répartition des unités et les isobathes du toit du Tertiaire montre l'influence de la topographie initiale sur le lieu de dépôt et / ou de préservation des unités. De U1 à U7, les unités sismiques sont implantées successivement dans des zones de moins en moins profondes (Fig. III-9). Par exemple, l'unité U7 est directement au contact du Tertiaire là où il se trouve à de faibles profondeurs (moins de - 20 m à l'extrémité sud du banc).

Globalement, les unités sont disposées symétriquement autour d'un axe virtuel E-W qui passe au milieu de la zone d'étude et de l'unité U1. Par ailleurs, les unités U1, U2 et U3 semblent inciser l'unité inférieure le long d'un axe E-W. En confrontant ces deux groupes d'observations, on note que la disposition des unités sismiques inférieures s'apparente à l'emboîtement de trois épisodes de remplissage de chenaux ou de dépressions de plus en plus ouverts au cours du temps (de U1 à U3), et recouverts par l'unité U4 (Fig. III-23).

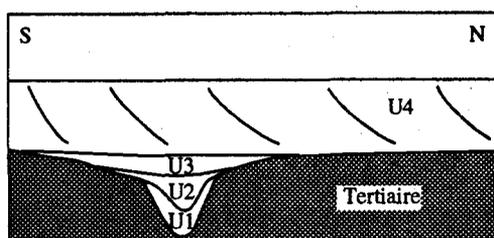


Figure III-23 - Coupe schématique N-S illustrant les relations entre les trois premières unités, emboîtées (de U1 à U3) de part et d'autre d'un axe de symétrie E-W, et recouvertes par l'unité U4.

- Schematic N-S profile showing the relationship between the three first units (from U1 to U3) superimposed along an E-W symmetrical axis and overlain by the unit U4.

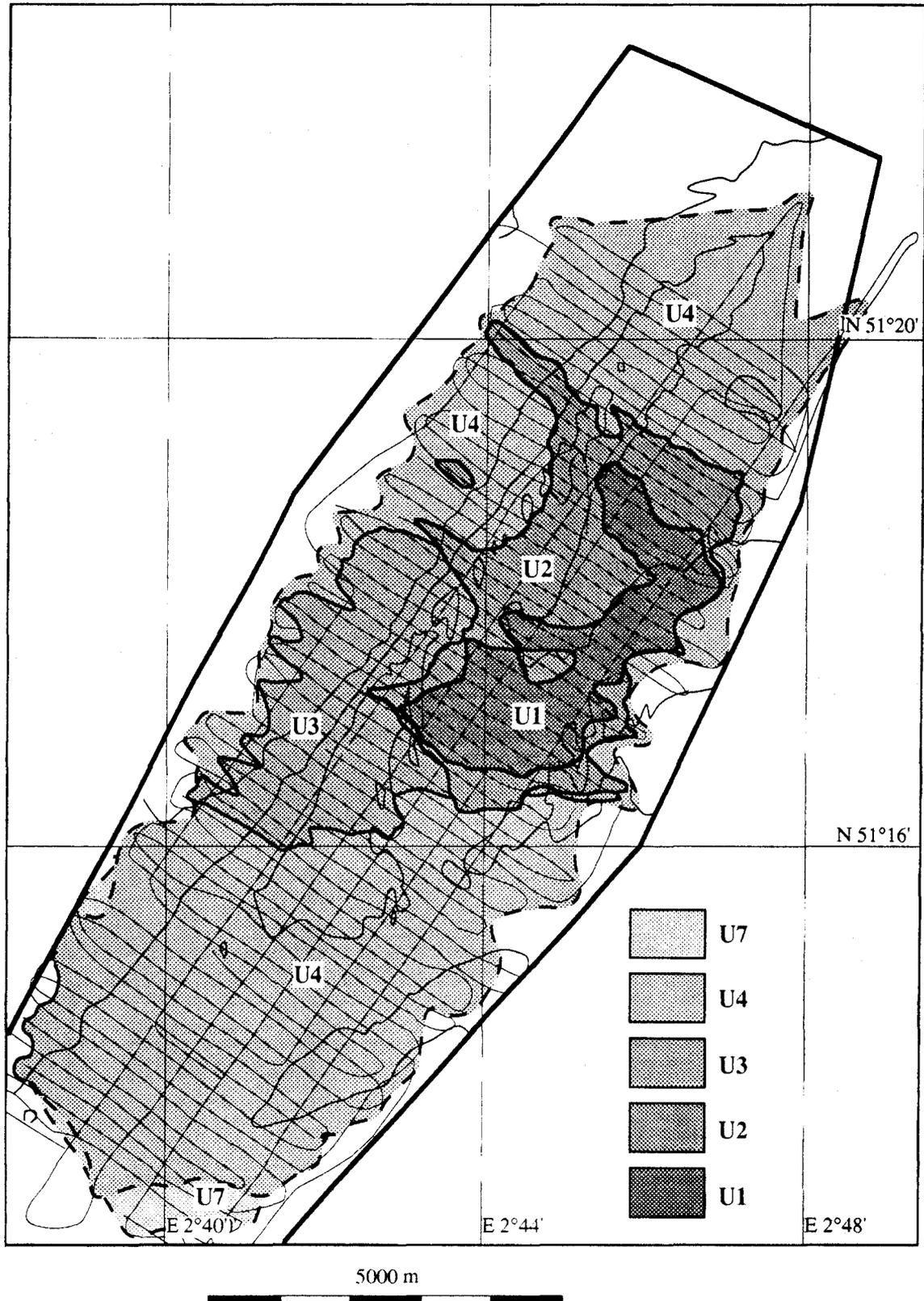


Figure III-22 - Carte des unités sismiques au contact du Tertiaire.
 - Map of the seismic units in contact with the Tertiary.

5 - Apports de la sismique très haute résolution (THR)

5.1 - Introduction

La résolution élevée de la sismique THR permet de préciser la structure superficielle des dix premiers mètres des terrains étudiés (cf. Chapitre I pour la description technique). Cette méthode permet donc de compléter utilement les données de la sismique HR. Malgré la pénétration peu importante de la sismique THR, l'utilisation en parallèle des deux méthodes permet souvent de retrouver des réflecteurs communs à chacun des deux types de profils (Fig. III-24). Le sondeur de sédiment a été utilisé sur la totalité du banc (voir plan de position, Fig. I-15), mais les résultats présentés ici concernent essentiellement les données recueillies au Nord du banc (Fig. I-16).

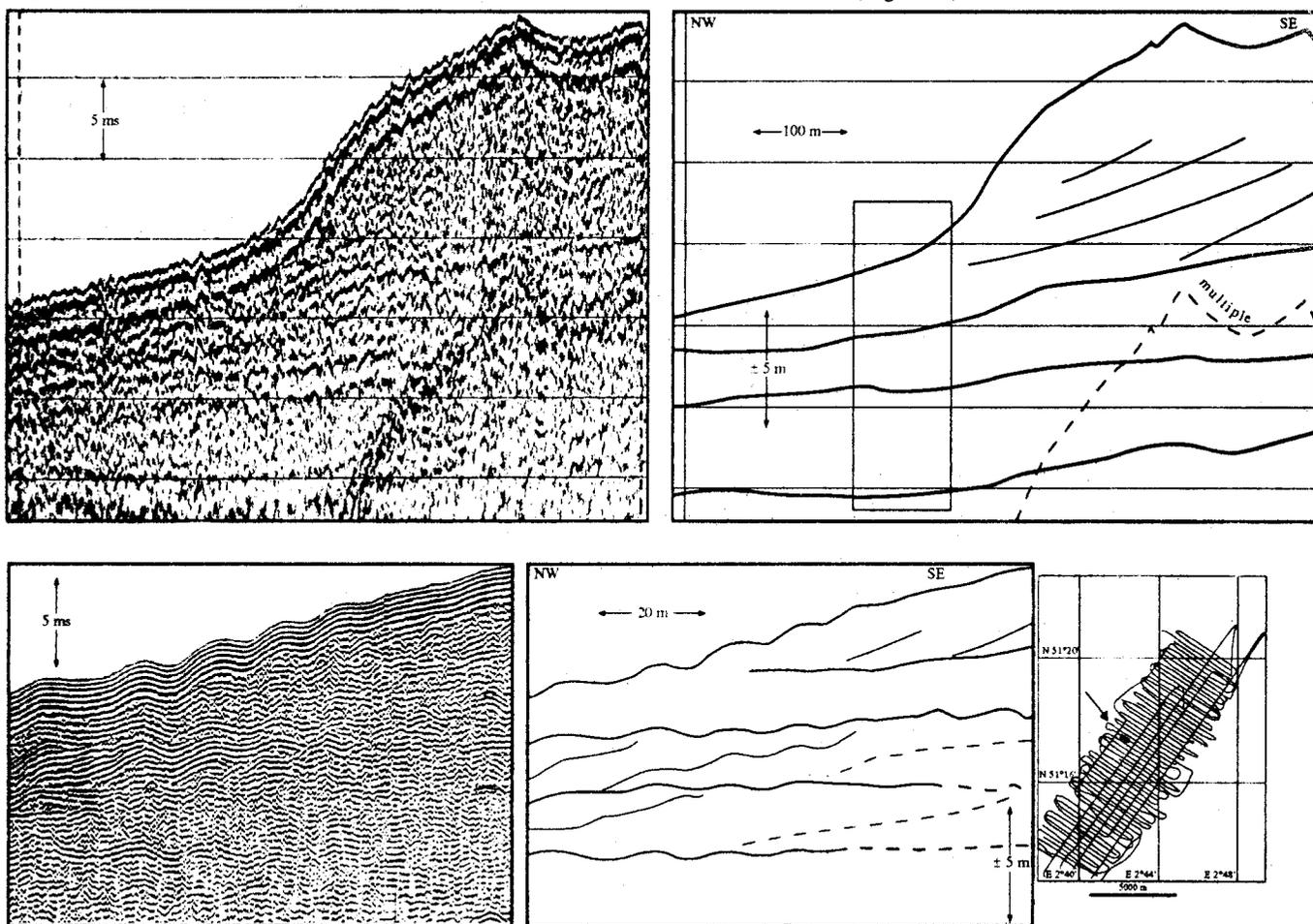


Figure III-24 - Exemple de profils sismiques obtenus sur la même zone à partir des deux sources utilisées.

- Sparker. Extrait du profil N° 27, mission RESECUI.
- Interprétation. Le rectangle correspond à la zone représentée en c et en d.
- Sondeur de sédiment. Extrait du profil N° 19, mission Belgica.
- Interprétation.

Notez la différence des échelles horizontales entre les deux profils ainsi que les effets dus à la houle sur les figures c et d.

- Example of seismic profiles obtained from the same area by using the two seismic sources.

- Sparker. Part of profile 27, RESECUI survey.
- Line drawing. The rectangle corresponds to the area figured in c and in d.
- Subbottom profiler. Part of profile 19, Belgica survey.
- Line drawing.

Notice the horizontal scale differences between the two profiles and the bad weather effects on figures c and d.

5.2 - Application à la partie nord du banc

5.2.1 - Situation générale

La terminaison nord du banc est caractérisée par la présence de grandes et très grandes dunes dont l'amplitude maximale atteint 5 mètres. L'observation de ces grands corps sédimentaires a donné lieu à la fabrication d'une mosaïque d'image sonar (cf. Chapitre II).

Simultanément, des profils sismiques ont été effectués sur cette zone selon le plan de positionnement donné au chapitre I (Fig. I-16). La réalisation d'une couverture dense de profils sismiques est justifiée par quatre caractéristiques particulières à cette zone :

- Les premiers profils sismiques réalisés ont montré des dunes de grande taille dans lesquelles plusieurs types de réflecteurs obliques sont présents ;
- le banc est peu épais (maximum 10 m). Le sondeur de sédiment est donc particulièrement adapté pour son étude ;
- le sparker a révélé la présence de surfaces déprimées à la limite Quaternaire / Tertiaire. La sismique THR peut être capable de préciser la forme de ces surfaces ;
- la profondeur d'eau comprise entre -14 et -24 m est suffisamment importante pour diminuer les problèmes techniques d'artéfacts sur les enregistrements ("fantôme" et multiples par exemple).

5.2.2 - Architecture de la terminaison septentrionale du banc

L'espacement des profils réduit à 100 m et le nombre élevé de recouvrements entre les profils ($9 \times 16 = 144$) rendent possible un bon contrôle de la position des réflecteurs observés, et permettent de reconstituer l'architecture générale de la zone d'étude (Fig. III-25 et III-26).

Le Tertiaire présente les mêmes caractéristiques que celles décrites précédemment. Il est affecté fréquemment par des failles. L'architecture générale du banc quant à elle semble plus simple que celle qui a été observée sur le reste du banc. Les réflecteurs de premier ordre sont moins nombreux et délimitent un nombre restreint d'unités et de sous-unités sismiques.

5.2.3 - Unités sismiques

La partie nord du Middelkerke Bank n'a pas été étudiée avec les outils de sismique HR. Cependant, il est possible de se servir des informations acquises sur l'architecture générale du banc (Fig. III-12 à III-18) comme moyens prédictifs pour cette zone particulière. Les deux unités pouvant être *a priori* présentes sont U4 et U7. Elles regroupent en tout cinq sous-unités :

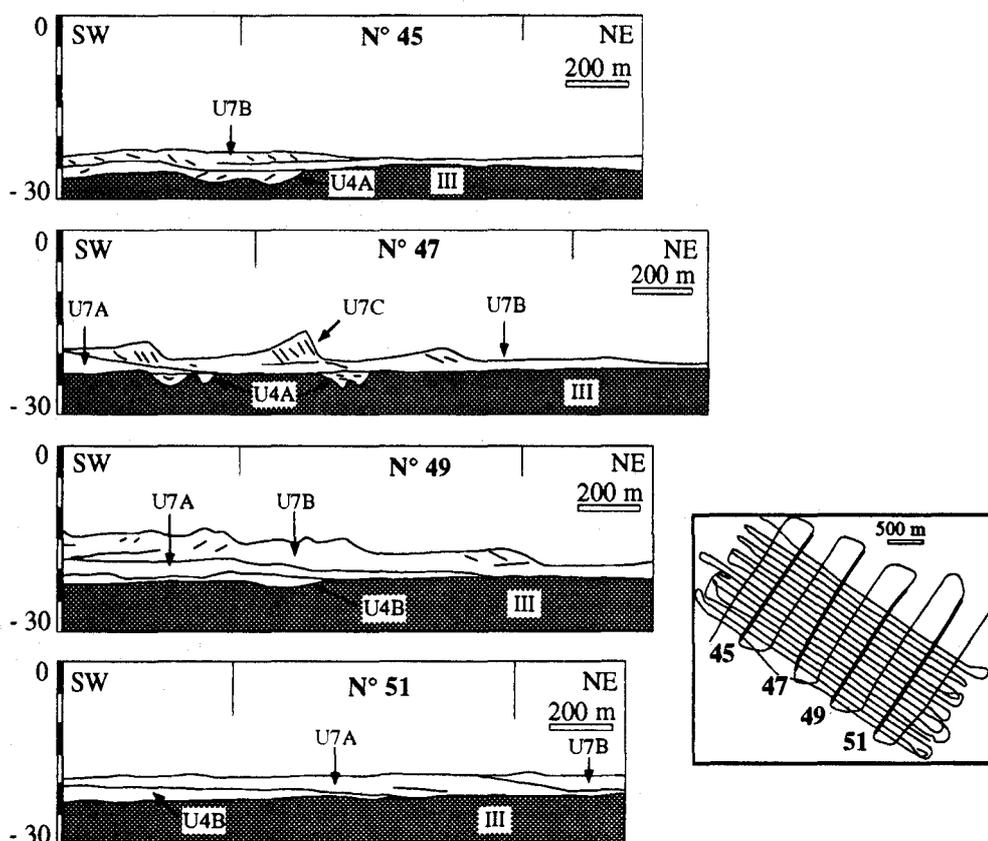


Figure III-25 - Interprétation de quatre profils THR longitudinaux au banc. Pleine échelle verticale : 30 m pour une vitesse des ondes acoustiques de 1600 m.s^{-1} dans le sédiment. Exagération verticale : $\times 20$. Sondeur de sédiment, mission Belgica
 - Line drawing of four very high resolution profiles parallel to the bank. Full vertical scale : 30 m for a sound velocity in the sediment of 1600 m.s^{-1} . Vertical exaggeration : $\times 20$. Subbottom profiler, Belgica cruise.

- La sous-unité inférieure est localisée uniquement dans les chenaux, eux-mêmes présents dans la zone la plus basse (à l'Ouest). A cause du non-recouvrement des données des deux appareils de sismique, il n'est pas possible de replacer cette unité par rapport au cadre général (U1 à U7). Néanmoins, la figure III-22 indique que seule l'unité U4 peut être présente au contact du Tertiaire dans cette zone. Cette première sous-unité est donc considérée comme faisant partie de U4. Elle est appelée U4A.

- La sous-unité suivante correspond à l'unité U4 dans le reste du banc. Dans cette zone, elle doit être considérée comme une sous-unité de U4. Elle est appelée U4B. Cette sous-unité est bien développée au Sud et à l'Est puis s'amenuise pour disparaître vers le Nord. Peu de réflecteurs internes sont observés.

Les trois sous-unité suivantes correspondent toutes à des sous-unités de l'unité U7. Elles sont nommées U7A, U7B et U7C.

- U7A est observée sur tous les profils perpendiculaires au banc et disparaît vers le Nord. Son développement maximal est localisé dans la partie Est.

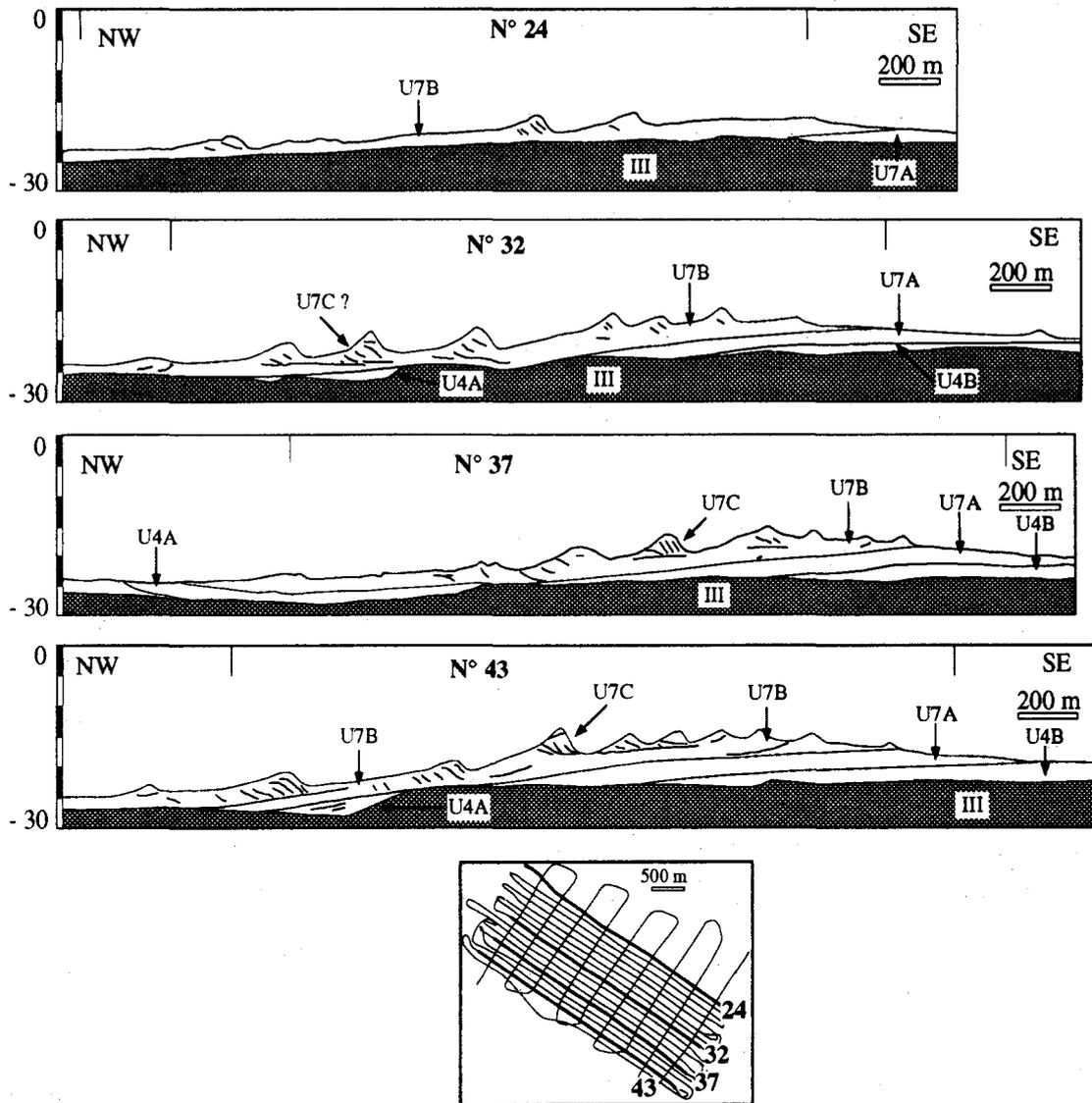


Figure III-26 - Interprétation de quatre profils THR transverse au banc. Pleine échelle verticale : 30 m pour une vitesse des ondes acoustiques de 1600 m.s^{-1} dans le sédiment. Exagération verticale : x20. Sondeur de sédiment, mission Belgica. La totalité des profils est donnée en annexe.
 - Line drawing of four very high resolution profiles transverse to the bank. Full vertical scale : 30 m for a sound velocity in the sediment of 1600 m.s^{-1} . Vertical exaggeration : x20. Subbottom profiler, Belgica cruise.

- U7B est surtout développée à l'Ouest. Elle est caractérisée par de nombreux réflecteurs internes pour la plupart pentés vers l'Est. Cette sous-unité constitue également le corps de certaines dunes.

- Fréquemment, les dunes les plus grandes possèdent un réflecteur faiblement penté à la base qui les isole du reste du banc. Ces réflecteurs limitent la sous-unité U7B de la sous-unité U7C constituée des plus grandes dunes. Les

problèmes de corrélation entre les profils, rencontrés lors de l'étude des réflecteurs les plus superficiels ne permettent pas de déterminer l'extension exacte de la sous-unité U7C ni de savoir si elle constitue l'ensemble des grandes dunes.

5.2.4 - Discontinuités

Les profils sismiques montrent que l'orientation des grandes dunes reflète une migration sédimentaire vers l'Est, marquée par la succession d'ensembles de couches obliques ou "sets" (2 sur les figures III-27 et III-28). L'orientation et le pendage apparent des réflecteurs mesurés aux intersections des profils sont reportés sur un canevas de Schmidt. Cette opération permet de restituer la valeur réelle du pendage. La direction correspond à celle des dunes mesurée sur la mosaïque de sonar latéral (cf. Chapitre II). Les limites des sets présentent des inclinaisons comprises entre 1,3° et 15°, équivalentes aux pentes des flancs raides des grandes et très grandes dunes. Ces réflecteurs marquent donc la progradation du flanc raide des dunes et peuvent être appelés "foresets", même si les pentes sont très faibles et ne correspondent en aucun cas à des faces d'avalanche sableuse.

- L'évolution des grandes dunes n'est pas continue mais marquée par des discontinuités (1a sur la figure III-26) ou par des surfaces horizontales (1b). Les discontinuités 1a limitent des "cosets" (groupements de sets ou faisceaux obliques) dans lesquels l'orientation et la pente des foresets est constante. Entre les "cosets", le changement dans la pente des réflecteurs internes signifie une modification des conditions hydrodynamiques. Il peut s'agir d'une combinaison des effets des marées et des houles. Il apparaît en effet qu'une période de tempête peut conduire à remobiliser une quantité importante de sédiment (cf. Chapitre II, rubrique 4) sans pour autant modifier fondamentalement la morphologie du fond marin (Houthuys, 1993).

Les surfaces horizontales (1b) tronquent le sommet des grandes dunes sur des épaisseurs pouvant dépasser un mètre. Terwindt (1971) en Mer du Nord, Ludwick (1972) dans la baie de Chesapeake aux Etats Unis et Langhorne (1982) dans la Start Bay en Manche ont déjà observé des phénomènes d'écâtage sur des grandes dunes lors des périodes de tempête. Cet écâtage, s'il est accompagné d'un vannage suffisant du sédiment, est susceptible d'engendrer une discontinuité sismique horizontale de type 1b. Sur le Middelkerke Bank, la taille des dunes affectées par ce phénomène est grande. Il s'agit donc probablement de l'action de tempêtes exceptionnelles associées à des conditions fortes de marées de vives eaux.

- Les grands réflecteurs obliques (0) qui séparent les unités sismiques sont les marqueurs de l'évolution à plus long terme du banc. Ils possèdent un pendage faible vers le Nord, inférieur à 1°. Ces réflecteurs possèdent les mêmes caractéristiques que les "discontinuités de premier ordre" observées par Berné (1991) sur les dunes de Surtainville au large du Cotentin. A Surtainville, Berné considère que ces discontinuités sont la marque de l'érosion par une forme surimposée. Ceci correspond aux réflecteurs du Middelkerke Bank qui semblent constituer la semelle de certaines grandes dunes. Ils constituent donc bien la marque de la progradation vers l'Est des plus grandes dunes qui érodent en partie les dunes sur lesquelles elles progressent. Un "train de dunes" correspondrait ainsi à une sous-unité sismique.

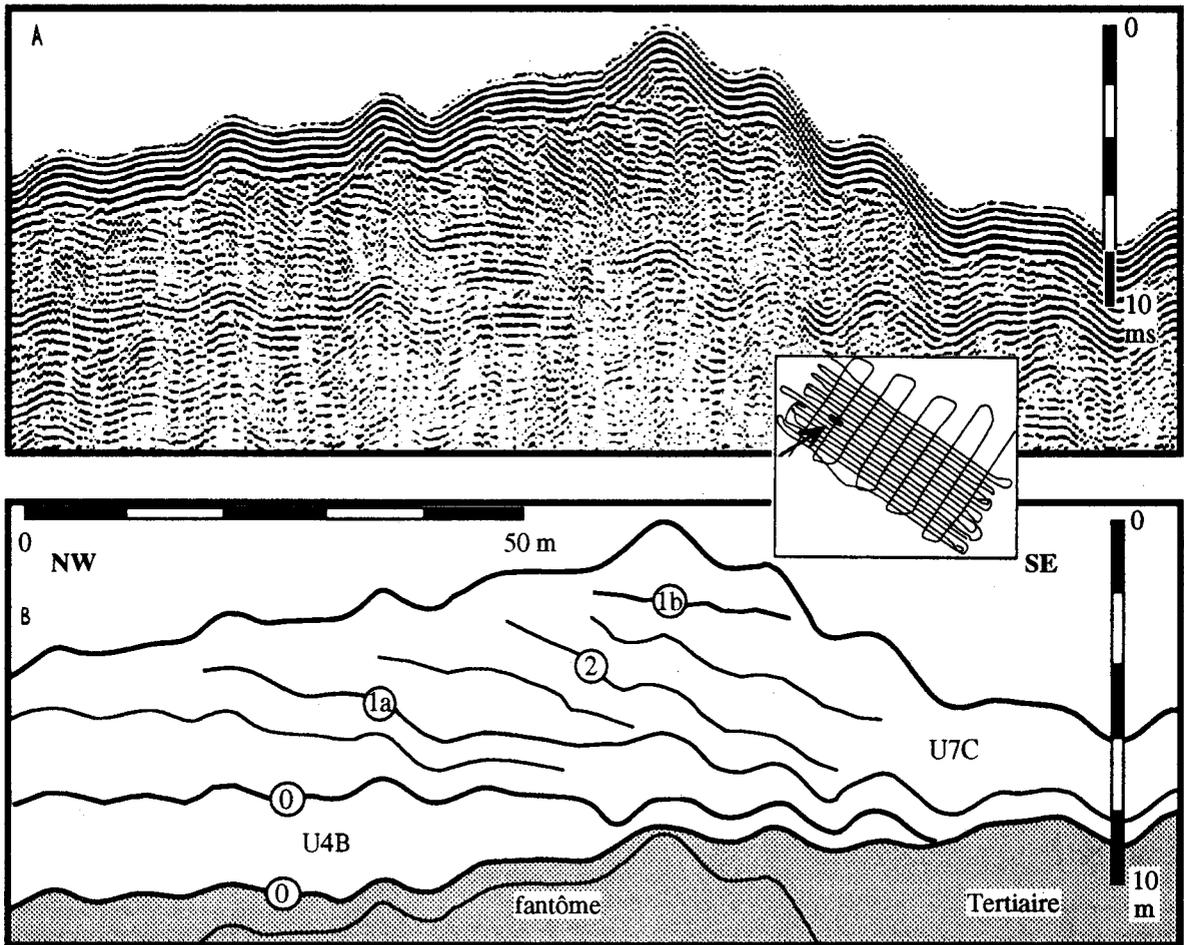


Figure III-27 - Exemple de profil sismique a) non interprété et b) interprété, montrant les différents types de réflecteurs et d'unités. Extrait du profil N° 33. Mission Belgica.
 - Example of a) analogic profile and b) interpreted line drawing. Four types of reflectors are distinguished (0, 1a, 1b and 2) in two seismic units. Part of profile 33. Belgica cruise.

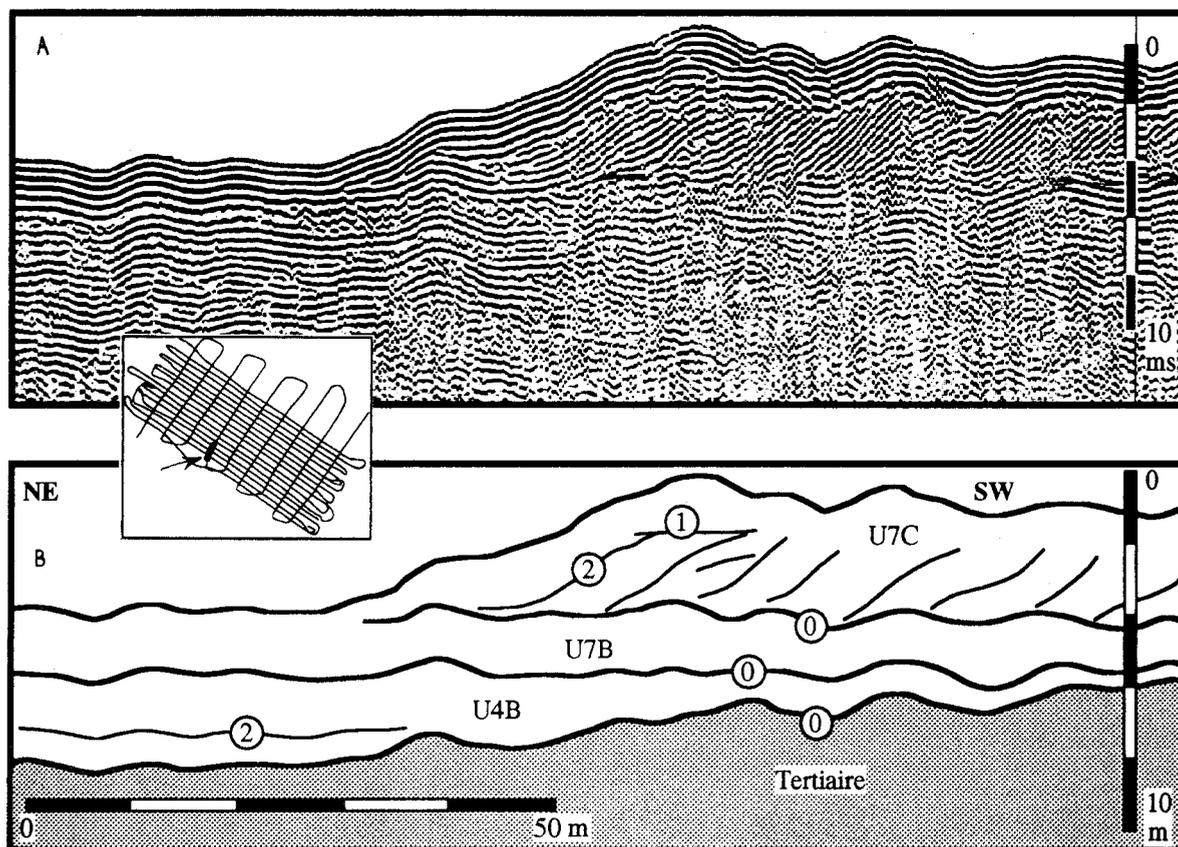


Figure III-28 - Exemple de profil sismique a) non interprété et b) interprété, montrant les différents types de réflecteurs et d'unités. Noter les unités basales de remplissage de chenaux et les sets de l'unité supérieure. Extrait du profil N° 47. Mission Belgica.

- Example of a) analogic profile and b) interpreted line drawing. Four types of reflectors are distinguished (0, 1a, 1b and 2) in two seismic units. Notice the basal channel infilling unit and the sets in the uppermost part of the profile. Part of profile 47. Belgica cruise.

5.2.5 - Récapitulatif

Les profils sismiques THR nous renseignent sur l'évolution de la terminaison septentrionale du banc à différentes échelles.

- A moyen terme, la zone est caractérisée par la progradation des grandes et très grandes dunes vers l'Est, ce qui s'accorde avec l'interprétation des profils de sonar latéral (cf. Rubrique B-7 au chapitre II).

- Cette évolution progradante générale peut être momentanément interrompue sous l'effet d'une tempête.

- A plus long terme, les unités sismiques s'empilent successivement du Sud vers le Nord. Cette disposition indique un accroissement latéral (progradation) du banc vers le Nord ainsi qu'une accumulation verticale (aggradation).

6 - Conclusion

L'étude par les techniques de sismique réflexion HR et THR de l'architecture interne du Middelkerke Bank montre que le développement du banc est polygénique et donc bien plus compliqué que les études antérieures ne l'avaient suggéré. Il résulte d'une succession de phases d'érosion et de dépôt.

Sept unités sismiques peuvent être distinguées. Elles traduisent des variations importantes de mode de dépôt au cours du temps depuis des formes de remplissage de chenaux jusqu'à des formes typiques de bancs sableux.

L'étude de la partie nord du banc, grâce en particulier à la sismique THR, permet de diviser certaines unités en sous-unités. Il est également possible de constater des différences importantes dans l'orientation des réflecteurs internes entre les différentes parties du banc. En effet, certaines unités sismiques présentent des réflecteurs internes de directions opposées qui indiquent des processus de sédimentation ou des sens d'apports différents au sein d'une même unité.

Même si l'architecture est bien connue, il importe de caractériser d'un point de vue sédimentologique chacune des unités sismiques. Ceci est réalisé grâce à l'étude lithologique de carottes et se trouve développé dans le sous-chapitre suivant.

B - Structures observées sur carottes

La mise à disposition à l'Université d'Utrecht d'un nouveau vibrocarottier du Service Géologique des Pays-Bas a permis de prélever un grand nombre de carottes pour une structure de la taille du Middelkerke Bank. Sur l'ensemble du banc, 65 carottes d'origines diverses ont été étudiées :

- Une carotte de 19 mètres qui atteint le Tertiaire à 13,55 m. Elle a été forée en 1989 par le Service Géologique de Belgique (BGD) dans l'Uitdiep, chenal qui sépare le Middelkerke Bank de l'Oostende Bank (cf. Chapitre I, fig. I-21).

- 61 carottes d'une longueur moyenne de 4 m (maximum : 5,62 m). Elles ont été prélevées par le Service Géologique des Pays-Bas le long de six lignes perpendiculaires au banc. L'objectif du prélèvement de ces carottes était de reconnaître l'architecture complète du Middelkerke Bank. Parmi ces 61 carottes, 35 ont été décrites avec Ad Stolk, doctorant à l'Université d'Utrecht.

- 3 carottes d'une longueur moyenne de 3,5 m (maximum : 4 m). Elles ont été prélevées par l'IFREMER à l'aide du vibrocarottier du BRGM, avec pour objectif la reconnaissance des discontinuités observées sur les profils sismiques THR.

La démarche suivie pour présenter les résultats se décompose en trois phases :

- 1) L'observation de toutes les carottes a été effectuée à partir d'empreintes à l'acétate (laquer peels). La diversité des sédiments est très grande d'un point de vue granulométrique (depuis des argiles jusqu'à des graviers) ainsi que par leur composition (dépôts bioclastiques à silicoclastiques, présence de débris de plantes...). Pour simplifier la description des carottes et leur interprétation, les sédiments ont été regroupés en onze faciès.

- 2) Les faciès étant définis, le profil N°80 qui comporte dix carottes a été choisi pour illustrer les grandes variations de faciès pouvant exister verticalement au sein d'une carotte, ainsi que latéralement le long d'un profil de carottages.

- 3) Le profil N°30, qui comprend neuf carottes, a été sélectionné afin d'illustrer l'opposition pouvant exister entre les carottes prélevées au sommet du banc et celles localisées sur ses flancs.

Les autres carottes ont également été étudiées mais il n'a pas été possible de les décrire toutes en détail. D'une part en effet, les principales informations tirées de leur description confirment les observations faites à l'aide des profils 30 et 80, d'autre part, l'examen détaillé de ces sondages fait partie prioritairement de la thèse d'Ad Stolk.

1 - Détermination des faciès

Un faciès est défini comme étant la somme des caractères macroscopiques observables d'un sédiment ou d'une roche (Walker, 1992) : lithologie, structures sédimentaires, bioturbations, stocks particulières ...

1.1 - Critères de distinction

Cinq critères ont été retenus pour différencier les faciès : la granularité moyenne, la nature des clastes, les structures sédimentaires (litage, etc.), les bioturbations et la couleur.

1) - Granularité moyenne du sédiment.

Les sédiments observés couvrent la gamme granulométrique allant de l'argile aux graviers pluricentimétriques. Leur granulométrie est estimée à partir de l'échelle graphique de Wenworth (Lowe et Walker, 1984) ou d'un double décimètre pour les particules les plus grossières. L'échelle graphique permet d'avoir une idée relative de la taille des grains. Ce n'est pas une valeur absolue. Pour tester cette valeur, 38 échantillons ont été tamisés et leur médiane de Folk (cf. Chapitre I, rubrique B-2) a été calculée et comparée avec la valeur observée (Fig. III-29).

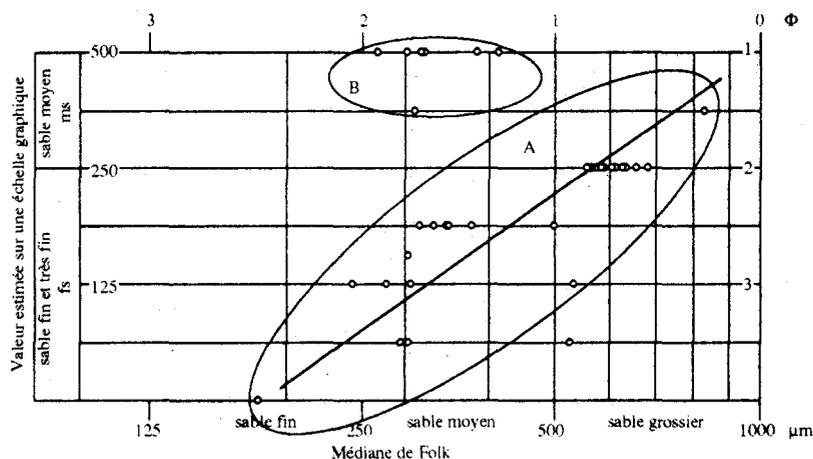


Figure III-29 - Comparaison entre la taille du grain estimée avec une échelle graphique de Wenworth (Lowe et Walker, 1984) et la médiane mesurée de 38 échantillons prélevés sur les carottes. A et B : voir les explications dans le texte.

- Comparison between the estimated grain-size according to a Wenworth graphic scale (Lowe et Walker, 1984) and measured mean grain-size of 38 samples from vibrocores. A and B: see explanations in the text.

Dans la plupart des cas (domaine A de la figure III-29), cette estimation minore le grain par rapport à la médiane réelle. Il semble donc que lors de la comparaison avec l'échelle de Wenworth, l'œil assimile la taille du sédiment à celle de sa matrice sans tenir compte des éléments les plus grossiers dont les teneurs sont souvent difficiles à évaluer. Malgré cette différence absolue dans la mesure de la taille, un sédiment évalué relativement plus fin qu'un autre l'est effectivement comme le montre la droite de régression de la figure III-28.

Par ailleurs les sables décrits comme moyens (domaine B de la figure III-29), correspondent effectivement à des sables moyens. Dans ce cas particulier, le sédiment est relativement mieux classé que les autres sables moyens. Une évaluation de la matrice ou des grains les plus grossiers n'affecte donc pas la valeur estimée.

2) - Nature des clastes.

On distingue les débris d'origine animale et végétale. La teneur en coquilles, estimée à l'œil nu, varie depuis des sédiments dépourvus de faune visible jusqu'à des sédiments constitués de plus de 50% de coquilles. La distinction est faite entre les coquilles entières ou brisées, en position de vie ou non. Les débris végétaux sont de petite taille. Ils sont le plus souvent concentrés dans de fins niveaux silteux ou enrichis en argile.

3) - Structures sédimentaires.

Quand le carottage ne les altère pas, il est possible d'identifier cinq structures différentes : 1) litages horizontaux plus ou moins fins ; 2) litages obliques, soulignés ou non par des lits enrichis en coquilles ; 3) litages entrecroisés à petite échelle ; 4) laminations lenticulaires, ondulées ou en "flasers" (Reineck et Singh, 1980) ; 5) absence de structure apparente.

4) - Bioturbations.

Dans l'ensemble des carottes, des bioturbations sont assez rarement observées car soit elles sont effectivement peu représentées, soit les contrastes lithologiques qu'elles induisent sont faibles et difficiles à observer. Les figures suivantes (Collinson et Thompson, 1989) ont été observées :

. *Skolitos* ou *Arenicolites*, attribuées à des vers (Fig. III-30,A).

. Type *Skolitos* associée à des bivalves : *Solen sp.*, *Ensis sp.* (B).

. Figures en "pelure d'oignon" produites par des échinodermes irréguliers *Echinocardium cordatum* (C).

. Plus rarement, une structure ovoïde a été observée. Elle correspond à la trace d'habitation de crevettes. (D).

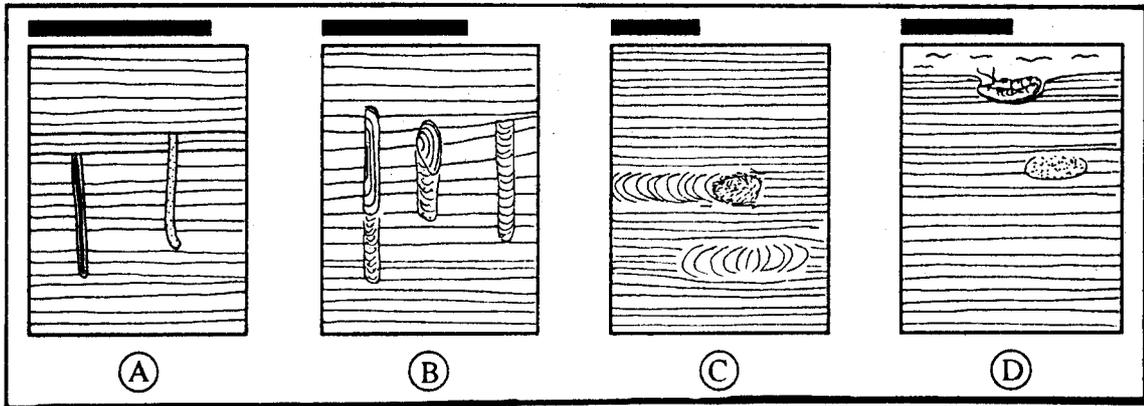


Figure III-30 - Schéma des quatre types de bioturbations rencontrées sur le Middelkerke Bank. Barre d'échelle : environ 10 cm.
 - Schematic figure showing the four types of bioturbations found on the Middelkerke Bank . Scale bar : around 10 cm.

5) - Couleur

Les sédiments présentent une grande variété de couleurs à dominante grise d'intensités et de colorations diverses : bruns, beiges, jaunâtres ou verdâtres.

1.2 - Les faciès sédimentaires

A partir des cinq critères retenus, les sédiments ont été regroupés en onze faciès, décrits du plus grossier au plus fin (Fig. III-31). Cette nomenclature a ensuite été utilisée pour toutes les représentations de carottes.

	N°	Granularité moyenne	Coquilles	Couleur dominante
	1	graviers de plus de 5 mm et de moins de 120 mm matrice argilo-sableuse ou sablo-argileuse	usées ou non, de taille variable	jaune, brun, gris
	2	matrice de sable moyen ou fin, plus fine que les coquilles	sediment composé de plus de 50% de coquilles, pour la plupart brisées	brun ou jaune
	3	sable coquillier fin à moyen	rarement entières	beige
	4	sable fin	absentes ou rares	beige
	5	sable fin à moyen, riche en petits graviers de silex ou de quartz arrondis, d'environ 5 mm de diamètre	débris moyennement abondants	beige
	6	sable fin à petits litages entrecroisés d'échelle centimétrique.	débris peu abondant	gris
	7	alternance de lits plurimillimétriques de sable fin, très fin et de silt	rare débris	gris
	8	alternance de lentilles d'argile dans une matrice de sable fin : flasers	quasi-absence de débris	gris-brun
	9	sable fin à litages horizontaux millimétriques	quasi-absence de débris	gris
	10	sable fin, silteux ou argileux	absentes ou très rares	gris
	11	argile ou argile silteuse	absence à l'œil nu	gris ou vert

	Débris de coquilles		Graviers d'environ 5 mm
	Gastéropodes		Graviers de plus de 5 mm
	Bioturbation		Galets d'argile
	Débris de plantes		Stratifications obliques soulignées par des débris de coquilles

Figure III-31 - Nomenclature établie pour définir les onze faciès sédimentaires et représentation des différents clastes observés. Le symbole "coquille" correspond généralement à des débris de coquilles, très rarement à des coquilles entières.

- The eleven sedimentary facies and associated clasts. The symbol "shell" corresponds to shell debris. Complete shells are seldom observed.

2 - Structure sédimentaire de la partie Sud du banc - Profil 80

Dans le secteur de ce profil, le sommet du banc n'est qu'à 6 m de profondeur. Il est fortement asymétrique (Fig. III-32). Le profil comprend dix carottes d'une longueur comprise entre 2,85 et 5,45 m localisées sur le flanc ouest (carottes 25 et 26), sur le sommet du banc (carottes 21 à 25), dans le chenal Uitdiep (carottes 19 et 20) et sur le flanc ouest de l'Oostende Bank (carotte 18). Les profondeurs s'étagent entre - 6 et - 18 m.

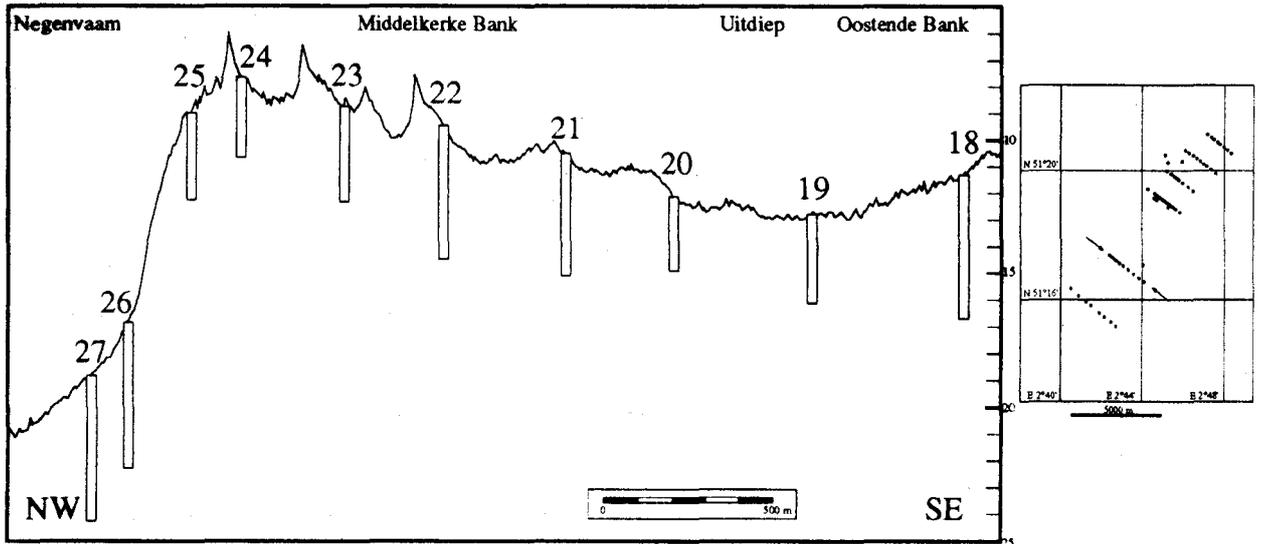


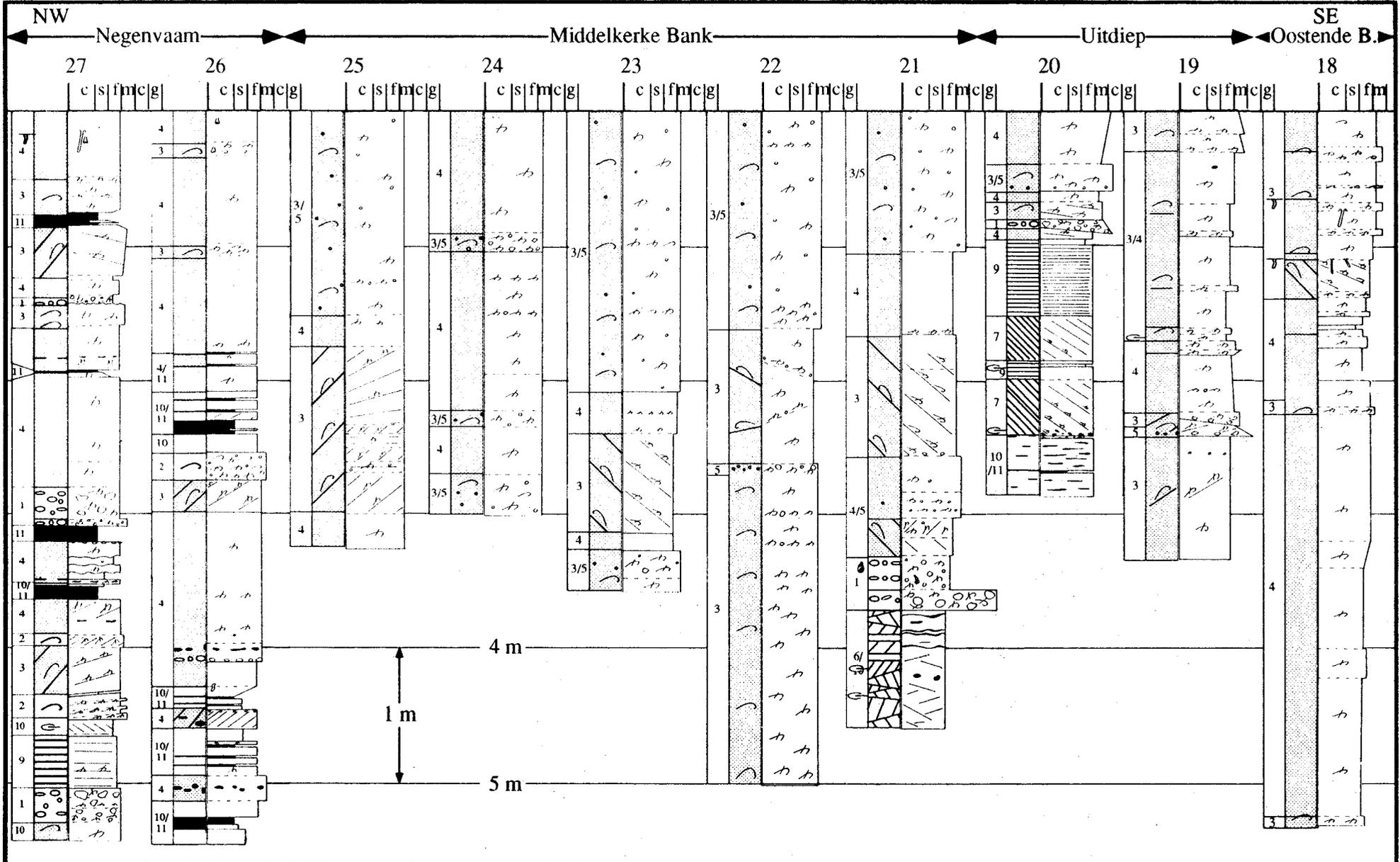
Figure III-32 - Localisation des carottes 18 à 27 sur le profil bathymétrique N° 80.
- Location of cores 18 to 27 on the sounding record of profile 80.

2.1 - Variabilité verticale

La majorité des carottes renferme un grand nombre de faciès qui, parfois, se succèdent rapidement. Quelques carottes en revanche présentent peu de variations verticales de faciès (par exemple, la carotte 22 qui ne contient que les faciès 3 et 5).

Les variations de granularité peuvent être observées sur la carotte N°27 (Fig. III-31). Cette carotte prélevée dans le Negenvaam renferme les faciès 1 à 4 et 9 à 11, c'est à dire les faciès à la fois les plus grossiers et les plus fins. Verticalement, le passage d'un faciès à un autre est souvent brutal. Par exemple, le faciès inférieur marqué par l'abondance de graviers de silex dont la taille atteint 4 cm, est surmonté sans transition de sable fin à très fin localement riche en débris végétaux. De même à 312 cm, un niveau d'argile épais de 7 centimètres est surmonté par des niveaux de gravier dont la taille atteint 4 cm.

Figure III-33 - Logs synthétiques des carottes N° 18 à 27 le long du profil N° 80. Colonnes de gauche : nature des faciès selon la figure III-31.
- Graphic logs of cores 18 to 27 from profile 80. Left columns: facies definition according to fig. III-31.



La nature des clastes ainsi que leur teneur peut également varier. Ainsi, la carotte N°21 prélevée sur le Middelkerke Bank renferme une base dans laquelle aucune coquille n'est reconnue mais dans laquelle des débris de plantes sont abondants (faciès 6 et 10). A partir de 372 cm et jusqu'à 330 cm, le sédiment comporte de nombreuses coquilles brisées ainsi que des petits gastéropodes entiers. Les 74 centimètres suivants (entre 330 et 256 cm) sont à nouveau pauvres en coquilles (faciès 4 et 5) mais sans débris de plantes ni gravier centimétrique.

Le troisième paramètre variable verticalement est la structure sédimentaire. La carotte N°20 prélevée dans le chenal Uitdiep renferme les faciès 7 à 11. Elle montre des litages variés, horizontaux à la base puis successivement obliques plans et à nouveau horizontaux. Dans les sédiments grossiers (sable moyen, sable grossier ou gravier), les litages sont souvent plus difficiles à déceler. Les variations verticales des litages y sont donc non observables.

Les variations verticales dans la nature et le nombre de bioturbation sont également difficiles à quantifier car elles sont rarement observées. La carotte N°18 prélevée sur le flanc ouest de l'Oostende Bank montre quand même des niveaux dans lesquels des bioturbations sont observables (à 64 et 110 cm par exemple). Ces niveaux succèdent à des niveaux dans lesquels aucune bioturbation n'est visible.

Les couleurs ne sont pas mentionnées sur la figure III-31. Elles ne présentent pas une variabilité verticale importante. Dans beaucoup de carottes (N°18 à 21, 26 et 27), la base est constituée de sédiment de teinte grise tandis que vers le sommet, les teintes deviennent de plus en plus brunes ou beiges. Le contraste de couleur est souvent brutal. Les carottes 22 à 25 quant à elles montrent une couleur uniforme beige sur toute leur longueur.

Ces diverses successions rapides de granularité, nature des clastes, structures sédimentaires, bioturbations ou couleur sont observables sur toutes les carottes. Elles correspondent à des changements fréquents dans le milieu de dépôt des sédiments. La seule constance décelable est une tendance globale à la granocroissance vers le haut. Cela est marqué par des quantités d'argile plus faibles au sommet des carottes que vers leur base.

2.2 - Corrélations latérales

Les carottes 18 à 27 mises côte à côte montrent l'existence de changements latéraux importants. Les carottes 19 et 20 prélevées à des profondeurs voisines, possèdent des faciès très différents, nettement plus fins (faciès 1, 3, 4, 5, 7, et 9 à 11) dans la 20 que dans la 19 (faciès 3 à 5). De même, si les carottes 21 et 22 possèdent à leur sommet des faciès sableux bioclastiques (3 à 5) similaires, la nature des faciès à la base est totalement différente. Elle est caractérisée dans la 21 par des sables très fins silteux (faciès 6 et 10) tandis que pour la 22, le sable est fin à moyen (faciès 3).

La partie la plus superficielle (le premier mètre) des dépôts est composée partout de sédiment plus ou moins bioclastique appartenant aux faciès 3 à 5. Le reste des carottes montre d'importantes variations verticales et horizontales qui indiquent que le banc n'a pas une structure simple caractérisée par un empilement de niveaux de sables homogènes. Elles confirment les variations latérales de structure observée sur les profils sismiques.

3 - Structure sédimentaire de la partie nord du banc - Profil 30

Au Nord de la zone d'étude, la profondeur de la crête du banc augmente jusqu'à environ -12 m. Le banc ne présente plus d'asymétrie prononcée comme pour le profil précédent (Fig. III-34). Le profil 30 comprend neuf carottes localisées sur le flanc ouest (carottes 15 et 16), le sommet (carottes 9, 10, 14 et 15), le flanc est (carotte 11 et 12) du banc, ainsi que dans le chenal Uitdiep (carotte 13). La longueur des carottes varie entre 2,65 et 5 m pour une longueur moyenne de 4,2 m.

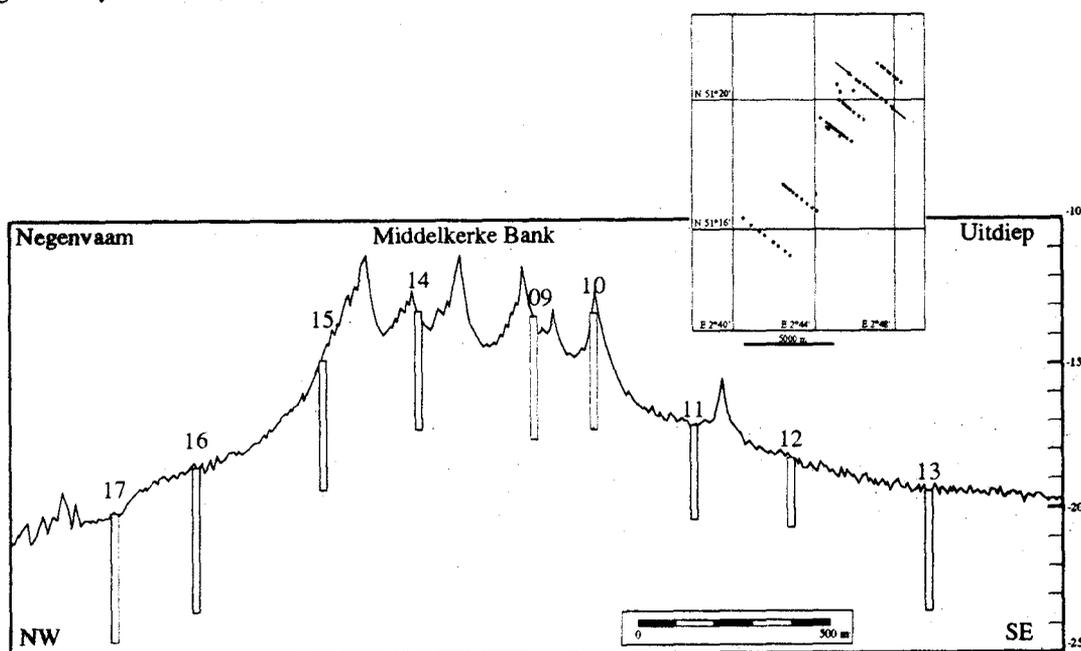
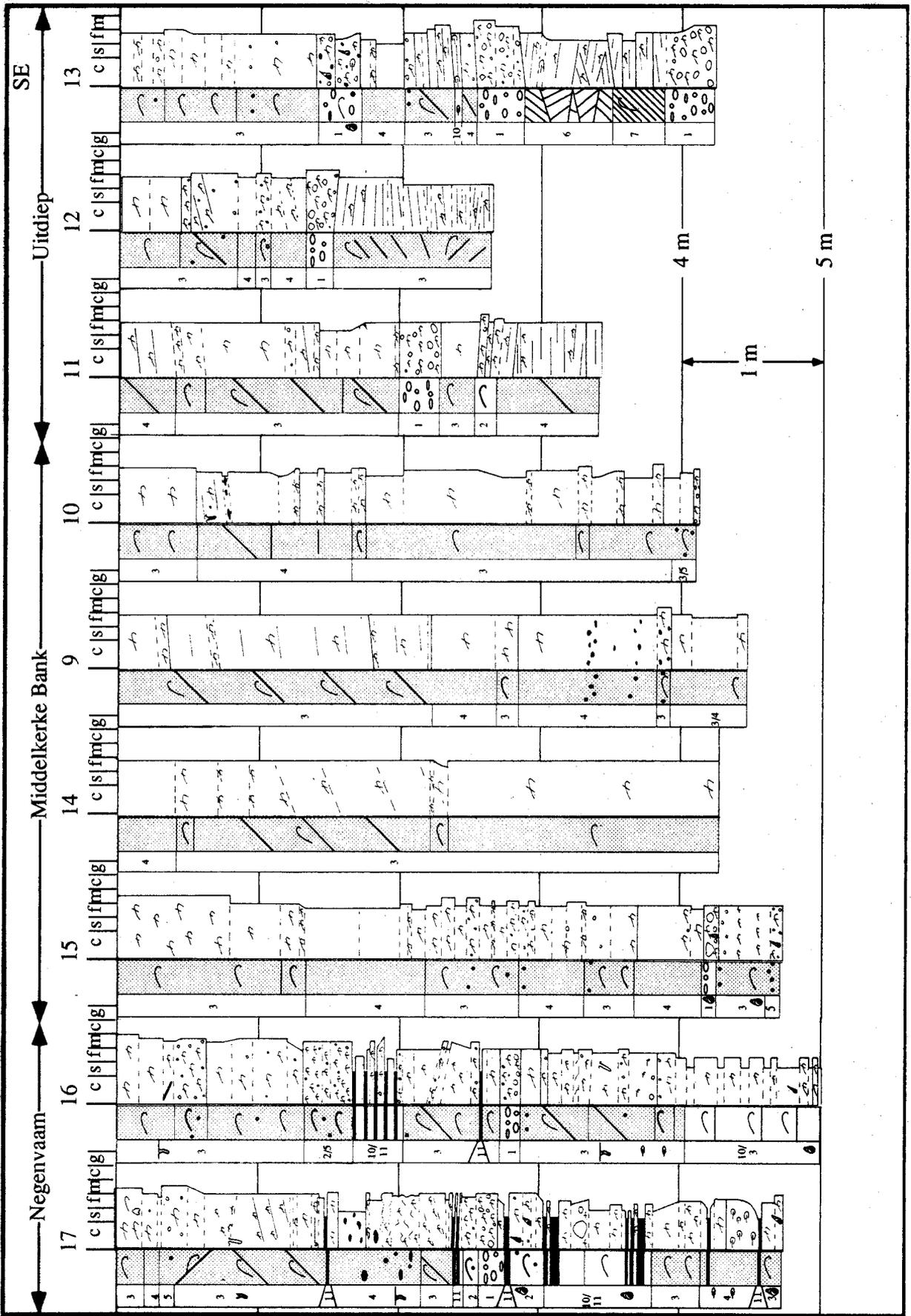


Figure III-34 - Localisation des carottes sur le profil bathymétrique N° 30.
- Location of cores 9 to 17 on the sounding record of profile 30.

Globalement, le sédiment est plus fin que pour les carottes du profil précédent (Fig. III-35). La teneur en gravier est également plus faible. Les carottes de ce profil présentent d'importantes variations verticales et latérales de faciès, comparables à celles observées sur le profil 80.

La comparaison de la lithologie des carottes avec leur localisation le long du profil montre que le sommet du banc (carottes 15, 14 et 9 à 11) présente une structure sédimentaire différente de celle observée sur les flancs (carottes 17, 16, 12 et 12).



3.1 - Caractères sédimentaires du sommet du banc

Les carottes prélevées au sommet du banc, dans la zone couverte de grandes dunes, ne montrent que les faciès 3, 4 et 5. Le sédiment correspondant est un sable moyen à grossier, plus ou moins bioclastique, dans lequel des litages obliques peuvent être observés. Ces litages sont soulignés par des niveaux plus riches en coquilles, séparés par plusieurs centimètres de sable plus siliciclastique. Au sein d'une même carotte, les changements d'orientation des lits obliques sont rares, et ne sont nets que dans l'ensemble de la carotte N°11. Le sable de ces carottes possède les mêmes caractéristiques que les sédiments superficiels prélevés à la benne : la granularité est celle d'un sable moyen à grossier dont la teinte dominante est beige et le contenu faunistique dominé par des bivalves comparables (*Venus sp.* ou *Abra sp.*).

3.2 - Caractères sédimentaires des flancs du banc

Les Caractéristiques sédimentaires des flancs du banc sont différentes de celles observées à son sommet. Elles se distinguent par une très grande variabilité verticale des faciès comparée à la constance des faciès rencontrés dans les carottes prélevées au sommet du banc. La variabilité est exprimée dans les carottes les plus profondes (N° 17, 16, 12 et 13). C'est dans ces carottes qu'est observée la plus grande variabilité verticale et latérale de faciès. Tous les faciès, excepté le faciès 8 ("flasers") difficile à identifier en carottes, sont présents. Le sédiment est quasi systématiquement plus fin que celui présent au sommet du banc. Le contraste lithologique peut néanmoins rester important. C'est le cas dans la carotte 17 qui présente un galet de silex de 12 centimètres à la profondeur de 330 cm, surmonté par des lits argileux. La présence d'un tel contraste granulométrique indique un changement brutal dans la nature des apports et dans celle des processus sédimentaires. Les graviers de grande taille ne semblent pas pouvoir être le résultat de lâchers de glaces flottantes car ils sont localisés dans un sédiment à la matrice de sable grossier comprenant des coquilles de grande taille (faciès 1). Il s'agit plus vraisemblablement du résultat d'un vannage intense du sédiment sous l'effet d'un courant fort.

Contrairement aux carottes prélevées au sommet du banc, les directions du litage changent souvent verticalement. Ceci indique que les sens des apports sont variables au cours du temps (carotte N°12 ou 13).

Les sédiments superficiels prélevés à la benne sur les flancs du banc montrent également une tendance à être plus fins que ceux du sommet. Néanmoins, le contenu faunistique de ces sédiments est différent de celui observé sur les carottes. Les sédiments superficiels sont généralement très riches en débris d'échinodermes et pauvres en gastéropodes, alors que les sédiments plus profonds observés en carotte en montrent peu et possèdent parfois des niveaux relativement riches en petits gastéropodes. Ce changement peut être dû à une fossilisation différente des particules bioclastiques mais est plutôt le résultat d'un changement dans le milieu de dépôt des sédiments. Alors que

Figure III-35 - Logs synthétiques des carottes 9 à 17, profil 30. Colonnes de gauche : nature des faciès selon la figure III-31.

- Graphic logs of cores 9 to 17 from profile 30. Left columns: facies definition according to fig. III-31.

les débris d'échinodermes sont caractéristiques des sédiments les plus profonds de la zone des bancs, les gastéropodes sont rares dans les sédiments actuels du Middelkerke Bank. Ils sont par contre plus fréquents dans les zones plus proches du rivage.

4 - Conclusion

Dans la majorité des carottes observées la tendance est à une granocroissance du sédiment vers le haut. Les niveaux inférieurs sont composés de sables fins à très fins avec de fréquentes intercalations de silts ou d'argile ; ils possèdent localement des passées de sédiment très grossier. Dans les niveaux supérieurs, le sédiment est un sable bioclastique plus grossier, organisé en séquences normales décimétriques dont la base plus grossière est riche en bioclastes. Ce type de succession résulte de la migration de petites et moyennes dunes : la base grossière correspond à la zone située sous la face abrupte de la dune, le reste de la succession à du sable mieux trié provenant du corps proprement dit de la dune. Il s'agit d'une tendance voisine de celle observée par Berné (1991) sur les dunes de Surtainville au large de la Normandie.

La séparation en deux groupes des carottes, correspondant à celles du sommet des flancs du banc confirme l'étude sismique. Le banc n'est pas une simple accumulation de sable, il est composé de sédiments variés à la fois verticalement et latéralement. Le sous-chapitre suivant s'attachera à vérifier si les différences lithologiques mises ici en évidence correspondent à des unités sismiques différentes.

C - Caractérisation des séquences de dépôt - Utilisation combinée des données de sismique et de carottage

1 - Relations entre les propriétés physiques observées sur carottes et la réponse sismique

1.1 - Introduction

L'expression sédimentaire des données sismiques peut difficilement être connue en l'absence de carottages de validation. C'est la raison pour laquelle toutes les carottes ont été localisées au voisinage immédiat d'un ou plusieurs profils sismiques. Il est alors possible de corréler les deux groupes d'informations. Les carottes prélevées par l'IFREMER ont, en plus de la description lithologique, bénéficié d'une analyse gamma-densimétrique susceptible d'apporter des informations sur l'état de compaction du sédiment. L'étude de ces trois carottes révèle des correspondances diverses entre les réflecteurs sismiques et les discontinuités lithologiques.

1.2 - Cas où les réflecteurs correspondent à des discontinuités lithologiques nettes. Exemple de la carotte VK 05

Du fait de la différence de résolution entre les descriptions lithologiques des carottes et les résultats des profils sismiques THR, il n'est pas facile de comparer les deux types de données. Néanmoins, certaines carottes telle que la VK 05 (Fig. III-36) apportent des informations grâce à la comparaison des différentes mesures. Cette carotte de 399 cm de long a été prélevée à 70 mètres du profil N°43 du sondeur de sédiment. Les réflecteurs sismiques étant généralement très faiblement pentés, les corrélations entre les données lithologiques et sismiques sont possibles. La carotte comprend à sa base un niveau d'argile compact, dans laquelle la progression du tube carottier a probablement été interrompue.

- La densité est directement fonction de la granularité même si certaines variations de densité ne sont pas visibles sur la carotte. Ainsi, les niveaux argileux possèdent une densité faible pouvant atteindre 2,2 alors que les niveaux sableux ont des densités supérieures à 2,5. Les niveaux de graviers, à 275 cm par exemple, déterminent une augmentation de la densité à 2,7. Il faut noter qu'entre 340 et 368 cm, les niveaux argileux présentent des densités variables. Ceci correspond sans doute à des variations non observables lors de la description visuelle, peut-être en relation avec des teneurs plus ou moins élevées en silts. La carotte ayant été découpée en tronçons de un mètre, les extrémités ont parfois subi un fluage pendant le transport. Ce fluage est dû à l'excès d'eau dans le sédiment. Il provoque des valeurs très faibles de densité ($<1,5$). Pour éviter ce type de problème, il serait préférable de faire les analyses gamma-densimétriques à bord des navires et non au laboratoire.

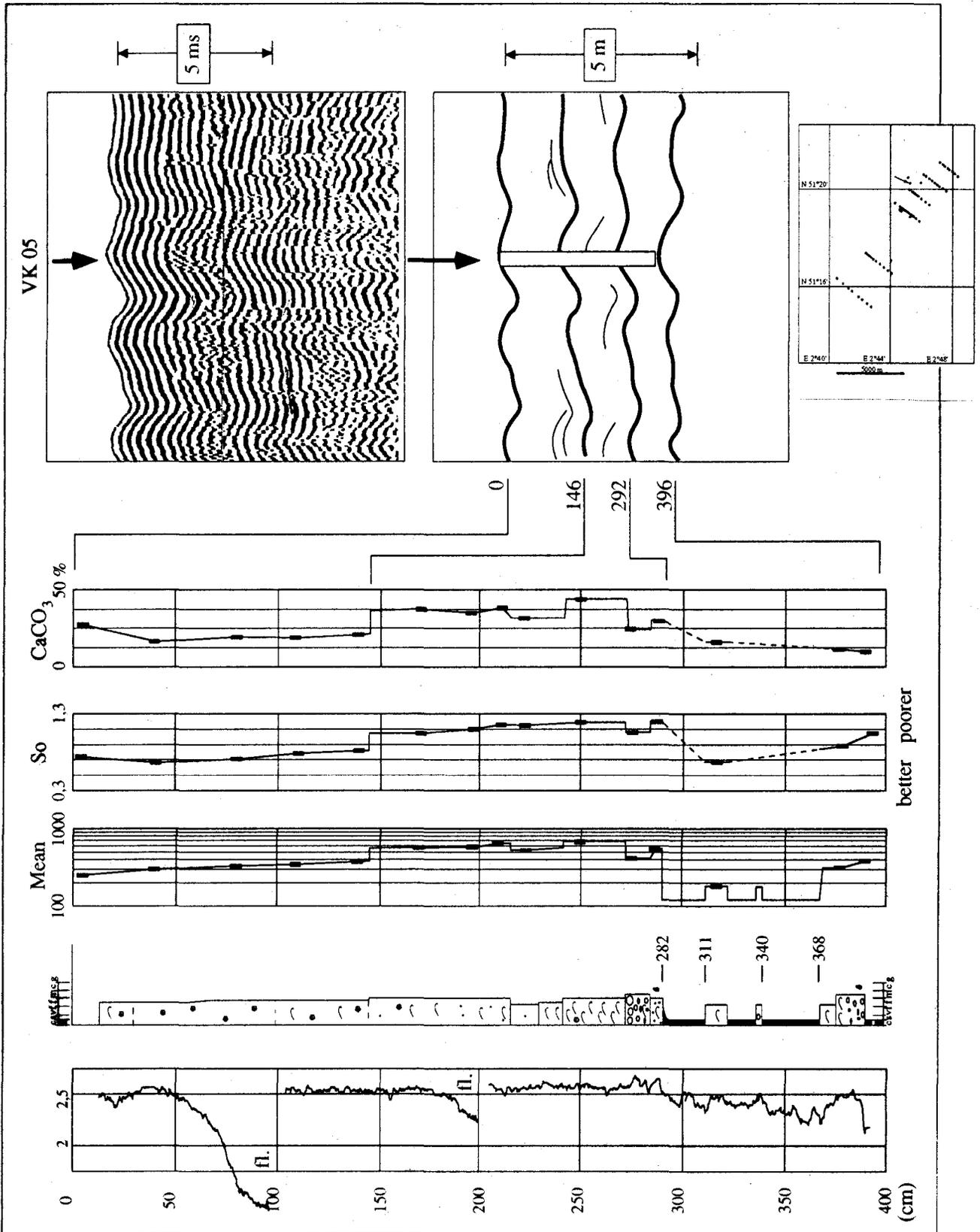


Figure III-36 - Caractéristiques de la carotte VK 05, profil N°43, mission SANBA. De gauche à droite : densité, lithologie, médiane (mean, en μm), classement (S_o), teneur en CaCO_3 et portion correspondante de profil sismique. fl. : fluage du sédiment lors des opérations de carottage.
 - Characteristics of core VK 05, profile 43, SANBA survey. From left to right : density, lithology, mean grain-size (in μm), sorting (S_o), CaCO_3 content and corresponding subbottom profile. fl.: sediment flowing during coring operations.

- Les paramètres de médiane, de classement et de CaCO_3 sont corrélés positivement. Un sédiment est d'autant plus riche en CaCO_3 et mal classé qu'il est plus grossier. Une telle similitude a déjà été observée sur les sédiments superficiels (cf. Chapitre II, Fig. II-6 et II-8).

- Les trois réflecteurs visibles sur le profil sismique correspondent à des changements lithologiques importants. A 292 et à 393 cm, il s'agit du passage de niveaux argileux à des lits de graviers ; cette discontinuité est également bien marquée sur le profil de densité. A 146 cm, il s'agit du passage d'un sable grossier à un sable moyen ; contrairement aux deux autres discontinuités, celle-ci n'est pas bien marquée sur le profil de densité.

1.3 - Cas où les réflecteurs correspondent à de très faibles discontinuités lithologiques. Exemple de la carotte VK 04

La carotte VK 04, courte, ne mesure que 262 cm de long. La carottage s'est achevé dans des niveaux argileux compacts considérés d'âge yprésien (Fig. III-37). La carotte a été prélevée à proximité immédiate (30 m) du profil N°42 de sondeur de sédiment. Cette courte distance facilite la comparaison entre les propriétés physiques du sédiment et la réponse sismique.

- Comme pour la carotte précédente, la densité est fonction de la granularité. Malgré une compaction apparente importante des niveaux argileux observée lors de l'ouverture des carottes, leur densité est faible. Elle atteint 2,25 à partir de 238 cm. Le niveau fin à 212 cm doit correspondre à un niveau d'argile silteuse car la densité y est nettement plus élevée. La présence de graviers de silex augmente de façon significative la densité (voir par exemple à 175 et 192 cm). A 192 cm, la densité approche 2,7, voisine de celle du quartz. Il s'agit donc de la valeur maximale observable dans les sédiments à dominante siliciclastique. Dans le cas présent, le silex a un diamètre de 5 cm qui occupe la quasi-totalité de la carotte.

- Les variations granulométriques des niveaux sableux sont peu importantes le long de la carotte, le sédiment est un sable fin ou moyen dont la médiane est voisine de 300 μm , malgré une tendance à une augmentation de la teneur en CaCO_3 . Cette teneur passe de 6% à la base à 14% au sommet de la carotte.

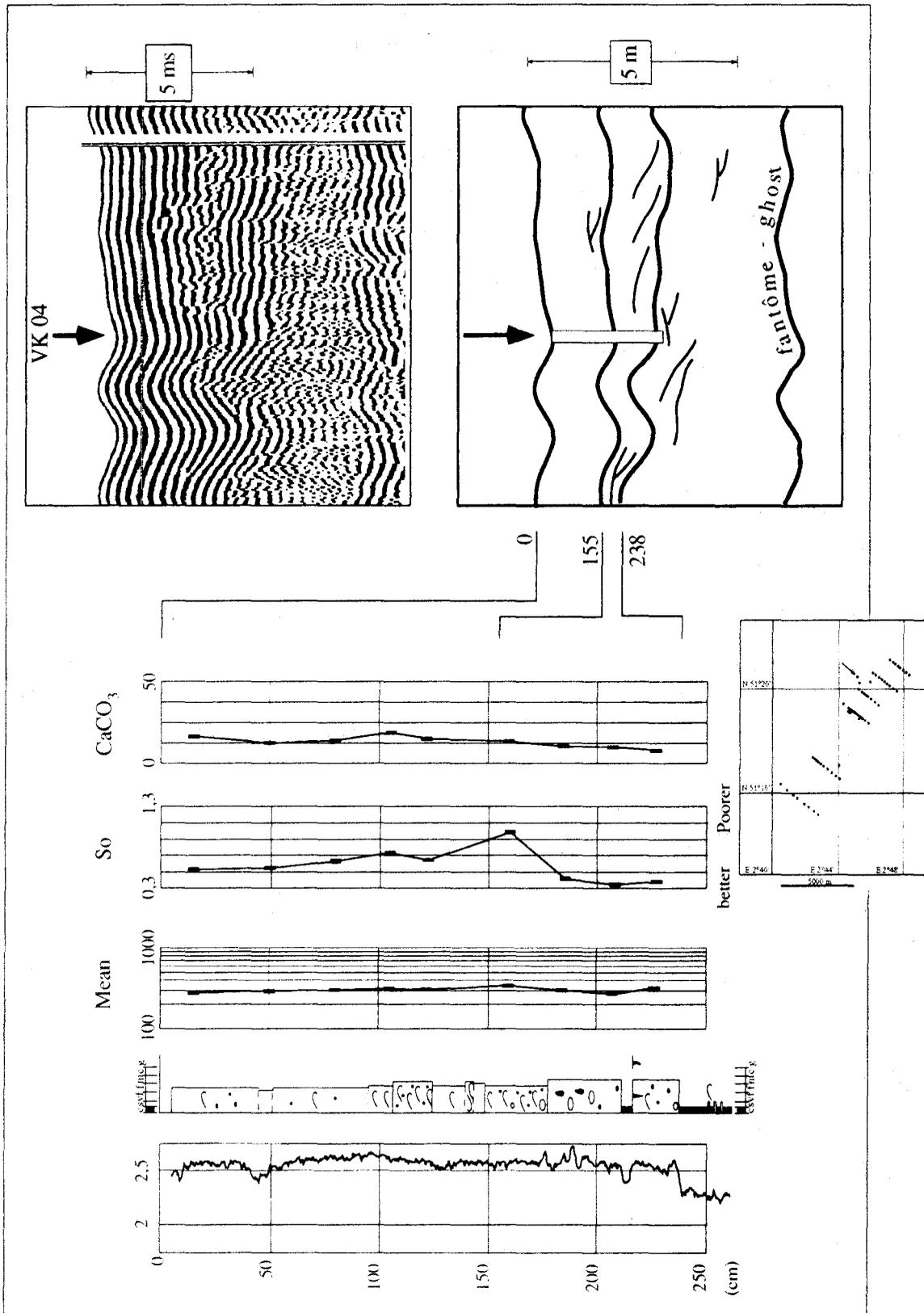


Figure III-37 - Caractéristiques de la carotte VK 04, profil N°42, mission SANBA. De gauche à droite : densité, lithologie, médiane (Mean, en μm), classement (So), teneur en CaCO_3 et portion correspondante de profil sismique.

- Characteristics of core VK 04, profile 42, SANBA survey. From left to right : density, lithology, mean grain-size (in μm), sorting (So), CaCO_3 content and corresponding subbottom profile.

- Deux réflecteurs sont observés sur les 262 premiers centimètres du profil correspondant à la carotte. Le réflecteur situé à 238 cm est du même type que ceux observés dans la rubrique précédente (1.2). Il coïncide avec le passage sable moyen / argile. La différence de densité y est importante, elle passe de 2,6 à 2,25. A 155 cm, par contre, la variation granulométrique correspondant au réflecteur est faible. Il se peut néanmoins que la cote du réflecteur soit imprécise et que celui-ci corresponde au passage sable moyen / sable fin coquillier localisé à 145 cm. Du fait du décalage entre la carotte et le profil sismique, il pourrait correspondre à un niveau diffus de graviers aux alentours de 170 cm. Si l'on élimine cette possibilité, les réflecteurs peuvent correspondre à de très faibles discontinuités lithologiques.

1.4 - Nature des réflecteurs internes. Exemple de la carotte VK 03

La carotte VK 03 a été prélevée à 50 mètres du profil de sondeur de sédiment N°42. Elle mesure 378 cm de long et ne montre pas de variations granulométriques exceptée à la base qui comporte du sable grossier (Fig. III-38). Le premier mètre de carotte a été fortement perturbé lors des opérations de prélèvement et/ou de transport, ce qui explique les zones à très faible densité à 20 cm ainsi qu'entre 60 et 75 cm. Le reste de la carotte ne montre que peu de variations densimétriques.

- La granularité se caractérise par une diminution vers le haut de la médiane qui correspond à une amélioration modérée du classement du sédiment (mal classé à modérément classé) et à une faible diminution des teneurs en CaCO_3 .

- Des deux réflecteurs compris dans les 373 premiers centimètres, seul l'inférieur est marqué par un changement granulométrique, marqué par le passage de sable moyen à du sable grossier. Les réflecteurs internes semblent quant à eux correspondre à la base de séquences négatives (réflecteur à 190 cm corrélable avec une faible densité). Les autres réflecteurs sont difficilement corrélables. Les réflecteurs internes observés sur les profils sismiques ne correspondent donc pas forcément à des discontinuités lithologiques importantes.

1.5 - Conclusions

De l'étude de ces trois carottes, il apparaît que les discontinuités sismiques peuvent être dues à plusieurs phénomènes :

- Le plus souvent, et notamment pour les réflecteurs sismiques importants, elles se situent à l'emplacement de changements lithologiques importants : gravier sur argile, sable moyen sur sable grossier. Elles peuvent également correspondre à de plus faibles changements lithologiques.

- Dans d'autres cas, pour les réflecteurs internes par exemple, elles ne coïncident avec aucun changement de la granularité ou de la densité. Ces dernières discontinuités moins fréquentes indiquent peut-être un changement dans l'état d'arrangement des particules ou dans l'état de tassement, dont l'origine n'est pas connue.

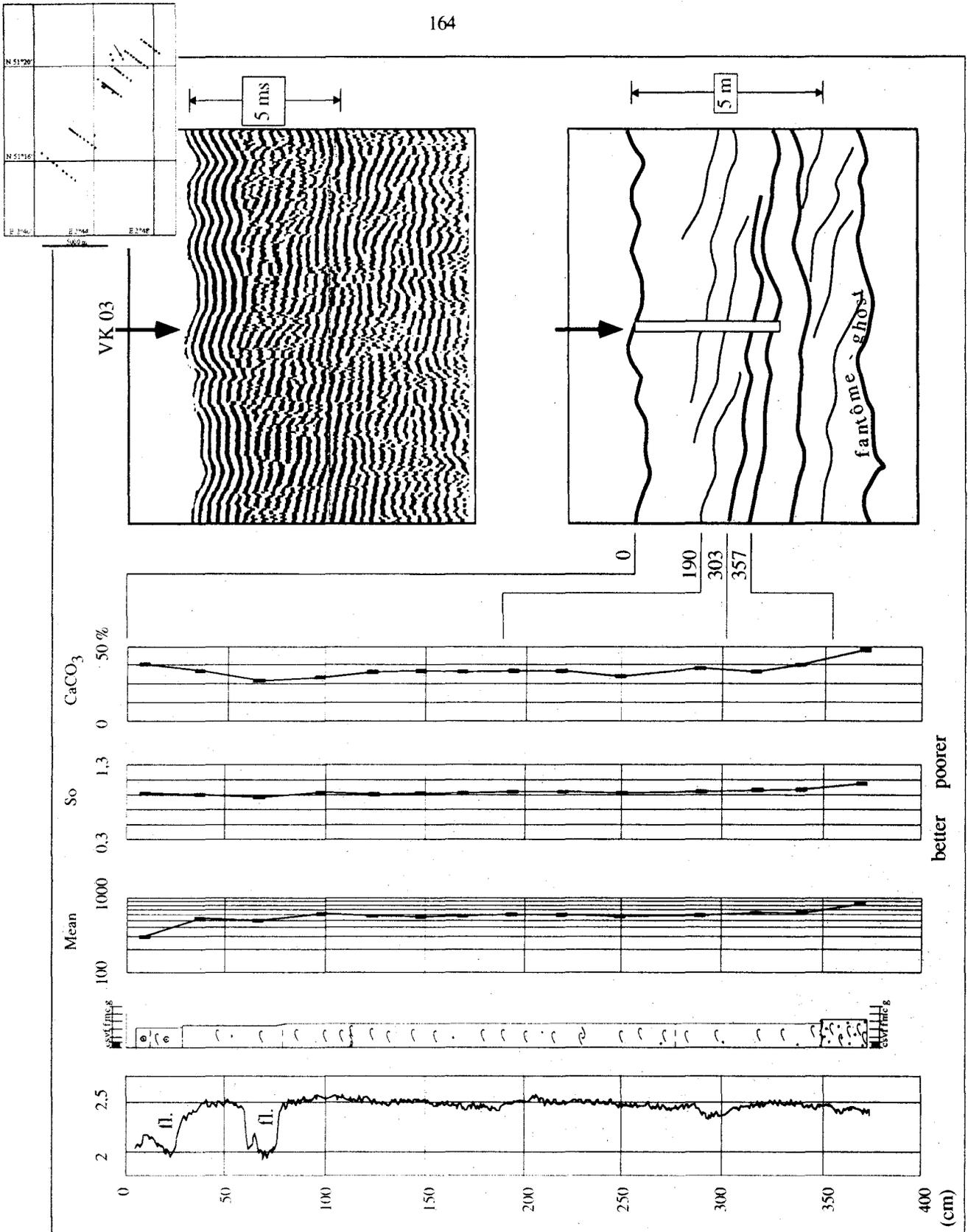


Figure III-38 - Caractéristiques de la carotte VK 03, profil N°42, mission SANBA. De gauche à droite : densité, lithologie, médiane (mean, en μm), classement (So), teneur en CaCO_3 et portion correspondante de profil sismique. fl. : fluage du sédiment lors des opérations de carottage.
 - Characteristics of core VK 03, profile 42, SANBA cruise. From left to right : density, lithology, mean grain-size (in μm), sorting (So), CaCO_3 content and corresponding subbottom profile. fl.: sediment flowing during the coring operations.

2 - Caractérisation des unités supérieures

Nous avons vu que les discontinuités sismiques correspondent le plus souvent à des changements lithologiques. Il est donc possible d'utiliser cette caractéristique non plus sur une carotte isolée mais sur un ensemble de carottes alignées le long de profils sismiques, puis sur la totalité de la zone d'étude. Seules les carottes prélevées par l'Université d'Utrecht sont suffisamment nombreuses et proches des profils sismiques pour permettre une telle démarche. Du fait de leur longueur relativement faible (de 259 à 557 cm pour une longueur moyenne de 415 cm), elles ne permettent de caractériser que les unités supérieures U4, U5, U6 et U7.

La démarche suivie comprend deux étapes :

- Dans un premier temps, les données des carottes sont confrontées avec celles d'un profil sismique donné. Cela permet de tester la validité des découpages effectués avec les outils de sismique. Le travail correspondant a été réalisé le long des quatre profils 20, 30, 80 et 100 répartis entre les extrémités nord et sud du banc. Ces lignes sismiques ont été étudiées à la fois à haute et très haute résolution. Le mouvement des dunes n'étant pas négligeable entre deux campagnes (cf. Chapitre II, Fig. II-35), un profil bathymétrique a été relevé à la même période que les opérations de carottage. Ce profil bathymétrique sert de base au positionnement des carottes et des réflecteurs sismiques.

- Dans un deuxième temps, en fonction des résultats précédents, les observations des différents profils sont mis en regard. Cela permet de caractériser la nature sédimentaire des unités sismiques supérieures (U4, U5, U6 et U7), sur l'ensemble du banc.

2.1 - Présentation des données

2.1.1 - Profil lithologique à l'extrémité nord du banc (N°20)

Le profil 20 a été effectué dans la zone de la mosaïque de sonar latéral (cf. Chapitres I et II) afin de compléter le grand nombre d'informations sismiques disponibles sur cette partie septentrionale du banc. Il comporte 8 carottes localisées sur le banc (N° 48 à 53) et dans le chenal Uitdiep (N° 46 et 47; Fig. III-39).

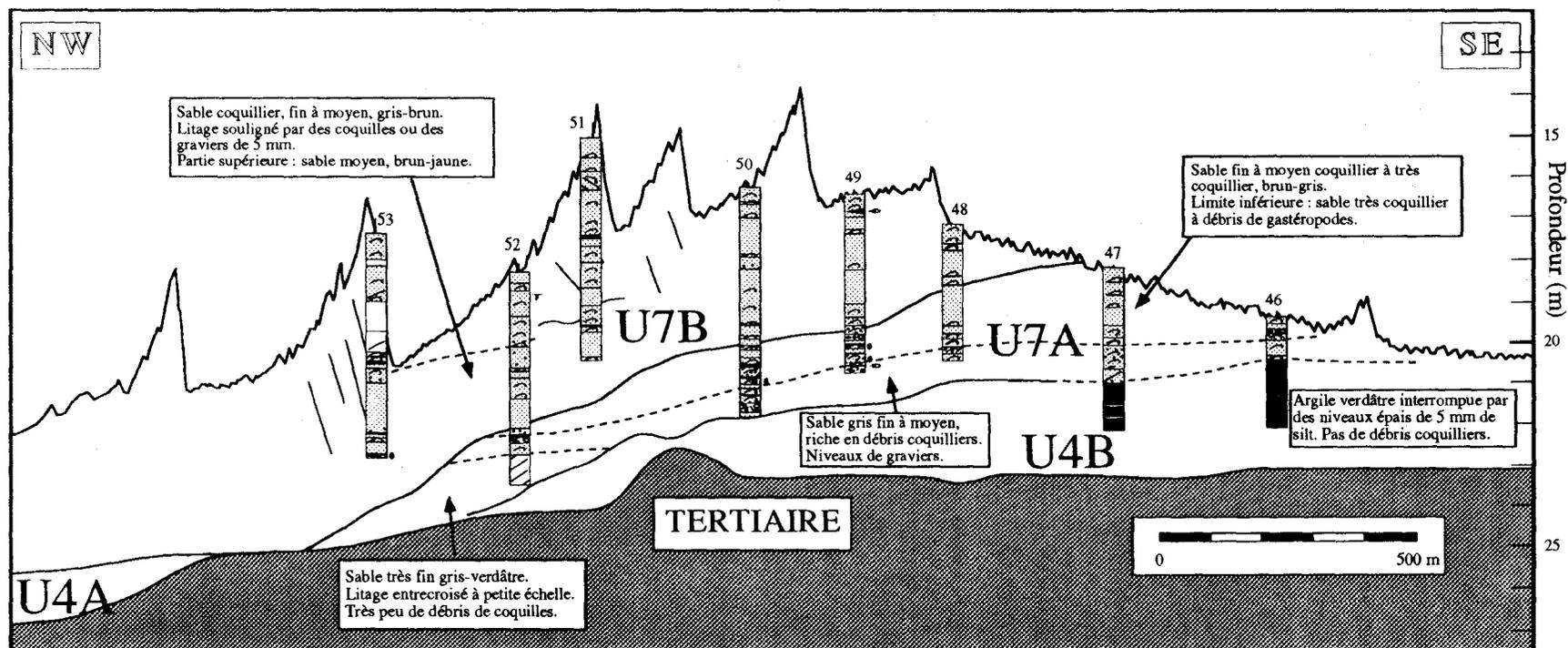
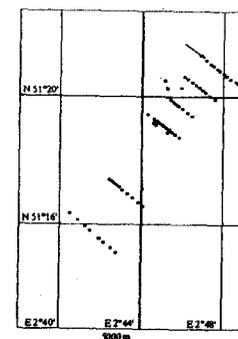


Figure III-39 - Profil N° 20, données sismiques et lithologiques. Les faciès sédimentaires suivent la nomenclature définie à la figure III-31. Les traits pleins représentent les réflecteurs sismiques, les tiretés les limites supposées à partir de l'étude des profils sismiques et de la lithologie. Pour chaque unité ou sous-unité, ainsi que pour certains réflecteurs, les caractéristiques principales sont encadrées. Profils N°35 et 39 du sondeur de sédiment, mission BELGICA.

- Profile 20, seismic and lithologic data. The sedimentological facies are those defined on figure III-31. Full lines correspond to seismic reflectors. Dashed lines correspond to the interpretation of seismic and lithologic data. For all units or sub-units, and also for some seismic reflectors, the major characteristics are framed. Subbottom profiles 35 and 39, BELGICA survey.



La reconnaissance des unités sismiques dans les rubriques précédentes (cf. chapitre III, rubriques A-4 et A-5) indique que quatre sous-unités sismiques sont présentes au-dessus du Tertiaire dans le profil N° 20. De ces quatre sous-unités, seules trois sont atteintes par les carottages : U4B dans les carottes 46 et 47 ; U7 divisée en deux sous-unités U7A et U7B dans la majorité des autres carottes. En comparant les données sismiques et lithologiques, il apparaît que les limites définies grâce à la sismique correspondent effectivement à des entités lithologiques.

La sous-unité U4B est caractérisée à l'extrémité nord du banc par une argile silteuse épaisse de 160 cm interrompue par des niveaux de silt de 5 cm d'épaisseur (faciès 10 et 11). L'argile est de teinte verdâtre et ne contient pas de coquille visible, elle ne correspond pas à l'argile yprésienne. Cette dernière est en effet brune, très compacte et non silteuse.

Le contraste sédimentologique entre U4B et U7A (argile silteuse et sable) est, dans cette partie du banc, à l'origine du réflecteur U7.b.

La partie inférieure de U7, nommée U7A, présente une grande variété de faciès (1 à 5 et 10), allant de sables très fins à des niveaux de graviers. Les galets d'argile sont fréquents. Au sein de cette sous-unité, il est possible de définir des zones lithologiques différentes. Dans les niveaux inférieurs (base de la carotte 52), le sédiment est un sable gris très fin pauvre en coquilles, à minces litages obliques. Ces caractéristiques le distinguent d'un ensemble corrélable le long des carottes 52, et 50 à 46 qui constitue un sable fin à moyen, de couleur grise, riche en débris coquilliers et en graviers de silice. L'ensemble supérieur de U7A, plus brun est encore plus riche en débris coquilliers. La limite entre ces ensembles n'apparaît pas sur les profils sismiques, mais semble correspondre dans les carottes à des niveaux plus riches en gastéropodes.

La partie supérieure de U7, nommée U7B, est principalement composée de sable moyen à grossier (faciès 3 et 4) avec localement de fines intercalations d'argile ou de sable fin. La carotte N° 53, prise entièrement dans cette unité, contient à la profondeur de 340 cm un fragment de bouteille de détergent datant tout au plus de quelques décennies. Ce témoin anthropique récent montre l'importance locale des phénomènes de sédimentation. De plus, ce fragment est recouvert vers 320 cm, soit 20 cm plus haut, par un lit d'argile de 3 cm d'épaisseur, ce qui atteste la variabilité importante des conditions de dépôt sur des courtes périodes. Dans toute cette sous-unité, le sable possède les caractéristiques des sédiments carottés dans les zones de grandes dunes (cf. rubrique B-3 au chapitre III) dont il paraît en conséquence faire partie.

Dans le profil N°20, le changement d'unité sismique s'accompagne de changements lithologiques. La sous-unité U4B caractérisée par de l'argile silteuse est en effet recouverte par les deux sous-unités U7A et U7B, qui diffèrent de la première tant par la taille du sédiment que par la couleur ou le contenu faunistique. Les réflecteurs ne semblent donc pas correspondre à des niveaux restreints de lithologie particulière mais à des changements lithologiques plus durables.

2.1.2 - Profil lithologique du banc dans la partie nord (N°30)

La structure interne du profil N°30 est bien connue grâce aux profils N°4 et 5 du sondeur de sédiment de l'IFREMER et du profil N°2 du sparker du RCMG, localisés à proximité. Il comporte neuf carottes précédemment décrites (fig. III-35). La superposition des informations sismiques et lithologiques donne le schéma présenté à la figure III-40.

Les unités sismiques U4 et U7 sont présentes et se distinguent sur les "laquer-peels" par leurs couleurs, respectivement dominées par le gris et par le brun.

L'unité U4 possède des faciès variés à dominante fine : argile silteuse, sable fin à très fin, sable moyen mais comporte également des niveaux de graviers associés (faciès 1 à 4, 6, 7 et 10), du sable moyen dans les niveaux supérieurs (faciès 2 à 4). Cette unité comporte trois ensembles géographiques : au centre du profil, elle est constituée par la superposition de deux ensembles sableux, alors qu'aux deux extrémités SE et NW, elle présente des faciès très variés, parfois chenalisés. La partie principale de U4 (au centre du profil) est constituée de sable fin ou très fin, gris. Les bioclastes sont généralement peu fréquents mais comprennent des débris de coquilles non observées dans les sédiments de surface (huîtres, pectens, petits gastéropodes). Toutes les coquilles ont une origine marine. Certains niveaux très fins sont riches en débris de plantes.

Au SE, les réflecteurs sismiques ne coïncident pas bien avec les limites lithologiques, ce qui résulte sans doute de l'éloignement relatif des deux groupes de profils. On y remarque deux ensembles lithologiques séparés par un niveau très riche en coquilles et en graviers de silex. L'ensemble inférieur présente le faciès 6 caractérisé par des litages plans entrecroisés, localement riche en coquilles et en débris de plantes. L'ensemble supérieur est plus grossier et coquillier. Sa couleur est brun-gris.

Au NW, les profils sismiques HR et THR montrent des réflecteurs arqués indiquant des contours de chenaux. Le sédiment correspondant est très varié, il est tantôt graveleux, sableux ou argileux.

La limite U7.b entre U4 et U7 est un réflecteur souligné sur les carottes par un niveau de couleur jaune-grisâtre, peu commun. Il s'agit d'un sédiment appartenant au faciès 1, grossier et riche en coquilles, dont d'huîtres. L'unité U7 peut être divisée en deux parties. La partie inférieure est composée de sable fin à moyen dont les teneurs en coquilles sont très variables (faciès 3 à 5) ; les graviers y sont fréquents, ainsi que les débris d'échinodermes. La partie supérieure est légèrement plus grossière et coquillière (faciès 3 et 4) ; très peu de graviers y sont observés. La discontinuité entre les deux parties de U7, bien marquée sur les profils sismiques, correspond donc à des changements lithologiques modérés.

Si le profil N°30 montre que les unités sismiques séparées par les réflecteurs de premier ordre correspondent bien à des entités lithologiques différentes, il montre également que le faciès sédimentaire peut être très variable au sein d'une unité donnée. Ces faciès sont séparés par des réflecteurs de second ordre et traduisent d'importantes variations latérales car les réflecteurs sont difficiles à corrélés d'un profil à l'autre.

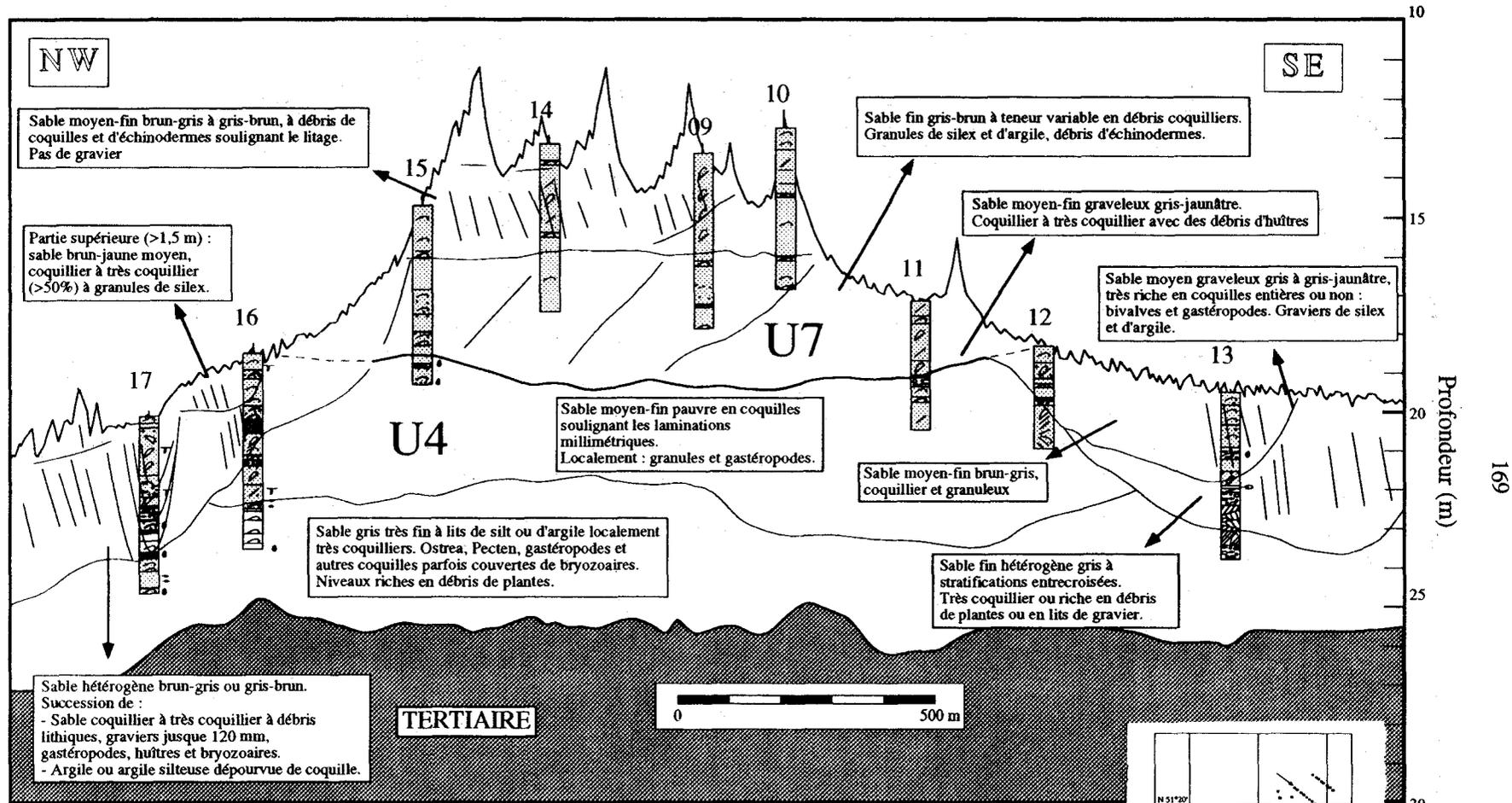
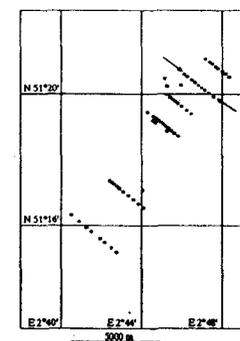


Figure III-40 - Profil N° 30, données sismiques et lithologiques. Même légende que pour la figure III-39. Profils N°4 et 5 du sondeur de sédiment, mission BELGICA et Profil N°2 du sparker, mission RESECUI.
 - Profile 30, seismic and lithologic data. Same legend as for figure III-39. Subbottom profiles 4 and 5, BELGICA survey and Sparker profile 2, RESECUI survey.



2.1.3 - Profil lithologique dans la partie sud du banc (N°80)

La ligne de carottes est superposée aux profils sismiques N°19 et 20 réalisés par l'IREMÉR ainsi que par les profils N°26 et 27 obtenus par le RCMG. Cela permet de corrélérer les deux sources d'information (Fig. III-41).

Le profil est localisé dans la partie sud du banc. Dans cette zone, le banc présente une morphologie caractéristique, avec un flanc nettement plus abrupt vers le large (NW) que vers la côte (SE). Il s'agit de la zone la moins profonde du banc. Les carottes montrent des faciès variés, décrits précédemment (Fig. III-31).

Quatre unités sismiques sont recoupées par les carottages : U4, U5, U6 et U7.

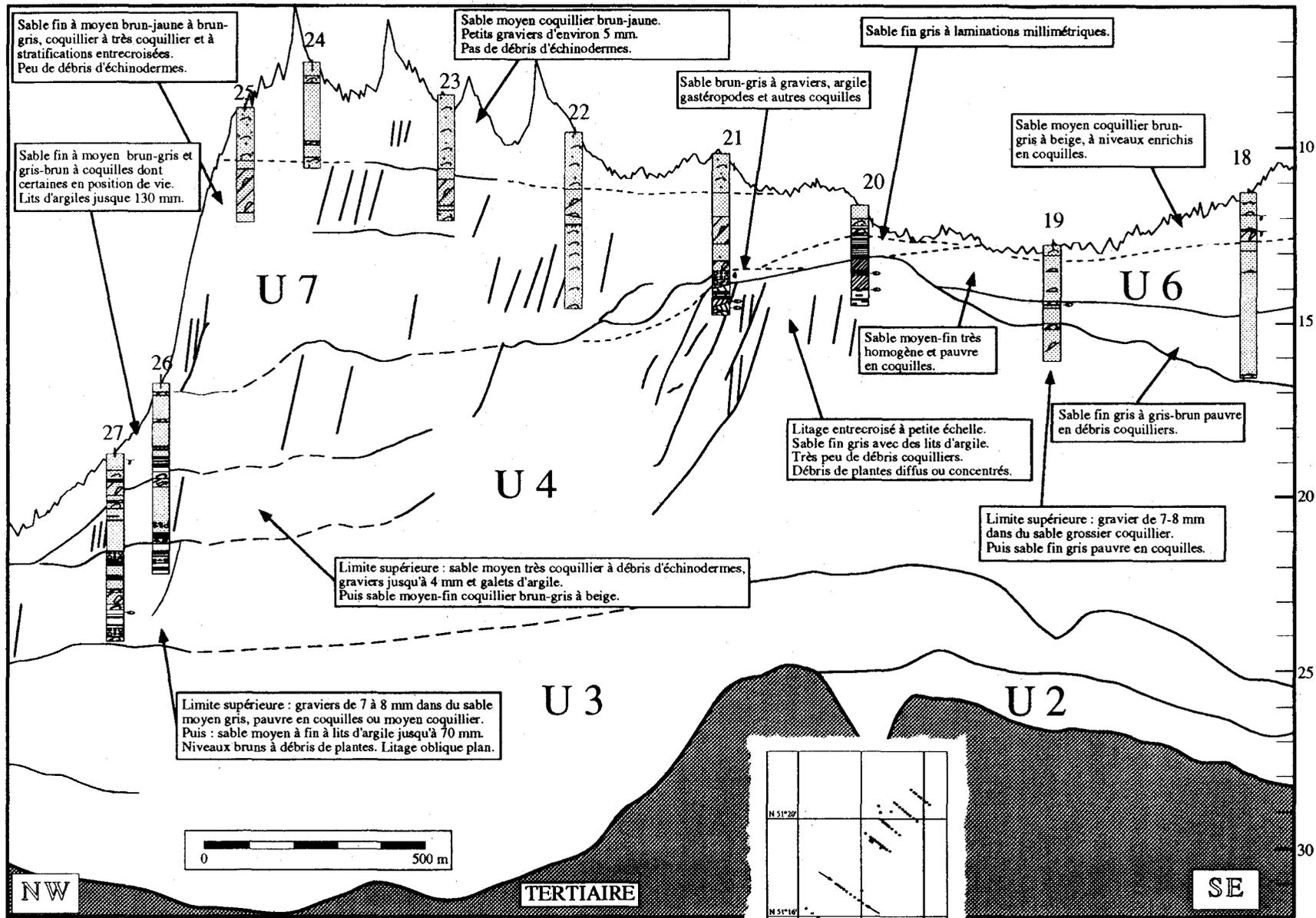
L'unité U4 est caractérisée par des teintes grises. Elle comporte des sédiments variés : essentiellement sables fins (faciès 2 à 4, 6, 7, 9 et 10) mais également des niveaux argileux (faciès 11) ou très hétérogènes à gravier et argile (faciès 1). Les variations latérales de faciès sont rapides. Ainsi entre l'extrémité NW et la partie SE du profil, des différences importantes apparaissent : au NW les carottes présentent une alternance de sédiments grossiers et très fins, les discontinuités sismiques semblent correspondre à des niveaux particulièrement grossiers mais les corrélations latérales de faciès entre les carottes 27 et 26 sont complexes. Au SE en revanche le sédiment est généralement plus constant en granularité mais latéralement le litage change rapidement ; cette zone est caractérisée par l'abondance des débris de plantes.

L'unité U5 est constituée par du sable fin gris à gris-brun, pauvre en débris coquilliers. Le fait que seulement deux carottes la traversent ne nous permet pas de préciser davantage son contenu.

La limite U6.b entre U5 et U6 n'est marquée par aucune discontinuité lithologique. La distance relativement élevée entre les carottes et les profils sismiques (plusieurs décamètres pour les carottes traversant U6) peut expliquer cette corrélation médiocre. L'unité U6 comporte du sable moyen brun-jaune avec des niveaux très riches en coquilles (faciès 3 et 4). Des bioturbations y sont observables.

Figure III-41 - Profil N° 80, données sismiques et lithologiques. Même légende que pour la figure III-39. Profils du sondeur de sédiment N°19 et 20, mission BELGICA et profils sparker N°26 et 27, mission RESECU1.

- Profile 80, seismic and lithologic data. Same legend as for figure III-39. Subbottom profiles 19 and 20, BELGICA survey and sparker profiles 26 and 27, RESECU1 survey.



L'unité U7 possède de nombreux réflecteurs internes orientés vers le NW. Ces réflecteurs sont séparés par des réflecteurs horizontaux, parfois difficiles à suivre car proches de la surface du banc. Le réflecteur horizontal le plus haut sépare deux sous-unités aux caractéristiques lithologiques différentes. La sous-unité inférieure est constituée de sable moyen à fin, gris-brun, coquillier à débris d'échinodermes (faciès 3 et 4) ; les graviers y sont rares. La sous-unité supérieure, par contre, est constituée de sable moyen brun-jaune dans lequel de nombreux graviers d'environ 5 mm sont présents (faciès 3, 4 et 5) ; le sable y est coquillier mais ne comporte que peu ou pas de débris d'échinodermes.

Le long du profil 80, certains sédiments particuliers sont observés très localement, dans une seule carotte. La carotte 21 par exemple montre entre 327 et 354 cm un sable fin à graviers et à gastéropodes particulièrement abondants. Ne pouvant être corrélés avec les carottes voisines, ces faciès sont interprétés comme faisant partie de petites lentilles isolées.

L'analyse du profil N°80 confirme les conclusions émises lors de l'étude du profil N°30 : les unités sismiques, même si elles sont corrélables sur l'ensemble de la zone d'étude, sont constituées par un assemblage de sous-unités aux caractéristiques lithologiques distinctes. Les limites entre ces sous-unités ne correspondent pas toujours à des réflecteurs observables en sismique, soit parce qu'ils échappent à la THR dont la pénétration est faible, soit parce qu'ils correspondent à des changements lithologiques trop faibles pour déterminer une réflexion enregistrable en HR.

2.1.4 - Profil lithologique à l'extrémité sud du banc (N°100)

Dans la partie sud, la forme asymétrique du banc s'estompe pour laisser place à un profil plus arrondi. Huit carottes espacées en moyenne de 600 mètres ont été prélevées le long du profil du sondeur de sédiment N°63 (Fig. III-42). Il faut noter que le profil sismique THR est légèrement oblique par rapport à la ligne de carottes. De plus, le profil sismique HR N°43 enregistré à proximité est de mauvaise qualité. Enfin, les données bathymétriques enregistrées lors de la campagne de carottage semblent indiquer une surélévation du fond de près de 1 m dans la zone des carottes 38 à 42, entre mai et septembre 1991. De ce fait, il n'a pas été possible de replacer les réflecteurs les plus proches de la surface. Trois unités sismiques ont été reconnues et échantillonnées : U4, U6 et U7.

L'unité U4, présente dans les carottes N°45B et 44 possède des sédiments variés : lumachelle grossière, gravier, sable fin (faciès 1 à 4) et, dans les zones les plus basses des carottes, alternance de silt grisâtre et d'argile sombre à stratifications entrecroisées (faciès 6 à 11). Il n'y a pas de coquille visible dans ces niveaux. La base de la carotte 43, formée de graviers coquilliers, représente sans doute la limite U7.b entre U4 et U7.

L'unité U6 a été échantillonnée par le carottage N°38. Le sédiment homogène est un sable fin gris-brun très pauvre en coquilles (faciès 4 et 10).

L'unité U7 est beaucoup plus riche en coquilles. Les 135 centimètres inférieurs de la carotte 42 sont composés d'une lumachelle avec plus de 50% de débris coquilliers à litages obliques (faciès 2). L'abondance de CaCO₃ contraste avec la pauvreté des sédiments de surface dans cette partie du banc (cf. Chapitre II).

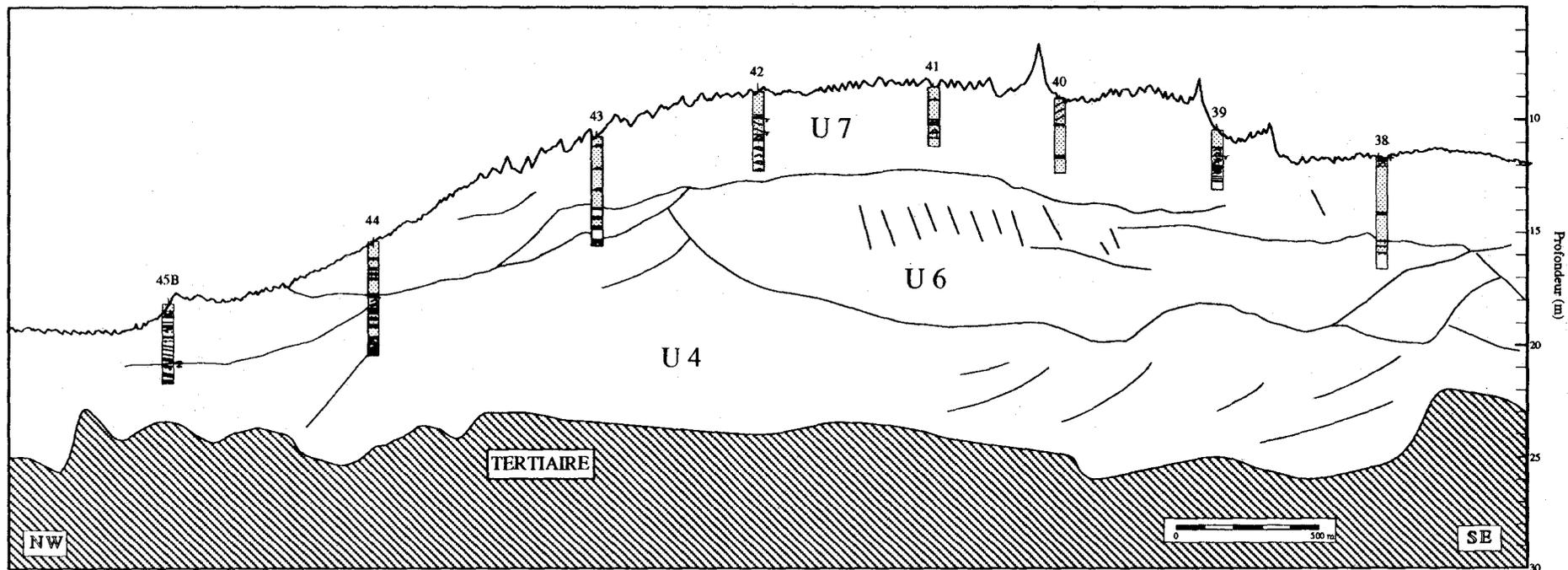
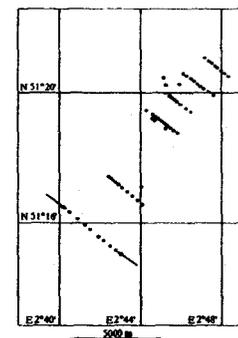


Figure III-42 - Profil N°100, données sismiques et lithologiques. Même légende que pour la figure III-39. Profil du sondeur de sédiment N°63, mission BELGICA et profil sparker N°43, mission RESECUI.
 - Profile 100, seismic and lithologic data. Same legend as for figure III-39. Subbottom profile 63, BELGICA survey and sparker profile 43, RESECUI survey.



Le profil N°100 apporte peu d'informations supplémentaires quant à la composition des unités sismiques. Il met cependant en évidence que d'un profil à l'autre, la lithologie des unités sismiques peut varier considérablement. Il existe donc d'importantes variations latérales de faciès dans les directions parallèles et perpendiculaires au banc.

2.2 - Caractères propres à chaque unité

L'observation des quatre profils N°20, 30, 80 et 100 indique que les unités sismiques sont composées de différents ensembles lithologiques. Il est possible de dégager des caractéristiques propres pour chacune des unités. Seules les unités supérieures pouvant être atteintes par les carottages de l'Université d'Utrecht, les rubriques suivantes ne concernent que les unités U4, U5, U6 et U7.

2.2.1 - Unité U4

Bien que les profils de carottage soient trop espacés pour faire de réelles corrélations lithologiques, l'unité U4 a été carottée suffisamment pour permettre une reconstitution de son milieu de dépôt. Quinze carottes recoupent cette unité qui montre une grande extension latérale. Elle est présente sous la quasi totalité du Middelkerke Bank, de l'Uitdiep et de l'Oostende Bank (Fig. III-15).

Cette unité possède les caractéristiques suivantes : elle est épaisse, possède des réflecteurs internes orientés vers le Nord, et présente en carottes une grande variété de faciès. Ces faciès sont difficiles à corréler le long d'un profil sismique (voir rubriques précédentes), et le sont encore davantage lorsque l'on considère leur disposition sur l'ensemble de la zone d'étude, d'un profil à l'autre (Fig. III-43).

La constante de l'unité U4 réside dans sa variabilité lithologique interne, aussi bien verticale que latérale. Une telle variabilité n'est pas observée sur les profils sismiques, qui présentent de nombreux réflecteurs internes avec une orientation préférentielle vers le Nord et des angles pouvant dépasser 5°. Dans les zones les plus basses, l'orientation des réflecteurs suit la pente de la limite inférieure de l'unité.

L'observation de toutes les carottes permet de distinguer trois associations de faciès nommés A, B et C.

- L'association A regroupe des sédiments appartenant aux faciès 6, 7, 9, 10 et 11. Il s'agit de sables fins à litages en chevrons, obliques ou plans ainsi que de sables silteux et d'argiles. Les sables très fins comportent des coquilles parmi lesquelles *Ostrea sp.*, *Mytilus sp.*, et des débris de petits gastéropodes parfois abondants. Au Nord, l'épaisseur d'argile, importante, dépasse 1,5 m et n'est interrompue que par de fins lits de silt. Les débris de plantes y sont abondants, et les graviers absents.

- L'association B regroupe des sédiments présentant les faciès 3, 4, 5 et 9, globalement plus grossiers que ceux de l'association précédente : sable gris, fin ou moyen, pauvre en débris coquilliers et à laminations millimétriques, ou encore sable gris à coquilles parmi lesquelles des débris d'huîtres (*Ostrea sp.*) de moules (*Mytilus sp.*) et de *Pecten sp.* On y trouve en outre des galets d'argile et des graviers fins.

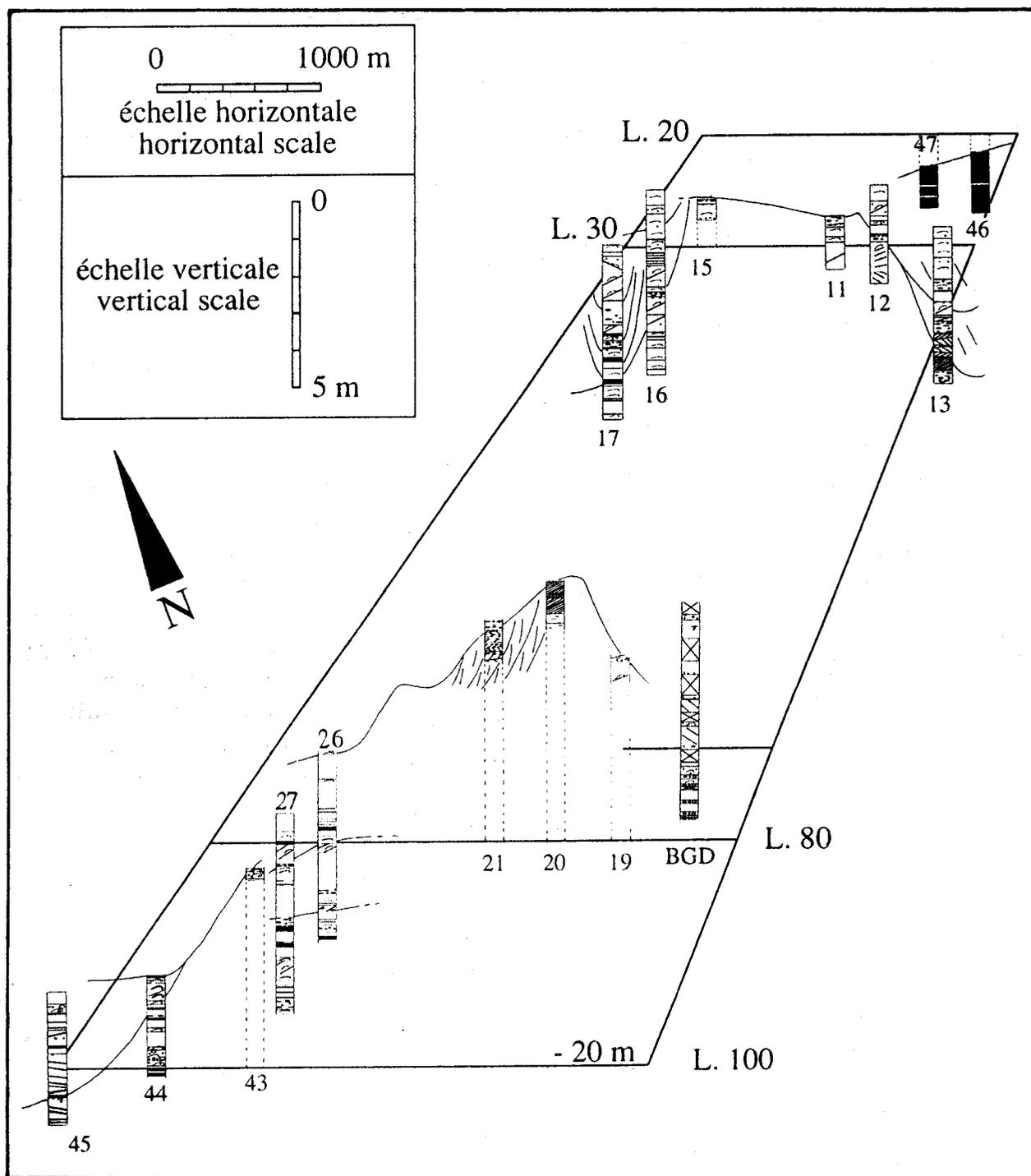


Figure III-43 - Faciès de U4 à partir des observations de toutes les carottes par rapport à l'isobathe - 20 m. Le sommet des carottes est systématiquement recoupé par le réflecteur U7.b ou U6.b pour la carotte notée BGD. Seule cette dernière montre le contact avec l'unité inférieure U3. Les numéros correspondent à celui des carottes décrites dans les figures précédentes.

- Distribution of the sedimentary facies in the Unit 4 from observations of all the cores. Location with regard to the - 20 m isobath. The core tops are systematically cut by the basis U7.b of unit U7 or by U6.b in the core labelled BGD. On this core only, U4 is in contact with the lower U3 seismic unit. Numbers refer to core numbers.

- L'association C est caractérisée par la présence fréquente de graviers dont la taille atteint 120 mm (faciès 1) associés à des niveaux de sable fin à moyen, coquillier ou non, et d'argile azoïque, ou encore des niveaux bruns de sables très fins silteux, riches en débris végétaux. Les coquilles comprennent des gastéropodes, des huîtres et des débris d'autres organismes. Des tests de bryozoaires encroûtent fréquemment les coquilles d'huîtres. Sur les profils sismiques, cette association est observée dans des formes chenalisantes (profil 30, à gauche sur la figure III- 44).

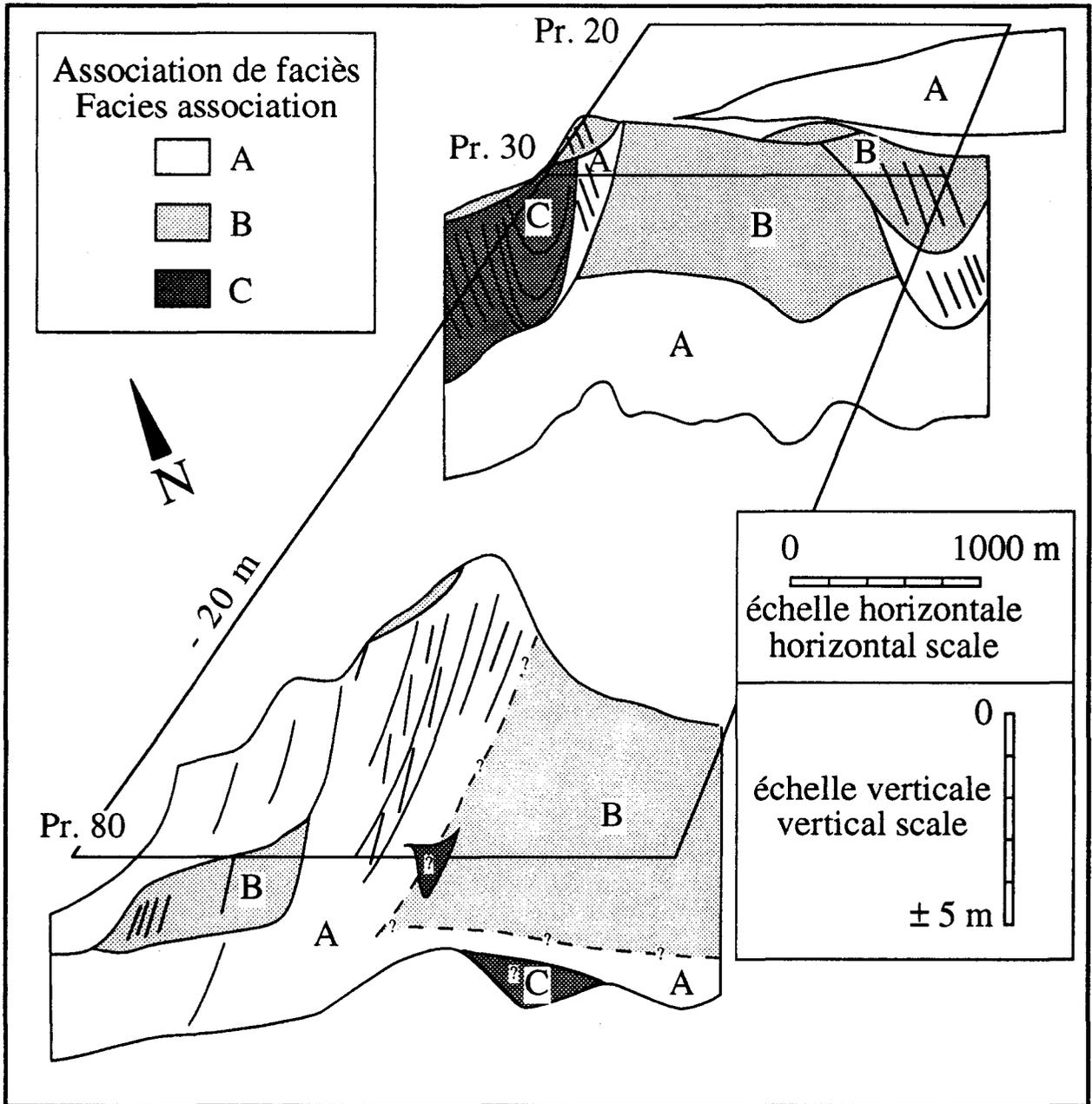


Figure III-44 - Division lithologique de l'unité U4 en trois associations de faciès.

Association A : faciès 6, 7, 9, 10 et 11.

B : faciès 3, 4, 5 and 9.

C : faciès de remplissage de chenaux.

- Lithologic division of unit U4 in three facies associations.

Association A: facies 6, 7, 9, 10 and 11.

B: facies 3, 4, 5 and 9.

C: channel infilling facies.

Dans tous les cas, excepté celui de la carotte du BGD (Service Géologique de Belgique), l'unité U4 débute par les faciès de l'association A. Ces faciès sont surmontés par des faciès de l'association B avec encore un peu d'argile. Cette association semble être intercalée dans l'association A. Selon le profil considéré (par exemple, le profil N°30), l'association C peut être bien développée. Le sommet de U4 est constitué par l'association A au Sud et par l'association B au Nord ; le caractère érosif de U5.b, U6.b et U7.b ne permet pas d'avoir la totalité de U4. Sur la figure III-42, de grandes zones de l'unité U4 ne sont pas caractérisées lithologiquement car aucune carotte ne les atteint. Il s'agit en particulier de la base SE du profil N°80 pour laquelle l'association A est supposée bien que non observée. Il semble en effet que cette association constitue les premiers dépôts de U4. Un certain nombre de chenaux a également été figuré. L'incertitude de leur localisation est indiquée par les caractères "?".

2.2.2 - Unité U5

L'unité 5 n'est connue que grâce aux informations des 2 carottes 18 et 19. Elle n'occupe qu'une petite zone de 10 km², entaille U4 et possède des réflecteurs orientés vers le SE. Le sédiment qui la compose est un sable fin, gris à brun-gris pauvre en débris coquilliers. D'après les observations des dépôts superficiels (bennes, chapitre I et box-cores, Stolk, 1993), cette unité pourrait correspondre à un milieu de chenal interbarres ou interbanacs. La rareté des informations ne permet pas de préciser davantage.

2.2.3 - Unité U6

L'unité 6 apparaît de manière spectaculaire sur les profils sismiques car elle présente de nombreux réflecteurs internes obliques, sub-parallèles. Ils sont orientés vers le SE ou le SSE avec une pente qui dépasse fréquemment 5°. L'unité U6 est recoupée par les carottes N° 38, 18 et 19, ainsi que par la carotte du BGD. Le sédiment correspondant y est systématiquement un sable moyen à dominante grise. Les coquilles sont rares et concentrées dans des niveaux de quelques centimètres d'épaisseur. Ces niveaux enrichis en coquilles ont souvent une teinte noire ou très foncée. De fines intercalations de silt ou d'argile sont également présentes.

2.2.4 - Unité U7

L'unité U7 est présente sur la quasi totalité de la zone d'étude. Elle est caractérisée par des réflecteurs internes orientés préférentiellement vers le NW, et dans certaines zones par de grands réflecteurs horizontaux. Du fait de sa position sommitale, l'unité U7 a été atteinte le long de tous les profils par de nombreuses carottes. On y distingue quatre zones :

1) La partie sud présente en sismique des réflecteurs horizontaux se terminant en "onlap" sur les unités inférieures (Figure III-1). La tendance générale est à la décroissance du grain moyen vers le haut, bien qu'il existe quelques séquences négatives. La teneur en coquilles diminue vers le haut cependant que celle des particules fines augmente. Cette caractéristique traduit une baisse progressive de l'énergie du milieu tandis que les réflecteurs correspondent à une progression irrégulière et verticale lente de l'unité U7.

2) La partie principale de l'unité est située au centre de la zone d'étude. Dans ce secteur, les réflecteurs internes obliques ont des pendages qui atteignent 5° et sont systématiquement orientés vers le NW. L'unité U7 est, sur ce profil, séparée en deux sous-unités par un réflecteur horizontal. La sous-unité inférieure est riche en débris de mollusques et d'échinodermes. La sous-unité supérieure se distingue par la présence de graviers et l'absence de débris d'échinodermes et (Fig. III-41).

3) Le profil 30, situé dans la partie nord du Middelkerke Bank, montre également un réflecteur sub-horizontale séparant deux sous-unités aux caractéristiques différentes (Fig. III-40). Dans la sous-unité inférieure, les réflecteurs sont orientés vers le NW, c'est-à-dire vers le large, et le sédiment exprime une tendance générale granocroissante avec empilement de séquences positives. La sous-unité supérieure se distingue par un sédiment organisé en séquences négatives et par la présence de réflecteurs orientés vers le SE, c'est-à-dire la côte. Le profil 30 constitue donc une zone de transition entre le corps principal du banc qui possède les caractères de la sous-unité inférieure, et la partie nord du banc aux caractéristiques voisines de la sous-unité supérieure (cf. rubriques suivantes).

4) L'extrémité septentrionale, peu épaisse, présente une structure interne différente de celle du reste du banc (Fig. III-39). Dans cette zone, U7 est l'unité principale et parfois exclusive. Elle repose souvent directement sur le substratum d'âge tertiaire. Les réflecteurs sont de deux ordres : 1) de grands réflecteurs obliques dont le pendage est orienté vers le Nord ; 2) des réflecteurs internes dont le pendage est similaire à la pente de la face abrupte des grandes dunes (vers l'Est, angle atteignant 15°). Le sédiment est habituellement granocroissant vers le haut, certains niveaux montrant la tendance inverse.

3 - Caractérisation d'une séquence complète

Le carottage "Uitdiep" du Service Géologique Belge (BGD) a été situé grâce aux observations préliminaires faites sur des profils sismiques haute résolution (Henriet *et al.*, 1978 ; Maréchal et Henriet, 1983). Le site choisi est le chenal Uitdiep, car la plateforme de forage nécessitait un tirant d'eau d'une quinzaine de mètres et un fond aussi plat et horizontal que possible. La carotte fait 19 m au total dont 13,55 m dans le Quaternaire. La première description de la carotte a été effectuée par Baeteman et Maenhaut Van Lemberge (1989). Nous l'avons redécrite en 1993, afin de disposer de la même nomenclature que pour toutes les autres carottes.

Le taux moyen de récupération de la carotte BGD est de 76%. Le forage ayant été effectué par tronçons de 1m, la marge d'incertitude verticale dans la position des sédiments n'est pas cumulée mais est localisée à chaque tronçon. L'incertitude maximale est de 60 cm pour les sédiments situés entre 3 et 4 m. Pour chaque tronçon, la partie sommitale, lessivée lors des opérations de tubage, peut être manquante (Cécile Baeteman, Comm. Pers.).

La carotte BGD présente le grand intérêt d'atteindre les unités sismiques inférieures U1, U2 et U3, ainsi que les unités U4 et U6 (Fig. III-45). Cette carotte constitue donc le seul point de contrôle lithologique pour les unités U1, U2 et U3. Au vu des fréquentes variations latérales de faciès présentes sur les profils sismiques et révélées lors des

études des unités supérieures (U4 à U7, rubriques 2.2.1 à 2.2.4), les interprétations sur les successions lithologiques doivent être considérées avec précautions.

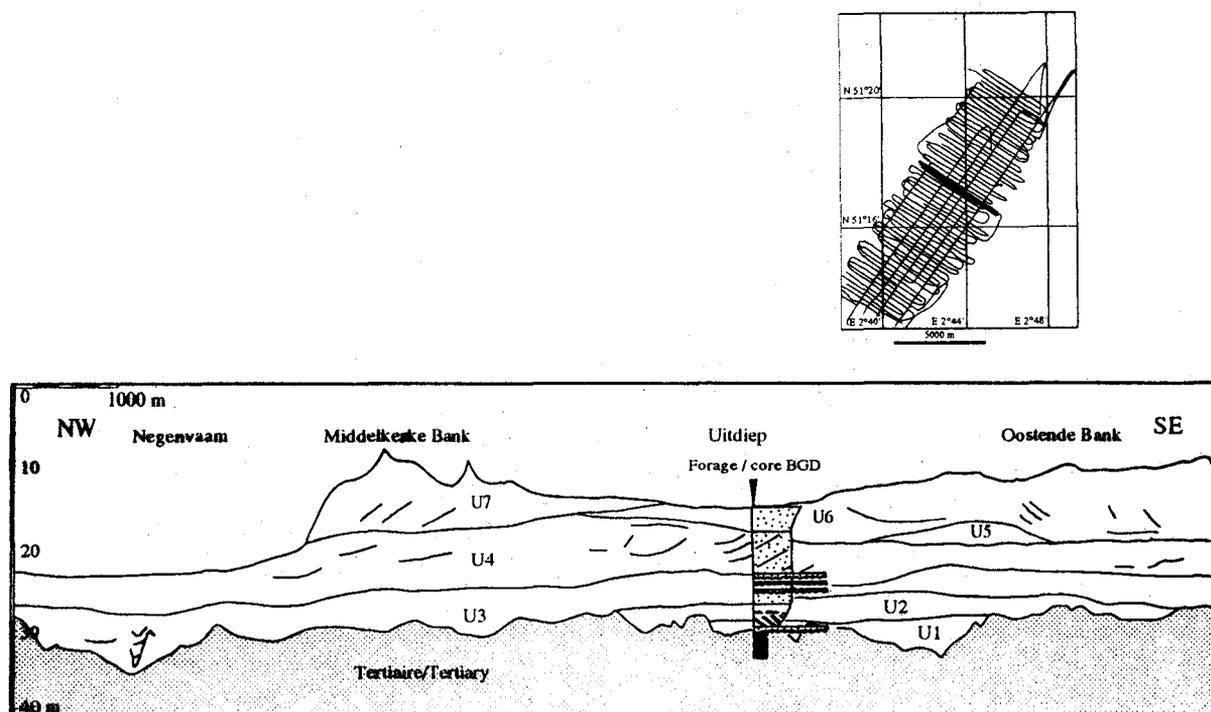


Figure III-45 - Localisation de la carotte du BGD sur le profil N° 25 du RCMG.
- Location of BGD's core on RCMG seismic profile 25.

3.1 - Description de la carotte "Uitdiep"

Presque tous les types de faciès précédemment définis sont rencontrés dans la carotte (Fig. III-46), à l'exception des faciès 2 (sable très coquillier) et 6 (sable fin à stratifications entrecroisées).

Cette longue carotte, dont le Quaternaire est épais de 13,55 m, présente des faciès allant des argiles jusqu'aux graviers. Elle est caractérisée à la base par des sédiments grossiers riches en marcssite, discordant sur l'argile yprésienne. Au-dessus se trouve une succession de lits dont l'épaisseur varie de quelques millimètres à plusieurs décimètres. Les lits sont arrangés selon des séquences granocroissantes (négatives) ou granodécroissantes (positives).

La base est érosive sur le substrat argileux yprésien. Elle comporte des graviers roulés de silex, de marcssite ou de quartz dans une matrice sablo-argileuse (faciès 1). Les coquilles, usées pour la plupart, correspondent à des débris de lamellibranches marins ou à de petits gastéropodes dont l'âge n'est pas connu. Cet ensemble de sédiment grossier forme une séquence positive.

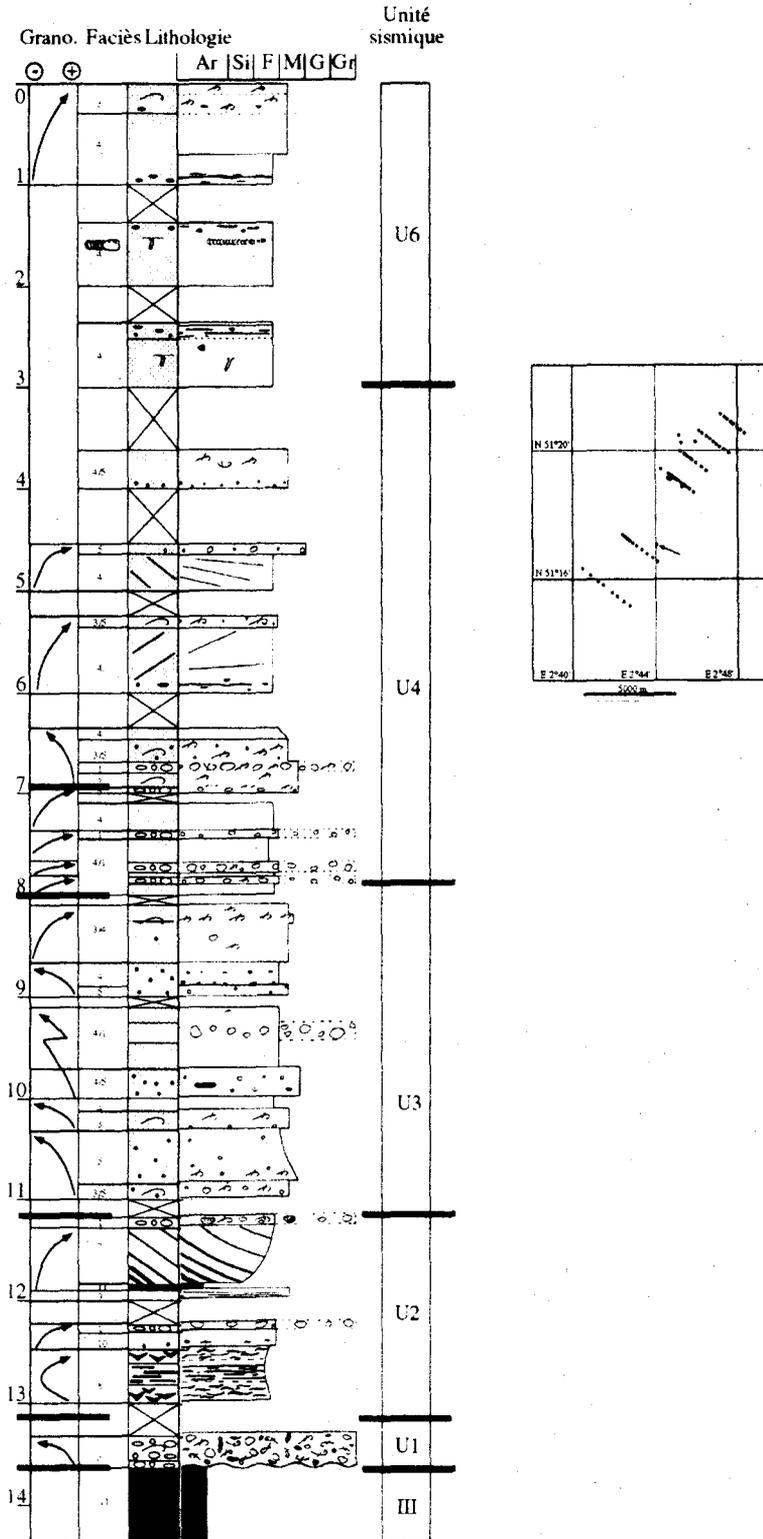


Figure III-46 - Description lithologique de la carotte "Uitdiep" forée par le Service géologique de Belgique.
 - Log of core "Uitdiep" sampled by the Belgian Geological Survey (BGD).

Au-dessus de 13,55 m de profondeur, la lithologie est caractérisée par l'abondance des niveaux riches en argile, disposés en lits continus ou sous forme de lentilles ou galet mous (faciès 8). Les débris de plantes y sont abondants. Jusqu'à -11 m, les sédiments sont arrangés en séquences négatives marquées par une diminution significative de l'argile vers le haut. Cette diminution est particulièrement bien marquée entre -11,90 et -11,25 m où s'observe une alternance de lits inclinés de sable fin et d'argile brune. Les lits d'argile deviennent plus minces et de plus en plus espacés vers le haut marquant une augmentation moyenne progressive de l'énergie dans un milieu à alternance de périodes calmes (dépôt d'argile) et plus agitées (dépôt de sable fin).

Les niveaux grossiers situés à -11 m correspondent au passage U2 / U3. La limite inférieure de U3 est soulignée par un niveau de graviers de silex et de grès dont le diamètre atteint 3 cm. Un de ces graviers pourrait être d'âge panisélien (Lutétien inférieur belge ; Cécile Baeteman, Comm. Pers.).

A partir de -11 mètres et jusqu'à -8 m, le sédiment est beaucoup plus sableux, bioclastique et comprend fréquemment des graviers de silex. Il est caractérisé par :

- Une diminution globale du grain vers le haut ;
- une diminution des teneurs en gravier vers le haut ;
- un empilement jusqu'à -8,65 m de séquences positives, dont la base est marquée par l'abondance des coquilles brisées et des graviers (faciès 1) ;
- des niveaux de sables bien triés, très propres ;
- un sommet singulier marqué par des lits de sables moyens/fins, riches en graviers.

Entre -8 et -7 mètres, le sédiment est riche en graviers siliciclastiques dont le diamètre dépasse 5 cm. Cette zone est formée de quatre séquences négatives décimétriques, se terminant par des niveaux enrichis en coquilles ou en graviers de silex atteignant 5 cm de diamètre.

A -7 m, le sédiment est caractérisé par des graviers de silex atteignant 3,5 cm de diamètre, associés à d'abondantes coquilles brisées (faciès 1).

Le reste de la carotte (entre -7 et 0 m) présente un taux de récupération réduit qui ne permet pas de définir clairement des séquences de granoclassement. Cette partie supérieure est caractérisée par la quasi absence de grains de taille supérieure à 5 mm, la diminution de la quantité d'argile, et des teneurs variables en coquilles. Le sable y est fin à moyen.

3.2 - Caractères des unités inférieures

3.2.1 - Unité U1

L'étude sismique indique que la base de l'unité U1 est érosive sur le substratum argileux tertiaire. Cette unité se retrouve en carotte entre -13,55 et -12,75 m. Elle est constituée de sédiments grossiers à la base puis plus argileux. Ces caractéristiques suggèrent d'associer U1 à une séquence de remplissage de chenaux.

3.2.2 - Unité U2

Sur les profils sismiques, l'unité U2 possède une forme de remplissage de chenaux. Lithologiquement, cette unité comprise entre -12,75 et -11,25 m est caractérisée par l'abondance des niveaux riches en argile. Les données de U2 sont proches de celles de U1 tant au niveau de la sismique que de la lithologie. Il est probable qu'elle représente également une séquence de comblement de chenaux. En particulier l'intervalle entre -11,9 et -11,25 m peut correspondre à la trace d'une grande dune dans un chenal sous influence tidale où l'alternance de périodes de haute et de basse énergie permet tour à tour le dépôt de sable et d'argile.

3.2.3 - Unité U3

La limite inférieure U3.b de U3 est particulièrement bien marquée sur les profils sismiques (cf. Tableau III-1 et Fig. III-10). Ce réflecteur correspond à un niveau riche en graviers de silex, qui contraste avec les sables environnants. L'abondance de graviers résulte sans doute d'une intense période d'érosion qui aurait vanné le sédiment. L'unité U3 est échantillonnée entre -11,25 et -7,6 m. Elle possède une forme de "sand sheet" sur les profils sismiques et présente peu de réflecteurs internes. Elle montre néanmoins des contrastes lithologiques importants dans la carotte. Le sable très propre et très bien trié situé entre -9 et -10 m n'a été observé que sur cette carotte.

3.3 - Compléments sur les unités U4 et U6

Notons qu'ici, U4.b ne correspond pas à une discontinuité lithologique importante mais à une succession de lits particulièrement grossiers de sables graveleux. Les faciès rencontrés dans U4, échantillonnée entre -7,6 et -3 m, correspondent à l'association A définie pour cette unité (cf. rubrique 2.2.1).

Dans l'unité U6, rencontrée entre -3 m et la surface, le sédiment est un sable fin à moyen du même type que celui observé dans les carottes prélevées par l'Université d'Utrecht.

D - Synthèse - Modèle d'évolution du Middelkerke Bank

La combinaison des données acquises par les moyens de sismique et de carottage ont permis de définir pour chacune des unités sismiques des caractères propres (Voir le sous-chapitre C). Chaque unité est constituée d'un certain nombre de sous-unités lithologiquement différentes qui définissent des entités corrélables sur l'ensemble de la zone d'étude. En fonction de ces données et de celles de la littérature, une tentative de reconstitution des milieux de dépôt de chacune des unités est maintenant effectuée.

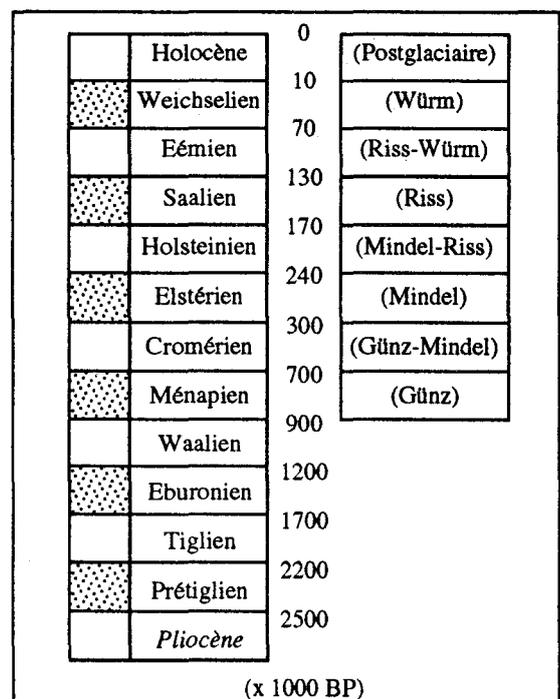
1 - Unité U1

1.1 - Discussion

Les caractères principaux de U1 résident dans une forme externe de remplissage de chenaux appartenant au système de la paléovallée d'Oostende et dans une lithologie grossière accompagnée de coquilles marines à la base. Pour reconstituer l'évolution de U1, il faut connaître l'origine du creusement de la vallée ainsi que la nature et l'âge de son remplissage.

Une étude bibliographique effectuée par Barclay (1992) sur 95 exemples anciens et modernes, répartis essentiellement sur le continent américain mais également en Europe et en Australie, montre que pour 75 cas, la relation régression / création de vallée peut être mise en évidence. Durant le Quaternaire, chaque épisode glaciaire, du Prétiglien au Weichselien (Fig. III-47), s'accompagne d'une baisse plus ou moins importante du niveau marin entraînant le creusement de vallées.

Figure III-47 - Périodes glaciaires et interglaciaires du Quaternaire néerlandais. D'après Zagwijn et Van Staalduinen (1975) et Lowe et Walker (1984). Les stades glaciaires sont signalés par les pointillés.
- *Glacial and interglacial stages of the dutch Quaternary. From Zagwijn and Van Staalduinen (1975) and Lowe and Walker (1984). Glacial stages are marked by dashed squares.*



La partie centrale de la Mer du Nord enregistre la totalité des épisodes climatiques quaternaires et au fur et à mesure que l'on se déplace vers le Déroit du Pas-de-Calais, l'épaisseur des sédiments quaternaires diminue. Seuls les derniers stades y sont enregistrés (Cameron *et al.*, 1993). La vallée d'Oostende, à laquelle semblent appartenir les chenaux de U1, n'a été formée qu'à partir du Saalien (Mostaert et De Moor, 1989). De plus, des datations effectuées sur les premiers sédiments quaternaires de la plateforme belge ont montré qu'ils y sont peu épais et probablement d'âge holocène (Jelgersma *et al.*, 1979 ; Paepe et Baeteman, 1979) car sur l'ensemble de la plateforme belge, l'Eémien est remanié lors des dépôts holocènes.

Bien que l'on ait pas encore de datation précise, le processus de creusement des chenaux dans la zone du Middelkerke Bank responsable de la topographie de la limite Tertiaire / Quaternaire (Fig. III-9) pourrait être d'âge weichselien (70 000 - 10 000 BP) mais a pu être initié dès le Saalien (170 000 - 130 000 BP).

Le creusement des vallées de la plateforme belge sont essentiellement le résultat de processus fluviaux (Liu *et al.*, 1993). Leur remplissage peut être de natures diverses. Une transgression remobilise l'ensemble des sédiments marins présents sur la plateforme lors de la remontée de la mer. Il s'agit de l'effet "Bulldozer", décrit par Hageman (1969) au large de la Hollande, qui est responsable du mélange de sédiments d'âges et d'origines multiples. Ce phénomène est décrit en d'autres termes sur des bancs quaternaires actifs (Cameron *et al.*, 1989 ; Liu, 1990 ; Yang et Sun, 1988) ou sur des bancs dits "moribonds" (Bouysse *et al.*, 1976 ; British Geological Survey, 1991 ; Davis et Balson, 1992). La nature marine des coquilles n'exclut pas une origine fluviale du milieu de dépôt qui remobilise le sédiment disponible (Dalrymple, 1992 ; Mostaert *et al.*, 1989). Le caractère grossier de la base de l'unité U1 ne permet pas non plus de préciser l'environnement. Les premiers sédiments qui remplissent un chenal sont en effet le plus souvent grossiers dans les environnements tidaux (Reineck, 1963) ou non (Barclay et Krause, 1992). Le dernier stade de creusement étant sans doute weichselien, les premiers dépôts de l'unité U1 sont soit tardi-weichseliens comme ceux rencontrés au large de la Hollande également dans des chenaux (Cameron *et al.*, 1989 ; Kosters *et al.*, 1992) soit plus probablement holocènes. Des datations seront effectuées par le Service Géologique des Pays-Bas pour confirmer cet âge (Ad Stolk, comm. pers.).

1.2 - Conclusion

Les informations sismiques et lithologiques montrent que l'unité U1 correspond à une phase de remplissage de chenaux, probablement d'âge holocène. La phase érosive serait d'âge weichselien même si un début de creusement antérieur, d'âge Saalien, n'est pas à exclure. Des datations sont indispensables pour s'en assurer.

2 - Unité U2

2.1 - Discussion

L'unité U2 possède une forme externe voisine de celle de U1 qui correspond à une forme de remplissage de chenaux. Les sédiments qui y sont rencontrés sont cependant plus fins. Il s'agit d'alternances de lits sableux et argileux avec divers types de litages et une diminution globale de la teneur en argile vers le haut.

Comme pour U1, l'âge du creusement est weichselien mais, puisque U2 est plus récent que U1, se prolonge peut-être à l'Holocène.

Les faciès mixtes sable / argile sont observés dans les sédiments actuels de nombreux estuaires influencés par des courants de marée : estuaires de l'Escaut et de la Meuse (Beek et Van Kesters, 1972), mud-flats de la Mer des Wadden (Reineck, 1972), estuaire de la Baie du Mont St Michel (Tessier, 1990). Ils caractérisent des dépôts effectués en bordure de chenaux, dans des zones en comblement. Les litages obliques constitués alternativement de feuillets argileux et de feuillets sableux sont fréquemment observés dans les chenaux tidaux. Ils y représentent le témoignage de la migration d'une grande dune sous l'influence de courants de marée alternativement faibles et forts (Reineck et Singh, 1980 ; Van den Berg, 1980). Ce type d'environnement correspond au milieu de dépôt du sommet de l'unité U2. L'évolution verticale de U2 indique une augmentation progressive de l'énergie. Il peut s'agir d'un déplacement latéral depuis des dépôts de haut d'estuaire à des dépôts situés plus en aval.

2.2 - Conclusion

L'unité U2 caractérise une séquence de remplissage de chenaux estuariens sous influence tidale marquée. Comme dans le cas de l'unité U1, l'estuaire correspondant pourrait être celui de la Vallée d'Oostende qui draine une grande partie de la plaine côtière flamande.

3 - Unité U3

3.1 - Discussion

Les grands traits de l'unité U3 sont : une forme externe en intercalation sableuse, peu épaisse avec un arrondi concave vers le haut, et un sédiment bien trié sans argile à la base suivi, au sommet, de niveaux grossiers.

Les auteurs ayant travaillé dans le Sud de la Mer du Nord et en particulier au large de la Hollande intercalent entre la phase de remplissage des chenaux et la mise en place des bancs sableux un épisode de tourbe "basal peat" suivi par des sédiments "tidaux" de lagon (Cameron *et al.*, 1989 ; Kesters *et al.*, 1992) rattachés par Jelgersma (1979) à la Formation diachrone des Dépôts d'Elbow (Oele, 1969). Une des caractéristiques des sédiments de cette formation est sa couleur grise.

Dans l'unité U3, l'absence d'argile et le bon tri du sédiment traduisent l'existence de courants suffisamment continus, non alternatifs et dont l'énergie diminue vers le haut avec la granularité. Sur les profils sismiques, l'unité U3 apparaît comme la dernière d'une série de corps sédimentaires comblant une dépression allongée EW (Fig. III-23), et possède des réflecteurs internes obliques plans au pendage faible vers le large.

L'équivalence latérale avec la Formation de Dépôts d'Elbow ne peut être vérifiée. En effet, aucun niveau de tourbe n'est observé dans U3 ni d'ailleurs sur toute la zone d'étude. De plus la couleur grise ainsi que les caractères tidaux ne sont pas reconnus. Il pourrait également s'agir d'un delta de marée à l'embouchure de l'estuaire réceptacle des vallées flamandes ou à un dépôt de plage au voisinage de l'embouchure. Les particules argileuses ne peuvent s'y déposer et les processus dynamiques y sont suffisamment forts et constants pour conduire à un bon tri du sédiment. La diminution progressive de la granularité correspond à un approfondissement continu du milieu de dépôt.

Le sommet de U3 constitué de niveaux grossiers marque un épisode ravinant, fréquemment observé au sommet de dépôts de plage en contexte transgressif aussi bien dans les dépôts anciens que modernes (Dalrymple, 1992).

3.2 - Conclusion

Le milieu de dépôt de U3 correspond vraisemblablement au passage d'un milieu estuarien à un milieu marin franc par l'intermédiaire de faciès bien triés qui peuvent correspondre à une plage. Les niveaux très grossiers à son sommet sont des surfaces de ravinement peut-être liées à des tempêtes qui tronquent les dépôts côtiers.

4 - Unité U4

4.1 - Discussion

L'unité U4 est l'unité sismique la plus épaisse et la plus étendue. Elle présente de grands réflecteurs obliques orientés vers le NW. L'étude lithologique des carottes a permis de diviser U4 en trois associations distinctes de faciès alternant de manière irrégulière. La couleur dominante de ces trois associations est le gris. L'association A, riche en argile et en litages obliques plans alternés comporte des coquilles de petits gastéropodes et de bivalves (*Ostrea sp.*, *Mytilus sp.*). L'association B comporte des sédiments plus grossiers avec des galets d'argile et des bivalves parmi lesquels *Ostrea sp.*, *Mytilus sp.* et *Pecten sp.* L'association C correspond à des épisodes de creusement et de remplissage de chenaux soulignés par des dépôts à la fois très grossiers (graviers) et très fins (argile).

Bien qu'appartenant à la même unité sismique, ces trois associations ont des caractères très différents les une des autres mais leur imbrication complexe conduit à leur associer des environnements voisins.

Les litages en chevrons "herringbones" de l'association A sont attribués à des courants alternatifs tels que les courants de marée, car les lits sont plans et non arqués comme dans le litage oblique arqué produit par les rides de vagues par exemple. Ils constituent un critère possible de milieu à influence tidale (Klein, 1971 ; Tankard et

Hobday, 1977). La présence d'une épaisseur d'argile plus ou moins silteuse supérieure à 1,5 m à l'extrémité septentrionale de la zone d'étude (profil N°20) traduit un milieu plutôt abrité dans lequel les particules fines ont la possibilité de décanter. Les espèces de mollusques sont différentes de celles observées sur les bancs sableux actuels (Wilson, 1982) et traduisent un milieu proximal de faible profondeur comme par exemple la Mer des Wadden (Reineck et Singh, 1980). Cependant, le caractère souvent sableux des sédiments est le signe d'un milieu plus ouvert que celui de la Mer des Wadden. Le type de litage, la nature des coquilles ainsi que la grande diversité des sédiments observés dans l'association A, constituent un ensemble de critères suggérant une zone protégée, peut-être située en arrière d'une barrière et soumise à l'alternance irrégulière de conditions tidales plus ouvertes et plus abritées (Reineck et Singh, 1980 ; Terwindt, 1988).

Les caractères de l'association B, tant sur les carottes que sur les profils sismiques, traduisent une énergie de dépôt plus forte que pour l'association A, et une progradation générale vers le NW. La nature de cette association paraît liée à celle de A, car les dépôts sont fréquemment intercalés les uns dans les autres et les sédiments de B contiennent des galets d'argile et des passées de sédiments plus fins de même type que ceux rencontrés dans l'association A. L'association B pourrait correspondre à une barrière sableuse protégeant une zone dans laquelle se déposeraient les sédiments de l'association A. Aucun critère tidal n'est clairement identifié dans cette unité.

L'association C se développe dans des formes en remplissage de chenaux. Elle recoupe à l'emporte-pièce les sédiments des deux autres associations. Elle est donc également liée à ces environnements.

Si l'on regroupe les conclusions concernant les trois associations de faciès de U4, cette unité semble être le témoin d'un système de barre sableuse et de zone protégée dont les positions bougent au cours du temps comme le montrent les imbrications. La nature de la barre et son âge sont difficiles à envisager en l'absence de datations fournies par des analyses radiométriques ou des études de pollens, diatomées, foraminifères ou ostracodes. Des analyses radiométriques au Tendétron (Duplessy et Arnold, 1985) sont actuellement en cours sur les coquilles les mieux conservées (Maurice Arnold, Comm. Pers.).

Jelgersma, *et al.* (1979) ainsi que Oele et Schuttenhelm (1979) décrivent l'existence de barrières côtières à partir de 7500 BP au Sud de la Mer du Nord mais ils ne précisent pas le type de barre dont il s'agit. Les indications qu'ils donnent permettent de proposer un système de barres attenantes à la côte du type décrit par Swift (1975), ou un système de barres côtières immergées ou non à proximité de la côte. Les îles de la Frise occidentale pourraient en être les équivalents actuels. Dans le cas du Middelkerke Bank, la proximité apparente de la barrière par rapport à la côte et le développement important des faciès dominés par la marée permettent de privilégier la première hypothèse.

La partie inférieure des dépôts quaternaires du Sud de la Mer du Nord, gris, sont associés par Jelgersma (1979) aux dépôts de Calais (8 000 - 3 700 BP ; cf. Brand *et al.*, 1965 ; Zagwijn et Van Staalduinen, 1975). Ces dépôts en Mer du Nord se sont mis en place dans des environnements de "tidal-flats". Jelgersma *et al.* (1979) soulignent à cette occasion l'âge de plus en plus ancien des dépôts "tidaux" vers le centre de la Mer du Nord et associent ces sédiments à une série diachrone : les Dépôts d'Elbow (8 000 - 5 000 BP ; cf. Oele, 1969).

L'ensemble des références citées ci-dessus montre qu'entre 7 500 et 2 700 BP une partie de plus en plus proche de la côte actuelle est constituée d'un ensemble barrières côtières / "tidal-flats" qui pourrait correspondre à l'ensemble association B / association A.

4.2 - Conclusion

La distance entre les profils et l'intercalation des deux grandes associations de faciès rendent difficile une véritable reconstitution tridimensionnelle de l'unité U4. L'étude lithologique ne reposant que sur quatre profils, il est probable que les milieux de sédimentation définis par les associations A, B et C sont répartis de façon relativement complexe au sein de U4. Ces réserves étant faites, l'unité U4 paraît être constituée d'un système de barres littorales attenantes au rivage ainsi que d'arrière-barres ou "tidal-flats" principalement influencés par des processus tidaux. Les caractères de l'unité U4 permettent de l'associer aux Dépôts d'Elbow (8 000 - 5 000 BP). Les profils sismiques indiquent une progradation dominante en direction du Nord ou du NNW. La zone sud de l'unité est donc plus ancienne que la partie nord. Cette zone sud comprend une part plus importante de faciès de l'association A tandis qu'au Nord l'association B domine. Cette évolution suggère qu'au cours du temps se sont produites conjointement une diminution en superficie de la zone d'arrière-barrière et une augmentation de la taille de la barre.

5 - Unité U5

Cette unité qui occupe une surface limitée possède une forme externe en lentille peu épaisse. Elle n'est traversée que par deux carottages ce qui ne permet pas de la caractériser précisément. Le sédiment qui la compose est semblable à celui trouvé actuellement dans les sédiments superficiels prélevés dans les chenaux interbanco. Au vu de sa taille, U5 pourrait être une sous-unité de U4. Il peut également s'agir de la trace d'un chenal interbanco ultérieur à la submersion de U4.

6 - Unité U6

6.1 - Discussion

Le passage entre les unités inférieures et U6 marque un changement important dans le mode de mise en place des corps sédimentaires. On passe d'une série progradante à une unité transgressive qui est le signe d'une diminution relative des apports continentaux par rapport à l'élévation du niveau marin ou d'une accélération de l'élévation du niveau marin par rapport à ces apports. La caractéristique principale de cette unité consiste en une abondance de réflecteurs internes obliques orientés vers le SE (actuellement la côte), avec des pentes fortes. Le sédiment qui la compose est un sable moyen à couleur dominante grise pauvre en coquilles qui sont concentrées dans des niveaux obliques de quelques centimètres d'épaisseur.

Trois types de corps sédimentaires correspondant à des environnements différents peuvent présenter de telles caractéristiques : 1) Les barres connectées ou non à la côte et dominées par les houles (storm-generated ridges ; Swift, 1975) ; 2) Un système de deltas de flot associé à une barrière en contexte d'embouchure d'estuaire (Washover fan ; Reinson, 1992) ; 3) les bancs côtiers du type de ceux observés au large de Dunkerque (Vicaire, 1991). Ces trois possibilités sont représentées sur la figure III-48.

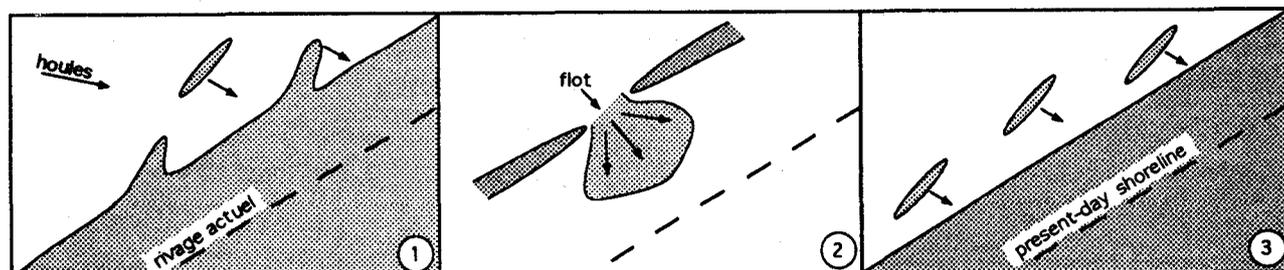


Figure III-48 - Trois environnements possibles possédant les caractéristiques principales de l'unité U6.
- Three possible environments with the main characteristics of the unit U6.

1) Les "storm generated ridges" présentent des stratifications obliques orientés vers la plage avec des angles de 2° au maximum et plus ou moins obliques par rapport au trait de côte (Durand *et al.*, 1990). Cette direction correspond à la direction de l'étalement du sédiment par les houles de tempête (Long et Drapeau, 1983). Selon de nombreux auteurs, ces barres ont le plus de chance d'être préservées en contexte transgressif (Ramli, 1986 ; Rothrock, 1972).

Trois arguments nous suggèrent d'éliminer cette hypothèse. 1) Les angles des réflecteurs internes du Middelkerke Bank possèdent des valeurs bien supérieures à celles observées dans les barres de houle (6° au lieu de 2° dans les barres de houle). 2) Le sédiment est un sable moyen gris possédant de fréquentes intercalations d'argile ou de silt. Ces sédiments fins sont quasiment absents des barres dominées par les tempêtes. 3) Les travaux de Durand *et al.* (1990) montrent que la structure interne de ces bancs est complexe. Elles sont divisées en de nombreuses sous-unités dont les directions des discontinuités sont variables, ce qui n'est pas le cas ici.

2) Les systèmes de delta de flot présentent également des discontinuités préférentiellement orientées vers la côte. Un delta de flot étant constitué de lobes superposés, les directions des discontinuités sont généralement dispersées (Reinson, 1992). Ces corps sédimentaires sont des édifices pouvant posséder un volume important, à la fois en superficie (Hayes, 1979) et en épaisseur (Kraft *et al.*, 1979). Ils sont obligatoirement associés à un système de barres sableuses (Walker et Plint, 1992) interrompues par des passes.

Comme pour les dépôts de deltas de flot, U6 occupe un volume important et possède des discontinuités orientées vers la côte. Mais sur le Middelkerke Bank, les réflecteurs ont une orientation très constante. De plus, si l'on considère que l'unité U4 pourrait constituer un équivalent latéral du système de barres sableuses, la position géométrique de U6 au-dessus de U4 implique une érosion intense des dépôts de U4, ou un déplacement très

important vers le large de U4 qui aurait été détruite par la suite. Cette hypothèse repose sur de nombreuses suppositions mais n'est peut-être pas à négliger totalement.

3) Les bancs côtiers tels que ceux de Dunkerque progradent vers la côte à des vitesses comprises entre 3 et 33 mètres par an (Garlan, 1990) et peuvent être annexés à la plage (Corbau *et al.*, 1993). Ces bancs sont typiquement asymétriques et présentent un flanc plus abrupt en direction de la côte avec des angles atteignant 6°. Une progradation vers la côte de ces appareils sédimentaires est susceptible d'engendrer des discontinuités obliques soulignées par des niveaux plus grossiers, coquilliers, dont le pendage serait voisin de 6° vers la côte. Néanmoins, aucune étude sismique n'a révélé de tels réflecteurs sur les bancs de Dunkerque. Les carottes qui y ont été prélevées présentent un sédiment plutôt mal classé, organisé en séquences granodécroissantes dans une tendance générale granocroissante.

Les réflecteurs internes de U6 correspondent vraisemblablement aux lits coquilliers observés sur les carottes. Ces lits plus grossiers sont des surfaces de réactivation de petites et moyennes dunes présentes sur les flancs des bancs, ou sont le reflet de périodes de tempêtes qui vannent le sable et produisent un sédiment plus grossier. Des exemples de ce litage ont été observés à Surtainville, au large du Cotentin (Berné, 1991) ou dans la Minette jurassique du Luxembourg (Teysse, 1984). L'unité U6 possède un sable moyen, comme le sédiment des bancs côtiers (Vicaire, 1991). Les caractéristiques morphologiques et lithologiques de U6 semblent très proches de celles des bancs côtiers. L'hypothèse 3 est donc celle qui paraît la plus vraisemblable.

6.2 - Conclusion

Le modèle le plus proche des données acquises sur le banc correspond à celui d'une barre côtière non rattachée à la côte du type de celles observées au large de Dunkerque (Vicaire, 1991) ou des bancs côtiers belges (De Maeyer *et al.*, 1983). En effet, les pendages des réflecteurs internes ont un angle élevé du même ordre de grandeur que la pente du flanc raide de ces bancs et le sédiment est organisé en séquences granodécroissantes dans une tendance générale granocroissante. Les différences concernent la taille du sédiment, plus fin sur le Middelkerke Bank et le doute concernant les réflecteurs internes des bancs côtiers. L'hypothèse de la résultante sédimentaire d'un delta de flot de grande taille n'est pas à exclure totalement.

7 - Unité U7

7.1 - Discussion

L'unité U7 est caractérisée par une forme externe de banc sableux et la présence de nombreux réflecteurs internes dont le pendage s'élève à 5° vers le NW. Le sédiment qui compose cette unité est un sable coquillier, fin à grossier, possédant parfois des graviers de petite taille (environ 5 mm). La couleur du sable présente une teinte beige dominante. L'assemblage faunistique déduit de la nature des coquilles indique une faune identique ou voisine de celle observée dans les sédiments superficiels.

Les données bibliographiques sur les bancs sableux "tidaux" indiquent que ceux-ci sont caractérisés par la présence de réflecteurs internes obliques, parallèles au flanc le plus déclive du banc. Depuis Houbolt (1968) sur les Well Banks en Mer du Nord, différents auteurs signalent ce type de réflecteurs observés sur des profils sismiques : Lapiere (1975) sur la Bassure de Baas en Manche orientale, Stride (1982) à partir d'exemples répartis autour des îles britanniques, Maréchal et Henriot (1983) sur la plateforme continentale belge, Twichell (1983) sur le George Bank, au large de la côte est des Etats-Unis, Torres (1986) sur le Banc de Serk, dans les îles anglo-normandes, Stride (1989) au Sud de la Mer du Nord, Harris *et al.* (1992) dans la baie de Moreton en Australie, Walker (1985) avec des exemples pris dans les séries anciennes, et d'autres auteurs ayant travaillé dans des environnements dominés par les courants de marée. Dans tous ces exemples, la granularité du sédiment est variable. Elle est une fonction directe des conditions actuelles de sédimentation.

L'unité U7 semble donc constituer un exemple typique de banc "tidal". Cependant, l'observation de U7 met en évidence la présence de discontinuités horizontales pouvant séparer l'unité en deux sous-unités. De plus, selon la zone considérée sur le banc, l'évolution verticale du sédiment traduit des vitesses différentes de croissance du banc. A l'extrémité sud, U7 est marquée par une décroissance de l'énergie du milieu. En surface, les sédiments sont des sables fins, tandis que les niveaux inférieurs renferment un sable moyen à grossier. Le reste du banc montre une croissance verticale de la granularité qui s'accompagne d'une diminution des teneurs en particules argileuses et en débris d'échinodermes compensée par une augmentation des graviers et des coquilles de bivalves. Ces changements indiquent que le Sud se caractérise par un déficit sédimentaire tandis que la majeure partie du banc s'accroît verticalement.

Les directions des réflecteurs internes traduisent une migration de l'unité vers le NW sur la quasi totalité du banc, à l'exception des deux extrémités. Le Sud est en aggradation comme le montrent les réflecteurs horizontaux en "onlap" (cf. Fig. III-1). L'extrémité nord prograde vers le NE sous l'effet de la migration de grandes dunes (cf. rubrique A-5.2)

7.2 - Conclusion

L'unité U7 constitue un exemple de ce qui est communément appelé un "banc tidal" du large. Il faut cependant signaler que son évolution est significativement plus complexe que ne l'avaient montré les études antérieures. Globalement, le banc s'accroît en hauteur sur la majeure partie de sa longueur, ce qui peut refléter une sédimentation plus rapide que la remontée du niveau marin. A l'extrémité sud, la tendance est inverse. Le banc prograde vers le NW sauf à l'extrémité nord où il s'allonge vers le NE. La résultante des courants de marée semble donc induire un déplacement des sédiments et un accroissement du banc vers le NE. Les grands réflecteurs horizontaux intra-U7 indiquent des phases d'érosions intenses peut-être dues à des tempêtes exceptionnelles lors du dépôt de U7.

8 - Tentative de datation - Conclusion

8.1 - Utilisation de la courbe de remontée du niveau marin

L'évolution du niveau marin aux Pays-Bas est sans doute la mieux connue au monde. La plupart des études réalisées dans ce pays montre des résultats identiques (Pirazzoli, 1991). La courbe de Jelgersma (1979) établie à partir de la datation de niveaux de tourbe concerne particulièrement le Sud de ce pays et se trouve donc très proche de celle de la Belgique. Si l'interprétation en termes d'environnements faite pour chacune des unités sismiques est valable, il doit être possible de dater approximativement chacune des unités. La démarche suivie est différente de celle couramment utilisée et basées sur des datations radiométriques ou de pollens, de foraminifères ou d'ostracodes. Il s'agit d'une tentative nouvelle de datation indirecte.

En partant du postulat que tous les dépôts sont holocènes et que la courbe de remontée du niveau marin est strictement croissante pour toute cette période (Fig. I-8), le raisonnement suivant a été utilisé :

Soit P la profondeur actuelle d'une unité donnée par l'interprétation des profils sismiques, et X la profondeur initiale de dépôt de cette unité déduite de l'étude lithologique. Il est possible de proposer une position approximative H du zéro hydrographique lors du dépôt de l'unité (Fig. III-49a). Cette profondeur replacée sur la courbe permet directement d'avoir l'âge de l'unité (Fig. III-50).

Une unité sismique U_n est comprise entre un réflecteur $U_n.b$ et une ou plusieurs unités postérieures U_{n+1} , U_{n+2} ... La profondeur P actuelle de l'unité varie donc de façon importante. Si la base $U_n.b$ des unités correspond effectivement au début de mise en place des unités, les limites des unités sont clairement des surfaces d'érosion. Il est donc illusoire de vouloir dater la fin de mise en place des unités. Ce caractère diachrone du sommet des unités est illustré par exemple par le fait que les unités U5, U6 et U7 peuvent toutes être directement superposées à U4 (Fig. III-19). En conséquence, les datations ne sont effectuées que sur la base de chaque unité.

Lors de l'utilisation de cette technique, quatre facteurs peuvent compliquer les calculs :

- Les bases des unités ne sont pas des surfaces horizontales mais sont plus ou moins accidentées (Fig. III-12a à III-18a). La profondeur P de la base est donc comprise entre la profondeur la plus basse P_b et la plus haute P_h (Fig. III-49b).

- L'estimation de la profondeur du milieu de dépôt est approximative et peut être compliquée par un éventuel marnage. Elle conduit à donner une estimation basse (X_{min}) et une estimation haute (X_{max}) du milieu de dépôt qui additionne les deux types d'incertitudes. X_{min} et X_{max} sont des valeurs négatives pour un dépôt sous le niveau marin et positives pour un dépôt au-dessus du niveau marin.

- Enfin, l'analyse des faciès sismiques ou lithologiques montre d'importantes variations latérales et verticales. Les valeurs obtenues doivent être donc considérées comme indicatives.

La combinaison de P_b avec X_{min} et X_{max} donne un intervalle bas de début de mise en place de l'unité sismique (Fig. III-19). De même, la combinaison de P_h avec X_{min} et X_{max} donne un intervalle haut de début de mise en place de l'unité. Si l'on considère que le milieu de sédimentation est le même pour tout point de la base de l'unité, le début de mise en place de celle-ci appartient à l'intersection entre les deux intervalles précédemment définis. Cette intersection correspond à une profondeur comprise entre H_{min} et H_{max} .

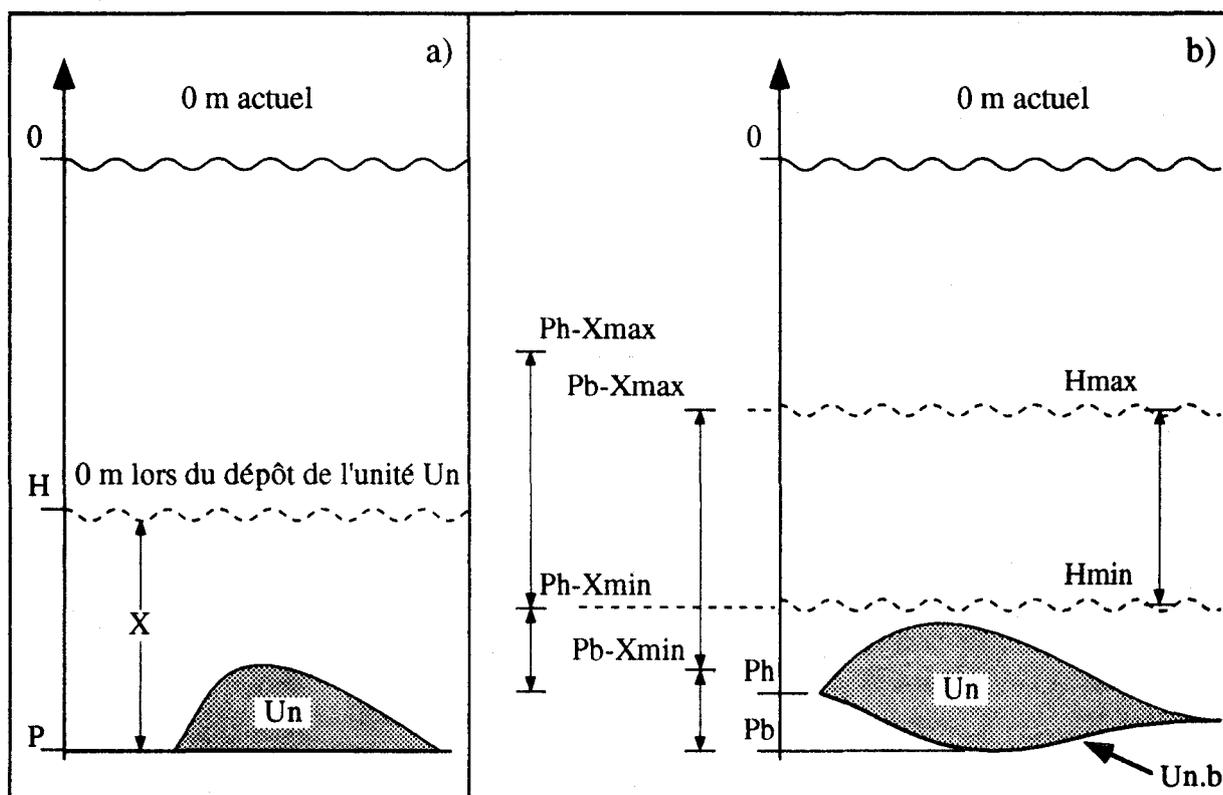


Figure III-49 - a) Mode de calcul permettant d'estimer la position du zéro hydrographique H lors du dépôt d'une unité sismique par rapport au niveau actuel de la mer. P : Profondeur actuelle de l'unité sismique ; X : Profondeur initiale du dépôt de l'unité.
 - b) Même calcul quand la profondeur actuelle de la base d'une unité U_n : $U_n.b$ est comprise entre une valeur basse P_b et une valeur haute P_h . La profondeur estimée du dépôt est comprise entre X_{min} et X_{max} . La profondeur de début de mise en place de l'unité par rapport au niveau marin actuel est comprise entre H_{min} et H_{max} .
 - a) Method to calculate H : the height of the sea-level during the deposit of a seismic unit compared to the present-day sea-level. P : Present-day depth of the seismic unit ; X : Initial depth of the deposit.
 - b) Same calculation for a base unit depth comprised between P_b : depth of the lower point of the base and P_h : depth of the upper point of the base. The initial deposit depth is estimated between X_{min} and X_{max} . The setting beginning depth regard to present-day sea level is comprised between H_{min} and H_{max} .

Les profondeurs H_{min} et H_{max} reportées sur la courbe de remontée du niveau marin permettent d'associer respectivement un âge minimal T_{min} et maximal T_{max} au début du dépôt de l'unité (Fig. III-50). Les résultats des calculs H_{min} , H_{max} , T_{min} et T_{max} sont donnés dans le tableau III-2. Dans ce tableau, toutes les valeurs sont

référéncées par rapport au niveau moyen de la mer (MSL). Les données de l'interprétation sismique qui se réfèrent au niveau des plus basses mers ont donc été rehaussées de la moitié du marnage, soit une hauteur de 2 mètres.

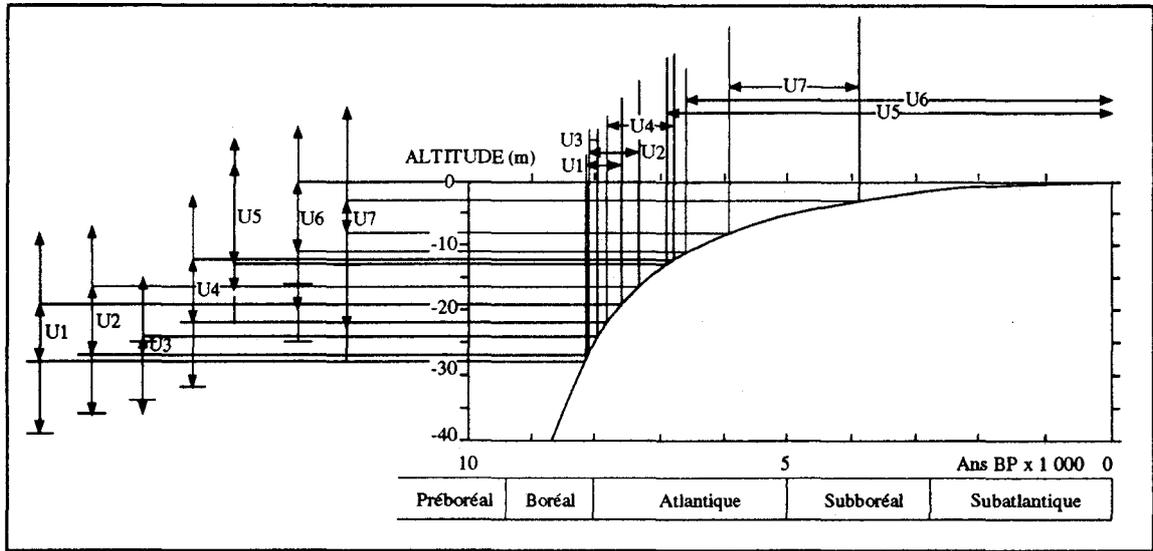


Figure III-50 - Profondeurs calculées de chaque unité sismique et âge correspondant.
- For each unit, calculated depth and corresponding age.

Unité	Profondeur de la base		Milieu	Prof. du milieu		Prof. du zéro		Age	
	Pb	Ph		Xmin	Xmax	Hmin	Hmax	Tmin	Tmax
U7	28	13	banc tidal	-25	-5	-8	-3	6 000	3 900
U6	25	16	banc côtier	-25	-5	-11	0	6 600	0
U5	22	18	? interbanks ?	-25	-5	-13	0	6 900	0
U4	32	22	barre / lagune	-20	0	-22	-12	7 800	6 700
U3	34	25	plage	-10	+2	-27	-24	8 100	7 900
U2	36	27	estuaire	-20	0	-27	-24	8 100	7 300
U1	39	28	estuaire	-20	0	-28	-24	8 200	7 600

Tableau III-2 - Ages BP du début de mise en place des différentes unités sismiques calculés à partir des données actuelles de profondeur et de milieu. Profondeurs par rapport au niveau moyen de la mer.
- Ages BP of the setting beginning for the different seismic units calculated from present-day data of depth and environment. Depths related to the mean sea level.

L'âge le plus tardif (Tmax) du début de mise en place de l'unité U3 peut être estimé à 7 900 BP, c'est-à-dire avant les Tmax de U1 et de U2 : 7 600 et 7 300 BP. L'unité U3 se met en place après les unités U1 et U2 ce qui permet de restreindre l'intervalle possible de début de mise en place de ces deux unités. Des combinaisons du même type sont effectuées pour les unités U4 à U7 ce qui permet également de restreindre l'intervalle possible (Tab. III-3).

Unité	Début de mise en place	Période correspondante
U7	6 000 - 3 900	Atlantique - Subboréal
U6	6 600 - 3 900	Atlantique - Subboréal
U5	6 900 - 3 900	Atlantique - Subboréal
U4	7 800 - 6 700	Atlantique
U3	8 100 - 7 900	Boréal - Atlantique
U2	8 100 - 7 900	Boréal - Atlantique
U1	8 200 - 7 900	Tardi Boréal

Tableau III-3 - Ages BP du début de mise en place des unités sismiques.
 - Ages BP of the setting beginning for the different seismic units.

Les valeurs obtenues sur le tableau, même si elles doivent être prises avec les précautions citées, permettent de proposer un âge relativement précis pour les dépôts quaternaires de la zone d'étude. Étant donnée la profondeur de la base du Quaternaire, il semble probable qu'aucun sédiment d'âge Weichselien ou Préboréal ne soit préservé. Les dépôts de U1 sont d'âge Tardi boréal. Ceci pourrait être vérifié par l'étude des pollens ou des spores car cet âge est caractérisé par un climat froid. Les dépôts de U2 ont également un âge tardi boréal mais peuvent appartenir à l'Atlantique. Les premiers dépôts strictement atlantiques correspondent à ceux de l'unité U4.

Lors de la discussion à la rubrique D-4 de ce chapitre, il a été proposé de rattacher l'unité U4 aux Dépôts d'Elbow (8 000 - 5 000 BP) qui rassemblent des faciès "tidaux" non synchrones en Mer du Nord, ou à la Formation de Calais (8 000 - 3 700 BP). L'interprétation du tableau III-3 suggère un âge compris entre 7 800 et 6 700 BP. Les deux résultats sont compatibles et permettent effectivement d'envisager un âge Atlantique correspondant aux Dépôts d'Elbow ou à la Formation de Calais pour l'unité U4.

La nature de l'unité U5 est connue avec trop peu de précision pour que l'on puisse discuter l'âge estimé. Pour les deux unités U6 et U7 les plus superficielles, les milieux de sédimentation ne sont pas caractéristiques d'une profondeur très précise mais d'un ensemble de profondeurs s'étagant parfois sur dix mètres. Les résultats sont donc imprécis et ne renseignent pas sur l'âge de ces unités. Néanmoins, le fait qu'elles soient postérieures à U4 permet de leur attribuer un âge au plus tôt Atlantique ou Subboréal.

8.2 - Limites méthodologiques de la technique de datation utilisée

Lors de la phase rapide de remontée du niveau marin, les environnements se succèdent à un rythme accéléré. Ensuite, la vitesse de remontée étant plus lente, la précision devient plus faible. Les conditions d'utilisation de cette technique nécessitent de prendre un certain nombre de précautions :

- L'architecture du banc doit être connue finement grâce à un réseau dense de profils sismiques.

- Les environnements de dépôt doivent être connus grâce à un contrôle lithologique rendu possible par les vibrocarottages.

- Le cadre tectonique doit être stable et la courbe de variation du niveau marin connue avec précision.

- Dans le cas de notre étude, il faut s'assurer que toutes les unités sont d'âge Holocène.

Sur la zone du Middelkerke Bank, c'est le dernier point qui pose problème. Il est indispensable de disposer de datations des unités inférieures par des méthodes radiométriques (au TENDETRON, analyses en cours, Maurice Arnold, comm. pers.) ou par l'analyse des pollens, foraminifères ou diatomées.

8.3 - Conclusion

L'utilisation combinée des données de sismique et de carottage est le moyen le plus efficace pour connaître l'architecture d'un corps sédimentaire marin. Dans le cas d'un banc tidal tel que le Middelkerke Bank, les profils sismiques montrent qu'il est composé de plusieurs unités, chacune érodant une partie de celles qui lui sont antérieures. Les faciès sédimentaires observés sur les carottes sont variés et témoignent d'importants changements de milieu de sédimentation au cours de l'Holocène.

Sur le substratum tertiaire constitué d'argile yprésienne, un réseau fluvial entaille la surface et forme une série de chenaux. Ce creusement s'effectue lors d'un épisode de bas niveau marin correspondant au dernier stade glaciaire, le Weichselien (70 000 - 10 000 BP) même si ils ont pu être initiés au Saalien (170 000 - 130 000 BP). Les premiers dépôts préservés sont des sédiments estuariens, ils ont un âge Tardi-boréal (8 200 - 7 900 BP). Divers environnements se succèdent ensuite dans la zone du Middelkerke Bank (Fig. III-51) :

- Un système de delta d'embouchure à la sortie de l'estuaire de la Vallée flamande ou une plage probablement pendant la période Atlantique.

- Un ensemble de barres connectées au rivage et de lagunes à influence tidale drainées par des chenaux de marée. L'âge des dépôts de ces ensembles peut être estimé entre 7 800 et 6 700 BP ce qui correspond aux dépôts diachrones d'Elbow. Ils indiquent un âge Atlantique de la Formation de Calais (8 000 - 3 800 BP).

- Un environnement de bancs côtiers tels qu'ils existent aujourd'hui au large de Dunkerque ou un delta de flot.

- Un environnement de banc sableux "tidal" du large.

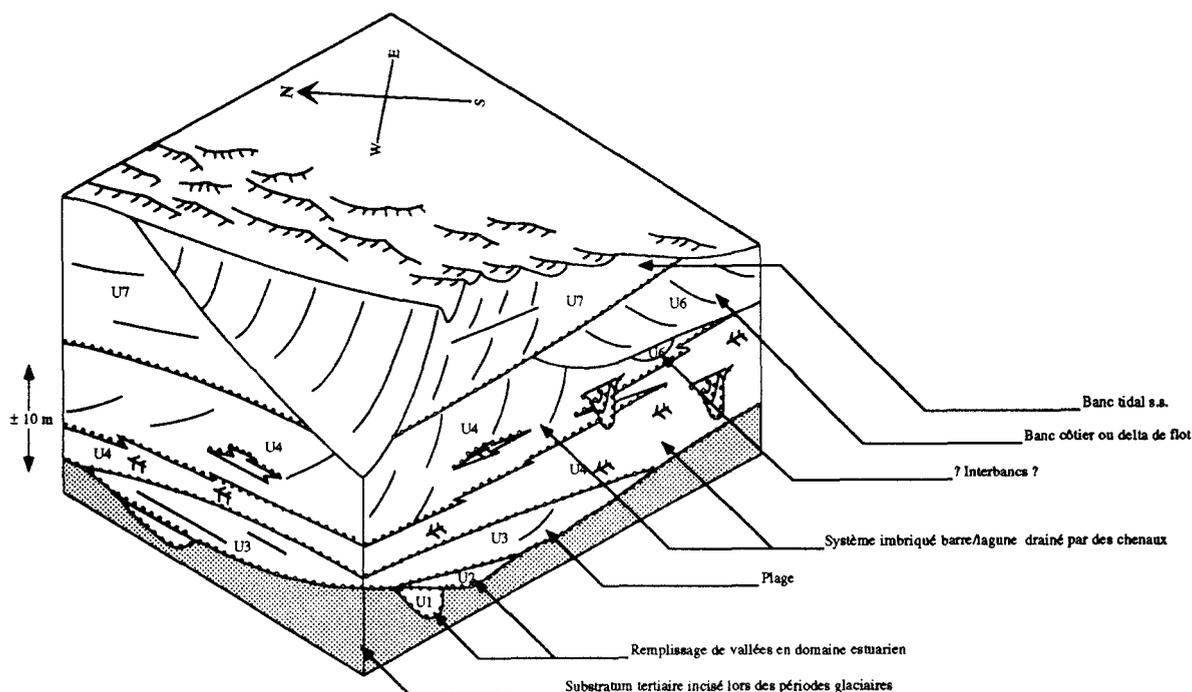


Figure III-51 - Succession verticale des environnements sédimentaires observés sur la zone du Middelkerke Bank.
 - Vertical succession of the sedimentary environments on the Middelkerke Bank area.

Les premiers dépôts quaternaires estuariens montrent une influence des courants de marée que l'on retrouve dans la majorité des unités qui composent le Middelkerke Bank. Le terme de "banc tidal" semble cependant exagéré car si les processus tidaux dominent, la zone d'étude ne constitue réellement un "banc tidal" uniquement dans la partie la plus superficielle. De plus, cette partie est marquée également par l'action de la houle et des tempêtes.

L'importance des niveaux érosifs témoigne d'une évolution qui présente régulièrement des états de déséquilibre. Ces états peuvent être dus à l'intérieur des unités à l'action de tempêtes et entre les unités à la migration des corps sédimentaires qui accompagne la transgression holocène.

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSION GÉNÉRALE

I - Objectifs et méthodes

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent l'étude multidisciplinaire d'un banc sableux situé au large des côtes de la Belgique. Il s'agit du Middelkerke Bank, qui fait partie du groupe des bancs de Flandre. C'est un corps sédimentaire allongé dans la direction NE-SW, de 15 km de longueur pour 3 à 5 km de largeur, constitué de sédiments quaternaires épais au maximum de 25 mètres et reposant sur un substratum argileux tertiaire. Le Middelkerke Bank est classé dans le groupe des bancs tidaux car sa forme actuelle semble principalement être due à l'action des courants de marée. Ces courants peuvent atteindre 1 m.s^{-1} lors des marées de vives-eaux et sont associés à un marnage supérieur à quatre mètres. La faible profondeur du banc, - 5 m à son sommet et - 20 m au creux des chenaux adjacents, entraîne un façonnement de sa surface par les courants de flot et de jusant respectivement orientés vers le NE et vers le SW. L'étude effectuée concerne essentiellement la dynamique sédimentaire actuelle et la structure interne du banc. Elle a été réalisée dans le cadre du projet RESECUSED financé par la Communauté Européenne au sein du programme MAST-1, et regroupant sept organismes belges, néerlandais, anglais et français.

Diverses questions se posent concernant ce type de corps sédimentaire :

- Le déplacement des figures sédimentaires identifiées à la surface des bancs est important mais n'est que rarement mesuré et chiffré. La mobilité des sédiments superficiels est quantifiable par des méthodes distinctes, donnant parfois des résultats contradictoires.

- La mise en place des grands corps sédimentaires du domaine subtidal côtier est soumise à controverse. L'évolution verticale est mal connue et les effets des variations du niveau marin ne sont pas appréhendables sans un contrôle architectural et lithologique des bancs.

- Le déplacement général des bancs sableux sur les plateformes continentales est difficile à évaluer. Il semble que leur position ne bouge que très lentement à l'échelle humaine, mais peu de données quantitatives existent.

Pour tenter de répondre à ces questions, le travail effectué s'articule autour des résultats obtenus à partir de deux grands groupes d'outils :

- 1) Des outils de prélèvement du sédiment superficiel (bennes) sont associés à des appareils permettant des analyses au laboratoire. Les résultats obtenus concernent la lithologie, la granulométrie et la minéralogie des échantillons. Ces outils sont complétés par les données du sonar à balayage latéral dont les images sont calibrées par les paramètres granulométriques. Elles permettent de connaître la distribution des principaux types sédimentaires, ainsi que les déplacements des particules et des figures sédimentaires à la surface du banc. Une méthode numérique d'évaluation du transit sédimentaire est également utilisée.

2) L'architecture interne est étudiée grâce aux outils de sismique haute résolution (sparker) et très haute résolution (sondeur de sédiment). L'étude est entreprise selon une grille suffisamment dense pour permettre une reconstitution tridimensionnelle des surfaces de discontinuités et des unités sismiques. De nombreux carottages apportent les données lithologiques indispensables à l'interprétation des données sismiques et à la reconstitution des paléoenvironnements.

II - Principaux apports

1 - Dynamique sédimentaire actuelle

L'analyse de la dynamique sédimentaire actuelle a été réalisée à partir de méthodes indirectes. Deux séries de 85 échantillons ont été prélevés sur l'ensemble du banc. Cet échantillonnage a été complété par 55 prélèvements plus denses localisés à la terminaison septentrionale du banc. Plus de 300 km ont été sondés au sonar à balayage latéral. Les résultats permettent de mettre en évidence quatre phénomènes :

- La distribution des paramètres granulométriques suit la forme du banc. Les sédiments les plus grossiers sont situés dans les parties hautes tandis que les plus fins sont observés dans les zones les plus profondes. La granularité d'un sédiment est liée à sa teneur en CaCO_3 et à son classement : un sédiment est d'autant plus riche en CaCO_3 et mal classé qu'il est grossier.

- Les résultats inattendus de la première campagne effectuée en Mai 1990 ont conduit à la réalisation d'une seconde campagne de prélèvement en Avril 1991. La comparaison entre la répartition des sédiments superficiels aux deux périodes et les conditions météorologiques ayant prévalu les jours précédant chacune des missions met en évidence les effets d'une période de tempête par rapport aux périodes soumises à des conditions plus banales et notamment aux courants de marée. La quantité de matériel remobilisé par les houles de tempête conduit à un profond changement dans la répartition des sédiments des zones exposées ou non aux houles marquées respectivement par un accroissement et une diminution de la valeur du grain moyen.

- L'extrémité nord du banc présente des dunes dont l'amplitude est la plus grande sur la zone d'étude. Elles peuvent atteindre cinq mètres de hauteur. Cette partie a été choisie afin de réaliser une mosaïque de sonar latéral en Mai 1991. Une seconde reconnaissance effectuée en Juillet 1992 montre un déplacement moyen des grandes dunes de 100 mètres vers l'Est. Cette valeur correspond à un mouvement de 86 mètres par an dans le sens du flanc raide des dunes. Elle exprime le caractère hautement dynamique de la terminaison du banc.

- L'ensemble des données de sonar à balayage latéral sur le banc confirme les observations faites sur d'autres bancs tidaux répartis en Mer du Nord ou sur les autres plateformes continentales. Il existe une nette opposition entre les deux flancs du banc exposés principalement aux composantes de flot et de jusant des courants de marée. Les

crêtes des dunes subissent une rotation vers la crête du banc. Cependant, il n'y a pas de rotation complète des sédiments autour du banc. Le système n'est pas clos. Il comporte des entrées de sédiment au SW et des sorties au NE de la zone d'étude. La composante rotationnelle des déplacements du sédiment se fait dans le sens horaire mais est donc incomplète.

- La méthode d'évaluation du transit résiduel de McLaren (1981) fondée sur les données granulométriques permet également d'observer une opposition entre les deux flancs du banc. Dans les zones où la répartition des paramètres granulométriques ne suit pas la forme générale du banc, les résultats de cette méthode comparés à ceux obtenus par les données du sonar à balayage latéral n'indiquent pas les mêmes directions de transit. Dans ce cas, l'interprétation de données morphologiques est considéré en priorité pour déduire le transit résiduel.

- L'évolution à long terme du banc n'est pas décelable par l'étude de la dynamique sédimentaire actuelle. Le schéma établi par Kenyon *et al.* (1981) prévoit un déplacement résiduel du banc vers le SW. L'absence de données quantitatives ne nous permet pas de le confirmer.

2 - Dynamique sédimentaire passée

L'analyse de la structure interne repose sur l'étude de 800 km de profils sismiques réflexion, associée à celle de 65 carottes d'une longueur moyenne de quatre mètres mais dont une mesure 13,55 m et atteint le substratum tertiaire.

L'architecture est caractérisée par l'empilement de sept unités sismiques dont les bases sont plus ou moins érosives sur les unités sous-jacentes. La lithologie dans l'espace est très variée. Elle confirme le découpage des unités sismiques, permet de les subdiviser en diverses sous-unités aux caractéristiques propres, et de leur attribuer un faciès sédimentaire ainsi qu'un milieu de dépôt. La combinaison de l'interprétation des paléoenvironnements avec la courbe de remontée du niveau marin holocène permet de proposer un âge pour les diverses unités.

Le substratum est composé d'argile yprésienne. Il est entaillé par un réseau de paléochenaux appartenant au système de la Vallée d'Oostende. Le creusement, peut-être initié au cours du stade glaciaire Saalien (170 000 - 130 000 BP), date essentiellement du stade glaciaire Weichselien (70 000 - 10 000 BP). L'âge du creusement implique un âge tardi-Weichselien ou Holocène de toutes les unités sismiques.

Il est possible de préciser cette estimation et de proposer un âge Boréal (8 600- 7 900 BP) pour les sédiments de l'unité sismique inférieure U1. Les dépôts correspondent vraisemblablement à un milieu estuarien et constituent le premier milieu de sédimentation identifié sur la zone du Middelkerke Bank. La seconde unité sismique U2 est, comme U1, une unité de remplissage de chenaux en milieu estuarien. Elle paraît dater de la limite entre la période Boréale et Atlantique (8 500 - 7 500 BP).

Le second milieu de sédimentation reconnu sur la zone du Middelkerke Bank est un milieu de plage ou de delta d'embouchure. Il correspond à l'unité U3. Son âge estimé est compris entre 8 100 et 7 300 BP. Il correspondrait à

un dépôt d'âge Atlantique.

Le troisième milieu de sédimentation identifié correspond à un système fabriqué de barres sableuses et de lagunes à influence tidale drainées par des chenaux de marée. Il correspond au dépôt de l'unité sismique U4. Cette unité est épaisse et le grand nombre de carottes qui la recourent permet de la caractériser lithologiquement avec précision. Les essais de datation effectués permettent de proposer un âge compris entre 7 800 et 5 000 BP, et de rapprocher cette unité à la Formation de Calais (7 000 - 3 7000 BP).

Les milieux de sédimentation succédant au système de barrière sont difficiles à définir en raison de la faible taille des unités sismiques ou de la rareté des informations lithologiques. L'unité sismique U5 qui n'occupe qu'une surface peu importante pourrait correspondre à un milieu d'inter-bancs. L'incertitude ne permet pas de proposer un âge au dépôt de cette unité.

L'unité U6 succédant l'unité progradante U4 est une unité transgressive. Elle possède les caractéristiques des bancs côtiers tels qu'ils existent actuellement au large de Dunkerque. Il est également envisageable d'attribuer à cette unité un milieu de delta de flot. Il n'est pas possible de trancher et de dater précisément cette unité.

Le dernier milieu clairement identifié caractérise un banc tidal principalement modelé par les courants de marée. Il correspond à l'unité sismique U7. Son évolution est significativement plus complexe que ne l'avaient montré les études antérieures sur différents bancs tidaux. De grands réflecteurs horizontaux indiquent une évolution entrecoupée de périodes érosives probablement dues à des tempêtes. La croissance verticale de U7 semble différente selon la localisation sur le banc.

3 - Bilan

L'étude du Middelkerke Bank montre qu'il est composé de diverses unités dont les environnements de dépôt se succèdent depuis un estuaire jusqu'à un banc sableux tidal. L'influence des marées semble importante dès le dépôt des premiers sédiments en milieu estuarien, à la limite entre le stade Boréal et Atlantique (8 500 - 7 500 BP). Cependant, le terme de "banc tidal" ne peut s'appliquer de manière homogène et unique à la caractérisation de ce corps sédimentaire. Les unités inférieures (U1 à U6) montrent une influence tidale dominante mais ne sont pas des bancs. La partie la plus superficielle du banc constitue un banc sableux "tidal" mais les agents qui la modèlent comprennent également des tempêtes.

La combinaison des données des sédiments superficiels et de la structure interne semble indiquer une croissance verticale maximale du banc dans la partie la plus haute et vers le Nord, tandis que le Sud semble être en déficit sédimentaire. Le transit résiduel global pourrait donc être orienté vers le NE ce qui conduirait à un allongement du banc dans cette direction.

III - Perspectives

L'étude effectuée apporte de nouveaux éléments à la connaissance des bancs sableux tidaux actuels. Il subsiste cependant diverses interrogations non résolues ou nouvelles.

- La résultante actuelle du mouvement du banc à l'échelle humaine n'est pas définitivement connue. Les systèmes récents de positionnement très précis pourraient apporter des éléments de réponse lors d'études chrono-séquentielles. La mise en oeuvre d'une approche de modélisation hydrosédimentaire couplée avec des données hydrologiques in-situ constituent également des perspectives importantes pour accroître notre connaissance sur les circulations sédimentaires.

- L'étude des profils sismiques montre que les unités sédimentaires ont une extension latérale qui se prolonge en direction des corps sédimentaires voisins. Vers le large, l'étude serait compliquée par la présence de chenaux profonds qui entaillent largement les sédiments quaternaires et en réduisent significativement l'épaisseur. Par contre, l'étude sismique montre une extension vers la côte des unités, en particulier sous l'Oostende Bank. Il serait donc important de prolonger l'étude dans cette direction afin notamment de relier précisément les données marines avec celles obtenues à terre, bien connues et datées.

- Les datations évoquées dans le présent travail ne sont qu'approximatives. Des datations radiochronologiques ou à partir de l'analyse de pollens, spores, ostracodes ou foraminifères permettraient de replacer les unités sismiques dans le contexte de la remontée holocène du niveau marin.

- Enfin, il importe d'étendre une approche similaire (multidisciplinaire et dense) à d'autres édifices sédimentaires quaternaires tels que ceux du système Manche-Mer du Nord pour progresser dans la compréhension du mécanisme de formation des grands bancs sableux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ashley, G.M., 1990.**
Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, **60** (1): 160-172.
- Auffret, J.P., Alduc, D., Larsonneur, C. & Smith, A.J., 1980.**
Cartographie du réseau des paléovallées et de l'épaisseur des formations superficielles meubles de la Manche orientale. *Annales de l'Institut Océanographique*, **56** (5): 21-35.
- Augris, C., Clabaut, P. & Vicaire, O., 1990.**
Le domaine marin du Nord-Pas de Calais. Nature, morphologie et mobilité des fonds. *Publ. IFREMER*, 96 pp.
- Augustin, J.M., 1985.**
Logiciel de traitement des images acoustiques des sonars latéraux. IFREMER, Rapport interne. DIT/DI/DLS.
- Baak, J.A., 1936.**
Regional petrology of the southern North Sea. *Veeman & zonen*, Wageningen, Netherlands.
- Baeteman, C., 1981.**
De Holocene ontwikkeling van de westelijke kustvlakte. Doctorat, Université libre de Bruxelles.
- Baeteman, C. & Maenhaut Van Lemberge, V., 1989.**
Uitdiep-Middelkerke Bank BH 29. Belgian Geological Survey, Technical internal report, 4 pp.
- Barclay, J.E., 1992.**
Valley-fill facies model based on worldwide examples and the importance of tidal deposits in the model. *in* Flemming, B.W. (Ed.), *Tidal clastics 92, Abstract volume*, Courier Forsch. -Inst. Senkenberg, Frankfurt a. M. : 6-7.
- Barclay, J.E. & Krause, F.F., 1992.**
Towards a descriptive facies model for incised valleys and valley-fills. Unpublished manuscript, 28 pp, 31 fig.
- Beck, C., Clabaut, P., Dewez, S., Vicaire, O., Chamley, H., Augris, C., Hoslin, R. & Caillot, A., 1991.**
Sand bodies and sand transport paths at the English Channel-North Sea border: morphology, hydrodynamics and radioactive tracing. *Oceanologica Acta*, Vol. sp. **11** : 111-121.
- Beek, J.L. & Van Kesters, E.A., 1972.**
Fluvial and estuarine sediments exposed along the Oude Mass (The Netherlands). *Sedimentology*, **19** : 237-256.
- Belderson, R.H., Johnson, M.A. & Kenyon, N.H., 1982.**
Bedforms. *in* Stride, A.H. (Ed.), *Offshore tidal sands, processes and deposits*, Chapman & Hall, London: 27-57.
- Belderson, R.H., Kenyon, N.H., Stride, A.H. & Stubbs, A.H., 1972.**
Sonographs of the sea floor. Elsevier, Amsterdam : 185 pp.
- Berné, S., 1991.**
Architecture et dynamique des dunes tidales. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 295 pp.
- Berné, S., Allen, G., Auffret, J.P., Chamley, H., Durand, J. & Weber, O., 1989.**
Essai de synthèse sur les dunes hydrauliques géantes tidales actuelles. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **6** : 1145-1160.

- Berné, S., Augustin, J.M., Braud, F., Chene, G. & Walker, P., 1986.**
Cartographie et interprétation de la dynamique sédimentaire des plates-formes continentales : amélioration de la technique d'observation par sonar latéral. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **82** (n° 3) : 437-446.
- Boillot, G., 1964.**
Géologie de la Manche occidentale : fonds rocheux, dépôts quaternaires, sédiments actuels. *Annales de l'Institut Océanographique*, **42** : 1-220.
- Bokuniewicz, H.J., Gordon, R.B. & Kastens, K.A., 1977.**
Form and migration of sand waves in a large estuary, Long Island Sound. *Marine Geology*, **24** : 185-199.
- Bouma, A.H., 1969.**
Methods for the study of sedimentary structures. John Wiley & Sons, New York : 457 pp.
- Bouysse, P., Horn, R., Lapiere, F. & LeLann, F., 1976.**
Etude des grands bancs de sable du Sud-Est de la Mer Celtique. *Marine Geology*, **20** : 251-275.
- Brand, G., Hageman, B.P., Jelgersma, S. & Sindowski, K.-H., 1965.**
Die lithostratigraphische Unterteilung des marinen Holozäns an der Nordseeküste. *Geologisches Jahrbuch*, **82** : 365-384.
- Braud, F., 1986.**
La dynamique sédimentaire à l'embouchure d'un estuaire. Intérêt du sonar latéral à l'étude de la passe Sud Gironde. Thèse de 3ème cycle, Université de Bordeaux 1, 278 pp.
- Briquet, A., 1930.**
Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique. Thèse Sci. Nat., Université d'Orléans, 439 pp.
- British Geological Survey, 1991.**
Swallow Hole. Quaternary geology, Sheet 55N00. 1:250.000 map series.
- Calatayud, P., 1981.**
Alluvionnement argileux dans deux bassins versants du Nord de la France. D.E.A., Lille I, 51 pp.
- Cameron, D., VanDoorn, D. & Streif, H.J., 1993.**
Geology of the Southern North Sea Basin. in Hillen, R. & Verhagen, H.J. (Ed.), *Coastlines of the Southern North Sea*, American Society of Civil Engineers, New-York : 14-26.
- Cameron, T.D.J., Schuttenhelm, R.T.E. & Laban, C., 1989.**
Middle and Upper Pleistocene and Holocene stratigraphy in the Southern Bight of the North Sea. in Henriet, J.P. & De Moor, G. (Ed.), *The Quaternary and Tertiary geology of the Southern Bight, North Sea*, Bruxelles : 119-137.
- Caston, V.N.D., 1972.**
Linear sand banks in the southern North Sea. *Sedimentology*, **18** : 63-78.
- Caston, V.N.D. & Stride, A.H., 1970.**
Tidal sand movement between some linear sand banks in the North Sea off northeast Norfolk. *Marine Geology*, **9** : 38-42.
- Chamley, H., 1989.**
Clay sedimentology. Springer Verlag, Berlin : 623 pp.
- Chesterman, W.D., Clynick, P.R. & Stride, A.H., 1958.**
An acoustic aid to sea bed survey. *Acustica*, **8** : 285-290.

- Clabaut, P., 1988.**
Dynamique sédimentaire dans le détroit du Pas-de-Calais. (Large des côtes françaises). Thèse de doctorat, Université de Lille I, 251 pp.
- Collinson, J.D. & Thompson, D.B., 1989.**
Sedimentary structures. Unwin Hyman, London : 207 pp.
- Corbau, C., Clabaut, P., Tessier, B. & Chamley, H., 1993.**
Modifications morphosédimentaires historiques et récentes du domaine côtier dunkerquois (France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris (II)*, 316 : 1573-1580.
- Dalrymple, R.W., 1992.**
Tidal Depositional Systems. in Walker, R.G. & James, P.N. (Ed.), *Facies Models, response to sea-level change* : 195-218.
- Dalrymple, R.W., Knight, R.J. & Lambiase, J.J., 1978.**
Bedforms and their hydraulic stability relationships in a tidal environment, Bay of Fundy, Canada. *Nature*, 275 : 100-104.
- Davis, R.A.J. & Balson, P.S., 1992.**
Stratigraphy of a North Sea tidal sand ridge. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62 (1): 116-121.
- De Batist, M., De Bruyne, H., Henriët, J.P. & Mostaert, F., 1989.**
Stratigraphic analysis of the Ypresian off the Belgian coast. in Henriët, J.P. & De Moor, G. (Ed.), *The Quaternary and Tertiary geology of the Southern Bight, North Sea*, Bruxelles : 75-88.
- De Maeyer, P.H. & Wartel, S., 1988.**
Relation between superficial sediment grainsize and morphological features of the Coastal Ridges off the Belgian coast. in De Boer, P.L., Van Gelder, A. & Nio, S.D. (Ed.), *Tide-influenced Sedimentary Environment and Facies*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht : 91-100.
- De Maeyer, P.H., Wartel, S. & De Moor, G., 1985.**
Internal structures of the Nieuwpoort bank (Southern North Sea). *Netherland Journal of Sea Research*, 19 (3): 15-18.
- De Moor, G., 1989.**
Maintenance on the Flemish banks. in Henriët, J.P. & De Moor, G. (Ed.), *The Quaternary and Tertiary geology of the Southern Bight, North Sea*, Bruxelles : 185-216.
- De Moor, G. & De Breuck, W., 1973.**
Sedimentologie en stratigrafie van enkele pleistocene afzettingen in de Belgische Kustvlakte. *Natuurwet. Tijdschr.*, 55 : 3-96.
- De Moor, G. & Lanckneus, J., 1988.**
Acoustic teledetection of sea-bottom structures in the Southern Bight. *Bulletin de la Société belge de Géologie*, 97 (2): 199-210.
- De Moor, G. & Lanckneus, J., 1991.**
RESECUSED, MAST project 0025C. State University of Gent, First annual report, 43 pp.
- De Moor, G., Lanckneus, J., Berné, S., Chamley, H., De Batist, M., Houthuys, R., Stolk, A., Terwindt, J., Trentesaux, A. & Vincent, C., 1993.**
Relationship between sea-floor currents and sediment mobility in the southern North Sea. in Barthel, K.-G., Bohle-Carbonnel, M., Fragakis, C. & Weydert, M. (Ed.), *MAST Days and Euromar market.*, EEC, Brussel : 192-207.
- Depret, M., 1983.**
Studie van de lithostratigrafie van het Kwartair en van het tertiaire substraat te Zeebrugge ouder meer met diepsonderingen. *Belgian Geologische Dienst, Professional paper*, 6 : 235.

- Devos, J., 1984.**
Hydrogéologie van het Duinengebied ten oosten van De Haan. Unpublished Ph.D thesis, State University of Gent.
- Dewez, S., 1985.**
Dynamique sédimentaire et rejets de dragage au large de Boulogne-sur-mer. DEA, Université de Lille 1, 51 pp.
- Dewez, S., 1988.**
Sédimentation et dynamique en Manche Orientale (De la baie d'Authie au Cap d'Alprech). thèse de doctorat, Université de Lille 1, 276 pp.
- Dienst Der Kust, 1985.**
Dienst Der Kust, Hydrografie. Vlaamse Banken, 1/100 000. Ministerie van Openbare Werken (Ed.).
- Duplessy, J.C. & Arnold, M., 1985**
La mesure du carbone 14 en spectrométrie de masse par accélérateur. Premières applications. in Roth, E. & Poty, B. (Ed.), *Méthodes de datation par les phénomènes nucléaires naturels. Applications*, Masson, Paris : 459-473.
- Durand, J., Champanhet, J.-M., Long, B. & Ross, N., 1990.**
Géométrie et diagnose de barres d'avant-côte : application en sédimentologie pétrolière. *Bulletin des Centres de Recherche, Exploration et Production de Elf Aquitaine*, 14 (1) : 197-212.
- Eisma, D., Jansen, J.H.F. & Vanweering, T.G.E., 1979.**
Sea-Floor morphology and recent sediment movement in the North Sea. in Oele, E., Schüttenhelm, R.T.E. & Wiggers, A.J. (Ed.), *The Quaternary History of the North Sea*, Acta Univ. Ups., Uppsala : 217-231.
- Fairbridge, R.W., 1961.**
Eustatic changes in sea level. in Ahrens, L.H., Press, F., Rankama, K. & Runkorn, S.K. (Ed.), *Physics and chemistry of the earth*, Pergamon, London : 99-185.
- Flemming, B.W., 1990.**
On the relationships between height, spacing and grain-size in subaqueous, flow-transverse bedforms. In *13 Th IAS Meeting*, Nottingham. Abstracts papers : 170.
- Folk, R.L. & Ward, W.C., 1957.**
Brazos River bar: a study in the significance of grain-size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27 : 3-26.
- Franken, A.F., 1987.**
Reconstructie van het paleo-getijklimaat in de Noordzee. Waterloopkundig Laboratorium, X 0029-00 : 74 pp. + app.
- Gao, S. & Collins, M., 1992.**
Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary Geology*, 80 : 47-60.
- Garlan, T., 1990.**
L'apport des levés bathymétriques pour la connaissance de la dynamique sédimentaire. L'exemple des "Ridens de la Rade" aux abords de Calais. In *1er Symp. Int. Ass. Eurocoast*, Marseille : 71-75.
- Gibbs, R.J., 1977.**
Clay mineral segregation in the marine environment. *Journal of Sedimentary Petrology*, 47 : 237-243.
- Gilson, G., 1900.**
Exploration de la mer sur les côtes de la Belgique. *Mémoires du Musée Royal d'Histoire Naturelle de Belgique*, 1 : 81.

- Hageman, B.P., 1969.**
Development of the western part of the Netherlands during the Holocene. *Geology en Mijnbouw*, **48** : 373-388.
- Harris, P.T. & Jones, M.R., 1988.**
Bedform movement in a marine tidal delta: air photo interpretation. *Geological Magazine*, **125** (1) : 31-49.
- Harris, P.T., Pattiaratchi, C.B., Cole, A. & Keene, J.B., 1992.**
Evolution of subtidal sandbanks in Moreton Bay, eastern Australia. *Marine Geology*, **103** : 225-247.
- Harris, P.T., Pattiaratchi, C.B., Keene, J.B. & Cole, A., 1990.**
Modelling the evolution of a linear sandbank field, Moreton Bay, Queensland : Report of results obtained during the cruise of A.M. Brogla in July, 1989. Ocean Sciences Institute, Sydney, report. 41, 171 pp.
- Hartmann, D. & Christiansen, C., 1992.**
The hyperbolic shape triangle as a tool for discriminating populations of sediment samples of closely connected origin. *Sedimentology*, **39** : 697-708.
- Hartmann, D., Trentesaux, A. & Lanckneus, J., 1994.**
Sediment dispersal patterns over a tidal sandbank applying the log hyperbolic method. The Middelkerke Bank, Southern North Sea. In *Coastal Dynamics'94*, Barcelona, Spain. Proceedings.
- Hayes, M.O., 1979.**
Barrier island morphology as a function of tidal and wave energy. in Leatherman, S.P. (Ed.), *Barrier islands. From the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*, Academic press, New York : 1-27.
- Henriet, J.P., Bastin, A. & De Rouck, J., 1978.**
Integration of continuous seismic profiling in geotechnical investigations of the Belgian coast. In *7th Intern. Harbour Congress*, Proceedings : 13 pp.
- Henriet, J.P., De Batist, M., De Bruyne, H., Heldens, P., Huylebroeck, J.P., Mostaert, F., Sevens, E., Auffret, J.P. & D'Olier, B., 1989.**
Preliminary seismic-stratigraphic maps and type sections of the Paleogene deposits in the Southern Bight of the North Sea. in Henriet, J.P. & De Moor, G. (Ed.), *The Quaternary and Tertiary geology of the Southern Bight, North Sea*, Bruxelles : 29-44.
- Henriet, J.P., De Batist, M., Van Vaerenbergh, W. & Verschuren, M., 1988.**
Seismic facies and clay tectonic features of the Ypresian clay in the southern North Sea. *Bull. Belg. Ver. Geol.*, **97** (4).
- Holtzapffel, T., 1985.**
Les minéraux argileux, préparation, analyse diffractométrique et détermination. Soc. géol. Nord, Mem. 12, Villeneuve d'Ascq : 136 pp.
- Hoogendoorn, R. & Kluwer, L.F.J., 1990.**
Geological Survey of the Netherlands' high-energy hydraulically driven vibration corer for subsea sediments. In *Oceanology International Conference*, Brighton, U.K. proceedings : 14.
- Houbolt, J.J.H.C., 1968.**
Recent sediments in the southern bight of the North sea. *Geology en Mijnbouw*, **47** (4) : 245-273.
- Houthuys, R., 1990.**
Vergelijkende studie van de afzettingsstructuur van getijdenzanden uit het Eoceen en van de huidige vlaamse banken. Leuven University Press, Leuven : 137 pp.
- Houthuys, R., 1993.**
Impact of a storm period on the morphology of the Middelkerke Bank. in De Moor, G. & Lanckneus, J. (Ed.), *RESECUSED, Final report* : Chapter 4, 29 pp.
- Howarth, M.J. & Hutnance, J.M., 1984.**
Tidal Residual Currents around a Norfolk Sandbank. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **19** : 105-117.

- Huthnance, J.M., 1973.**
Tidal currents asymmetries over the Norfolk sandbanks. *Estuarine and Coastal marine Science*, **1** : 89-99.
- Huthnance, J.M., 1982.**
On One Mechanism Forming Linear Sand Banks. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **14** : 79-99.
- Jansen, J.H.F., Van Weering, T.C.E. & Eisma, D., 1979.**
Late Quaternary sedimentation in the North Sea. in Oele, E., Schüttenhelm, R.T.E. & Wiggers, A.J. (Ed.), *The Quaternary History of the North Sea*, Acta Univ. Ups., Uppsala : 157-187.
- Jelgersma, S., 1961.**
Holocene sea-level changes in the Netherlands. *Meded. Geol. Stichting, C-IV (7)* : 167.
- Jelgersma, S., 1966.**
Sea level changes during the last 10000 years. In *World climate from 8000 to 0 B.C.*, Imperial college, London. Proceedings : 54-71.
- Jelgersma, S., 1979.**
Sea-level changes in the North Sea basin. in Oele, E., Schüttenhelm, R.T.E. & Wiggers, A.J. (Ed.), *The Quaternary History of the North Sea*, Acta Univ. Ups., Uppsala : 233-248.
- Jelgersma, S., Oele, E. & Wiggers, A.J., 1979.**
Depositional history and coastal development in the Netherlands and the adjacent North Sea since the Eemian. in Oele, E., Schüttenhelm, R.T.E. & Wiggers, A.J. (Ed.), *The Quaternary History of the North Sea*, Acta Univ. Ups., Uppsala : 115-142.
- Johnson, M.A., Kenyon, N.H., Belderson, R.H. & Stride, A.H., 1982.**
Sand transport. in Stride, A.H. (Ed.), *Offshore tidal sands, processes and deposits*, Chapman & Hall, London : 58-94.
- Jones, N.S., Kain, J.M. & Stride, A.H., 1965.**
The movement of sand waves on Warts Bank, Isle of Man. *Mar. Geol.*, **3** : 329-336.
- Kelland & Bailey, 1975.**
An underwater study of sandwave mobility in Start Bay. *Rep. Underwat. Ass.*, **1** : 74-80.
- Kenyon, N.H., Belderson, R.H., Stride, A.H. & Johnson, M.A., 1981.**
Offshore tidal sand-banks as indicators of net sand transport and as potential deposits. *Special Publications of the international Association of Sedimentologists*, **5** : 257-268.
- Klein, G.d.V., 1971.**
A sedimentary model for determining paleotidal range. *Geological Society of America Bulletin*, **82** : 2585-2592.
- Köhn, W., 1988.**
The Holocene transgression of the North Sea as exemplified by the southern Jade Bay and the Belgian coastline. Unpublished report.
- Kosters, E.C., Van Mierlo, B.E.J.M., Verbeek, N.H., Posthumus, B.J., McGee, T.M. & Brouwer, J., 1992.**
Late Quaternary stratigraphic signature, offshore the Dutch barrier shoreline. *Sedimentary Geology*, **80** : 199-212.
- Kraft, J.C., Allen, E.A., Belknap, D.F., John, C.J. & Maurmeyer, E.M., 1979.**
Processes and morphologic evolution of an estuarine and coastal barrier system. in Leatherman, S.P. (Ed.), *Barrier islands. From the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*, Academic press, New York : 149-183.
- Krank, K. & Milligan, T.G., 1992.**
Bay of Fundy bottom sediment grain-size dynamics. in Flemming, B.W. (Ed.), *Tidal clastics 92, Abstract volume*, Courier Forsch. -Inst. Senckenberg, Frankfurt a. M. : 49-50.

- Lanckneus, J., 1989.**
A comparative study of sedimentological parameters of some superficial sediments on the Flemish Banks. in Henriet, J.P. & De Moor, G. (Ed.), *The Quaternary and Tertiary geology of the Southern Bight, North Sea*, Bruxelles : 229-241.
- Lanckneus, J., De Moor, G., De Schaepemeester, G., Meyus, I. & Spiers, V., 1992.**
Residual sediment transport directions on a tidal sand bank. Comparison of the "McLaren Model" with bedform analysis. *Bulletin de la Société belge d'Etudes Géographiques*, (2) : 425-446.
- Lanckneus, J. & De Moor, G., 1990.**
Present-day evolution of sandwaves on a sandy shelf bank in the Southern bight. In *Environnement des mers épicontinentales. Colloque Mars 1990*, Lille.
- Lanckneus, J., De Moor, G. & VandeVelde, L., 1993.**
Evolution of residual transport paths. in De Moor, G. & Lanckneus, J. (Ed.), *RESECUSED, Final report* : Chapter 8, 9 pp.
- Langhorne, D.N., 1973.**
A sandwave field in the Outer Thames Estuary, Great Britain. *Mar. Geol.*, 14 : 129-143.
- Langhorne, D.N., 1977.**
Consideration of meteorological conditions when determining the navigational water depth over a sandwave field. *International Hydrographical Review*, 54 : 17-30.
- Langhorne, D.N., 1982.**
A study of the dynamics of a marine sand wave. *Sedimentology*, 29 : 571-594.
- Lapierre, F., 1975.**
Contribution à l'étude géologique et sédimentologique de la Manche orientale. *Philosophical Transactions of the royal Society of London A*, 279 : 177-187.
- Larsonneur, C., 1971.**
Manche centrale et Baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse d'état, Université de Caen, 394 pp.
- Le Drezen, E., 1988.**
Le dépouillement des données sonar latéral à l'Ifremer. Utilisation du logiciel "Trias". IFREMER, mémoire DERO/GM 88-17.
- Lericolais, G., Allenou, J.P., Berné, S. & Hervéou, J., 1988.**
SINUP: A new equipment for acquisition and processing of very high resolution seismic reflection. In *20th Ocean Technology Conference*, Houston, USA. annual meeting proceeding : 337-343.
- Lericolais, G. & Berné, S., 1990.**
Apport de l'acquisition et du traitement numérique de la sismique réflexion très haute résolution à l'étude des corps sableux de plate-forme. *Bulletin des Centres de Recherche, Exploration et Production de Elf Aquitaine*, 14 (1): 185-196.
- Liu, A.C., 1990.**
A seismic and geomorphological study of the erosion surface at the top of the Tertiary in the southern North Sea (Belgian and northern French sectors). Unpublished Ph.D. thesis, Rijks Universiteit Gent.
- Liu, A.C., De Batist, M., Henriet, J.P. & Missiaen, T., 1993.**
Plio-Pleistocene scour hollows in the Southern Bight of the North Sea. *Geology en Mijnbouw*, 71 : 195-204.
- Liu, A.C., Missiaen, T. & Henriet, J.P., 1992.**
The morphology of the top-Tertiary erosion surface in the Belgian sector of the North Sea. *Marine Geology*, 105 : 275-284.

- Long, B.F. & Drapeau, G., 1983.**
Evolution du transport sédimentaire par traceurs radioactifs sur la zone infralittorale de la basse-côte Nord du Saint-Laurent. In *Proc. Can. Coastal Conf.*, Holden. 83 : 201-216.
- Lowe, J.J. & Walker, M.J.C., 1984.**
Reconstructing Quaternary environments. Longman Scientific & Technical, London : 370 pp.
- Ludwick, J.C., 1972.**
Migration of tidal sand waves in Chesapeake Bay entrance. in Swift, D.J.P., Duane, D.B. & Pilkey, O.H. (Ed.), *Shelf sediment transport : process and pattern*, Dwden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pennsylvania : 377-410.
- Malikides, M., Harris, P.T. & Tate, P.M., 1989.**
Sediment transport and flow over sandwaves in non-rectilinear tidal environment: Bass Strait, Australia. *Continental Shelf Research*, 9 (3): 203-221.
- Maréchal, R. & Henriët, J.P., 1983.**
Seismisch onderzoek op het Belgisch Continentaal Plat : Ontginningszone 2. Ministerie van Economische Zaken, Administratie van het Mijnwezen, Unpublished Report. 33 pp.
- Marsset, T. & Olgnon, M., 1992.**
SITHERE : manuel d'utilisation. IFREMER, Brest, Rapport interne, 5pp.
- Masselink, G., 1992.**
Longshore variation of grain-size distribution along the coast of the Rhône Delta, Southern France. A test of the McLaren Model. *Journal of Coastal Research*, 8 (2): 286-291.
- McCave, I.N. & Langhorne, D.N., 1982.**
Sand waves and sediment transport around the end of a tidal sand bank. *Sedimentology*, 29 : 95-110.
- McLaren, P., 1981.**
An interpretation of trends in grain size measures. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51 : 611-624.
- McLaren, P. & Bowles, D., 1985.**
The effect of sediment transport on grain-size distribution. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55 (4): 457-470.
- McLaren, P., Collins, M.B., Gao, S. & Powys, R.I.L., 1993.**
Sediment dynamics of the Severn Estuary and inner Bristol Channel. *Journal of the Geological Society of London*, 150 : 589-603.
- Middelton, G.V., 1976.**
Hydraulic interpretation of sand size distributions. *Journal of Geology*, 84 : 405-426.
- Mitchum, R.M., Vail, P.R. & Sangree, J.B., 1977.**
Stratigraphic Interpretation of Seismic Reflection Patterns in Depositional Sequences. in Payton, C.E. (Ed.), *Seismic stratigraphy - Application to hydrocarbon exploration*, AAPG Mem. 26: 117-133.
- Mostaert, F., 1985.**
Bijdrage tot de kennis van de Kwartairgeologie van de oostelijke kustvlakte op basis van sedimentologisch en lithostratigrafisch onderzoek. Unpublished Ph.D thesis, Rijks Universiteit Gent.
- Mostaert, F., Auffret, J.P., De Batist, M., Henriët, J.P., Moons, A., Sevens, E., Van den Broeke, I. & Verschuren, M., 1989.**
Quaternary shelf deposits and drainage patterns off the French and Belgian coast. in Henriët, J.P. & De Moor, G. (Ed.), *The Quaternary and Tertiary geology of the Southern Bight, North Sea*, Bruxelles : 111-118.
- Mostaert, F. & DeMoor, G., 1989.**
Eemian and Holocene sedimentary sequences on the Belgian coast and their meaning for sea level reconstructions. in Henriët, J.P. & De Moor, G. (Ed.), *The Quaternary and Tertiary geology of the Southern Bight, North Sea*, Bruxelles : 137-148.

- Nio, S.D., 1976.**
Marine transgressions as a factor in the formation of sandwave complexes. *Geology en Mijnbouw*, **55** (1-2) : 18-40.
- Oele, E., 1969.**
The Quaternary geology of the Dutch part of the North Sea, north of the Frisian Isles. *Geology en Mijnbouw*, **48** : 467-480.
- Oele, E. & Schüttenhelm, R.T.E., 1979.**
Development of the North Sea after the Saalian glaciation. in Oele, E., Schüttenhelm, R.T.E. & Wiggers, A.J. (Ed.), *The Quaternary History of the North Sea*, Acta Univ. Ups., Uppsala : 191-215.
- Paepe, R. & Baeteman, C., 1979.**
The Belgian coastal plain during the Quaternary. in Oele, E., Schüttenhelm, R.T.E. & Wiggers, A.J. (Ed.), *The Quaternary History of the North Sea*, Acta Univ. Ups., Uppsala : 143-146.
- Pasenau, H. & Ulrich, J., 1974.**
Giant and megaripples in the German Bight and their studies in a testing area (Lister Tief). In *14th Coast. Eng. Conf.*, Copenhagen. proc. 2 : 1025-1035.
- Pirazzoli, P.A., 1991.**
World atlas of Holocene Sea-Level changes. Elsevier, Amsterdam : 300 pp.
- Ramli, N., 1986.**
Depositional model of a Miocene barred wave and storm dominated shoreface and shelf, Southeastern Malay basin, offshore west Malaysia. *Bulletin of the American Association of petroleum Geologists*, **70** (1) : 34-47.
- Reineck, H.-E., 1963.**
Sedimentologefuge im Bereich des Sudliche Nordsee. *Abhanddl. Senken. Nat. Gesell.*, **505** : 1-138.
- Reineck, H.-E., 1972.**
Tidal flats. in Rigby, J.K. & Hamblin, W.K. (Ed.), *Recognition of ancient sedimentary environments*, S.E.P.M., Spec. Publ. : 146-159.
- Reineck, H.-E. & Singh, I.B., 1980.**
Depositional sedimentary environments, with reference to terrigenous clastics. Springer-Verlag, Berlin : 549 pp.
- Reinson, R.E., 1992.**
Transgressive barrier island and estuarine systems. in Walker, R.G. & James, P.N. (Ed.) *Facies Models, response to sea-level change* : 179-194.
- Rivière, A., 1977.**
Méthodes granulométriques, techniques et interprétations. Masson, Paris : 170 pp.
- Rothrock, H., 1972.**
Davis gardner oil pool, Coleman Country Texas. *Mem. american Association of Petroleum Geologists*, **16** : 406-414.
- Rubin, D.M. & McCulloch, D.S., 1980.**
Single and superimposed bedforms: a synthesis of San Francisco bay and flume observations. *Sedimentary Geology*, **26** : 207-231.
- Salsman, G.G., Tolbert, W.H. & Villars, R.G., 1966.**
Sand-ridge migration in St. Andrew Bay, Florida. *Marine Geology*, **4** : 11-19.
- Shepherd, S.A. & Hails, J.R., 1984.**
The dynamics of a megaripple field in northern Spencer Gulf, South Australia. *Marine Geology*, **61** : 249-263.

- Simons, D.B., Richardson, E.V. & Nordin, C.F., 1965.**
Sedimentary structures generated by flow in alluvial channels. in S.E.P.M., *Special publication n°12* : 24-52.
- Sommé, J., 1977.**
Les plaines du Nord de la France et leur bordure : Etude géomorphologique. Thèse Sci. Nat., Université de Paris I. 801 pp
- Sommé, J., 1979.**
Quaternary coastlines in northern France in Oele, E., Schüttenhelm, R.T.E. & Wiggers, A.J. (Ed.), *The Quaternary History of the North Sea*. Acta Univ. Upsal. Uppsala : 147-158.
- Stewart, H.B. & Jordan, G.F., 1964.**
Underwater sand ridges on Georges Shoal in Miller, R.I. (Ed.), *Papers in marine geology*, MacMillan, New York : 102-114.
- Stolk, A., 1993a.**
Hydrodynamics and suspended load; shipborne tidal cycle and stand-alone frame measurements. in De Moor, G. & Lanckneus, J. (Ed.), *RESECUSED. Final report* : Chapter 18, 17 pp.
- Stolk, A., 1993b.**
Small scale sedimentary structure analysis by boxcoring. in De Moor, G. & Lanckneus, J. (Ed.), *RESECUSED, Final report* : Chapter 11, 14 pp.
- Stolk, A. & Haak, W., 1993.**
Calibration unit for suspended load measurements by optical backscatter sensors. in De Moor, G. & Lanckneus, J. (Ed.), *RESECUSED, Final report* : Chapter 19, 6 pp.
- Stolk, A. & Trentesaux, A., 1993.**
Small scale sedimentary structure analysis by vibrocoring. in De Moor, G. & Lanckneus, J. (Ed.), *RESECUSED, Final report* : Chapter 12, 11 pp.
- Stride, A.H., 1973.**
Sediment transport by the North Sea. *Science* : 101-130.
- Stride, A.H., 1982.**
Offshore tidal sands, processes and deposits. Chapman & Hall, London : 222 pp.
- Stride, A.H., 1989.**
Modern deposits, quasi-deposits and some Holocene sequences in the Southern Bight, North Sea. in Henriot, J.P. & De Moor, G. (Ed.), *The Quaternary and Tertiary geology of the Southern Bight, North Sea* : 149-159.
- Stride, A.H., Belderson, R.H., Kenyon, N.H. & Johnson, M.A., 1982.**
Offshore tidal deposits: sand sheet and sand bank facies. in Stride, A.H. (Ed.), *Offshore tidal sands, processes and deposits*, Chapman & Hall, London : 95-125.
- Swift, D.J.P., 1975.**
Tidal sand ridges and shoal retreat massifs. *Marine Geology*, 18 : 105-134.
- Tankard, A.J. & Hobday, D.K., 1977.**
Tide-dominated back barrier sedimentation, early Ordovician Cape Basin, Cape Peninsula, South Africa. *Sedimentary Geology*, 18 : 135-160.
- Ters, M., 1973.**
Les variations du niveau marin depuis 10000 ans la long du littoral atlantique français. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 36 (9ème congr. Int. INQUA) : 114-136.
- Terwindt, J.H.J., 1971.**
Sand waves in the southern bight of the North Sea. *Marine Geology*, 10 : 51-67.

- Terwindt, J.H.J., 1988.**
Palaeo-tidal reconstructions of inshore tidal depositional environments. in De Boer, P.L., Van Gelder, A. & Nio, S.D. (Ed.), *Tide-influenced Sedimentary Environment and Facies*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht : 233-263
- Tessier, B., 1990.**
Enregistrement des cycles tidaux en accréation verticale dans un milieu actuel (la baie du Mont-Saint-Michel et dans une formation ancienne (la molasse marine miocène du Bassin de Digne). Thèse de Doctorat, Université de Caen. 122 pp
- Teyssen, T.A.L., 1984.**
Sedimentology of the Minette oolitic ironstone of Luxembourg and Lorraine: a Jurassic sandwave complex. *Sedimentology* 31 195-211
- Torres, A., 1986.**
Géométrie, dynamique et structure interne du banc de Serk. Mémoire de DEA, Université de Bretagne Occidentale. Brest, 106 pp
- Twichell, D.C., 1983.**
Bedform distribution and inferred sand transport on George Bank, United States Atlantic continental Shelf *Sedimentology* 30 695-710
- Udden, J.A., 1898.**
The mechanical composition of wind deposits. Augustana Library Publications 69 pp.
- Van cauwenberghe, C. & Denduyver, D., 1993.**
Het radioplaatsbepalingssysteem SYLEDIS langs de Belgische kust en aanderenzend gebied. Hydrografische Dienst der Kust, Oostende. Internal report, 22 pp. Nr 41
- Van den Berg, J.H., 1980.**
Field course guidebook on clastic tidal deposits In *1st Symposium on modern and ancient clastic*: 67 pp.
- Van Mierlo, C.J., 1899.**
La carte lithologique de la partie méridionale de la Mer du Nord *Bulletin de la Société belge de Géologie* 13 219-249
- Van Veen, J., 1936.**
Onderzoekingen in de Hoofden. s Gravenhage 252 pp.
- Verschuren, M., 1992.**
An integrated 3D approach to clay tectonic deformation and the development of a new 3D surface modelling technique. Unpublished PhD thesis, Universiteit Gent.
- Vicaire, O., 1991.**
Dynamique hydrosédimentaire en Mer du Nord méridionale (Du Cap Blanc-Nez à la frontière belge). Thèse de doctorat, Université de Lille I. 264 pp.
- Vincent, C. & Stolk, A., 1993.**
Hydrodynamics and suspended load: measurements by total sediment-load sampler and acoustic backscatter. in De Moor, G & Lanckneus, J (Ed.), *RESECUSED. Final report* : Chapter 18, 17 p.
- Walker, R.G., 1985.**
Ancient examples of tidal sand bodies formed in open, shallow seas. in Tillman, R.W., Swift, D.J.P. & Walker, R.G. (Ed.), *Shelf sands and sandstone reservoirs, SEPM Short Course N° 13*, Tulsa, Oklahoma : 303-342.
- Walker, R.G., 1992.**
Facies, Facies Models and Modern Stratigraphic Concepts in Walker, R. & James, P.N. (Ed.), *Facies Models, response to sea-level change* : 1-14.

- Walker, R.G. & Flint, A.G., 1992.**
Wave- and Storm-Dominated Shallow Marine Systems. in Walker, R.G. & James, P.N. (Ed.), *Facies Models, response to sea-level change* : 219-238.
- Wenworth, C.K., 1922.**
A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, **30** : 377-392.
- Wilson, J.B., 1982.**
Shelly faunas associated with temperate offshore tidal deposits. in Stride, A.H. (Ed.), *Offshore tidal sands, processes and deposits*, Chapman & Hall, London : 95-125.
- Wingfield, R.T.R., 1990.**
The origin of major incisions within the Pleistocene deposits of the North Sea. *Marine Geology*, **91** : 31-52.
- Yang, C.S. & Sun, J., 1988.**
Tidal sand ridges on the East China shelf. in De Boer, P.L., Van Gelder, A. & Nio, S.D. (Ed.), *Tide-Influenced Sedimentary Environment and Facies*, D. Reidel Publishing Company : 23-38.
- Zagwijn, W.H., 1979.**
Early and Middle Pleistocene coastlines in the southern North Sea basin. in Oele, E., Schüttenhelm, R.T.E. & Wiggers, A.J. (Ed.), *The Quaternary History of the North Sea*, Acta Univ. Ups., Uppsala : 31-42.
- Zagwijn, W.H., 1985.**
An outline of the Quaternary stratigraphy of the Netherlands. *Geology en Mijnbouw*, **64** : 17-24.
- Zagwijn, W.H. & Van Staaldin, C.J., 1975.**
Toelichting bij geologische overzichtskaarten van Nederland. Rijks Geol. Dienst, 134 pp. Haarlem.

LISTES

LISTE DES FIGURES

- Figure I-1 - Le Sud de la Mer du Nord, carte morphologique.
1. Bancs de Norfolk, 2. Banc Gabbard, 3. Bancs de la Tamise, 4. The Falls, 5. Bancs de Zélande, 6. Bancs de Hinder, 7. Bancs de Flandre, 8. Bancs côtiers d'après Eisma. (1979) et Houthuys, (1990).
- Figure I-2 - Extrait de la carte marine "Vlaamse Banken" avec le Middelkerke Bank et les ensembles morphologiques voisins. Echelle 1/150 000. Profondeurs en décimètres et courbes de niveau en mètres sous le niveau des plus basses mers (Dienst Der Kust, 1985).
- Figure I-3 - Morphologie générale du secteur étudié. L'étoile indique la position des appareils de mesures de courant figures I-4 et I-5.
- Figure I-4 - Vitesses de courants mesurées lors d'un cycle semi-diurne de marée sur le flanc NW du Middelkerke Bank. Vitesses en $m.s^{-1}$ position à la figure I-3 (Ad Stolk in De Moor *et al.* 1993).
- Figure I-5 - Vitesse et orientation des courants lors d'un cycle de marée. Valeurs en $m.s^{-1}$ position à la figure I-3. Ad Stolk in (De Moor *et al.*, 1993).
- Figure I-6 - Ecorché géologique des dépôts paléogènes du Sud de la Mer du Nord, d'après l'interprétation de profils sismiques (Henriet *et al.*, 1989). Les interprétations des profils sismiques du secteur britannique ne sont pas incorporées à la carte. T1 à T3 : Thanétien ; Y1 à Y3 : Yprésien ; L1 et L2 : Lutétien ; B1 et B2 : Bartonien ; P1 : Priabonien ; R1 et R2 : Rupélien.
- Figure I-7 - Découpage climatique et chronostratigraphique du Quaternaire d'après (Larsonneur, 1971 ; Ters, 1973 ; Zagwijn et Van Staaldunen, 1975 ; Zagwijn, 1985).
- Figure I-8 - Courbe du niveau marin à l'Holocène d'après (Jelgersma, 1961 ; Zagwijn, 1979).
- Figure I-9 - Variation hypothétique du trait de côte au cours de l'Holocène dans la Mer du Nord. Age et niveau marin sous le niveau actuel. Compilation de cartes d'après Jelgersma (1979)
1 : 9000 BP, Boréal inférieur, 50 m sous le niveau marin actuel.
2 : 8700 BP, Boréal inférieur, 36 m sous le niveau marin actuel.
3 : 8300 BP, Boréal supérieur, 30 m sous le niveau marin actuel.
4 : 7800 BP, Atlantique inférieur, 20 m sous le niveau marin actuel.
- Figure I-10 - Colonne lithologique composite et hypothétique des dépôts du Sud de la Mer du Nord (d'après Cameron *et al.*, 1989 in Kusters *et al.*, 1992).
- Figure I-11 - Localisation des 85 points de prélèvement à la benne en Mai 1990 et Avril 1991. Les indications G 16 - G 20 et H 00 - H 04 correspondent aux lignes rouges du réseau DECCA de positionnement.
- Figure I-12 - Localisation des points de prélèvements à l'extrémité Nord du banc. Septembre 1992. Mission N 39.
- Figure I-13 - Schéma de principe de formation d'une image de sonar latéral. D'après un document EG&G.
- Figure I-14 - Angles couverts par le sonar à balayage latéral. Les paramètres H et P correspondent à l'altitude du poisson et à la portée choisie de l'appareil.
- Figure I-15 - Exemple de sonogramme. Profil N°14, mission SANBA. Juillet 1992.
- Figure I-16 - Couverture sonar latéral du banc lors de la mission du Belgica en Mai 1991.
- Figure I-17 - Couverture par sonar latéral de la zone de la mosaïque. Mission du Belgica, Mai 1991.
- Figure I-18 - Principe de fonctionnement de la sismique réflexion marine. D'après Clabaut (1988).

- Figure I-19 - Exemple de filtre de houle réalisé sur un profil de sondeur de sédiment (logiciel SITHERE). A : avant traitement, B : après traitement. Mission Belgica. Extrémité Nord du banc. Noter la forme du réflecteur pointé par la flèche. Mission Belgica.
- Figure I-20 - Couverture sismique haute résolution réalisée par le RCMG. Mission RESECUI et RESECUI2
- Figure I-21 - Technique des empreintes à la laque.
- Figure I-22 - Localisation des carottages. Points noirs : prélèvements de l'Université d'Utrecht le long des profils 20, 30, 40, 50, 80 et 100. Missions V 17, 36 et 37. Points blancs : prélèvement de l'IFREMER (VK 03, 04 et 05). Mission SANBA.
- Figure II-1 - Variation des abondances relatives des minéraux argileux et de la teneur en quartz de la fraction < 2 μm à la fraction < 8 μm . La valeur en Å indique le pic dont la hauteur a été mesurée pour le calcul
- Figure II-2 - Distribution des fractions de sédiment en fonction de la classe granulométrique.
- Figure II-3 - Fuseau granulométrique de l'ensemble des sédiments de la zone d'étude.
- Figure II-4 - Répartition de la médiane calculée sur l'échantillon brut. Première campagne, Mai 1990
- Figure II-5 - Répartition de la médiane calculée sur l'échantillon décalcifié. Première campagne, Mai 1990
- Figure II-6 - Relation entre le classement et la médiane. Première campagne, Mai 1990
- Figure II-7 - Teneur en CaCO_3 dans les sédiments. Première campagne, Mai 1990
- Figure II-8 - Relation entre la teneur en CaCO_3 et la granulométrie (Médiane). Première campagne, Mai 1990.
- Figure II-9 - Position des crêtes sur les cartes de bathymétrie, médiane et teneur en CaCO_3 . Première campagne, Mai 1990.
- Figure II-10 - Répartition de la médiane calculée sur l'échantillon brut. Seconde campagne, Avril 1991.
- Figure II-11 - Répartition de la médiane calculée sur l'échantillon décalcifié. Seconde campagne, Avril 1991.
- Figure II-12 - Teneur en CaCO_3 dans les sédiments superficiels. Seconde campagne, Avril 1991.
- Figure II-13 - Comparaison entre la médiane pour la première et la seconde campagne.
- Figure II-14 - Fréquence des vents à Dunkerque les 15 jours précédant les deux campagnes (en %).
a : 01-16 Mai 1990. May 1990.
b : 09-24 Avril 1991. April 1991
- Figure II-15 - Vitesse des vents à Dunkerque les 15 jours précédant les deux campagnes (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).
a : 01-16 Mai 1990. May 1990.
b : 09-24 Avril 1991. April 1991.
- Figure II-16 - Courbes de distribution du sédiment source (D1) et dépôt (D2) et cas de transport correspondant. Les valeurs de taille croissent vers la droite.
- Figure II-17 - Position des échantillons dans un diagramme sable fin, sable moyen, sable grossier et localisation de sept types sédimentaires.
- Figure II-18 - Courbes granulométriques typiques des sept classes de sédiments.
- Figure II-19 - Répartition des différents types sédimentaires à la surface du banc.

- Figure II-20 - Filiations possibles (Source → dépôt) entre les différents types de sédiments.
- Figure II-21 - Directions possibles des transits sédimentaires déduites des relations entre les paramètres granulométriques des types de sédiments
- Figure II-22 - Répartition de la médiane à la terminaison nord du banc
- Figure II-23 - Répartition de la teneur en CaCO_3 à l'extrémité nord du banc
- Figure II-24 - Répartition du classement à l'extrémité nord du banc
- Figure II-25 - Caractéristiques géométriques d'une figure sédimentaire transverse H : amplitude . L : longueur d'onde
 α : pente du flanc doux . β : pente du flanc raide
- Figure II-26 - Exemple de superposition de dunes d'amplitudes différentes Profil N°41 mission SANBA
- Figure II-27 - Trace d'impact d'un engin explosif pendant le jusant panache vers l'WSW Profil N°64, mission Belgica, Mai 1991
- Figure II-28 - Orientation des dunes et indication de leur flanc raide (pointe des triangles) La position des symboles des dunes n'indique pas une figure sédimentaire mais un groupe de dunes aux mêmes caractéristiques. Mission BELGICA, Mai 1991
- Figure II-29 - Localisation des six boîtes direction de progradation des dunes déduite de leur asymétrie en fonction de leur localisation sur le banc
- Figure II-30 - a) Exemple de sonogramme montrant l'évolution de la longueur d'onde des PMD en fonction de leur position sur les GD. b) Interprétation de l'image Profil N°12, mission SANBA
- Figure II-31 - Mosaïque sonar de l'extrémité nord du Middelkerke Bank, traitée par le logiciel "TRIAS" Etat du 6 Mai 1991. La crête des dunes apparaît en clair, essentiellement à cause de la faible distance existant entre le poisson du sonar et la crête des dunes. La zone située en aval du flanc raide est constituée d'un sédiment plus grossier, plus rétrodiffusant et apparaît en sombre Mission BELGICA.
- Figure II-32 - Interprétation de la mosaïque sonar en Mai 1991. Les traits épais représentent les crêtes des dunes et leur polarité. La bathymétrie a été calculée par des méthodes géostatistiques à partir des profils. Elle a ensuite été interprétée en fonction de la position des grandes dunes. La crête des petites et moyennes dunes n'est pas représentée Mission BELGICA.
- Figure II-33 - Mosaïque sonar de l'extrémité nord du Middelkerke Bank, traitée par le logiciel "TRIAS" Etat du 2 Juillet 1992. Les chiffres indiquent l'amplitude des dunes en mètres. Mission SANBA.
- Figure II-34 - Interprétation de la mosaïque sonar en Juillet 1992. Les traits épais représentent les crêtes des dunes et leur polarité. Les valeurs indiquent l'amplitude des dunes en mètres. Les crêtes des petites et moyennes dunes ne sont pas représentées. Mission SANBA.
- Figure II-35 - Déplacement des crêtes des grandes et très grandes dunes entre Mai 1991 et Juillet 1992.
- Figure II-36 - Sens des transits sédimentaires déduits de l'asymétrie des petites aux grandes dunes.
- Figure II-37 - Diagramme indiquant la direction de migration d'un banc sableux en fonction de l'angle entre le courant tidal principal et la crête du banc. D'après Johnson *et al.* (1982). Le cas correspondant au Middelkerke Bank est celui qui présente une rotation horaire (clockwise).
- Figure II-38 - Transit sableux en Mer du Nord (Kenyon *et al.*, 1981).
- Figure II-39 - Comparaison des transits sédimentaires déduits de la méthode de McLaren et de l'interprétation des sonogrammes.

- Figure II-40 - Mouvements schématiques de déplacement des sédiments dans la zone du Middelkerke Bank. L'épaisseur des flèches est proportionnelle à l'importance du transit.
- Figure III-1 - Relations entre les réflecteurs et les limites des séquences de dépôt. U4, U6 et U7 correspondent aux unités sismiques définies au chapitre III. Profil N° 48 du RCMG, mission RESECU2.
- Figure III-2 - Points significatifs conservés après filtrage pour la reconstitution de la surface bathymétrique du banc. Logiciel GEOFOX.
- Figure III-3 - Triangulation entre les points significatifs de la surface du banc. Noter les surfaces de discontinuités aux lignes plus épaisses le long des grandes dunes. Logiciel GEOFOX.
- Figure III-4 - Exemple de représentation de la surface du banc. Logiciel GEOFOX.
- Figure III-5 - Exemple de représentation 3D de la surface du banc. Logiciel GEOFOX.
- Figure III-6 - Profil sismique analogique et interprétation montrant les déformations intra-yprésiennes. Profil N° 18, mission RESECU2.
- Figure III-7 - Carte des isobathes du toit du Tertiaire de la plateforme continentale belge d'après Liu *et al.* (1992).
- Figure III-8 - Unités morphologiques du toit de Tertiaire aux environs du Middelkerke Bank. D'après Liu *et al.* (1992). Le carré central correspond à la zone d'étude.
- Figure III-9 - Isobathes de la surface anté-quaternaire dans la zone d'étude. Logiciel GEOFOX.
- Figure III-10 - a : profil sismique analogique sur lequel cinq réflecteurs intra-quaternaires peuvent être distingués. Profil 18, mission RESECU2
b : Interprétation.
- Figure III-11 - Exemple de relations entre les réflecteurs de premier et de second ordres. L'échelle verticale (ms) est donnée en temps double. Sondeur de sédiment, profil N°40, mission BELGICA.
- Figure III-12 à III-18 - Représentation des unités sismiques U1 à U7. Pour chacune des unités :
a : Profondeur de la surface de base. Logiciel GEOFOX, l'échelle est différente selon l'unité considérée.
b : Epaisseur de l'unité sismique. Logiciel GEOFOX.
c : Directions et pendages des réflecteurs internes. Pendages en dixièmes de degrés.
Tirés : limites de l'unité sismique en dehors de la zone d'étude.
- Figure III-19 - Profil analogique et interprétation d'un profil présentant les sept unités sismiques. Profil N°27, mission RESECU1.
- Figure III-20 - Caractéristiques de chacune des unités sismiques. Dans la colonne de gauche, les grilles représentent
1) de gauche à droite, le chenal Negenvaam, le Middelkerke Bank, le chenal Utdiep et l'Oostende Bank
2) de haut en bas, les parties NE, centrale et SW.
- Figure III-21 - Carte des affleurements des différentes unités sismiques.
- Figure III-22 - Carte des unités sismiques au contact du Tertiaire.
- Figure III-23 - Coupe schématique N-S illustrant les relations entre les trois premières unités, emboîtées (de U1 à U3) de part et d'autre d'un axe de symétrie E-W, et recouvertes par l'unité U4.
- Figure III-24 - Exemple de profils sismiques obtenus sur la même zone à partir des deux sources utilisées.
a) Extrait du profil N° 27 de la mission RESECU1. Sparker.
b) Interprétation. Le rectangle correspond à la zone représentée en c et en d.
c) Extrait du profil N° 19 de la mission Belgica. Sondeur de sédiment.
d) Interprétation.
Notez la différence des échelles horizontales entre les deux profils ainsi que les effets dus à la houle sur les figures c et d.

- Figure III-25** - Interprétation de quatre profils THR longitudinaux au banc. Pleine échelle verticale : 30 m pour une vitesse des ondes acoustiques de 1600 m.s^{-1} dans le sédiment. Exagération verticale : x20. Sondeur de sédiment, mission Belgica
- Figure III-26** - Interprétation de quatre profils THR transverses au banc. Pleine échelle verticale : 30 m pour une vitesse des ondes acoustiques de 1600 m.s^{-1} dans le sédiment. Exagération verticale : x20. Sondeur de sédiment, mission Belgica. La totalité des profils est donnée en annexe.
- Figure III-27** - Exemple de profil sismique a) non interprété et b) interprété, montrant les différents types de réflecteurs et d'unités. Extrait du profil N° 33. Mission Belgica.
- Figure III-28** - Exemple de profil sismique a) non interprété et b) interprété, montrant les différents types de réflecteurs et d'unités. Noter les unités basales de remplissage de chenaux et les sets de l'unité supérieure. Extrait du profil N° 47. Mission Belgica.
- Figure III-29** - Comparaison entre la taille du grain estimée avec une échelle graphique de Wenworth (Lowe et Walker, 1984) et la médiane mesurée de 38 échantillons prélevés sur les carottes. A et B : voir explications dans le texte.
- Figure III-30** - Schéma des quatre types de bioturbations rencontrées sur le Middelkerke Bank. Barre d'échelle : environ 10 cm.
- Figure III-31** - Nomenclature établie pour définir les onze faciès sédimentaires et représentation des différents clastes observés. Le symbole "coquille" correspond généralement à des débris de coquilles, très rarement à des coquilles entières.
- Figure III-32** - Localisation des carottes 18 à 27 sur le profil bathymétrique N° 80.
- Figure III-33** - Logs synthétiques des carottes N° 18 à 27 le long du profil N° 80. Colonnes de gauche : nature des faciès selon la figure III-31.
- Figure III-34** - Localisation des carottes sur le profil bathymétrique N° 30.
- Figure III-35** - Logs synthétiques des carottes 9 à 17, profil 30. Colonnes de gauche : nature des faciès selon la figure III-31.
- Figure III-36** - Caractéristiques de la carotte VK 05, profil N°43, mission SANBA. De gauche à droite : densité, lithologie, médiane (mean, en μm), classement (So), teneur en CaCO_3 et portion correspondante de profil sismique. fl. : fluage du sédiment lors des opérations de carottage.
- Figure III-37** - Caractéristiques de la carotte VK 04, profil N°42, mission SANBA. De gauche à droite : densité, lithologie, médiane (mean, en μm), classement (So), teneur en CaCO_3 et portion correspondante de profil sismique.
- Figure III-38** - Caractéristiques de la carotte VK 03, profil N°42, mission SANBA. De gauche à droite : densité, lithologie, médiane (mean, en μm), classement (So), teneur en CaCO_3 et portion correspondante de profil sismique. fl. : fluage du sédiment lors des opérations de carottage.
- Figure III-39** - Profil N° 20, données sismiques et lithologiques. Les faciès sédimentaires suivent la nomenclature définie à la figure III-31. Les traits pleins représentent les réflecteurs sismiques, les tiretés les limites supposées à partir de l'étude des profils sismiques et de la lithologie. Pour chaque unité ou sous-unité, ainsi que pour certains réflecteurs, les caractéristiques principales sont encadrées. Profils N°35 et 39 du sondeur de sédiment, mission BELGICA.
- Figure III-40** - Profil N° 30, données sismiques et lithologiques. Même légende que pour la figure III-39. Profils N°4 et 5 du sondeur de sédiment, mission BELGICA et Profil N°2 du sparker, mission RESECU1.
- Figure III-41** - Profil N° 80, données sismiques et lithologiques. Même légende que pour la figure III-39. Profils du sondeur de sédiment N°19 et 20, mission BELGICA et profils sparker N°26 et 27, mission RESECU1.

Figure III-42 - Profil N°100, données sismiques et lithologiques. Même légende que pour la figure III-39. Profil du sondeur de sédiment N°63, mission BELGICA et profil sparker N°43, mission RESECU1.

Figure III-43 - Faciès de U4 à partir des observations de toutes les carottes par rapport à l'isobathe - 20 m. Le sommet des carottes est systématiquement recoupé par le réflecteur U7.b ou U6.b pour la carotte notée BGD. Seule cette dernière montre le contact avec l'unité inférieure U3. Les numéros correspondent à celui des carottes décrites dans les figures précédentes.

Figure III-44 - Division lithologique de l'unité U4 en trois associations de faciès

Association A : faciès 6, 7, 9, 10 et 11

B : faciès 3, 4, 5 and 9.

C : faciès de remplissage de chenaux.

Figure III-45 - Localisation de la carotte du BGD sur le profil N° 25 du RCMG

Figure III-46 - Description lithologique de la carotte "Uitdiep" forée par le Service géologique de Belgique.

Figure III-47 - Périodes glaciaires et interglaciaires du Quaternaire néerlandais D'après Zagwijn et Van Staaldinien (1975) et Lowe et Walker (1984). Les stades glaciaires sont signalé par les pointillés.

Figure III-48 - Trois environnements possibles possédant les caractéristiques principales de l'unité U6.

Figure III-49 - a) Mode de calcul permettant d'estimer la position du zéro hydrographique H lors du dépôt d'une unité sismique par rapport au niveau actuel de la mer P : Profondeur actuelle de l'unité sismique : X Profondeur initiale du dépôt de l'unité.

- b) Même calcul quand la profondeur d'une unité Un : Un.b est comprise entre une valeur basse : Pb et une valeur haute Ph. La profondeur estimée du dépôt est comprise entre Xmin et Xmax. La profondeur de début de mise en place de l'unité par rapport au niveau marin actuel est comprise entre Hmin et Hmax

Figure III-50 - Profondeur calculée de chaque unité sismique et âge correspondant.

Figure III-51 - Succession verticale des environnements sédimentaires observés sur la zone du Middelkerke Bank.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 0-1 - Répartition des tâches principales au sein du projet RESECUSED.

Tableau 0-2 - Extrait des campagnes en mer effectuées dans le cadre du projet RESECUSED.

Tableau I-1 - Définition du nom d'un sédiment selon la valeur de sa médiane. (d'après Folk et Ward, 1957).

Tableau I-2 - Echelle des classements selon Folk et Ward (1957)

Tableau I-3 - Caractéristiques techniques des appareils utilisés pour les relevés de sismique.

Tableau II-1 - Vitesse, direction du vent et état de la mer pendant les 15 jours précédant les deux campagnes. Etat de la mer, échelle de Beaufort à 10 échelons. 1 plate, 2 calme, 3 belle, 4 peu agitée, 5 agitée, 6 forte.

Tableau II-3 - Comparaison entre les paramètres granulométriques pour les sept classes sédimentaires. Chaque classe est comparée avec les autres en prenant en compte successivement les paramètres suivants : la médiane (plus grande C, plus petite F), le classement (meilleur B, moins bon P) et l'asymétrie (plus positive +, plus négative -). Les cases entourées de lignes épaisses correspondent aux relations possibles : FB- ou CB+.

Tableau II-4 - Définition des figures sédimentaires transversales en fonction de leur amplitude et de leur longueur d'onde en mètres (Ashley, 1990 ; Berné *et al.*, 1989).

Tableau II-5 - Valeur de l'azimut des dunes sur les différentes parties du banc. Pour les deux classes de dunes (PMD et GD) sont reportés le nombre de mesures (Nb), l'azimut moyen et l'écart type (σ) qui donne une idée de la dispersion des azimuts dans la boîte. La dernière colonne indique la différence d'orientation entre les deux classes de figures. Les valeurs d'azimut, d'écart type et d'obliquité sont en degrés.

Tableau II-6 - Exemples de vitesses de migration de dunes.

Tableau III-1 - Caractéristiques et localisation des six réflecteurs de premier ordre. Du plus ancien au plus récent : U2.b à U7.b.

Tableau III-2 - Ages BP du début de mise en place des différentes unités sismiques calculés à partir des données actuelles de profondeur et de milieu. Profondeurs par rapport au niveau moyen de la mer.

Tableau III-3 - Ages BP du début de mise en place des unités sismiques.

ANNEXES

Annexes

Interprétation des profils THR réalisés à l'extrémité Nord du banc. Zone choisie pour la réalisation de la mosaïque sonar latéral (Cf. chapitre II). Pleine échelle verticale : 30 m pour une vitesse des ondes acoustiques de 1600 m.s^{-1} dans les sédiments. Exagération verticale : x20. Sondeur de sédiment, mission Belgica.

p. 226 : Profils 44 à 52 longitudinaux au banc présentés du NW au SE.

p. 227 : Profils transversaux au banc présentés du NE au SW.

p. 228 : Profils transversaux au banc présentés du NE au SW (suite).

p. 229 : Localisation des profils transversaux.

Line drawing of four very high resolution profiles at the northern end of the bank. Area chosen for the side-scan sonar mosaic (Cf. Chap. 2). Full vertical scale: 30 m for a sound velocity of 1600 m.s^{-1} . Vertical exaggeration: x20. Subbottom profiler, Belgica cruise.

p. 226 : Profiles 44 to 52 parallel to the bank presented from NW to SE.

p. 227 : Profiles transverse to the bank presented from NE to SW.

p. 228 : Profiles transverse to the bank presented from NE to SW (end).

p. 229 : Location of the transverse profiles.

