

MINISTERE DES AFFAIRES ECONOMIQUES



Administration Qualité et Sécurité

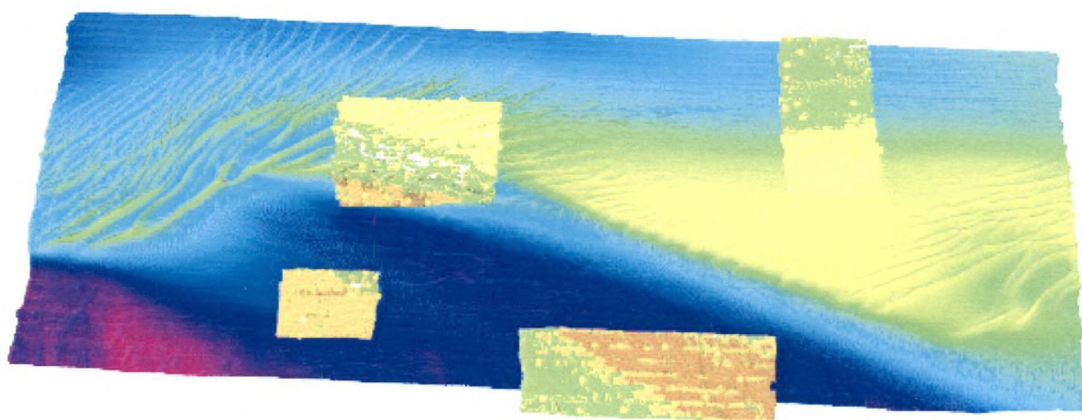
Division Sécurité

Dr Sc Marc Roche

58110

Utilisation du sonar multifaisceaux pour la classification acoustique
des sédiments et son application à la cartographie de la zone de
concession 2 de la mer territoriale et du plateau continental belge

Etude de Faisabilité



Mémoire de Stage

Avril 2002

Table des matières

1. Introduction, bref historique, but et présentation du travail	1
1. Cadres légal et économique	2
1.1. Cadre légal	2
1.2. Cadre économique	4
2. Contexte géomorphologique, géologique et hydrodynamique	7
2.1. Géomorphologie actuelle	7
2.2. Géologie	11
2.2.1. Géologie pré-quaternaire	11
2.2.2. Géologie quaternaire	12
2.2.2.1. La surface de base du quaternaire	12
2.2.2.2. Les bancs de sable	15
2.2.2.3. Les sédiments dans la zone de concession 2	17
2.3. Dynamique sédimentaire actuelle	21
3. Le sonar multifaisceaux : aspect bathymétrique	23
3.1. Principe général de fonctionnement d'un sonar multifaisceaux	23
3.2. Architecture générale d'un sonar multifaisceaux	25
3.3. Le sonar multifaisceaux EM1002S et les senseurs associés	27
3.4. Acquisition et traitement des données sonar multifaisceaux	29
3.4.1. Acquisition des données à bord du Belgica	29
3.4.2. Post-traitement des données	29
3.5. La bathymétrie du Kwintebank	32
4. L'énergie acoustique rétrodiffusée	33
4.1. Principes généraux	33
4.2. Enregistrement et normalisation des données BS	35
4.3. Traitement des données	36
4.3.1. Mosaïque sonar – Poseidon	36
4.3.2. Classification – Triton	37
4.3.2.1. Extraction de 5 paramètres	37
4.3.2.2. Définition des classes	39
4.3.2.3. Classification et segmentation de l'image	39
5. Données de la campagne 0131	40
5.1. Acquisition des données	40
5.2. Post-traitement bathymétrique des données	44
5.3. Classification acoustique	46
5.3.1. Mosaïque sonar – cartographie du BS dans Poseidon	46
5.3.2. Classification dans Triton	48
5.3.2.1. Extraction des paramètres BS	48
5.3.2.2. Définition des classes	50
5.3.2.3. Classification	57
6. Validation des classes	59
7. Conclusions	67

1. Introduction, bref historique, but et présentation du travail

Dans le cadre du suivi des extractions marines par le Fonds¹, le Ministère des Affaires Economiques a acquis un sonar multifaisceaux Kongsberg Simrad 1002S livré par la firme INES Marine NV. Ce système a été installé à bord du navire océanographique Belgica durant l'été 1999. Ce type d'appareil de mesure permet d'établir une cartographie détaillée des zones d'exploitation d'agrégats marins afin de préciser entre autre, l'impact des extractions sur la topographie sous-marine.

Le coût total de ce système a été de 28,515 millions de francs belges (706.868,39 €). Le Fonds a financé 90 % du coût total, l'UGMM² prenant à sa charge les frais d'intégration du système à bord du Belgica, soit 2,515 millions de francs belges (62.345,22 €).

La première campagne de mesure effectuée en sonar multifaisceaux par l'équipe du Fonds a eu lieu en novembre 1999 sur le Kwintebank, banc le plus exploité. Depuis, le système a fait l'objet de nombreux tests et d'aménagement au cours des années 2000-2001.

Comme en témoigne un nombre élevé d'articles scientifiques et techniques publiés ces dernières années, l'utilisation de l'acoustique sous-marine en tant qu'outil de classification du fonds marin constitue un domaine de recherche prometteur et en plein développement. Le sonar multifaisceaux acquis par le Ministère des Affaires Economiques – Fonds pourrait donc constituer l'outil actuel le plus approprié à l'établissement, outre de la cartographie de la bathymétrie sous-marine, d'une carte des ressources minérales du plateau continental belge à une échelle de 1/10.000.

Ce rapport de stage doit être perçu comme une étude de faisabilité. Son but principal est d'évaluer les potentialités du sondeur multifaisceaux pour l'établissement d'une cartographie de la nature du fonds marin. Plus précisément, ce travail se focalise sur la discrimination des sables et des graviers qui sont les deux ressources minérales actuellement exploitées sur le plateau continental belge.

Ce travail s'organise suivant cinq parties :

1. Dans un premier temps nous effectuerons un rappel des cadres légal et économique dans lesquels s'inscrit cette étude de faisabilité ;
2. Une synthèse du contexte géologique constitue la deuxième partie de ce rapport ;
3. La technologie du sonar multifaisceaux (définitions, principes de fonctionnement, acquisition et traitement des données) est développée en détail dans le cadre de la troisième partie de ce travail ;

¹ Fonds pour l'exploration et l'exploitation des ressources minérales et autres ressources non vivantes de la mer territoriale et du plateau continental de la Belgique

² Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la Mer du Nord et de l'Estuaire de l'Escaut dépendant de l'Institut Royal des Sciences naturelles de Belgique

4. Cette étude de faisabilité s'appuie sur une campagne de mesure spécifique effectuée à bord du navire de recherche Belgica du 27 au 29 novembre 2001. La quatrième partie de ce travail est consacrée au traitement et à la présentation des résultats de cette campagne.
5. L'évaluation des potentialités de la technologie du sondeur multifaisceaux pour la discrimination des sables et graviers constitue la cinquième partie de ce rapport.

Deux remarques s'imposent quant au mode de présentation opté pour ce rapport :

- Le sonar multifaisceaux est un outil complexe. Bien que la compréhension approfondie de son mode de fonctionnement soit pour le moins ardue pour le profane, dans le mesure où cette technologie constitue la pierre angulaire de ce travail, il m'a semblé important de décrire en détail les principes sus-jacents à son fonctionnement. Seule une bonne connaissance de l'outil permet d'en apprécier ses limites. Toutefois, afin de rendre cet exposé accessible aux non-spécialistes et en partant du principe « qu'un beau dessin vaut mieux qu'un long discours », j'ai délibérément choisi de limiter les formulations mathématiques au strict minimum et de privilégier les schémas et les illustrations.
- Ce rapport représente essentiellement le fruit d'un travail de cartographie et d'analyse de données. Pour une raison similaire à celle évoquée au point précédent, les résultats sont surtout présentés sous la forme de cartes³ et de graphiques intégrés au texte.

1. Cadres légal et économique

1.1. Cadre légal

Ce rapport de stage s'inscrit dans le cadre légal belge réglementant l'exploration et l'exploitation des ressources minérales (sables et graviers) sur le plateau continental.

Ce cadre législatif s'organise autour de :

- la loi du 13 juin 1969 sur l'exploration et l'exploitation des ressources non vivantes de la mer territoriale, modifiée par la loi du 22 avril 1999 visant la protection du milieu marin dans les espaces marins sous juridiction de la Belgique et par la Loi du 22 avril 1999 concernant la zone économique exclusive de la Belgique en mer du Nord ;
- l'arrêté royal du 7 octobre 1974 relatif à l'octroi de concessions de recherche et d'exploitation des ressources minérales et autres ressources non vivantes sur le plateau continental modifié par l'arrêté royal du 22 avril 1983 portant sur les explorations et les exploitations du sable destiné à des travaux portuaires ou côtiers exécutés par l'état ou pour le compte de celui-ci.

³ Pour toutes les cartes présentées dans ce rapport :

Datum horizontal = ED50 ; Système de Projection = UTM Zone 31 ;

Datum vertical = MLLWS (« Mean Low Low-Water Spring »).

- l'arrêté royal du 16 mai 1977 portant des mesures de protection de la navigation, de la pêche maritime, de l'environnement et d'autres intérêts essentiels lors de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales et autres ressources non vivantes du lit de la mer et du sous-sol dans la mer territoriale et sur le plateau continental. Cet arrêté définit les deux zones d'extraction sur le plateau continental belge (figure 1) ;

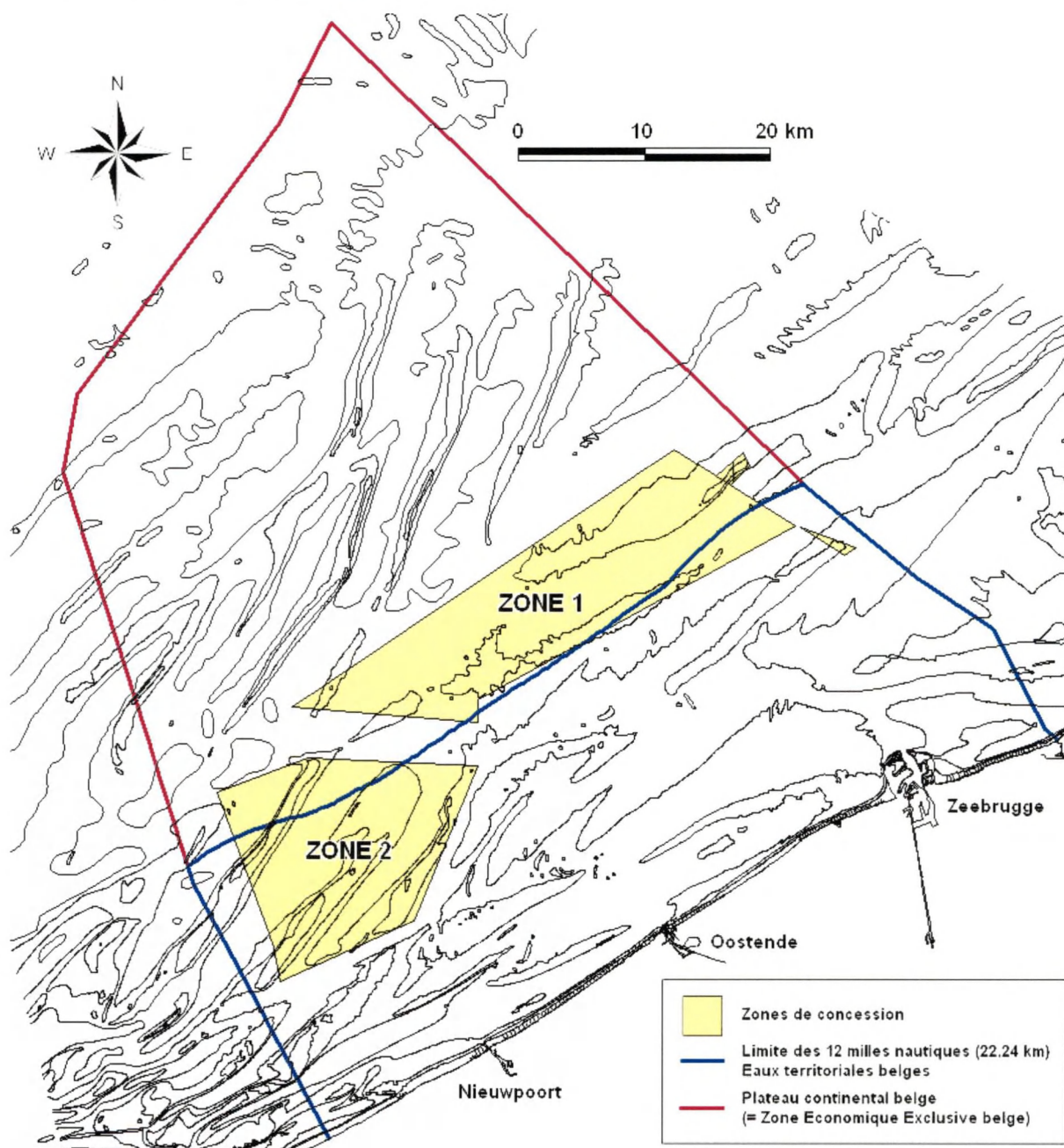


Figure 1 : Situation des zones concédées à l'extraction de sable et gravier sur le plateau continental belge.

- le plan fédéral de développement durable 2000-2004 fixé par l'arrêté royal du 19 septembre 2000 dans le cadre de la loi du 5 mai 1997 relative à la coordination de la politique fédérale en matière de développement durable.

Les arrêtés d'exécution des amendements portés à la loi du 13 juin 1969 n'étant pas encore en vigueur, la procédure d'octroi des concessions qui prévoit la publication d'arrêtés royaux et ministériels se base actuellement sur l'arrêté royal du 7 octobre 1974.

Le financement et l'utilisation par le Ministère des Affaires Economiques - Fonds, d'un sonar multifaisceaux permettant une cartographie en haute résolution des zones d'exploitation est conforme à l'esprit de la loi du 13 janvier 1969 (article 3, § 2, 3°) qui stipule que « L'exploration et l'exploitation sont soumises à un examen continu de l'influence des activités concernées sur les déplacements de sédiments et sur le milieu marin ». Ce travail s'intègre dans cet objectif d'évaluation de l'impact des extractions sur la topographie et la nature du fonds marin.

Précisons que l'article 3, §2 de la loi du 13 juin 1969 modifiée par la loi du 22 avril 1999, prévoit également un contrôle de cette incidence en amont : « toute demande de concession ou d'autorisation comprend une étude d'incidences sur l'environnement qui est établie sous la responsabilité et aux frais du demandeur. La demande est soumise à une évaluation des incidences sur l'environnement. »

1.2. Cadre économique

En Belgique, les sables et graviers marins font l'objet d'une exploitation recensée depuis 1979. La figure 2 illustre l'évolution des volumes extraits de 1979 à 2001.

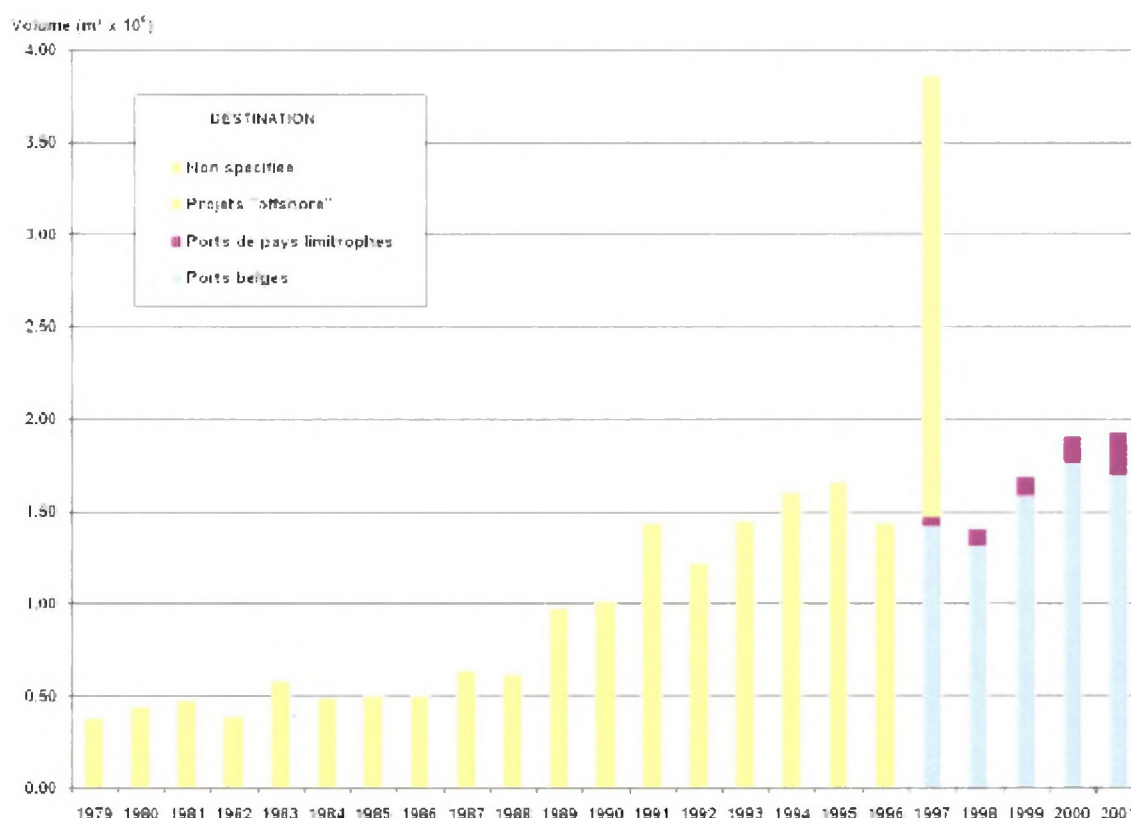


Figure 2 : Evolution de l'extraction de sable et gravier marins de 1979 à 2001.

L'extraction annuelle a évolué régulièrement de 370.000 m³ en 1979 pour atteindre une production de 1.700.000 m³ au milieu des années 90. La valeur exceptionnelle

de 3.860.000 m³ extraite en 1997 reflète l'importance des travaux « offshore » entrepris cette année-là (2.390.000 m³ utilisés pour le remblaiement des sillons de traçage des gazoducs Interconnector et Franpipe).

Depuis 2 ans, la production se rapproche de la barre des 2.000.000 m³ (soit 3.000.000 de tonnes pour une densité moyenne du sable de l'ordre de 1,5 t/m³).

Du point de vue des exploitants, le prix de vente des sables et graviers varie suivant leur qualité industrielle, qualité déterminée par leur granulométrie.

Matériau	Prix indicatif à la tonne
Sable de remblais	3.7 €
Sable à béton	6.2 €
Gravier	8.7 €

Tableau 1 : Prix indicatifs de vente des sables et graviers marins.

Actuellement, pour un volume annuel extrait de 1.900.000 m³ (équivalent à 2.850.000 tonnes), en considérant un prix de vente moyen de 6.2 €, l'extraction de sable et gravier marin génèrerait un chiffre d'affaire de l'ordre de 17.670.000 € / an.

Du point de vue de l'Etat, en vertu de l'arrêté royal du 7 octobre 1974 susdit, les redevances pour les concessions de sable et de gravier sont mentionnées dans chaque arrêté de concession.

Ces redevances sont dues pour l'exécution de l'examen continu de l'influence des exploitations sur les déplacements de sédiments et sur le milieu marin (article 3, §4 de la loi de 1969 précitée). Chaque exploitant paye une redevance en fonction du volume extrait avec un minimum annuel de 18.592,02 €. Actuellement, cette redevance est fixée à 0,35 € / m³ indépendamment de la nature du matériau extrait (sable ou gravier). La perception de ces redevances est ventilée entre 3 administrations fédérales :

Administration	Redevance minimale annuelle (€)	Redevance / Volume (€/m ³)
Fonds Ministère des Affaires Economiques	6.197 ,34	0.15
Département des pêches Ministère de l'Agriculture	6.197 ,34	0.1
UGMM SSTC – Services du Premier Ministre	6.197 ,34	0.1
TOTAUX :	18.592,02	0,35

Tableau 2 : Ventilation des redevances relatives à l'extraction de sable et gravier marins.

En accord avec le plan fédéral de développement durable, un projet d'adaptation des droits de concession est en cours d'évaluation au sein du Fonds.

Ce projet prévoit :

- le maintien de la redevance minimale annuelle ;
- la distinction entre sable (0.063-2 mm) et gravier (2-4 mm) pour la redevance perçue sur le volume extrait.

A titre indicatif, la législation en vigueur aux Pays-Bas impose une redevance sur le volume extrait 2,6 fois plus élevée pour l'extraction des graviers que pour celle des sables (redevances néerlandaises : 1.23 € / m³ pour les graviers, 0,47 € / m³ pour les sables).

Nous verrons plus en détail dans le chapitre suivant que les graviers du plateau continental belge correspondent à des dépôts de nature fluviatile. Ces graviers d'Âge Pléistocène représentent le comblement de paléovallées qui ont incisé la surface d'érosion majeure limitant dans toute la Manche et la Mer du Nord, les sédiments quaternaires des sédiments sous-jacents.

Contrairement aux sables dont la granulométrie laisse supputer un renouvellement par transit sédimentaire sous l'action des courants, les graviers, de par leur nature, sont le type même de la ressource non-renouvelable. Nous avons vu que ce matériau qui est utilisé pour la fabrication de béton de bonne qualité possède une plus haute valeur commerciale que le sable. En terme de développement durable, il est donc logique d'imposer une redevance plus élevée pour l'extraction des graviers.

Ce travail de stage s'inscrit particulièrement dans cet esprit de gestion durable des ressources du plateau continental.

Le développement de méthodes permettant une cartographie précise des ressources minérales du plateau continental va de pair avec ce projet de modification de la législation relative aux redevances. En effet, du point de vue de la mission de contrôle du Fonds, il semble difficile de concevoir un système de redevances différenciées pour les sables et graviers qui ne s'appuierait pas sur une cartographie des ressources dans les deux zones de concession. A mon sens, l'aspect économique de ce travail rejoint ici le point de vue législatif.

2. Contexte géomorphologique, géologique et hydrodynamique

De nombreux travaux scientifiques relatifs à l'hydrodynamique, la géomorphologie, et la géologie du plateau continental belge ont été publiés ces 20 dernières années.

Ce chapitre n'ambitionne pas de présenter une synthèse approfondie des observations et des théories scientifiques les plus récentes relatives à ce vaste domaine de recherche pluridisciplinaire. Compte tenu de la complexité des interactions liant le transport et le dépôt des sédiments aux agents hydrodynamiques, une telle synthèse sortirait rapidement du cadre technique de ce travail.

Ce chapitre présente simplement les grandes lignes du contexte géomorphologique, géologique et hydrodynamique dans lequel s'intègre cette étude. Il s'inspire largement des travaux de synthèse suivants : Ceuleneer & Lauwaert, 1987, Henriët & de Moor, 1989, Liu A. C., 1990, De Moor & Lanckneus, 1993, Trentesaux, 1993, Augris *et al.*, 1995 et Augris & Clabaut, 2001.

2.1. Géomorphologie actuelle

Le plateau continental belge appartient au domaine méridional de la Mer du Nord. Ce domaine de transition vers la manche, est modelé par de nombreux bancs de sable, corps sédimentaires longitudinaux (orientés dans le sens général du courant dominant) de grande taille, pouvant atteindre quelques dizaines de km (figure 3).

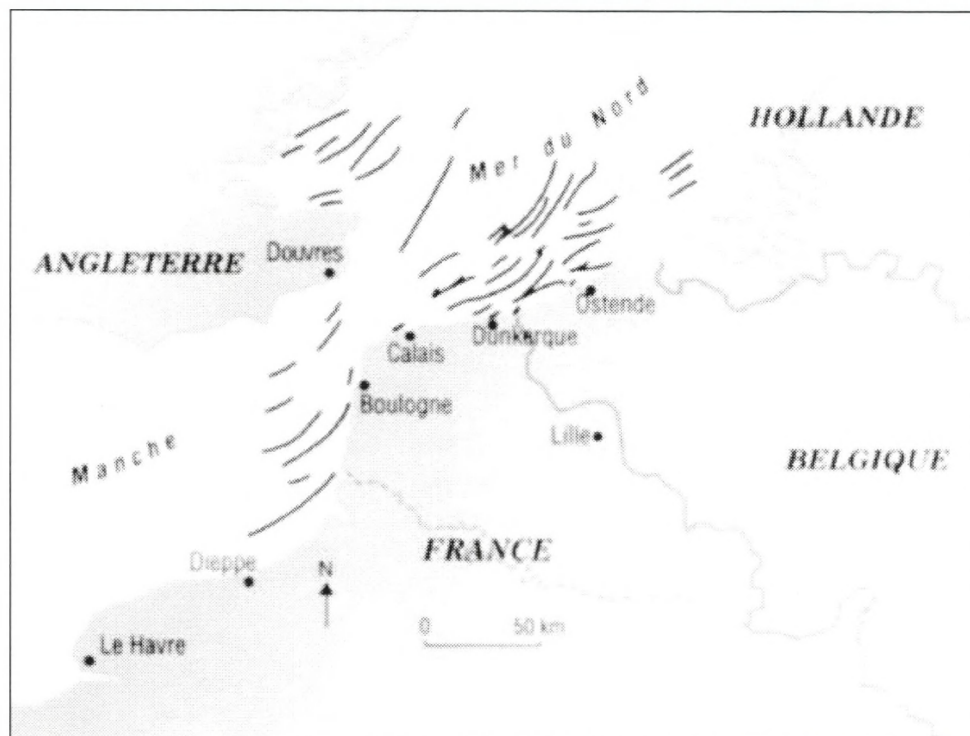


Figure 3 : Répartition des bancs sableux en Manche orientale et dans le domaine sud de la Mer du Nord (extrait de Augris & Clabaut, 2001).

Les bancs sont regroupés en divers ensembles en fonction de leur orientation générale. Les figures 4 et 5 illustrent la répartition et la morphologie générale de ces bancs sur le plateau continental belge.

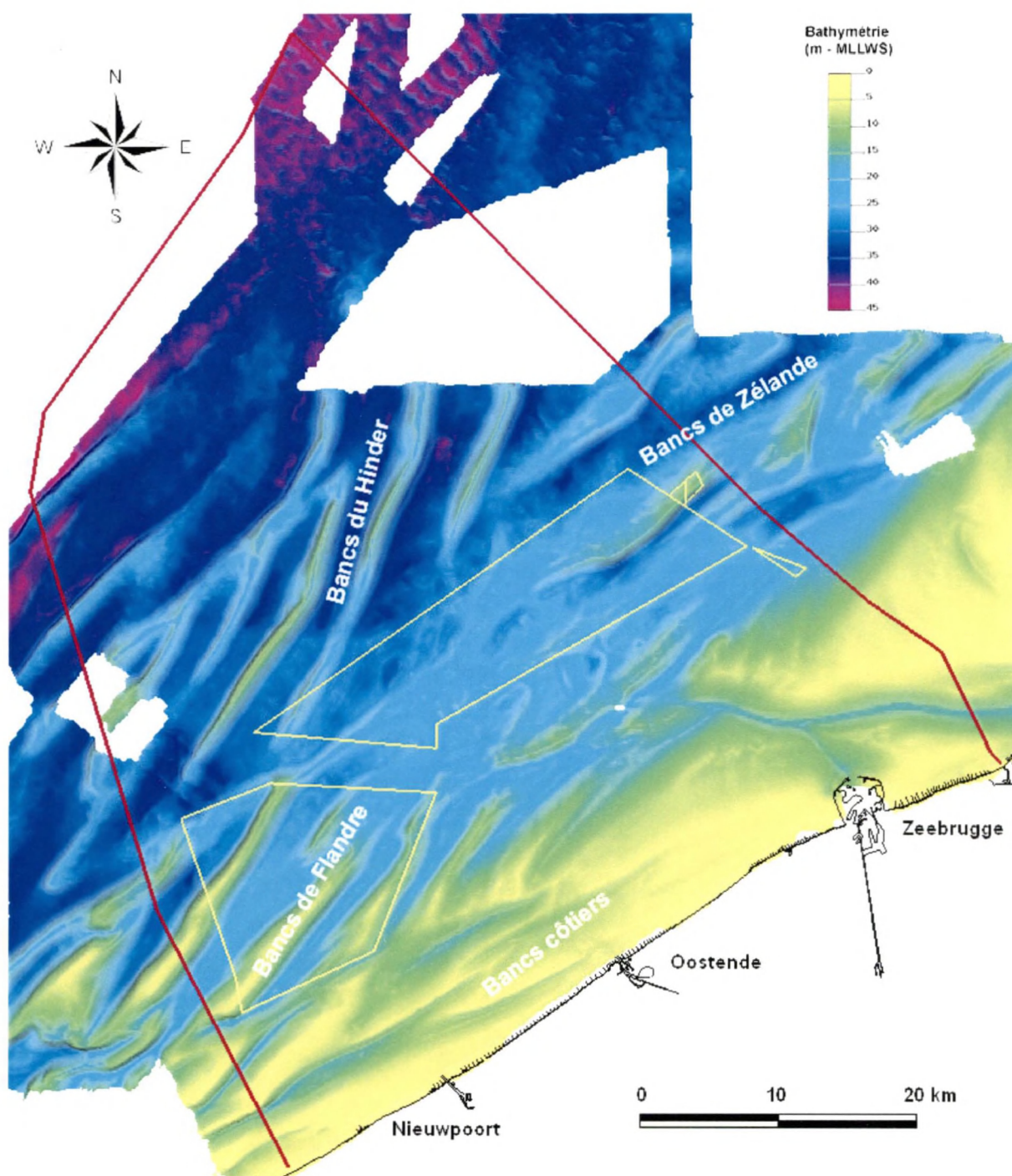


Figure 4 : Modèle de terrain général du plateau continental belge (résolution 200X200 m) ; données de base : points acquis en sonar monofaisceau par le Service Hydrographique d'Oostende ; modélisation : Fonds ; en rouge : limite nationale ; en jaune : limites de concession.

La concession 2 recouvre une partie de la zone des bancs de Flandres. Ce groupe de bancs a une orientation SO-NE, oblique à la ligne de côte. Chacun de ces bancs montre une longueur de 20 à 30 km, une largeur de 1 à 2 km et une hauteur de 10 à 20 m. La taille générale des bancs diminue d'ouest en est.

Les bancs de Flandre sont asymétriques. Ils montrent un flanc raide orienté NO en direction du large et un flanc doux moins déclive orienté au SE vers la côte.

Les bancs sont séparés par des chenaux dont la profondeur augmente vers l'ouest. Dans la zone de concession 2, la bathymétrie va de 5 m dans la zone la plus haute du Kwintebank à 30 m pour les parties les plus profondes du chenal occidental bordant l'Oostdyck.

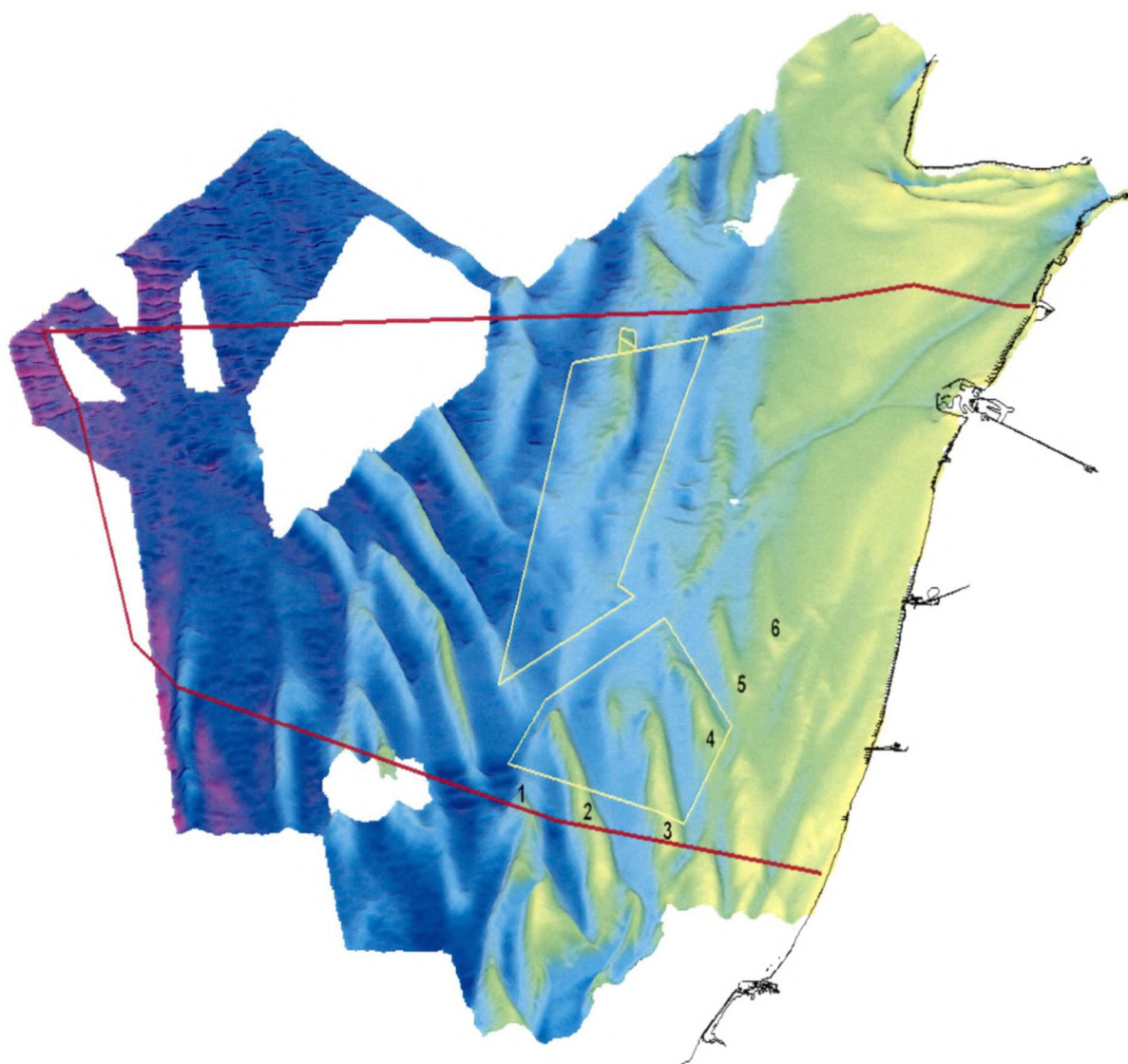


Figure 5 : Vue 3D (SW-NE) du modèle de terrain général du plateau continental belge (voir figure 3 pour échelle) ; 1-6 = Bancs de Flandre ; 1 = Bergues, 2 = Oostdyck, 3 = Buitenratel, 4 = Kwintebank, 5 = Middelkerke et 6 = Oostende.

Ce travail concerne essentiellement le Kwintebank, banc le plus oriental de la zone de concession 2 et le chenal séparant ce banc de son voisin occidental le Buitenratel (« kwintegeul »).

Rappelons qu'en terme de volume de sables et de graviers extraits, le Kwintebank est le banc le plus exploité du plateau continental, totalisant plus de 90 % de la production (Degrendele *et al.*, 2002).

De manière générale, tous les bancs sont modélés par des dunes (structures sédimentaires transversales perpendiculaires au courant qui les génère). Ces figures sédimentaires sont caractérisées par leur longueur d'onde λ et leur amplitude A (tableau 3).

		Dunes sous-aquatiques							
λ (m)	Rides	0,6	petites	5	moyennes	10	grandes	100	très grandes
A (m)		0,06		0,25		0,5		3	

Tableau 3 : Définition des structures sédimentaires transversales en fonction de leur amplitude A et de leur longueur d'onde λ (Ashley, 1990 & Berné *et al.*, 1989).

Les dunes sous-aquatiques, obliques à la direction générale du banc, s'organisent suivant une hiérarchie très tranchée, les dunes de courte longueur d'onde se superposant aux dunes de longueur d'onde d'ordre supérieur (figure 4).

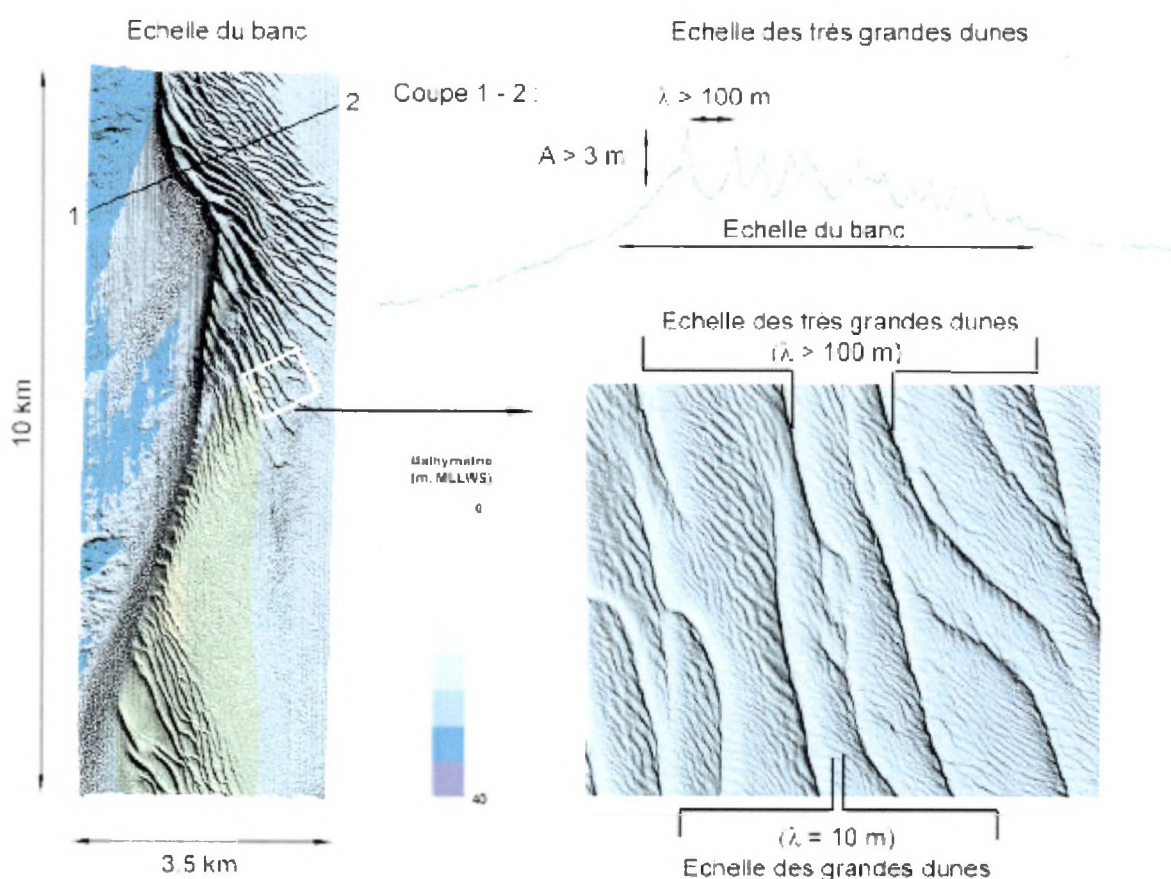


Figure 6 : Cartographie des structures sédimentaires transversales associées au Kwintebank ; modèle de terrain du Kwintebank établi à partir des données sonar multifaisceaux acquises par le Fonds ; les structures d'échelle inférieure aux dunes moyennes (rides et petites dunes) sont en deçà du pouvoir de résolution du sonar.

La cartographie des structures transverses est fondamentale. En effet, l'échelle et la morphologie des dunes reflètent la dynamique sédimentaire responsable de leur formation. Leur taille est corrélée avec leur durée de vie et leur asymétrie fournit le sens de déplacement du sédiment.

2.2. Géologie

2.2.1. Géologie pré-quaternaire

La connaissance du soubassement géologique pré-quaternaire de la partie Sud de la Mer du Nord provient des données indirectes issues de la géophysique (sismique) et des forages effectués par le Service géologique (Cameron *et al.*, 1993 et Laga & Vandenberghe, 1989).

L'écorché géologique pré-quaternaire du plateau continental est présenté à la figure 7 ci-dessous.

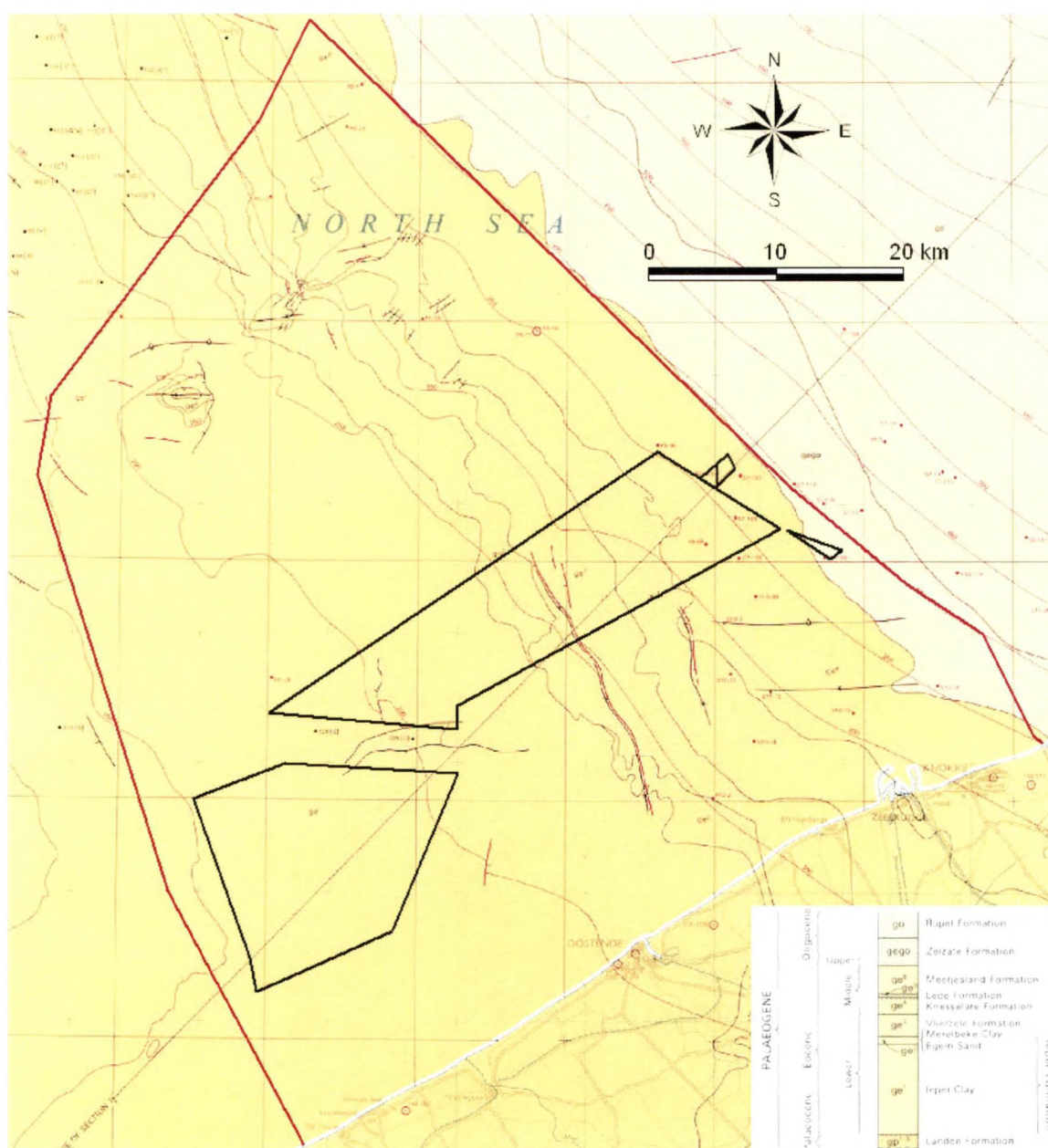


Figure 7 : Carte géologique pré-quaternaire du plateau continental belge
(Source : BGS-RGD-BGD, 1991 ; Ostend Sheet 51°N-02°E ; échelle originale : 1/250 000)

Le substratum pré-quaternaire du plateau continental est constitué de Formations argilo-sableuses d'Âge Eocène à Oligocène inférieur. Ces Formations dessinent une série monoclinale orientée grosso modo NNO-SSE, en pente faible (0.5 à 1°) vers le NE. Depuis la limite occidentale jusqu'à la partie médiane de la zone de concession 1, le substratum est constitué par la Formation de l'Argile d'Ypres (ge¹, Eocène inférieur). Homogène, cette formation d'origine marine est composée essentiellement d'argile silteuse. Son épaisseur est de l'ordre de 150 m. Vers l'est, au-delà de la partie médiane de la zone de concession 1, l'Argile d'Ypres est couverte par une série de Formations plus sableuses (successivement : Sables d'Egem et Argiles de Merelbeke ge², Formations sableuses de Vlierzele ge³, de Knesselare ge⁴ et de Lede ge⁵, Formation de Meetjesland ge⁶ composée d'argile glauconieuse et de sable fin, Formation sableuse de Zelsate gego).

Les profils sismiques révèlent que l'Argile d'Ypres est affectée par des déformations intraformationnelles qui seraient liées à sa perméabilité moindre par rapport aux terrains sableux qui l'encadrent. Par rééquilibrage brusque des pressions verticales, ce type de déformation entraîne une rupture en bloc le long de failles subverticales. Les rejets peuvent atteindre 4 m (Liu, 1990). Ces failles sont certainement à l'origine des ruptures topographiques brusques que nous pouvons observer actuellement sur le plateau continental⁴.

2.2.2. Géologie quaternaire

2.2.2.1. La surface de base du quaternaire

La compilation et l'analyse détaillée des profils sismiques acquis sur le plateau continental a permis d'établir un modèle de la surface d'érosion au toit du Tertiaire (Liu, 1990). Cette surface pénéplainée se caractérise par différents ensembles morphologiques : plateformes, pentes, escarpements, dépressions d'érosion et vallées (figure 8 page suivante). Elle serait essentiellement le résultat de phases successives d'abrasion marine et d'érosion glaciaire durant le Pléistocène.

La partie orientale de la zone de concession 2 empiète sur la paléovallée d'Oostende, vallée asymétrique faiblement creusée qui présente un versant NE plus abrupt. La paléovallée d'Oostende se caractérise par un système de chenaux et par des dépressions subcirculaires (« scour hollow »). Les surcreusements locaux de l'Argile d'Ypres peuvent dépasser 20 m. Ils seraient liés à des courants fluviatiles ou tidaux (Liu *et al.*, 1993).

Les graviers du plateau continental ont comme première origine les dépôts fluviatiles liés au creusement de la paléovallée d'Oostende. Ce creusement a pu être initié au Saalien (Pléistocène moyen, 170.000 - 130.000 BP⁵). Postérieurement, les remaniements de ces dépôts fluviatiles durant les phases successives de transgression ont conduit à la formation de dépôts de remplissage de nature polygénique et résiduelle tapissant les dépressions de la surface de base du quaternaire. Ces dépôts résiduels, témoins de la dernière glaciation, seraient d'Âge Weichselien (70.000 – 10.000 BP).

⁴ voir figures 3 et 4 respectivement pages 8 et 9

⁵ BP = (years) Before Present

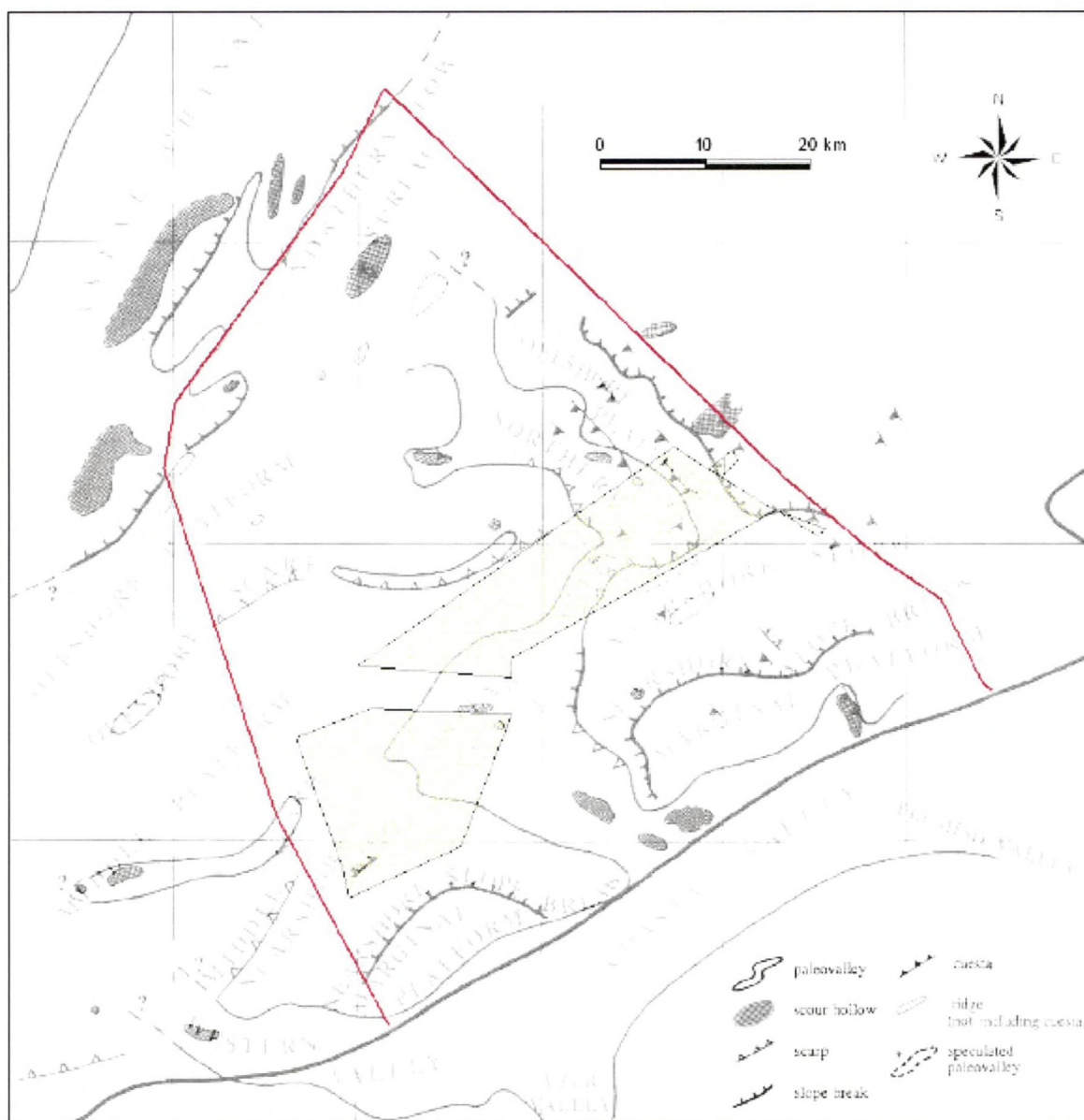


Figure 8 : Unités géomorphologiques de la surface de base du Quaternaire (d'après Liu, 1990).

Dans le cadre des travaux de cartographie effectués par le Fonds sur les zones de concession, la connaissance précise de la topographie de la surface de base du quaternaire est fondamentale :

- elle constitue la surface de référence permettant d'évaluer objectivement le volume sédimentaire d'un banc relativement à ses limites naturelles;
- la répartition des graviers est conditionnée par le modelé de cette surface d'érosion.

Pour cette raison, une digitalisation des données sismiques acquises pour le compte du Ministère des Affaires Economiques - Service géologique a été en partie effectuée par le Fonds. Ce travail est toujours en cours pour la zone de concession 2.

Afin d'illustrer l'intérêt de ce projet, la figure 9 présente le modèle de terrain établi à partir des profils sismiques digitalisés de la surface de base du quaternaire sous la

topographie actuelle du Kwintebank. Cette carte révèle la pente douce du flanc occidental de la paléovallée d'Oostende sous la topographie actuelle du Kwintebank. Des dépressions subcirculaires caractérisent la surface de base du quaternaire dans la partie septentrionale de la carte. Ces dépressions marquent l'axe NO-SE de la paléovallée d'Oostende. En particulier, une dépression affecte la bordure NO du chenal bordant le Kwintebank. En coïncidence spatiale avec cette dépression, la topographie actuelle montre également une inflexion. Ce type de structure constitue un site potentiel d'accumulation privilégiée de graviers résiduels.

Dans le chenal (« kwintegeul ») en bordure occidentale du banc, les deux surfaces topographiques se rejoignent en différents endroits, formant une suite d'aplots orientés SO-NE. Dans cette zone, l'Argile d'Ypres affleurent directement sur le fonds marin sans aucune couverture de sédiments quaternaires.

Entre la surface couverte par le modèle topographique actuel du banc et la surface basale du quaternaire, le volume de sédiments est de l'ordre de $300 \times 10^6 \text{ m}^3$.

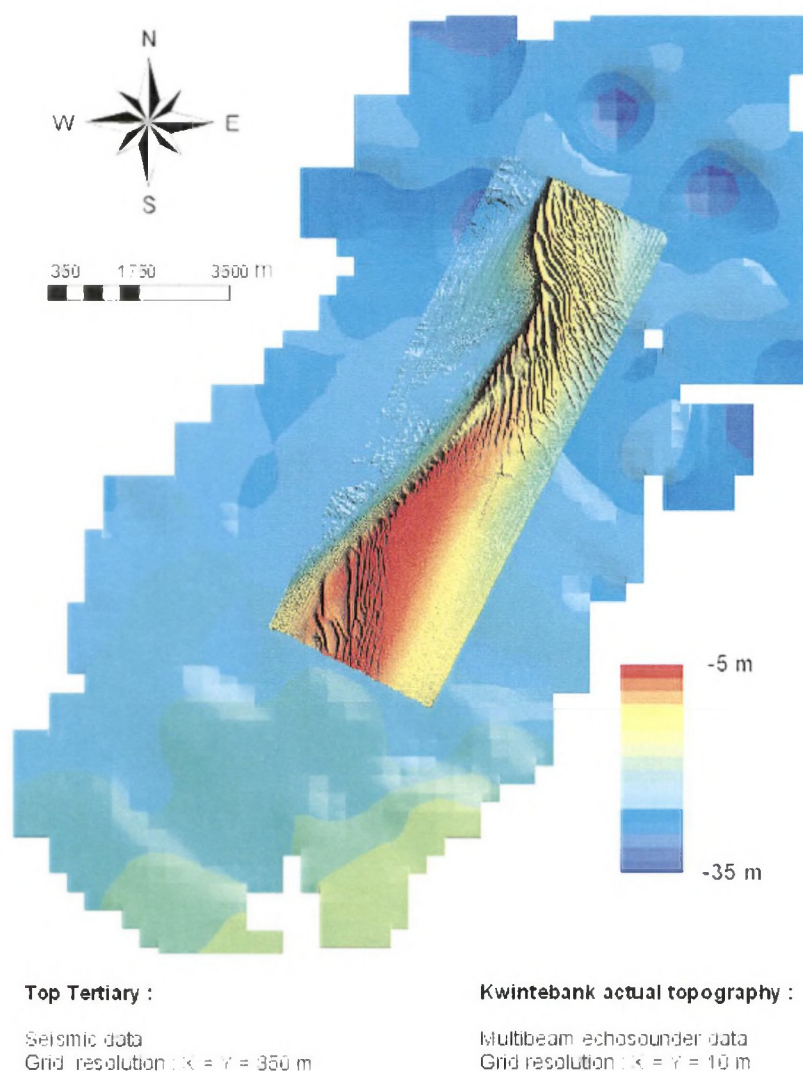


Figure 9 : Carte de la surface de base du quaternaire et de la bathymétrie actuelle du Kwintebank ; les deux surfaces topographiques sont présentées strictement aux mêmes échelles horizontale et verticale ; données sismiques de base : Henriët & De Vos, 1983 ; digitalisation et modélisation : Goethals & Roche, 2000 ; sonar multifaisceaux : Fonds, 1999-2000.

2.2.2.2. Les bancs de sable

De manière globale, les bancs de sable peuvent être visualisés comme la superposition de deux unités principales :

- une unité inférieure complexe constituant le corps principal du banc ; la structure interne de cette unité montre différentes phases de dépôts qui traduisent l'édification du banc et ses déplacements sous l'effet des tempêtes et des courants de marée ;
- l'unité supérieure constitue l'enveloppe du banc qui est actuellement mobile sous l'action des courants de marée.

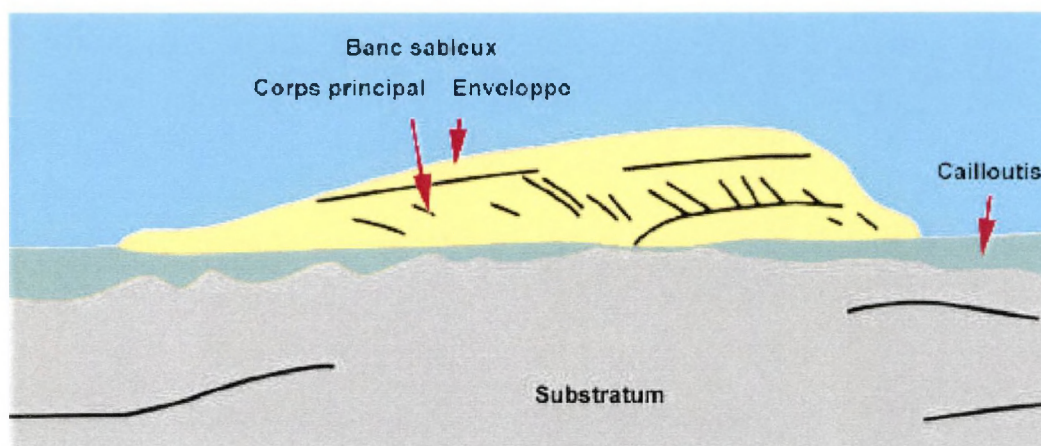


Figure 10 : Architecture générale d'un banc de sable (d'après Augris & Clabaut, 2001).

Le mécanisme précis de mise en place des bancs reste encore un sujet de controverse :

- ? développement autour de noyaux tertiaires, pléistocènes ou holocènes précoces épargnés par l'érosion fluviale et non remaniés lors de la transgression ;
- ? ancienne lignes de côtes détachées et isolées des terres sous l'action des courants de marée.

En revanche, la liaison stratigraphique entre les bancs de sable et la dernière remontée du niveau marin (transgression flandrienne) semble bien établie.

Le Quaternaire est caractérisé par une succession de cycles glaciaires et interglaciaires. A ces variations climatiques rapides sont associées des variations du niveau marin et un déplacement des lignes de rivage (cycles glacio-eustatiques).

La transgression flandrienne marque la base de l'Holocène. Elle fait suite à la période glaciaire weichselienne (Pléistocène récent) dont le maximum glaciaire est daté de 18000 BP. La transgression flandrienne s'amorce vers 15000 BP. Vers 9000 BP, le niveau marin arrive à -40 m par rapport au niveau moyen actuel. La connexion entre la Mer du Nord et la Manche s'établit durant cette période. La remontée du

niveau marin se poursuit jusqu'au niveau actuel qui est atteint vers 2000 BP.

Les travaux récents utilisant la sismique haute résolution mettent en évidence la complexité de la structure interne des bancs. Ces données sismiques révèlent une édification en plusieurs phases.

Dans la zone des bancs de Flandre, le banc de Middelkerke voisin du Kwintebank à fait l'objet d'un projet de recherche pluridisciplinaire approfondi (De Moor & Lanckneus, 1993). L'analyse des profils issus de la sismique haute résolution permet de reconnaître 7 unités (figure 11).

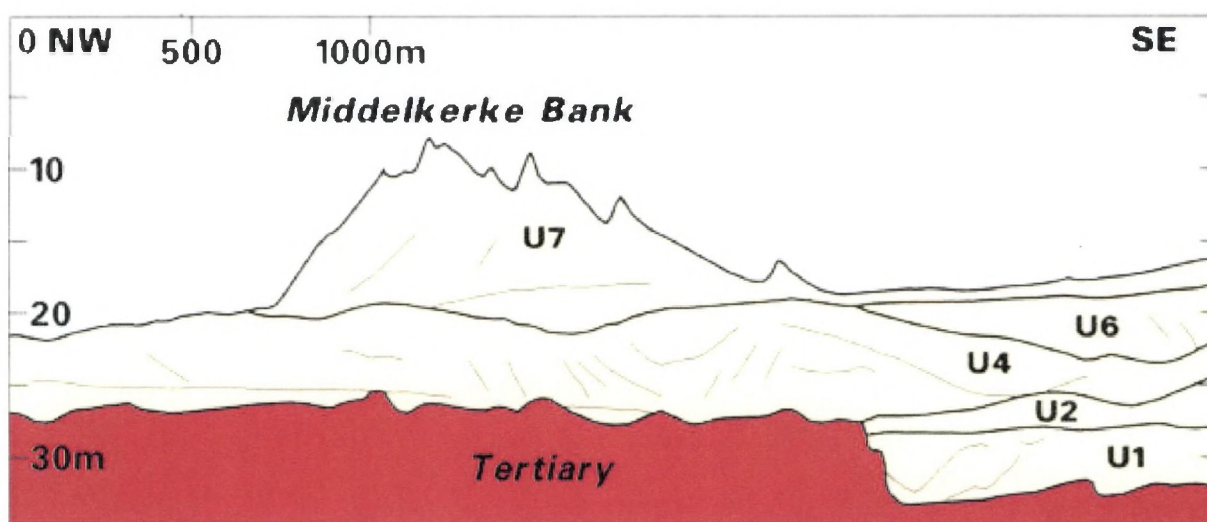


Figure 11 : Coupe sismique dans la partie médiane du banc de Middelkerke (extrait de la carte « Middelkerke bank Southern North Sea », Project RESECUSED, Coordination and edition : De Moor & Lanckneus, 1993).

L'interprétation géologique de ces 7 unités sismiques calées par rapport à un réseau de 125 forages (vibrocores) permet de reconstituer l'historique de l'édification du banc (Trentesaux *et al.*, 1999).

Quatre phases sont reconnues :

PHASE	UNITES SISMQUES	CARACTERISTIQUES	AGE	
4	U7	Banc tidal <i>sensu stricto</i> conditions hydrodynamiques actuelles	?	HOLOCENE
3	U5 – U6	Banc côtier de faciès intermédiaire entre banc tidal et banc de tempête	± 4000 BP	
2	U4	Dépôts lagunaires sub-littoraux	5000-8000 BP	
1	U1 - U3	Remplissage de chenaux : faciès d'incision en environnement estuarien	?	WEICHSELIEN - PLEISTOCENE RECENT

Tableau 4 : Phases d'édification du banc Middelkerke (d'après Trentesaux *et al.*, 1999).

2.2.2.3. Les sédiments dans la zone de concession 2

Ce sous-chapitre est introduit par une description sommaire de la méthode de prélèvements, de la procédure d'analyse granulométrique et de la classification des sédiments utilisées par le Fonds.

Plusieurs systèmes permettent le prélèvements de sédiments marins de surface à partir du pont d'un navire. Concrètement, dans le cadre des travaux effectués par le Fonds, les sédiments sont généralement prélevés par benne Van Veen (figure 11).

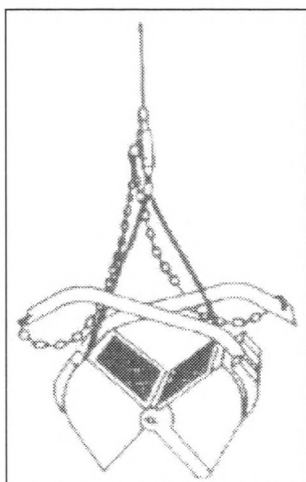


Figure 12 : Benne Van Veen pour le prélèvement de sédiment de surface; la benne treuillée est mise à l'eau en position ouverte, un système de loquet permet sa fermeture lorsqu'elle touche le sédiment.

Les analyses effectuées sur les prélèvements par benne Van Veen sont les suivantes :

1. Analyse granulométrique par tamisage sur une fraction (200 gr) de l'échantillon. Les valeurs des mailles des tamis utilisées sont les suivantes :

Graviers		Sables		Boues	
mm	Phi ϕ	μm	Phi ϕ	μm	Phi ϕ
32	-5	2000	-1.0	80	3.6
16	-4	1000	0.0	63	4.0
8	-3	710	0.5	50	4.3
4	-2	500	1.0		
		355	1.5		
		300	1.7		
		250	2.0		
		180	2.5		
		125	3.0		
		90	3.5		
Phi ϕ = $-\log_2$ (diamètre en mm)					

Tableau 5 : Echelle des mailles des tamis pour les trois grandes classes granulométriques (Vernemmen & Degrendele, 2000).

2. Mesure de la fraction carbonatée CaCO_3 par décalcification à l'HCl.
3. Analyse granulométrique de la fraction décalcifiée comprise entre 50 μm et 4 mm.

Parmi les paramètres estimés, citons les deux indices de position et de dispersion calculés à partir de la courbe granulométrique (diagramme des pesées des refus des tamis exprimées en fréquences cumulées, en fonction des différentes mailles des tamis). Ces paramètres permettent de résumer la distribution granulométrique :

Indice Moyen	$M = \frac{\phi 16 + \phi 50 + \phi 84}{3}$	Mesure l'énergie (vitesse du courant)
Indice de Classement « sorting index »	$\sigma = \frac{\phi 84 - \phi 16}{4} - \frac{\phi 95 - \phi 5}{6,6}$	Mesure la maturité (temps de résidence aux agents hydrodynamique)

Tableau 6 : Paramètres granulométriques (Folk & Ward, 1957).

La figure 12 présente la classification granulométrique des sédiments en fonction de l'échelle granulométrique. Cette classification est utilisée dans le cadre de ce travail.

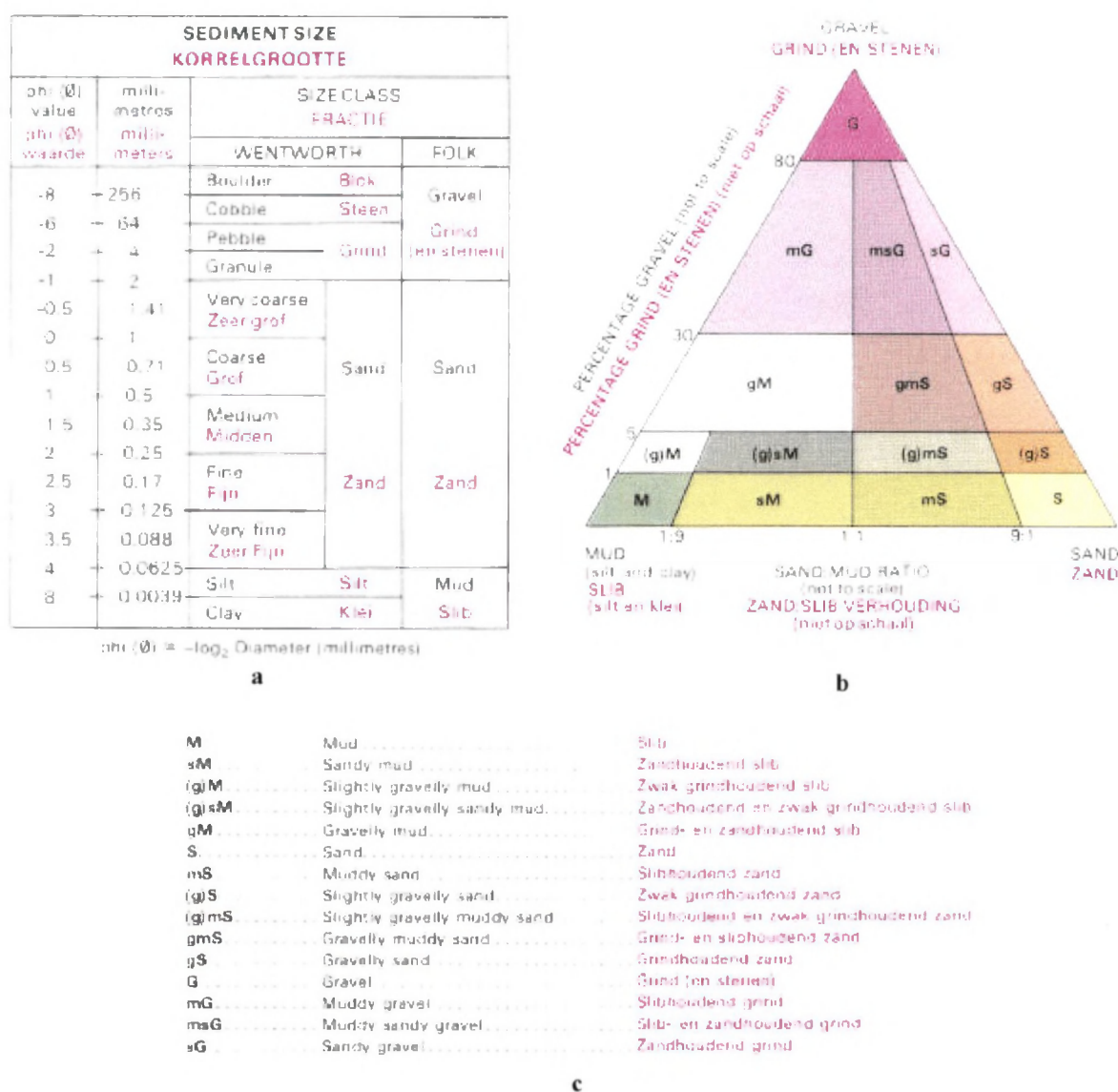


Figure 13 : Classification des sédiments ; a : échelle granulométrique ; b : diagramme triangulaire gravier-sable-boue ; c : définition des domaines du diagramme triangulaire (Source : BGS-RGD-BGD, Ostend Sheet 51°N-02°E ; Sea bed sediments and Holocene geology).

Globalement, la répartition des sédiments superficiels du plateau continental peut être corrélée avec l'intensité moyenne des courants de marée de vives eaux (Ceuleneer & Lauwaert, 1987) :

- lorsque celle-ci est supérieure à 1 m/s, le fonds est essentiellement graveleux. Dans ces zones, les sables sont mobilisés.
- Les sables présentent deux modes de gisements, soit en nappes, généralement de faibles épaisseurs (de l'ordre du m) et d'étendues kilométriques soit en bancs. Dans les zones où les courants dépassent 1 m/s, les sables participent à la construction des bancs. Les nappes sableuses se forment typiquement dans les zones où les courants sont inférieurs au m/s ;
- Les boues envahissent les zones les moins dynamiques où la vitesse maximale des courants ne dépassent pas 0.5 m/s.

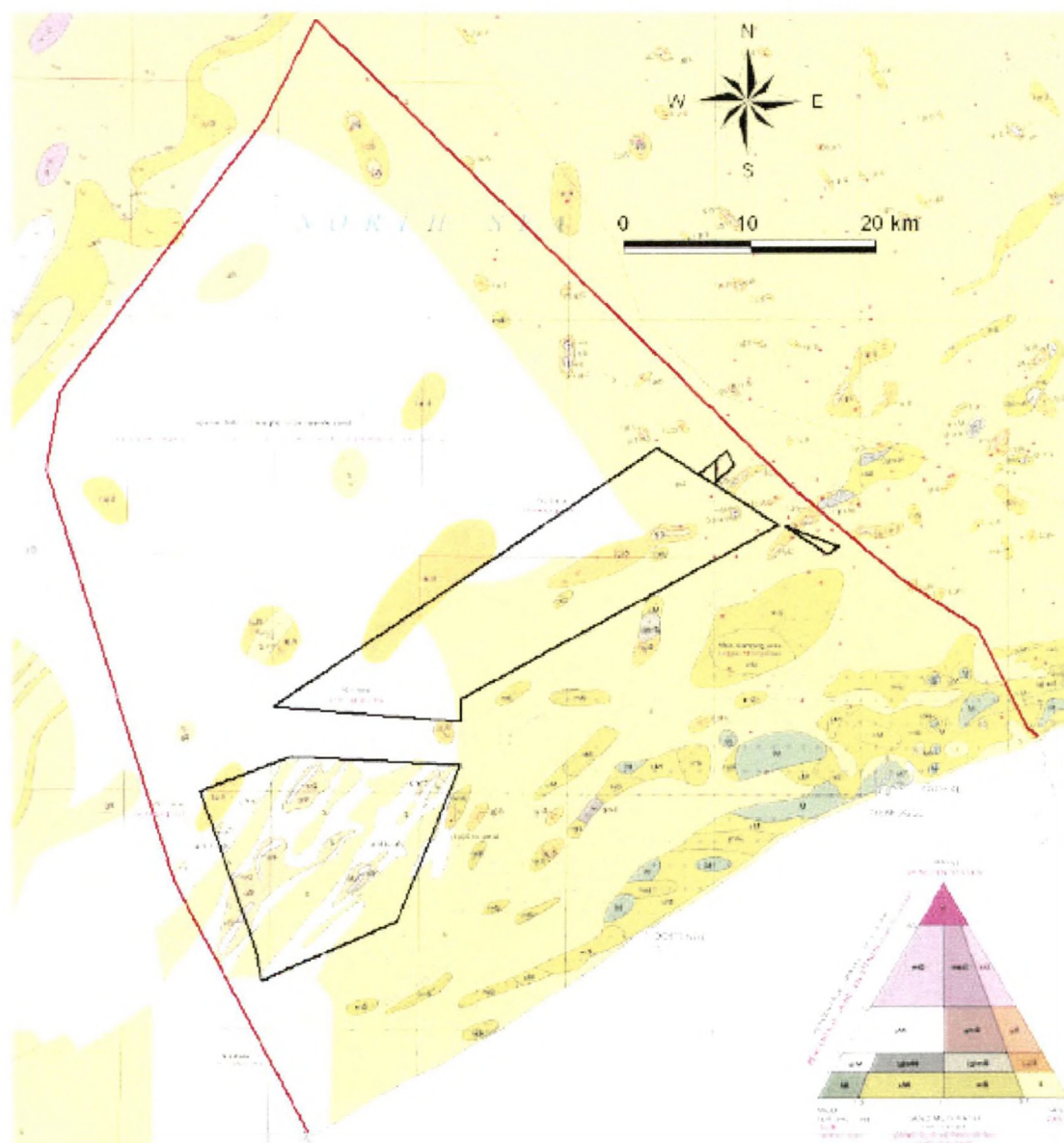


Figure 14 : Carte des sédiments superficiels (Source : BGS-RGD-BGD, 1991 ; Ostend Sheet 51°N-02°E ; Sea bed sediments and Holocene geology ; échelle originale : 1/250 000).

Les analyses des sédiments dans la zone de concession 2 et sur le banc de Middelkerke (De Moor, 1984, Lanckneus, 1989, Tytgat, 1989, Trentesaux, 1993 et Vernemmen & Degrendele, 2000) montrent que l'essentiel du stock sédimentaire est constitué de sables et de graviers (voir également la carte des sédiments superficiels figure 14, page 19). Ces études mettent en évidence le contraste entre les bancs et les chenaux. La répartition des sédiments montre les tendances générales suivantes :

Graviers	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fortes concentrations dans les chenaux interbancs ➤ Absence au sommet des bancs
Sables	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Répartition granulométrique en relation avec la bathymétrie du banc : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Sables fins dominant les parties basses du banc ➤ Sables plus grossiers dominant la crête du banc ➤ Corrélation positive entre l'Indice Moyen et le % en CaCO_3 ➤ Classement faible dans les chenaux, plus élevé sur les bancs
Boues	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Teneurs très faibles (< 2 %) sur les bancs ➤ Teneurs comprises entre 2 et 10 % dans les chenaux interbancs

Tableau 7 :
Tendances de la répartition des sédiments
(zone de concession 2 et banc de Middelkerke).

La répartition des graviers montre une grande cohérence dans toute la zone des bancs de Flandre. Leur répartition, limitée en surface à des champs confinés aux zones des chenaux, confirme le caractère résiduel de ces dépôts.

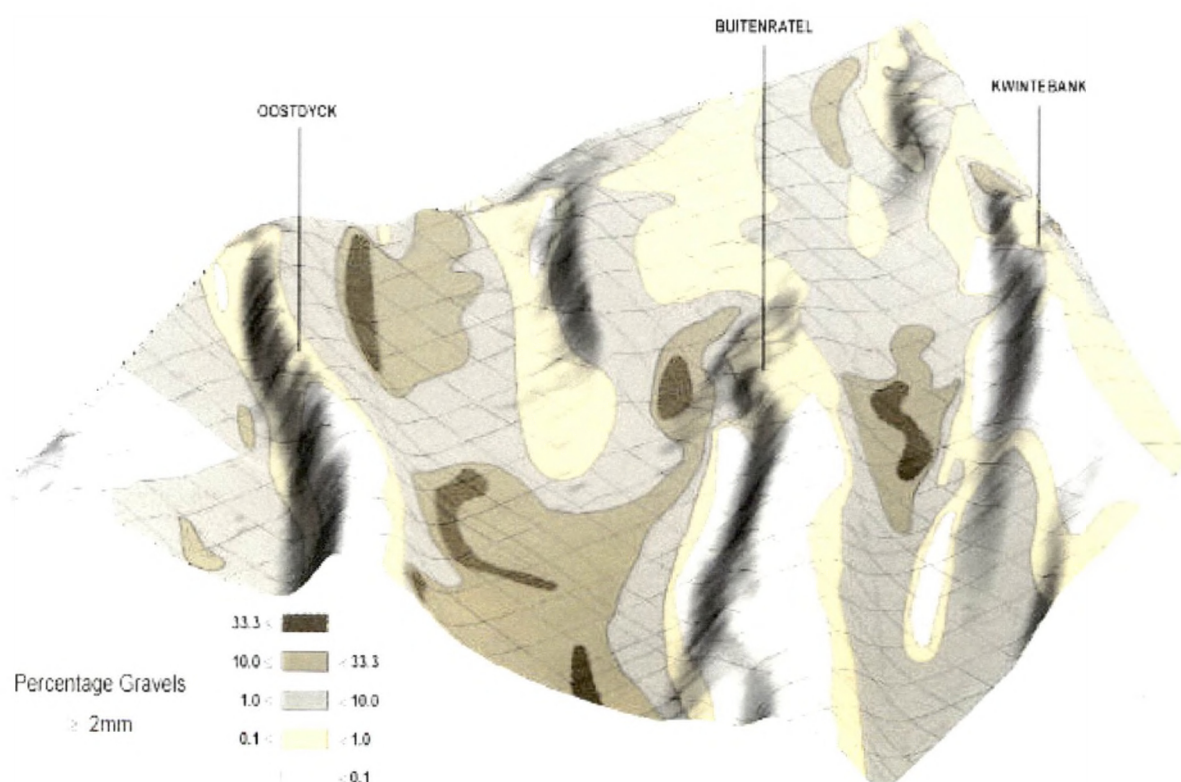


Figure 15 : Superposition de la carte du pourcentage des graviers sur le modèle de terrain général du plateau continental belge limité à la zone de concession 2 (Sources : carte du pourcentage des graviers : Ceuleneer & Lauwaert, 1987, échelle originale : 1/40 000 ; Modèle de terrain général du plateau continental belge (résolution 200X200 m) ; données de base : points acquis en sonar monofaisceau par le Service Hydrographique d'Oostende ; modélisation : Fonds).

2.3. Dynamique sédimentaire actuelle

Comme l'atteste le sub-parallélisme entre la direction générale des bancs et l'axe d'allongement du grand axe des ellipses de marée, les bancs de sable sont des structures dominés par les courants de marée, d'où leur appellation commune de bancs tidaux.

La connaissance des paramètres hydrodynamiques est essentielle à la compréhension de la dynamique sédimentaire actuelle de ces structures. A titre d'exemple, des enregistrements effectués en bordure NO du Middelkerke (figure 5 d'après Stolk in De Moor *et al.*, 1993) fournissent les valeurs représentatives suivantes :

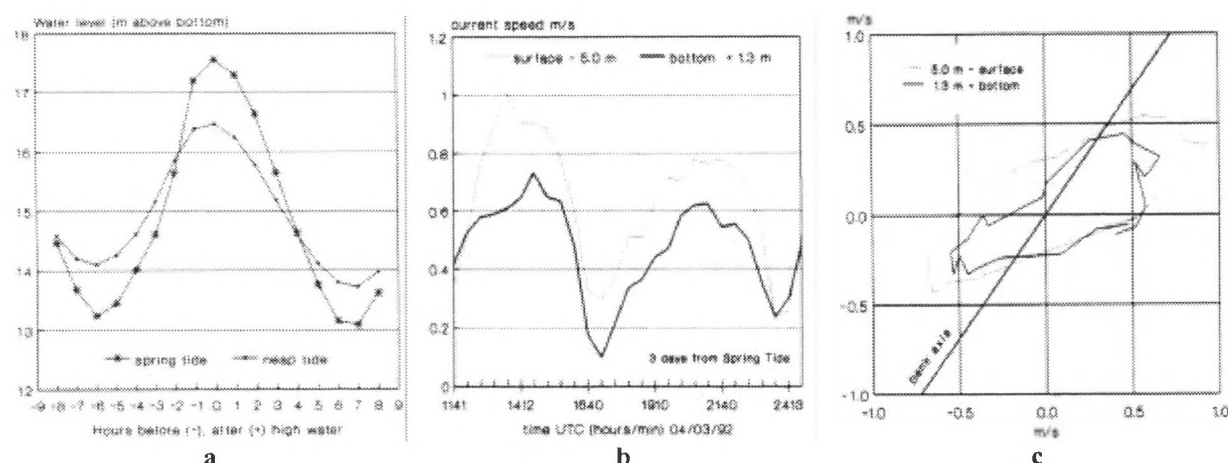


Figure 16. a : courbe marégraphique ; b : vitesse des courants mesurés lors d'un cycle de marée ; c : vitesse et orientation des courants mesurés lors d'un cycle de marée ; station G1 bord NW du banc de Middelkerke (Stolk in De Moor *et al.*, 1993).

De manière générale, pour la zone des bancs de Flandre, on retiendra les faits suivants :

- le marnage est de type intermédiaire entre méso et macrotidal, atteignant 4 m en période de marée de vives eaux;
- les courants tidaux mesurés en surface (- 5 m de profondeur) peuvent atteindre des valeurs de 1 m/s ;
- les ellipses des courants de marée sont fortement allongées, indiquant un flot portant vers le NE et un jusant portant vers le SE.

Par rapport à la direction générale SO-NE des bancs, le grand axe des ellipses des courants de marée montre un angle de l'ordre de 25 %.

Par ailleurs, le mouvement des sédiments ne débute qu'au-delà d'un seuil critique appelé vitesse d'entraînement, fonction de la granulométrie. Des vitesses de 0,3 à 0,5 m/s à 1 m au dessus du fond, sont nécessaires pour mettre en mouvement un sable fin à moyen compris entre 0,2 et 0,5 mm. Une différence de 5 % entre les vitesses des courants de flot et de jusant suffit à déterminer une orientation nette du transit sédimentaire dans la direction du flot (Augris & Clabaut, 2001).

Les caractéristiques géométriques des structures sédimentaires transverses associées aux bancs et aux chenaux⁶ révèlent le sens du transport résiduel des sédiments.

Sur le Kwintebank et dans les chenaux adjacents, l'analyse de la géométrie des dunes par sonar à balayage latéral (« sidescan sonar ») et la mise en parallèle avec les données hydrodynamiques conduit De Moor (1984) à présenter un modèle de maintenance du banc.

L'apport résiduel de sable se fait de part et d'autre du banc, au départ des chenaux, vers les flancs et la crête du banc. Le flanc occidental abrupt du banc est sous l'influence dominante du flot et le transit sédimentaire s'effectue du SO vers le NE. Le flanc oriental en pente douce du banc est nourri par le jusant de direction opposée à celle du flot. Tout ce passe comme si le sable effectuait un mouvement de rotation dextre autour du banc.

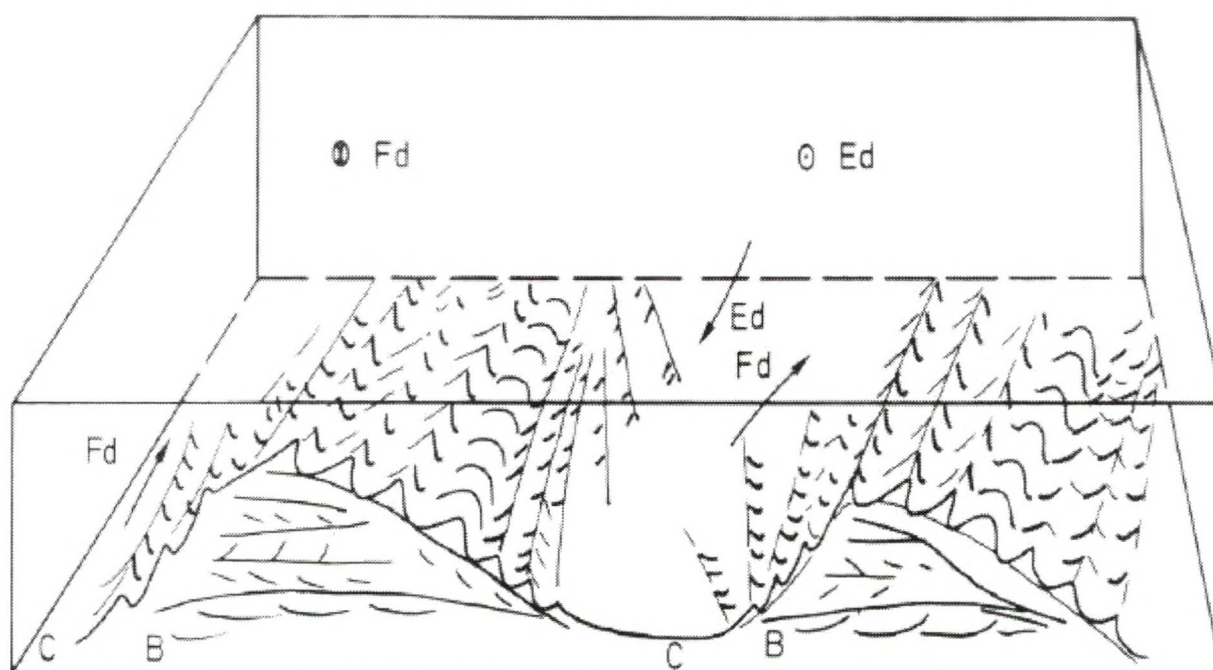


Figure 17 : Schéma illustrant le mécanisme de maintenance des bancs de sable par apport résiduel bilatéral à partir des chenaux sous l'effet des courants tidiaux (C = chenal, B = Banc, Fd = courant de flot, Ed = courant de jusant ; simplifié d'après De Moor, 1987).

Un tel mécanisme est susceptible d'assurer la conservation en « équilibre dynamique » des bancs de Flandre et permet d'expliquer leur grande stabilité sur plusieurs centaines d'années (Van Cauwenberghe, 1971).

A l'échelle du plateau continental belge et des régions limitrophes, les bancs de Flandre se situeraient à cheval entre une zone côtière où le transit sédimentaire est de direction SO-NE et une zone plus au large où le transit s'effectue en sens opposé (Stride *et al.*, 1982, Augris *et al.*, 1995 et Augris & Clabaut, 2001).

⁶ voir point 2.1., page 10

3. Le sonar multifaisceaux : aspect bathymétrique

3.1. Principe général de fonctionnement d'un sonar multifaisceaux

Ce sous-chapitre consacré au principe de fonctionnement et à l'architecture générale des sonars multifaisceaux s'inspire largement de Clarke J. H. (2001), de Moustier C. (2001), Mayer L. (2001) et Michaux P. (2001).

Fondamentalement, un sonar acoustique classique (monofaisceau) détermine la profondeur en :

- émettant une impulsion sonore au travers d'un faisceau dirigé selon la verticale du navire;
- mesurant le temps nécessaire au signal à parcourir le trajet navire/fond/navire;
- connaissant la vitesse du son, convertissant le temps mesuré en distance.

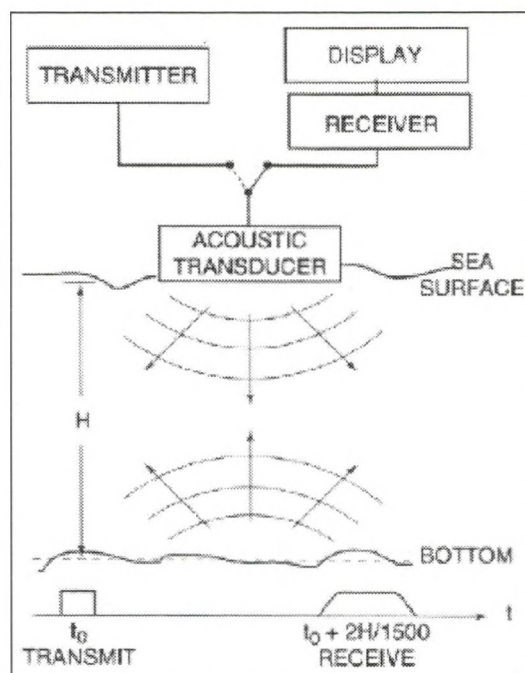


Figure 18 : Principe de base d'un sonar (Source : de Moustier, 2001).

La mesure de la vitesse du son dans l'eau est un facteur clef dans le calcul des profondeurs. Elle dépend des caractéristiques de l'eau au moment de la mesure (température, pression, salinité). En moyenne, pour l'eau de mer, elle est de l'ordre de 1500 m/s.

Les systèmes sonars multifaisceaux utilisent un déploiement d'émetteurs-récepteurs installés sous la coque du navire. La profondeur est mesurée simultanément dans plusieurs directions déterminées par la géométrie des faisceaux de réception du système.

Les faisceaux acoustiques forment une fauchée perpendiculaire à l'axe du navire. Au fur et à mesure que le navire avance, les profondeurs sont mesurées plusieurs fois par seconde pour chacun des faisceaux acoustiques. Les mesures successives forment une couverture de sondes bathymétriques perpendiculairement à la ligne de navigation. Les distances entre les lignes de navigation sont déterminées afin d'obtenir un chevauchement des mesures d'une ligne à l'autre, assurant ainsi la couverture complète de la zone à cartographier.

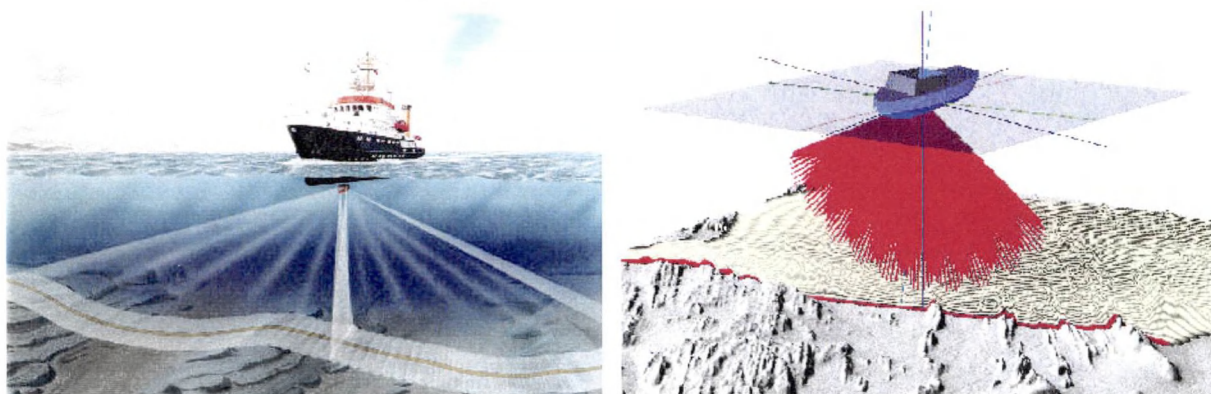


Figure 19 : Géométrie générale d'un sonar multifaisceaux (Source : Clarke, 2001).

La plupart des sondeurs multifaisceaux fonctionnent selon la technique dite des "faisceaux croisés" :

- Une impulsion sonore est émise au travers d'un lobe d'émission étroit dans la direction longitudinale (typiquement de l'ordre de 1 à 5 degrés) et large transversalement (typiquement 150 degrés);
- La réception se fait à l'aide de faisceaux assez larges longitudinalement (de l'ordre de 20 degrés) et étroits dans le plan transversal.

Pour chaque faisceau de réception, la zone du fond explorée (zone insonifiée = « foot print ») est l'intersection entre le lobe d'émission et le faisceau de réception.

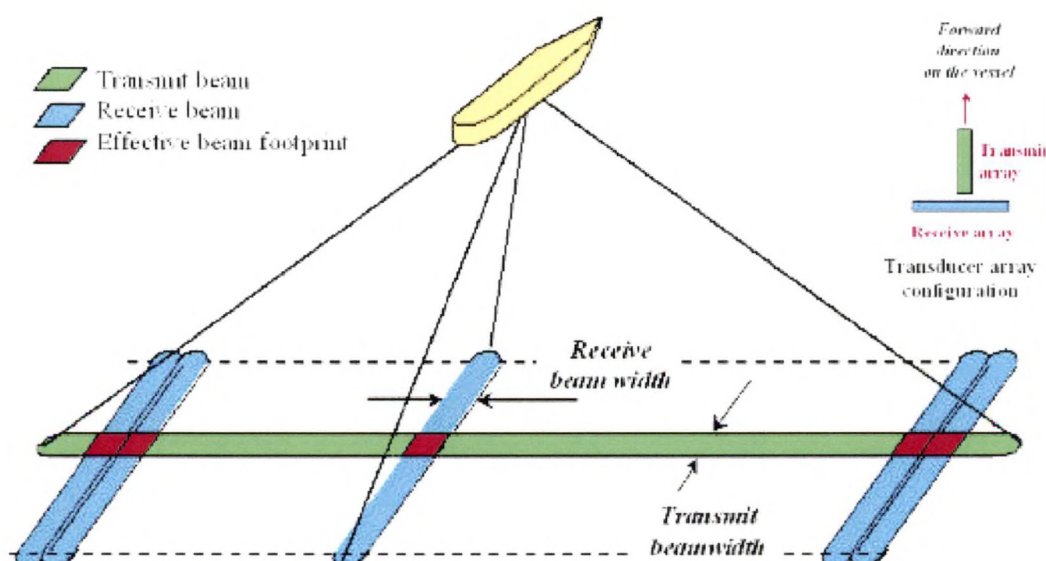


Figure 20 : Principe des faisceaux croisés (Source : Kongsberg – Simrad).

La mesure de la bathymétrie s'effectue par détection du temps de retour de l'impulsion sonore (détection de l'écho) pour chacun des faisceaux. Les sonars multifaisceaux utilisent deux types de détection :

- la détection par amplitude : l'instant de retour de l'impulsion est fixé au centre de gravité du signal sur une fenêtre de pré-détection. La qualité de la détection est déduite de l'énergie reçue. Ce type de détection est mal adaptée au cas des faisceaux latéraux ;
- la détection par décalage de phase (interférométrie) : ce principe de détection consiste à déterminer le retard d'arrivée du signal sur deux antennes de réception proches l'une de l'autre. Ce retard correspond à un déphasage. Pour un angle d'incidence donné, l'instant de détection est déterminé par le passage à zéro du décalage de phase. Cette grandeur est modélisée par une approximation polynomiale. La qualité de détection est déduite des résidus de cette approximation. La détection par phase offre en principe une résolution plus fine que la largeur du faisceau. Elle est toutefois inadaptée au cas des faisceaux verticaux.

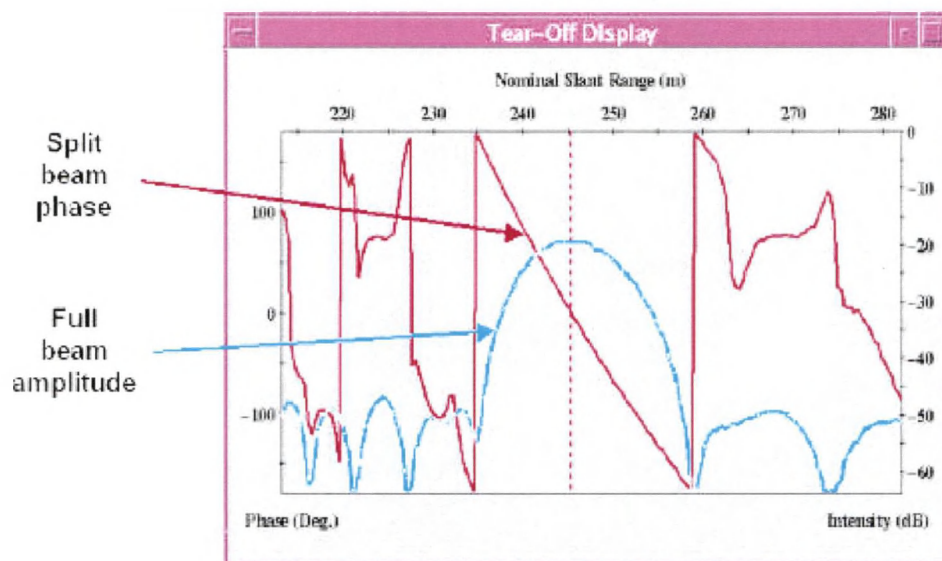


Figure 21 : Détection par décalage de phase (Source : Kongsberg-Simrad).

Pratiquement, les deux techniques de détection sont utilisées simultanément pour chacun des faisceaux. Le choix entre les deux mesures se fait en fonction de la valeur du critère de qualité de la détection par phase.

3.2. Architecture générale d'un sonar multifaisceaux

Un sonar multifaisceaux comprend :

- des antennes d'émission et de réception;

- une unité d'émission/réception génère le faisceau d'émission et assure la réception des signaux et leur traitement;
- un interface homme-machine : une station de travail qui permet à l'opérateur de piloter le sondeur et de contrôler son bon fonctionnement.

Afin de déterminer des sondes dans un repère absolu (profondeur associée à une position géographique), un sonar multifaisceaux doit être associé à différents senseurs auxiliaires :

- système de positionnement :

Le sondeur est relié à un système de localisation qui lui fournit la position. Actuellement, on utilise presque exclusivement le système GPS. Plusieurs modes de fonctionnement existent, suivant la précision requise : GPS naturel (précision décamétrique), différentiel (métrique) ou cinématique (décimétrique).

- centrale d'attitude, de cap et de pilonnement :

Les mesures de profondeur sont réparties de part et d'autre de la route du navire. Pour déterminer leurs positions géographiques, il est nécessaire de connaître le cap du navire. Pour connaître l'orientation des faisceaux par rapport à la verticale du lieu, il est nécessaire de mesurer le roulis et le tangage (l'attitude) du navire. Enfin, pour déterminer la profondeur par rapport à la surface moyenne, il est nécessaire de mesurer le pilonnement (mouvements verticaux) du navire. Actuellement, l'attitude, le cap et le pilonnement sont déterminées à l'aide de systèmes utilisant des techniques inertielles combinées à des mesures GPS. Des précisions de l'ordre de $0,05^\circ$ pour le cap, le roulis et le tangage et de 10 cm pour le pilonnement sont atteintes.

- mesure du profil de célérité :

Les variations de célérité provoquent une courbure des rayons sonores. Il est nécessaire, pour établir le trajet de l'onde sonore pour une incidence et une durée de trajet données de connaître la célérité du son dans l'eau (profil de célérité). Un profil de célérité est mesuré en station à l'aide d'un bathycélérimètre (mesure de la pression et de la célérité), ou d'une bathysonde (pression, température, salinité).

- mesure de la célérité de surface :

la formation correcte des faisceaux impose de connaître la célérité au voisinage des antennes. Il est donc souvent recommandé (dans le cas des antennes planes, notamment) de disposer d'un célérimètre de coque qui mesure en permanence la célérité de surface, utilisée pour la formation des faisceaux.

3.3. Le sonar multifaisceaux EM1002S et les senseurs associés

En accord avec les spécifications fournies par Kongsberg Simrad (EM1002, Product Description, 1999), les caractéristiques techniques de l'EM1002S financé par le Ministère des Affaires Economiques – Fonds et installé à bord du Belgica sont les suivantes :

Fréquence nominale	95 KHz
Nombre de faisceaux	111
Ouverture angulaire	150°
Largeur des faisceaux	2x2°
Répartition des faisceaux	Equiangulaire, équidistante ou mode mixte
Durée de l'impulsion sonore	0.2 ms
Fréquence d'émission	Maximum 10 Hz

Tableau 8 : Caractéristiques techniques du sonar multifaisceaux EM1002S (Source : Kongsberg-Simrad).

Pour une ouverture angulaire $> 100^\circ$, le faisceau d'émission est séparé en 3 secteurs. Différentes fréquences sont utilisées pour chacun des secteurs (92-98KHz). Les trois secteurs sont transmis séquentiellement à chaque impulsion.

Le sonar multifaisceaux EM1002S est interfacé avec différents senseurs :

- Système de positionnement DGPS Sercel NR103 :

Transmission à 1.6 Hz ;
 temps UTC;
 latitude à partir du parallèle 50° de l'ellipsoïde de référence WGS84;
 longitude WGS84;
 hauteur au dessus du niveau marin moyen;
 vitesse du bateau;
 cap du bateau;
 contrôle de qualité (fonction du nombre de satellites visibles).

Selon VERIPOS (gestionnaire du réseau des stations de référence DGPS couvrant le Nord-Ouest européen), la précision du positionnement est inférieure à 5 m. L'erreur moyenne serait de 6.6 m (Vanzielegheem T., 1998).

- Gyrocompas Anschutz Standard 20 :

transmission à 50 Hz ;
 angle du cap (erreur dynamique $< 0.04^\circ \times 1/\cos(\text{latitude})$).

- Senseur de mouvement du navire Seatex MRU5

transmission à 100 Hz ;
 angle du roulis (roll) ($\pm 0.05^\circ$);
 angle du tangage (pitch) ($\pm 0.05^\circ$);
 translation verticale liée au pilonnement (heave) (± 0.1 m).

- Thermosalinomètre SEACAT

transmission 0.2 Hz)

T° (± 0.01 °C)

conductivité (± 0.01 mmho/cm)

calcul de la vitesse du son à proximité du transducteur.

Selon Kongsberg Simrad, la précision totale du système EM1002S sur les profondeurs mesurées est de 10 cm RMS (Root Mean Square Error = Erreur résiduelle); l'erreur relative est de 0,2 % de la profondeur.

Afin de quantifier concrètement la variance globale de l'ensemble du système EM1002S installé à bord du Belgica, deux séries de mesure ont été effectuées sur une épave de grand gabarit (Birkenfels, N 51°39',040 - E 2°32',350). Après correction marégraphique et filtration des sondes ($m \pm 2\sigma$), la différence moyenne des valeurs bathymétriques filtrées est de 0,20 m pour une profondeur moyenne de 29,6 m. L'ordre de grandeur de l'erreur bathymétrique du système EM1002S installé à bord du Belgica est de 20 cm (Degrendele et al., 2001).



Figure 22 : Le sondeur multifaisceaux Kongsberg-Simrad EM1002S installé à bord du navire de recherche Belgica ; 1 : station de l'opérateur ; 2 : Seatex MRU5, senseur de mouvement du navire ; 3 : unité de contrôle, de transmission et de réception ; 4 et 5 : système mécanique de remontée du « transducteur » dans le sas ; 6 : le « transducteur ».

3.4. Acquisition et traitement des données sonar multifaisceaux

3.4.1. Acquisition des données à bord du Belgica

A bord, l'acquisition des données comprend les étapes suivantes :

- Mesure et entrée des paramètres de travail (« input et runtime parameters ») dans Merlin de Kongsberg Simrad, logiciel d'acquisition et de visualisation des données en temps réel (Système d'opération = UNIX) :
 - position du transducteur par rapport au plan d'eau;
 - profil de vitesse du son mesuré avec le bathycélérimètre SV PLUS Applied Microsystems LTD (précision = ± 0.06 m/s);
 - coefficient d'absorption.
- Calibration de l'attitude du navire (roulis et tangage);
- Visualisation de la bathymétrie, contrôle des paramètres, détermination des lignes de navigation et enregistrement des données via Merlin;
- Fin de campagne : sauvegarde des données sur Digital Data Storage.

3.4.2. Post-traitement des données

Les données brutes enregistrées à bord du Belgica sont transférées dans le Serveur SUN installé dans les bureaux du Ministère des Affaires Economiques - Fonds.

Le logiciel Neptune développé par Kongsberg Simrad est utilisé pour le post-traitement bathymétrique (Système d'Opération = UNIX) qui s'effectue en trois étapes :

- Correction des positions (sauts de DGPS, positions aberrantes...);
- Corrections des profondeurs :

A ce niveau s'effectue la correction marégraphique.

- Les fichiers de corrections marégraphiques sont établis suivant la méthode M2 développée par le Service Hydrographique d'Oostende (Ministère de la Région Flamande).
- L'appellation "M2" est à mettre en relation avec le caractère lunaire semi-diurnal des marées (période de 12 heures et 25 minutes) observées sur la côte belge.
- La méthode M2 de réduction marégraphique (Van Cauwenberghe et al., 1993) est basée sur le principe qu'en tout point en mer, la marée peut être estimée à partir des valeurs mesurées à un marégraphe de référence en tenant compte de trois facteurs correctifs, un facteur d'amplitude, un facteur de phase et un facteur lié à la différence du niveau marin moyen.

Pratiquement, une série de routines C (Vande Wiele, non publié) établit les fichiers de corrections marégraphiques semi-automatiquement à partir :

- des positions XY - temps de la campagne de mesure enregistrés dans le fichier ODAS du Belgica , des valeurs d'amplitude, de phase et de différence du niveau marin moyen fournis par la matrice (1 X 1 km) de réduction marégraphique du Service Hydrographique d'Oostende (Ministère de la Région Flamande);
- des valeurs hauteur de marée - temps issues de la digitalisation des courbes marégraphiques enregistrées aux trois marégraphes de référence (Nieuwpoort, Oostende et Zeebrugge).

En accord avec Van Cauwenberghe et al. (1993), la précision de la correction marégraphique est de l'ordre de 10 cm.

Après correction, les profondeurs sont réduites au datum vertical MLLWS de référence pour la zone côtière belge.

- **Nettoyage des données**

Le nettoyage des données dans le module "binstat" de Neptune constitue la dernière étape du post-traitement :

- filtration automatique sur une grille calculée préalablement pour la zone traitée; dans chaque unité de la grille, un critère de rejet (limites basées sur l'écart-type, le bruit ou le résidu) est appliqué au données;
- filtration des sondes par sélection manuelle des profondeurs à rejeter sur le diagramme de corrélation profondeur versus n° de faisceau acoustique; le diagramme de corrélation peut être visualisé successivement pour chaque impulsion (« ping by ping ») ou, pour une série d'impulsion consécutives. Cette étape est très fastidieuse.

- **Exportation des données bathymétriques corrigées**

Le post-traitement se clôture par la sauvegarde des données bathymétriques corrigées. Neptune offre de nombreuses options de sauvegarde :

- nature des données (toutes les sondes validées, valeurs médianes, maximales, minimales de chaque unité de la grille...);
- format des fichiers (binaire, ascii, latitude-longitude, coordonnées métriques...);
- Modélisation et cartographie des données.

Les données bathymétriques corrigées sont exportées dans Cfloor, logiciel de modélisation, de visualisation 3D et de cartographie développé par Roxar (Système d'Opération : UNIX et Windows NT/2000).

Cfloor offre de nombreux algorithmes pour générer un modèle numérique de terrain à partir d'une matrice de points XYZ.

Nous travaillons principalement avec l'algorithme « Seabed » qui permet de modéliser rapidement un grand nombre de sondes (> 5.000.000 de points). Cet algorithme fonctionne en trois étapes :

- triage et assignation des points : la grille est définie en fonction de la résolution imposée par l'utilisateur. Chaque élément de la grille est subdivisé en 4 quadrants qui sont eux-mêmes subdivisés en secteurs. Le nombre de secteurs est défini par l'utilisateur. Tous les points sont triés et assignés aux secteurs de la grille;
- recherche en spirale des points intervenant dans le calcul de chacun des nœuds du modèle de terrain : en fonction des critères imposés par l'utilisateur (rayon de recherche, nombre de points minimums, nombre de secteurs par quadrant, nombre minimum de points par secteur ...), l'algorithme effectue une recherche en spirale des points qui vont intervenir dans le calcul des valeurs bathymétriques aux nœuds du modèle de terrain;
- interpolation des valeurs aux nœuds du modèle de terrain à partir des points sélectionnés durant l'étape 2 : plusieurs interpolateurs sont disponibles (valeur la plus proche, moyenne, médiane, parabolique, plane) Nous utilisons préférentiellement l'interpolation parabolique. Pour chaque nœud de la grille, une surface parabolique est générée à partir des points sélectionnés qui interviennent dans le calcul (étape 2). La valeur au nœud de la grille est la valeur de la surface parabolique en ce point.

Des options de pondération et de lissage sont également disponibles.

De nombreux traitements cartographiques peuvent être effectués à partir des modèles numériques de terrain :

- Cartographie géomorphologique (carte du relief, des pentes...);
- Visualisation tri-dimensionnelle des structures;
- Calcul des volumes par rapport à une surface de référence quelconque;
- Coupe du modèle par rapport à un plan d'orientation quelconque;
- Comparaison des modèles de terrain correspondant à des séries temporelles de mesures de la même zone (monitoring).

Pratiquement, un ensemble de routine C (K. Degrendele), permet d'exporter les modèles numériques de terrain calculés dans Cfloor vers les logiciels d'informations géographiques fonctionnant sur PC (Système d'Opération = Windows NT).

3.5. La bathymétrie du Kwintebank

Ce travail s'appuie sur les cartes bathymétriques et géomorphologiques du Kwintebank établies par le fonds avec le sonar multifaisceaux. Ces cartes matérialisent le résultat final du post-traitement et de la modélisation des données acquises de novembre 1999 à mars 2000.

Campagne Belgica	Mesure	Date
99/25	9925 kb_sector1_2	16/11/1999
00/01	0001KB	25-28/01/2000
00/08	Kb0008	22-24/03/2000

Tableau 9 : Date d'acquisition des données sonar multifaisceaux corrigées relatives au Kwintebank.

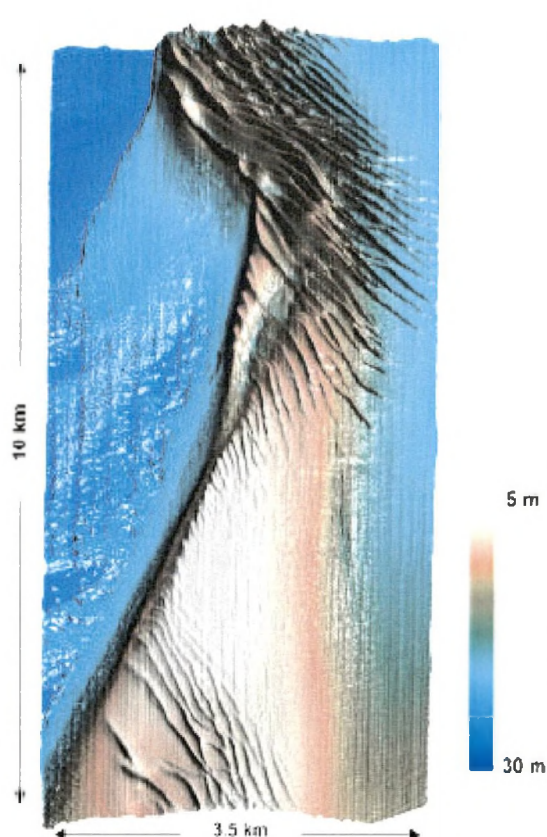
Les modèles de terrain établis à partir des données corrigées permettent une cartographie à deux échelles du Kwintebank.

Echelle	Données de base	Algorithme de modélisation	Résolution du modèle de terrain
1/25 000	Médianes extraites d'une grille de 5 X 5 m	« Seabed »	5 X 5 m
1/10 000	Toutes les sondes valides ($\pm 70\ 000\ 000$)	« Seabed »	1 X 1 m

Tableau 10 : Cartes du Kwintebank établies à partir des données sonar multifaisceaux.

La cartographie du Kwintebank met en évidence une dépression bathymétrique corrélée avec la densité de dragage dans la partie centrale du banc. Cette corrélation suggère une incidence directe de l'extraction sur la morphologie du banc (Degrendele *et al.*, 2002).

Figure 23 :
Modèle numérique de terrain du Kwintebank établi par le fonds ;
Résolution : 5 x 5 m.



4. L'énergie acoustique rétrodiffusée

4.1. Principes généraux

Le principe du sonar est basé sur la mesure du temps écoulé entre l'émission d'une onde sonore et la réception de l'écho renvoyé par le fond. Une partie de l'onde acoustique qui arrive sur le fond subit une réflexion spéculaire selon la direction symétrique. Comme le fonds marin est relativement rugueux par rapport à la longueur d'onde du signal acoustique émis, une partie de l'énergie acoustique est également diffusée dans toutes les directions. Parmi toutes les directions de diffusion, une partie retourne à l'émetteur. Bien que très faible, les sonars enregistrent cette énergie rétrodiffusée.

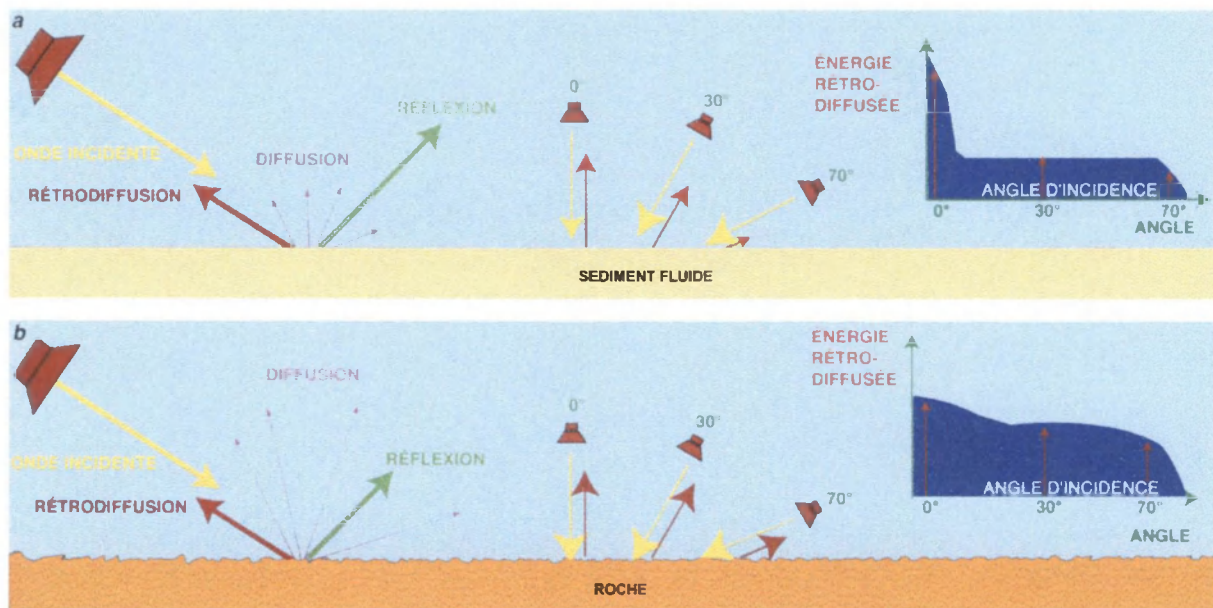


Figure 24 : Diffusion de l'énergie d'une onde acoustique à l'interface eau-sédiment; a : cas d'une interface de faible rugosité ; b : cas d'une interface rugueuse (d'après Luton *et al.*, 2001).

L'intensité I_s d'un signal rétrodiffusé est fonction de :

- I_o : intensité émise par l'émetteur ;
- R : distance à l'émetteur ;
- A : surface insonifiée ;
- $S(\theta_i)$: coefficient de rétrodiffusion pour un angle d'incidence θ_i .

$$I_s = I_o \frac{AS(\theta_i)}{R^2}$$

BS l'intensité rétrodiffusée est définie :

$$BS = 10 \log_{10}(S(\theta_i))$$

en décibel, dB

BS = « Backscatter strength »

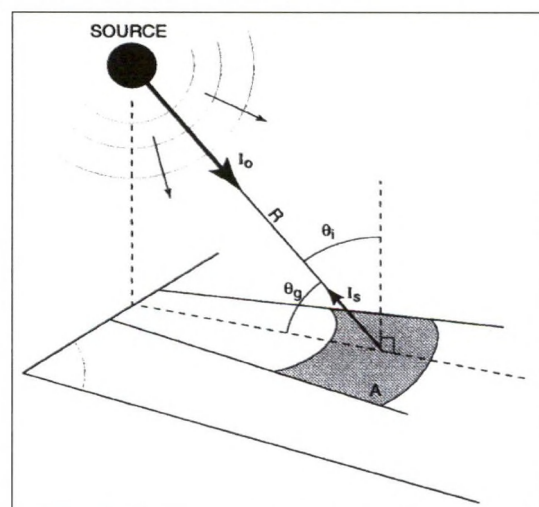


Figure 25 : Géométrie de la rétrodiffusion (Source : de Moustier, 2001)

L'intensité rétrodiffusée BS est liée à l'équation du sonar : le niveau écho – bruit (EN) est obtenu en soustrayant à la puissance acoustique émise (SL), les pertes de propagation durant la transmission (2TL) et le niveau de bruit ambiant (NL), et en ajoutant l'intensité rétrodiffusée (BS).

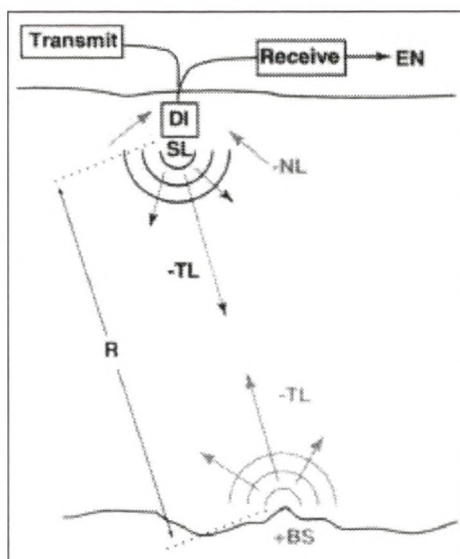


Figure 26 : Equation du Sonar : $EN = SL - 2TL - NL + BS$ (en dB)
(Source : de Moustier, 2001)

Fondamentalement, BS est fonction de l'angle d'incidence et de la nature du substrat. Pour un angle d'incidence donné, l'impédance acoustique du sédiment (résistance au passage de l'onde acoustique) détermine la quantité d'énergie rétrodiffusée. La figure 27 illustre cette double relation liant BS à la fois au type de sédiment et à l'angle d'incidence.

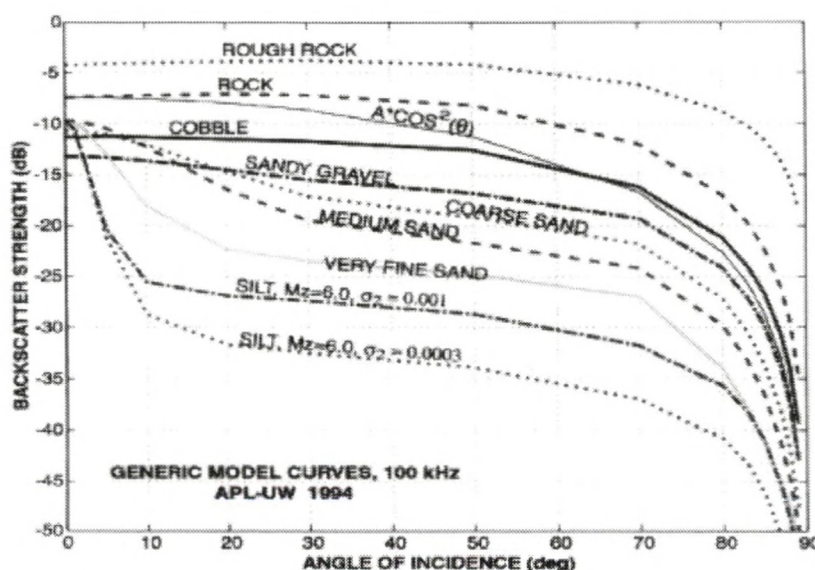


Figure 27 : Relation BS - angle d'incidence pour différent type de sédiments
(Source : de Moustier, 2001).

4.2. Enregistrement et normalisation des données BS

Pour chacun des 111 faisceaux, le système sonar multifaisceaux Kongsberg Simrad EM1002S enregistre :

- comme dans un sonar latéral, séquentiellement sous forme de série temporelle, les valeurs BS durant le temps de réception du cycle émission-réception (« ping »). D'un faisceau à l'autre, le nombre de valeurs enregistrées est variable, fonction de la géométrie (angle d'incidence, surface insonifiée).
- une valeur moyenne d'intensité rétrodiffusée BS (une solution par faisceau).

Pour former une image sonar réellement indicatrice de la nature du fonds marin à partir des valeurs BS enregistrées par un système sonar multifaisceaux, les valeurs BS doivent faire l'objet d'une normalisation (Clarke, 2001).

En accord avec Kongsberg Simrad, les valeurs BS sont corrigées pour :

- les variations d'intensité de l'émetteur ;
- la géométrie des faisceaux d'émission et de réception ;
- les pertes de propagation ;
- l'absorption ;
- la surface insonifiée du fonds marin.

BS dépend de l'angle d'incidence : pour des grands angles d'incidence, les pertes par diffusion seront plus grandes et BS sera d'autant plus petit. Pour cette raison, les valeurs de BS enregistrées séquentiellement dans chacun des faisceaux font l'objet d'une correction géométrique en fonction de l'angle d'incidence (Hammerstad, 1994, Milvang *et al.*, 1995 et Clarke, 2001).

Le modèle de correction géométrique adopté par Kongsberg Simrad est le suivant :

$$\begin{aligned}
 &BS = BS_N \\
 &\text{pour } 0^\circ < \Phi < 25^\circ \\
 \\
 &BS = BS_0 + 10 \log_{10}(\cos(\Phi))^2 \\
 &\text{pour } \Phi > 25^\circ \\
 &\text{(Loi de Lambert)}
 \end{aligned}$$

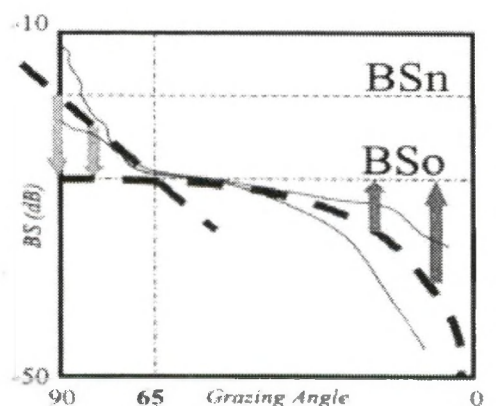


Figure 28 :
Correction Kongsberg Simrad de BS en fonction de l'angle d'incidence Φ ($\Phi = 90^\circ - \text{Grazing Angle}$)
(Source : Clarke, 2001).

4.3. Traitement des données

Développés par Kongsberg Simrad, Poseidon et Triton sont deux logiciels aux fonctionnalités complémentaires qui permettent d'exploiter les données BS afin d'établir une cartographie acoustique du fonds marin. Nous allons passer en revue le mode de fonctionnement de ces deux programmes qui ont été largement utilisés dans le cadre de ce travail.

4.3.1. Mosaïque sonar – Poseidon

Poseidon est un module qui permet d'établir une mosaïque sonar à partir des données BS. Le résultat est similaire à une mosaïque obtenue à partir de données acquises par sonar latéral. Le module s'intègre dans Neptune (logiciel de post-traitement axé sur la bathymétrie) de telle sorte que les données peuvent être traitées successivement pour la bathymétrie et pour l'imagerie sonar.

Pratiquement, Poseidon calcule une grille (équivalent à un modèle de terrain où $Z = BS$) à partir des valeurs de BS. Ce calcul comprend 2 étapes :

- extraction et traitement des données BS successivement par ligne de navigation. A ce stade l'utilisateur définit la résolution spatiale de la grille et le type de valeurs BS qui seront retenues (moyenne, min, max). Des fonctions d'interpolation sont implémentées ;

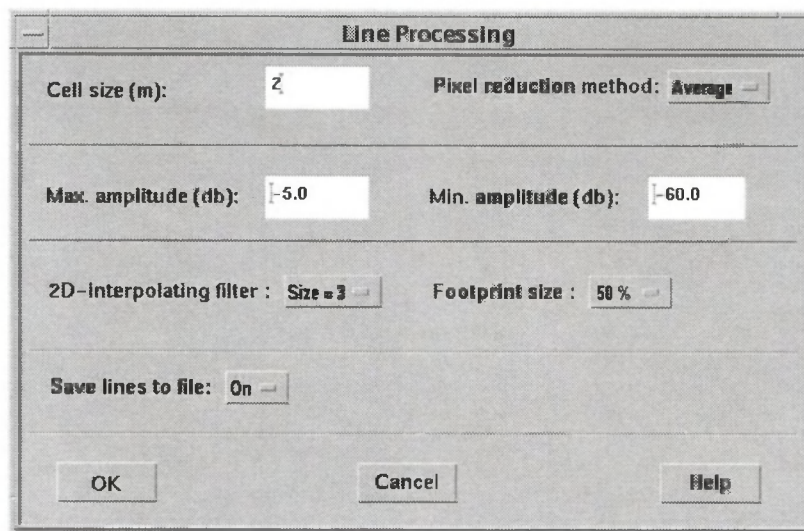


Figure 29 : Poseidon ; boîte de dialogue de traitement des valeurs BS par ligne de navigation
(Source : Kongsberg Simrad).

- le deuxième algorithme gère les valeurs BS comprises dans les zones de chevauchement des faisceaux d'une ligne à l'autre. Un algorithme de lissage est également inclus.

Les mosaïques sonar obtenues sont exportables en ASCII et peuvent être combinées avec les cartes bathymétriques.

L'intérêt majeur de Poseidon réside dans sa capacité à traiter un volume considérable de données pour produire une image acoustique continue du fond marin. Cet image, combinée avec la morphologie, permet une interprétation visuelle directe en terme de type sédiment.

4.3.2. Classification – Triton

Triton est un logiciel de classification multivariable du fonds marin. Tout comme Poséidon, Triton s'intègre dans Neptune, les données une fois corrigées pour la bathymétrie peuvent être analysées dans Triton.

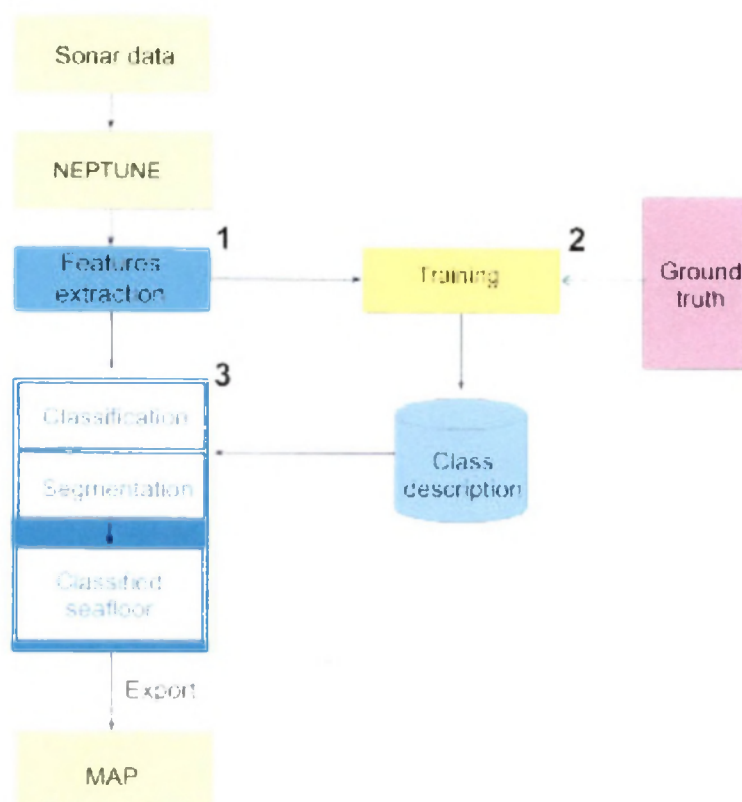


Figure 30 : Organigramme de fonctionnement de Triton, logiciel de classification acoustique
(Source : Kongsberg Simrad, modifié).

L'organigramme de fonctionnement de Triton montre les 3 étapes qui conduisent à la classification du fonds marin sur la base des valeurs BS enregistrées par le sonar multifaisceaux.

4.3.2.1. Extraction de 5 paramètres

A partir des valeurs BS, 5 paramètres sont calculés. Cette extraction s'effectue ligne par ligne de navigation :

- Pour chaque cycle de mesure (« ping » = cycle émission - réception), les valeurs BS sont intégrées dans 4 secteurs (« bins ») ; le premier secteur contient les

valeurs BS du faisceau 1 au faisceau 28, le second secteur du faisceau 29 au 56 et ainsi de suite.

- la ligne de navigation est traitée par cycles de mesures successifs jusqu'à l'obtention de 4000 valeurs BS par secteurs avec un plafond maximum de 20 cycles.

Les 4000 valeurs BS intégrées sur un secteur définissent une parcelle du fonds marin (« patch »), entité spatiale sur laquelle sont calculés 5 paramètres.

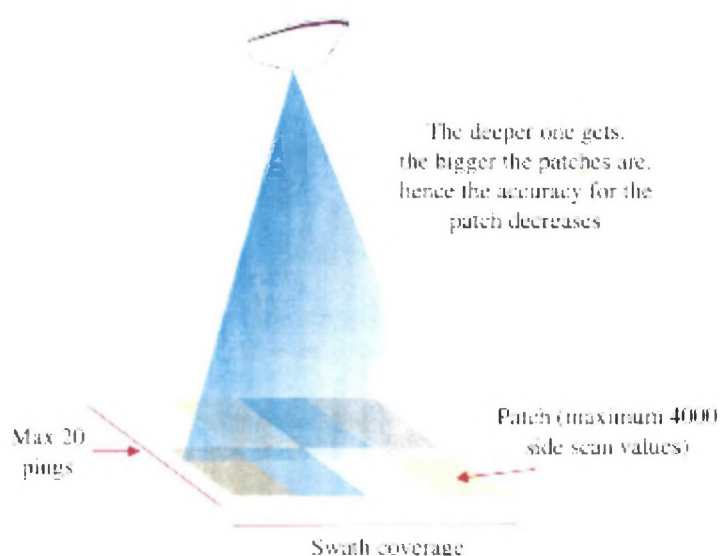


Figure 31 : Représentation spatiale des parcelles « patches », unités spatiales dans lesquelles sont calculés les 5 paramètres (Source : Kongsberg Simrad).

Ces 5 paramètres se répartissent en trois catégories. Nous en donnons volontairement une définition intuitive plutôt que mathématique :

- Paramètre spectral :

PACE : le calcul du PACE est complexe ; il est basé sur l'analyse spectrale des intensités de la matrice de niveaux de gris associée à la distribution spatiale des valeurs BS ; la figure 32 schématise le calcul du PACE. Dans Triton, le PACE correspond au rapport des aires F_{16} / F_2 des spectres d'intensité normalisés.

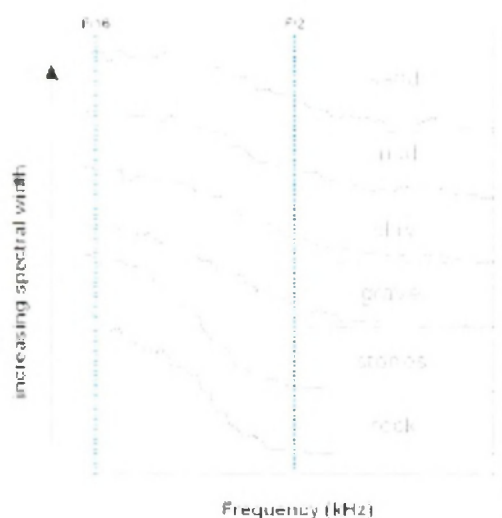


Figure 32 : PACE, le spectre des fréquences varie suivant le type de sédiment (Source : de Moustier, 2001, modifié).

- Paramètre textural :

Contraste - « contrast » : ce paramètre est déduit de l'analyse texturale de la matrice de niveaux de gris associée à la distribution spatiale des valeurs BS sur la parcelle. Le contraste est une mesure de la variance spatiale de BS. Un fort contraste signifie que la parcelle contient une grande proportion de valeurs BS voisines très différentes.

- Paramètres statistiques :

Moyenne - « Mean » : la moyenne de toutes la valeurs BS intégrées dans la parcelle ;

Quantile 0.8 : paramètre de position équivalent à la médiane (valeurs séparant la distribution à 50 %) mais pour 80 % ;

Ecart-type - « standard deviation - STD » : l'écart type des toutes les valeurs BS intégrées dans la parcelle.

4.3.2.2. Définition des classes

Sur base de la visualisation cartographique des 5 paramètres, l'opérateur définit des classes en sélectionnant un ensemble de parcelles qui montre des propriétés homogènes. Les valeurs des 5 paramètres des classes définies sont stockées dans des fichiers ASCII accessibles (3 fichiers par classe).

La nature concrète des classes doit être vérifiée par la prise d'échantillons réels de sédiments (« ground truth »).

4.3.2.3. Classification et segmentation de l'image

La classification est le processus par lequel chaque unité de surface d'une grille (« pixel ») est assignée à une des classes telles que prédéfinies au point précédent. L'algorithme de classification utilisé dans Triton est basé sur le critère probabiliste de Bayes.

En simplifiant, pour chaque unité de surface, le critère de Bayes calcule les probabilités d'appartenance à chacune des classes. L'algorithme de classification utilise la probabilité maximum comme critère d'assignation.

Pour finir, un algorithme de segmentation par lissage de l'image est implémenté. Plusieurs niveaux de lissage sont disponibles. La segmentation par lissage fournit une image cartographique plus continue du fonds marin classifié.

5. Données de la campagne 0131

Les données acquises lors de la campagne Belgica 0131 fournissent la base pratique à notre étude de faisabilité. Cette campagne a été spécialement organisée pour effectuer un calibrage de BS⁷ par un prélèvement simultané de sédiments.

Quatre zones, deux situées sur le Kwintebank et les deux autres sur le chenal occidental bordant le banc (« kwintegeul ») ont fait l'objet d'un levé en sonar multifaisceaux et de prélèvements de sédiments à la benne Van Veen.

5.1. Acquisition des données

Concrètement, pour chacune des 4 zones prospectées, la campagne était organisée en 3 phases :

- levé en sonar multifaisceaux ;
- une fois la couverture en sonar multifaisceaux effectuée, visualisation du BS à bord. Pour cette étape, l'unité de post-traitement (serveur Sun Enterprise 250) a été installée à bord et mise en réseau avec la station de travail qui contrôle le sonar, ce qui a permis un transfert en temps réel des données. La visualisation du BS des données brutes a permis de définir la position des sites à échantillonner ;
- prélèvements des sédiments à la benne Van Veen effectués au plus vite après le relevé et la transmission des coordonnées au pilote.

Une telle organisation a permis de minimiser l'intervalle de temps séparant la mesure en sonar multifaisceaux et la prise d'échantillon de telle sorte que l'échantillon soit le plus possible représentatif de la nature du fonds marin au moment de l'insonification.

Le tableau 11 fournit les coordonnées géographiques (ED50) et les dimensions des 4 zones. La figure 28 page suivante cartographie leurs situations et les lignes de navigation effectuées durant la campagne sur le modèle de terrain du Kwintebank.

	Latitude	Longitude	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface (km ²)
MA (Monitoring area)	51° 17.7572' 51° 18.4658' 51° 18.2441' 51° 17.5394'	2° 39.6018' 2° 40.1601' 2° 40.8422' 2° 40.2671'	1460	890	1.290
GS (Gravel Sand area)	51° 16.8643' 51° 17.9707' 51° 17.8276' 51° 16.7093'	2° 37.1317' 2° 37.9929' 2° 38.4920' 2° 37.5889'	2280	640	1.425
S1 (Sand 1 area)	51° 18.5850' 51° 18.9611' 51° 18.8372' 51° 18.4611'	2° 39.0469' 2° 39.3287' 2° 39.7482' 2° 39.4496'	770	537	0.4091
S2 (Sand 2 area)	51° 15.9142' 51° 16.3007' 51° 15.9292' 51° 15.5374'	2° 38.3059' 2° 38.5959' 2° 39.8531' 2° 39.5633'	1612	800	1.285

Tableau 11 : Coordonnées géographiques et dimensions des zones étudiées durant la campagne 0131.

⁷ Pour rappel, BS = « Backscatter Strength » = Intensité acoustique rétrodiffusée (voir point 4.1., page 33)

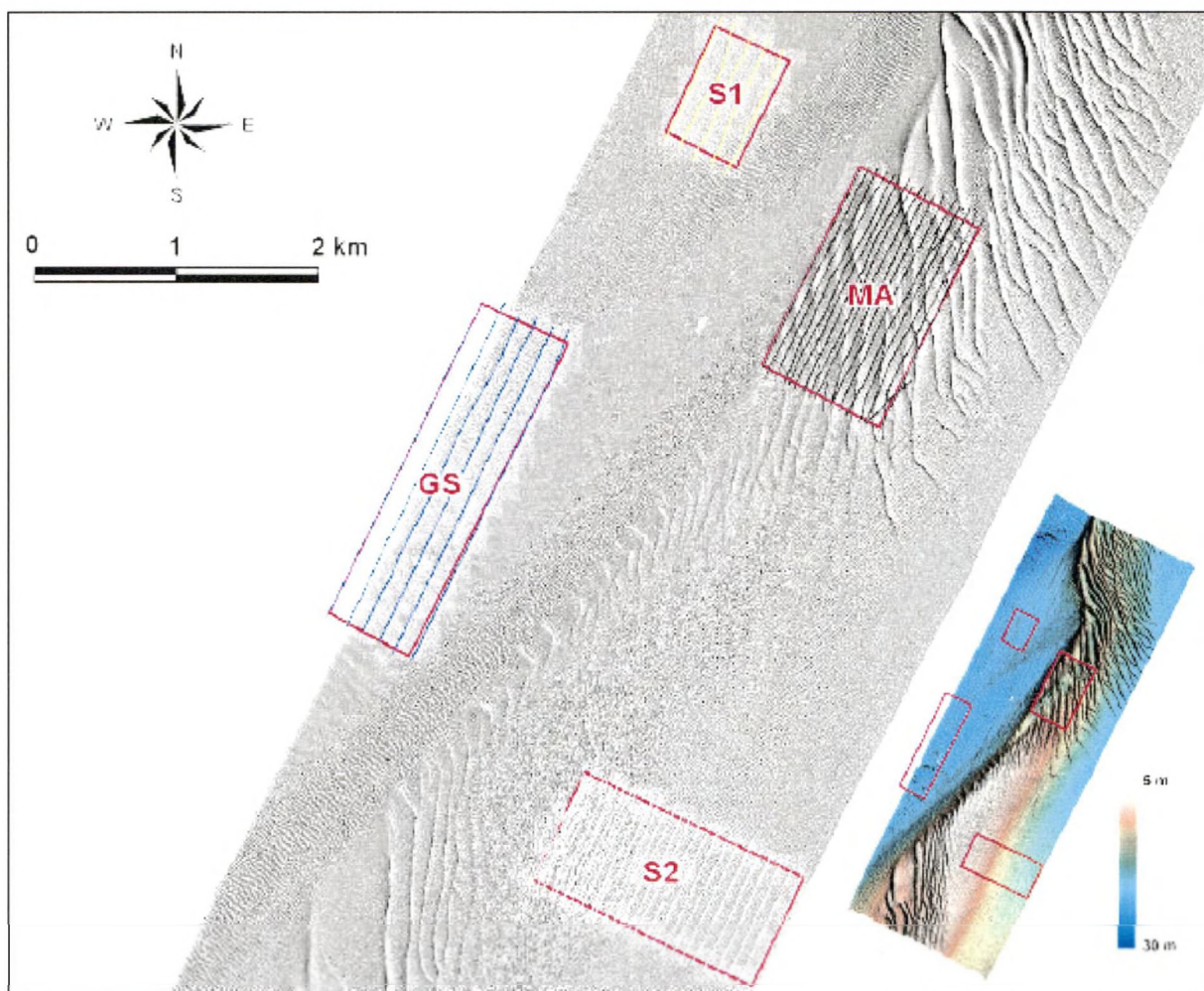


Figure 33 : Zones de références de la campagne Belgica 0131 sur le Kwintebank et dans le chenal bordant le banc (« Kwintegoul ») ; lignes bleues, noires, jaunes et blanches = lignes de navigation.

Un total de 50 échantillons ont été prélevés par benne Van Veen.

A bord, ces échantillons ont fait l'objet d'une description macroscopique (Baeteman C., Service Géologique de Belgique).

L'analyse granulométrique quantitative est en cours au Laboratoire de Géographie de l'Université de Gent.

Le tableau 12 page suivante présente les données relatives à ces échantillons (label, coordonnées cartographiques). Les descriptions macroscopiques résumées sont intégrées au tableau.

La figure 29 page 40 fournit la cartographie labellisée des échantillons sur le modèle de terrain du Kwintebank.

Label	X	Y	Z	Description sommaire
KWMA-C1/1	476906	5684178	22.0	Sable fin silto-argileux, faune riche, peu de coquilles
KWMA-C1/2	476844	5683994	20.1	Sable fin silto-argileux, faune riche, riche en coquilles
KWMA-C1/3	476740	5683804	18.9	Sable fin silto-argileux riche en coquilles
KWMA-C1/4	476614	5683620	18.4	Sable fin très riche en coquilles
KWMA-C1/5	476513	5683455	17.2	Sable fin très riche en coquilles
KWMA-C2/1	477050	5683916	11.2	Débris de coquilles dominants, sable moyen
KWMA-C2/2	477271	5683691	15.0	Débris de coquilles dominants, sable fin-moyen
KWMA-C2/3	476839	5683529	15.3	Débris de coquilles dominants, sable fin-moyen
KWMA-C2/4	476773	5683107	15.3	Débris de coquilles dominants, sable fin-moyen
KWMA-C2/5	476422	5682883	16.6	Débris de coquilles dominants, sable fin-moyen
KWMA-C3/1	477579	5683713	13.1	Sable fin et débris de coquilles
KWMA-C3/2	477430	5683357	13.8	Sable fin, silteux et fins débris de coquilles
KWMA-C3/3	477112	5683077	10.5	Sable fin, silteux et fins débris de coquilles
KWMA-C3/4	477107	5682700	11.2	Sable fin, silteux et fins débris de coquilles
KWMA-C3/5	476721	5682699	11.6	Sable fin, silteux et fins débris de coquilles
KWGS-C1/1	474558	5682292	24.3	Sable moyen graveleux, riche en coquille et débris de coquilles
KWGS-C1/2	474376	5681908	24.0	Cailloutis à coquilles et débris de coquille dans boue
KWGS-C1/3	473806	5681755	23.6	Cailloutis à coquilles et débris de coquille, matrice sableuse
KWGS-C1/4	473826	5681383	24.7	Sable graveleux, riche en graviers (silex noirs) et coquilles
KWGS-C1/5	474117	5681474	24.4	Cailloutis sableux dans boue
KWGS-C2/1	474020	5682507	24.3	Sable graveleux, riche en débris de coquilles
KWGS-C2/2	474421	5682746	24.2	Sable graveleux, riche en débris de coquilles
KWGS-C2/3	474734	5683057	24.1	Sable graveleux, riche en débris de coquilles
KWGS-C2/4	474174	5682880	24.4	Sable graveleux, riche en débris de coquilles
KWGS-C2/5	474417	5683162	24.0	Sable graveleux, riche en débris de coquilles
KWS1-C1/1	475878	5685041	23.5	Sable silto-argileux, peu de coquilles, riche en terriers de vers
KWS1-C1/2	475690	5684481	23.8	Sable silto-argileux, peu de coquilles, riche en terriers de vers
KWS1-C1/3	475997	5684777	23.0	Sable silto-argileux, peu de coquilles, riche en terriers de vers
KWS1-C1/4	476038	5684454	23.1	Sable silto-argileux, peu de coquilles, riche en terriers de vers
KWS1-C1/5	476426	5684852	22.2	Sable silto-argileux, peu de coquilles, terriers de vers, oursins
KWS1-C2/1	475914	5684220	23.5	Sable fin-moyen, peu de coquilles
KWS1-C2/2	476049	5684275	23.0	Sable fin, argilo-silteux, peu de coquilles
KWS1-C2/3	476086	5684180	23.4	Sable fin, débris de coquilles, terriers de vers et oursins
KWS1-C2/4	476279	5684301	23.6	Sable fin, peu de coquilles
KWS1-C2/5	476303	5684564	22.5	Sable fin, peu de coquilles
KWS2-C1/1	475170	5680160	7.5	Sable très fin à fin, homogène
KWS2-C1/2	474839	5679582	7.4	Sable très fin à fin, homogène
KWS2-C1/3	475132	5679672	8.6	Sable très fin à fin, homogène
KWS2-C1/4	475185	5679448	9.6	Sable très fin à fin, homogène, oursins
KWS2-C1/5	475413	5679861	10.0	Sable très fin à fin, homogène
KWS2-C2/1	475690	5679954	12.4	Sable très fin à fin, homogène
KWS2-C2/2	475920	5679854	15.3	Sable très fin à fin, homogène
KWS2-C2/3	475758	5679754	14.1	Sable fin à très fin homogène, silteux, oursins et étoiles de mer
KWS2-C2/4	475689	5679208	15.1	Sable fin à très fin, silteux, oursins, étoiles de mer, vers
KWS2-C2/5	475915	5679725	15.6	Sable fin à très fin, silteux, oursins
KWS2-C3/1	476207	5679679	17.0	Sable fin à très fin, silteux, rares coquilles, oursins
KWS2-C3/2	476326	5679614	17.2	Sable fin à très fin, silteux, rares coquilles, oursins et vers
KWS2-C3/3	476575	5679462	17.2	Sable fin à très fin, silteux, rares coquilles, oursins et vers
KWS2-C3/4	476392	5679426	17.2	Sable fin à très fin, silteux, rares coquilles, oursins et vers
KWS2-C3/5	476465	5679233	16.8	Sable fin à très fin argileux, rares coquilles

Tableau 12 : Coordonnées cartographiques et description macroscopique des échantillons prélevés à la benne Van Veen (les profondeurs Z sont corrigées pour la marée).

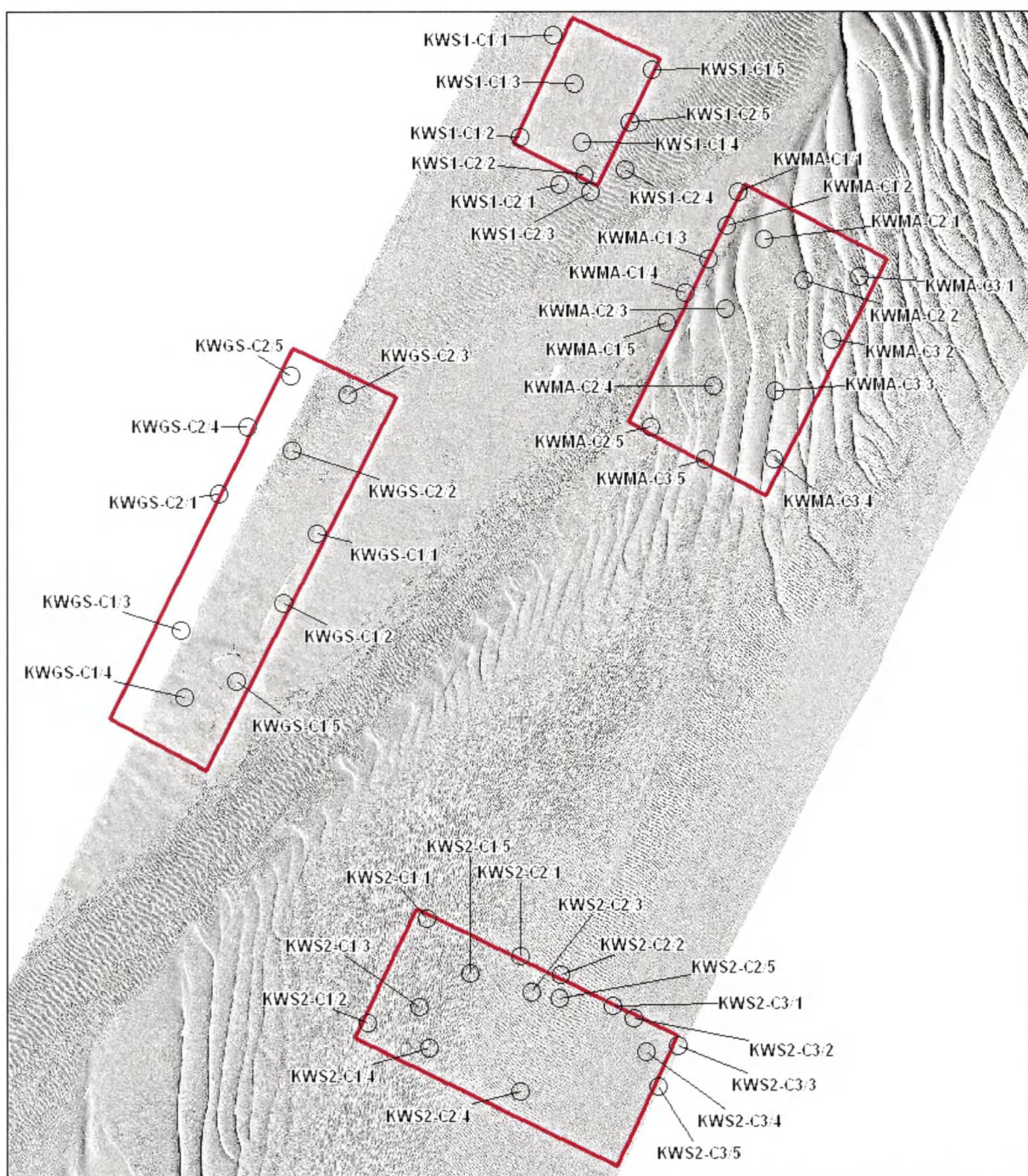


Figure 34 : Cartographie labellisée des échantillons sur le modèle de terrain du Kwantebank.

5.2. Post-traitement bathymétrique des données

En accord avec la procédure décrite précédemment⁸, les données bathymétriques brutes ont fait l'objet d'un post-traitement dans le logiciel Neptune de Kongsberg Simrad.

Les paramètres généraux des différentes étapes du post-traitement sont présentés. Les fichiers de contrôle détaillés relatifs au post-traitement sont disponibles sur demande auprès du Fonds.

- Correction des positions :

Basic Mode

Rejection distance = 15.00 m
Maximum rejection interval = 100.00 m
Maximum speed = 10.00 m/s
Normal speed = 3.50 m/s
Maximum interpolation distance = 30 m
Maximum interpolation distance = 3 sec

Merge/smooth Mode

Cutoff frequency = 0.07
Filter length = 5

- Correction des profondeurs :

Tide files = 2001-31utc.tide

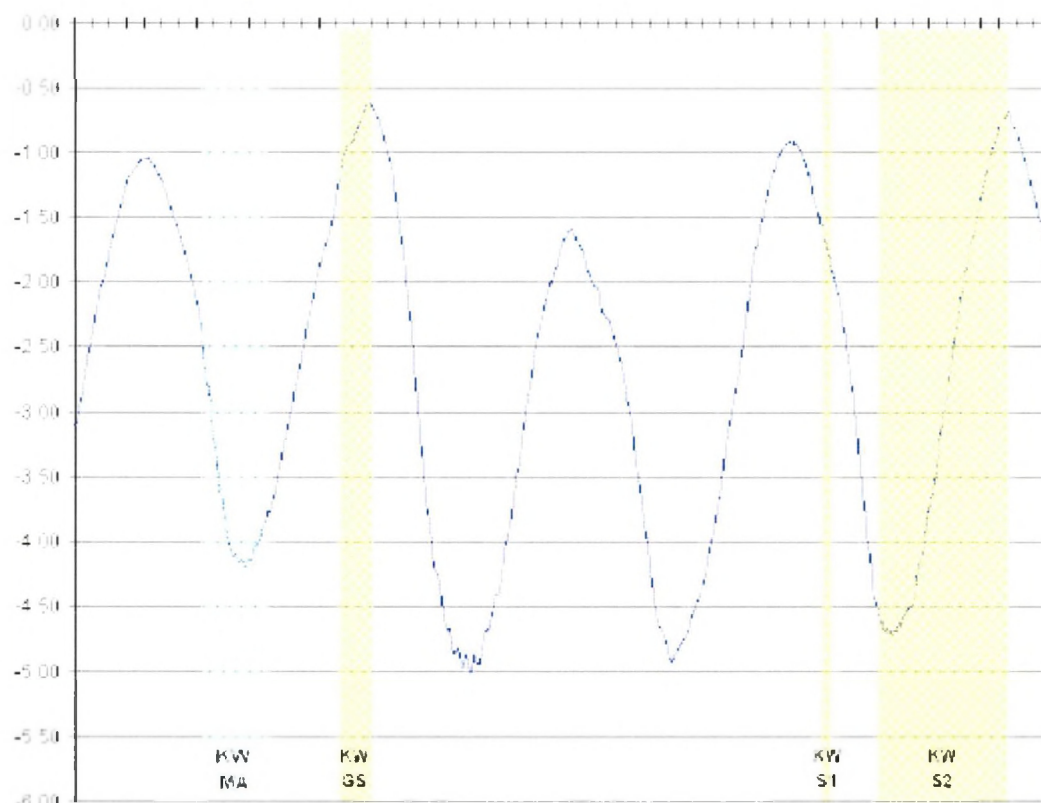


Figure 35 : Courbe de correction marégraphique (méthode M2) pour la campagne 0131
(X = temps UTC, Y = hauteur de la marée).

- Filtration des sondes bathymétriques :
STD limit (times the STD) = 2
Filtration manuelle par série de 300 « pings »

⁸voir point 3.4.2., pages 29-31

A partir des sondes corrigées, un modèle numérique de terrain de résolution 2 X 2 m a été généré en utilisant l'algorithme « Seabed ».

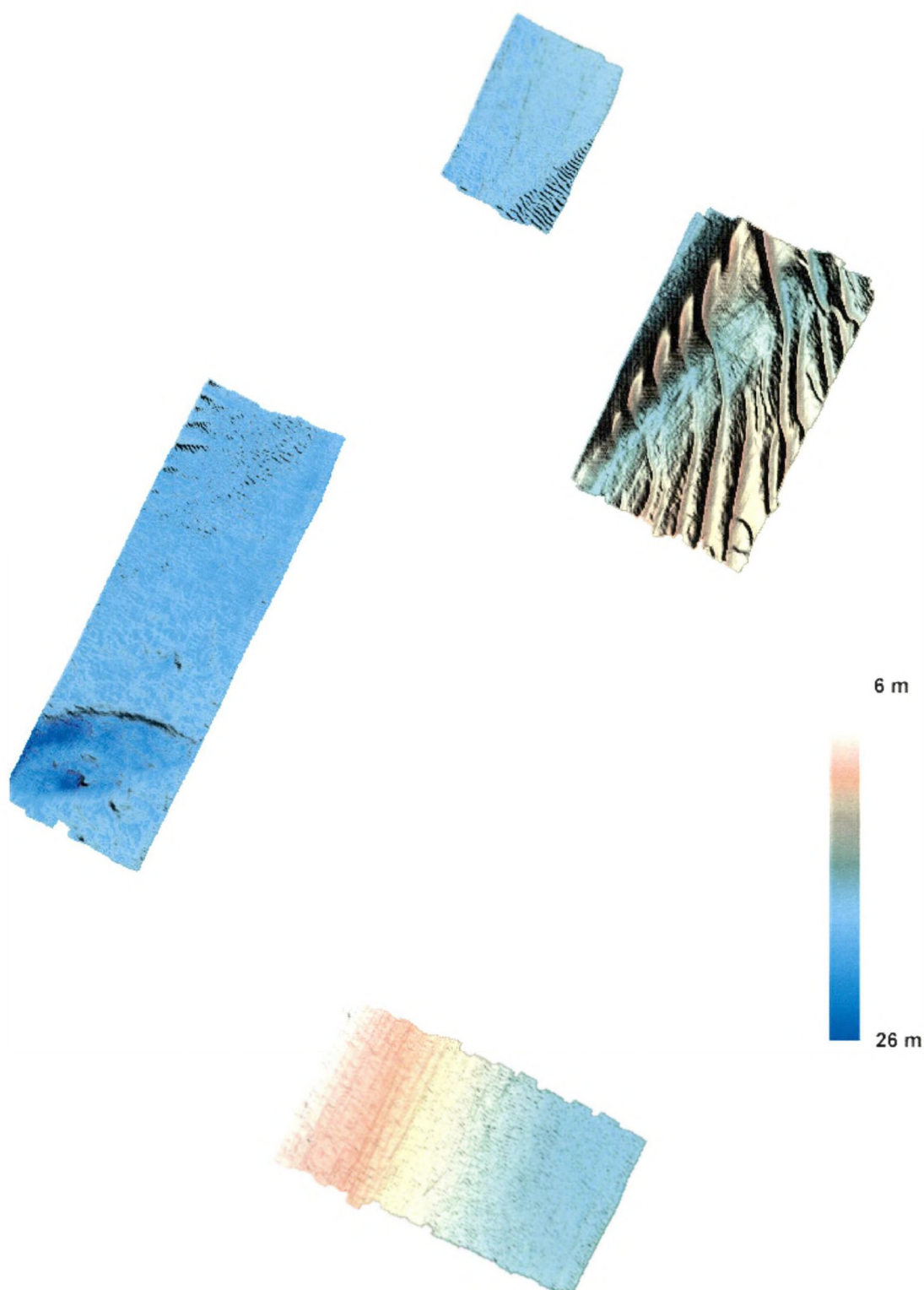
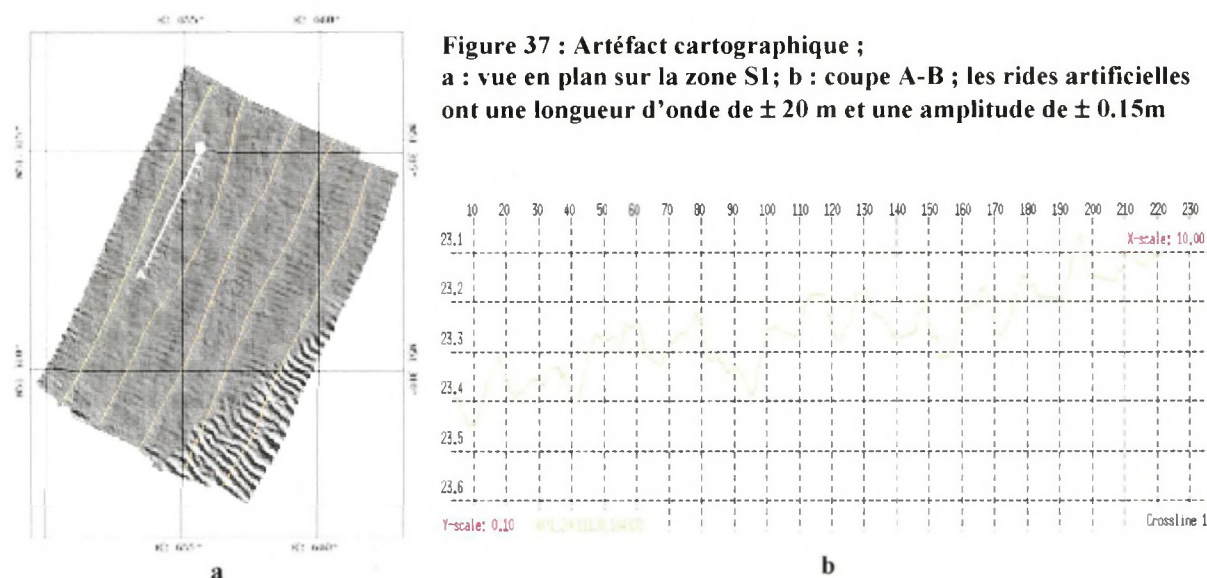


Figure 36 : Bathymétrie corrigée des 4 zones de références de la campagne Belgica 0131 sur le Kwintebank et dans le chenal bordant le banc (« Kwintegeul ») ; (Données normalisées, DTM : algorithme « seabed » ; résolution = 2 x 2 m).

Il convient de souligner la présence d'un artefact cartographique. Cet artefact se caractérise par un ridage perpendiculaire aux lignes de navigation. Ce ridage cyclique affecte l'ensemble de la fauchée. Il ne s'agit pas de structures sédimentaires réelles mais bien d'un pilonnement artificiel (« fault heave ») vraisemblablement lié à un alignement imparfait du senseur de mouvement (Seatex MRU5) par rapport aux axes d'inertie du Belgica. Un fort roulis engendre ce mouvement vertical artificiel. En toute logique, il ressort principalement dans les zones GS et S1 les plus profondes.



Cet artefact témoigne des conditions météorologiques médiocres qui ont dominé la campagne 0131 (vents de 5-7 Beaufort de direction SSO).

5.3. Classification acoustique

5.3.1. Mosaïque sonar – cartographie du BS dans Poseidon

Les données ont été traitées dans Poseidon⁹ afin de générer une image sonar permettant d'avoir une vue de conjointe de BS sur l'ensemble des 4 zones.

Les paramètres utilisés pour le traitement sont les suivants :

Line processing :

Cell size = 2 m ;
Pixel reduction method = Average ;
Max. amplitude = - 5 dB
Min. amplitude = - 60 dB
2D-interpolating filter size = 3
Foot print size = 25 %

Grid processing :

Line overlap = weighted average ;
Smoothing filter = off

⁹ voir point 4.3.1. page 36

L'image sonar est présentée en regard de la carte morphologique à la figure 38.

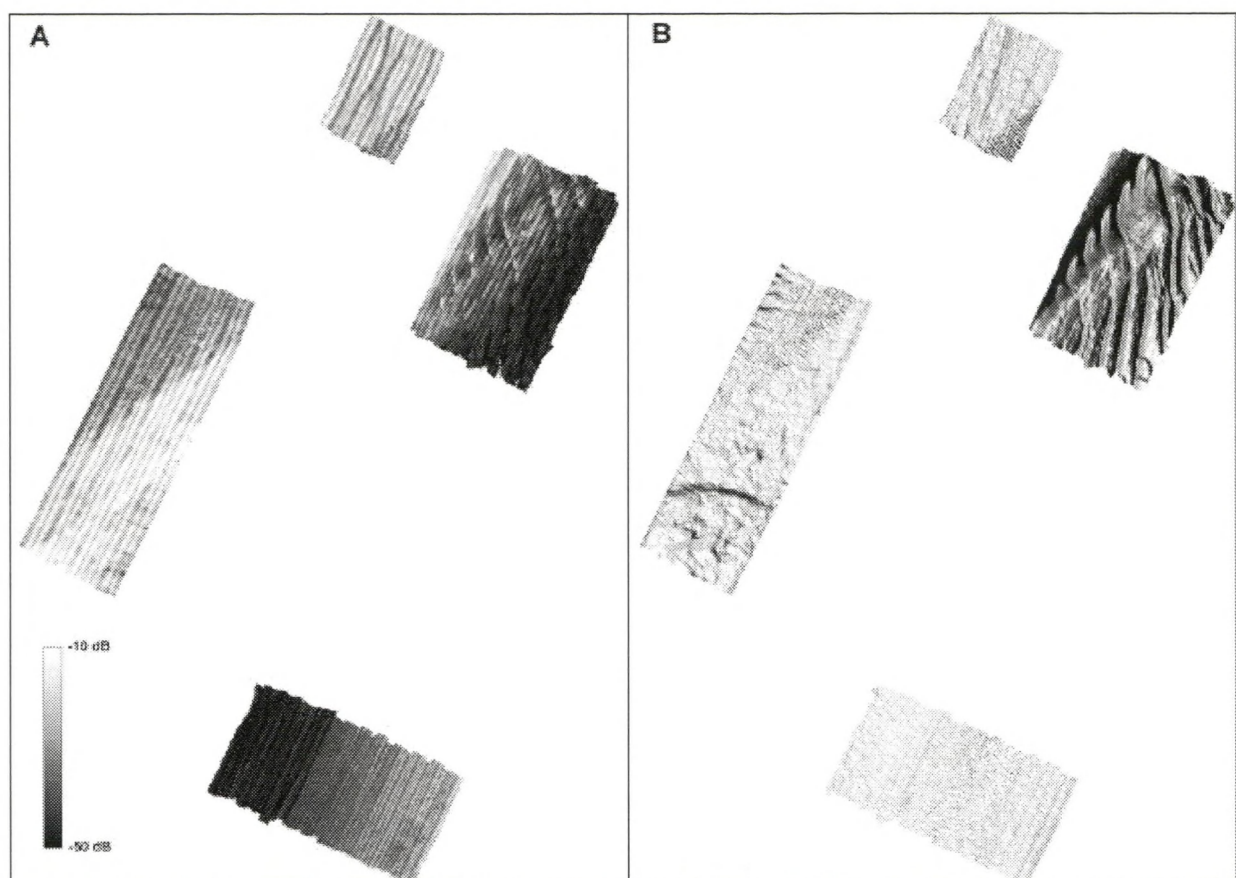


Figure 38 : Mosaïque sonar des 4 zones en regard de la carte morphologique (A : Mosaïque sonar : valeurs normalisées, résolution = 2X2 m ; B : Modèle numérique de terrain : résolution = 2x2 m ; voir figure 33 page 41 et figure 36 page 45 pour la localisation et la bathymétrie des zones).

L'image sonar révèle des zones claires à forte rétrodiffusion et des zones de faible rétrodiffusion. Sur cette image, le contraste est accentué par la normalisation des valeurs. Dans l'ensemble, l'image sonar montre une bonne corrélation avec la géomorphologie.

Les faits les plus marquants sont les suivants :

- Les valeurs BS les plus élevées sont observées sur une aire méridionale étendue de la zone GS du chenal ouest ; cette aire de forte rétrodiffusion est corrélée avec une morphologie particulière « en mamelons » ;
- Les valeurs intermédiaires caractérisent les zones à rides de sable (moyennes à très grandes dunes) ;
- la zone S2 montre un gradient de BS allant de valeurs élevées en bordure de la crête du banc vers des valeurs faibles en descendant le flanc oriental du banc ;

- Les valeurs les plus faibles sont observées sur le banc même, en bordure occidentale de la zone MA (zone de référence du Kwintebank) et sur la partie la plus élevée de la zone S2.

L'image sonar reflète la morphologie des zones où les rides de sable sont bien développées (dans le chenal : partie nord de la zone GS et partie sud de la zone S1 ; sur le banc : essentiellement la partie en dépression et l'ouest de la zone MA, le sud-ouest de la zone S2).

En tout logique, BS variant avec l'angle d'incidence, les flancs opposés des dunes orientées plus ou moins perpendiculairement à la direction de navigation montrent des valeurs de BS contrastées.

5.3.2. Classification dans Triton

La procédure de traitement des données est conforme à celle décrite précédemment¹⁰.

5.3.2.1. Extraction des paramètres BS

Les statistiques de base des 5 paramètres BS ont été calculées à partir des valeurs extraites des fichiers «.fvb». Pour chaque ligne de navigation, un fichier «.fvb» mémorise les valeurs des 5 paramètres (quantile, mean, pace, contrast et standard deviation¹¹).

Afin d'obtenir une statistique globale sur l'ensemble des valeurs extraites par Triton, les fichiers «.fvb» ont été fusionnés en un seul fichier regroupant toutes les valeurs.

A titre d'information, les statistiques de base pour l'ensemble des valeurs des 5 paramètres sont présentées dans le tableau 13 et à la figure 39 page suivante.

	QUANTILE	MEAN	PACE	CONTRAST	STD
Mean	34.72	30.23	59.06	6.53	5.61
Median	34.50	30.13	58.20	6.61	5.64
Minimum	23.00	19.26	38.23	1.07	2.23
Maximum	49.00	46.94	145.24	12.83	8.87
Lower Quartile 25 %	31.00	26.50	52.52	5.83	5.38
Upper Quartile 75 %	39.00	34.37	65.69	7.39	5.86
Quartile Range	8.00	7.87	13.17	1.57	0.48
Percentile 10 %	28.00	23.71	47.92	4.77	5.06
Percentile 90 %	41.00	36.65	71.00	7.95	6.05
Range	26.00	27.68	107.01	11.76	6.64
Variance	23.12	23.38	76.02	1.31	0.18
STD	4.81	4.83	8.72	1.15	0.42

Tableau 13 : Statistiques de base des 5 paramètres pour l'ensemble des valeurs extraites à partir des lignes de navigation de la campagne 0131 (nb de mesures = 36413 ; valeurs en -dB pour Quantile et Mean).

¹⁰ voir point 4.3.2. page 37

¹¹ voir point 4.3.2.1. page 37

Les statistiques calculées sur l'ensemble des valeurs extraites de la campagne 0131 peuvent servir de références pour des études cartographiques ultérieures. Elles permettront de s'assurer de la stabilité du système d'acquisition.

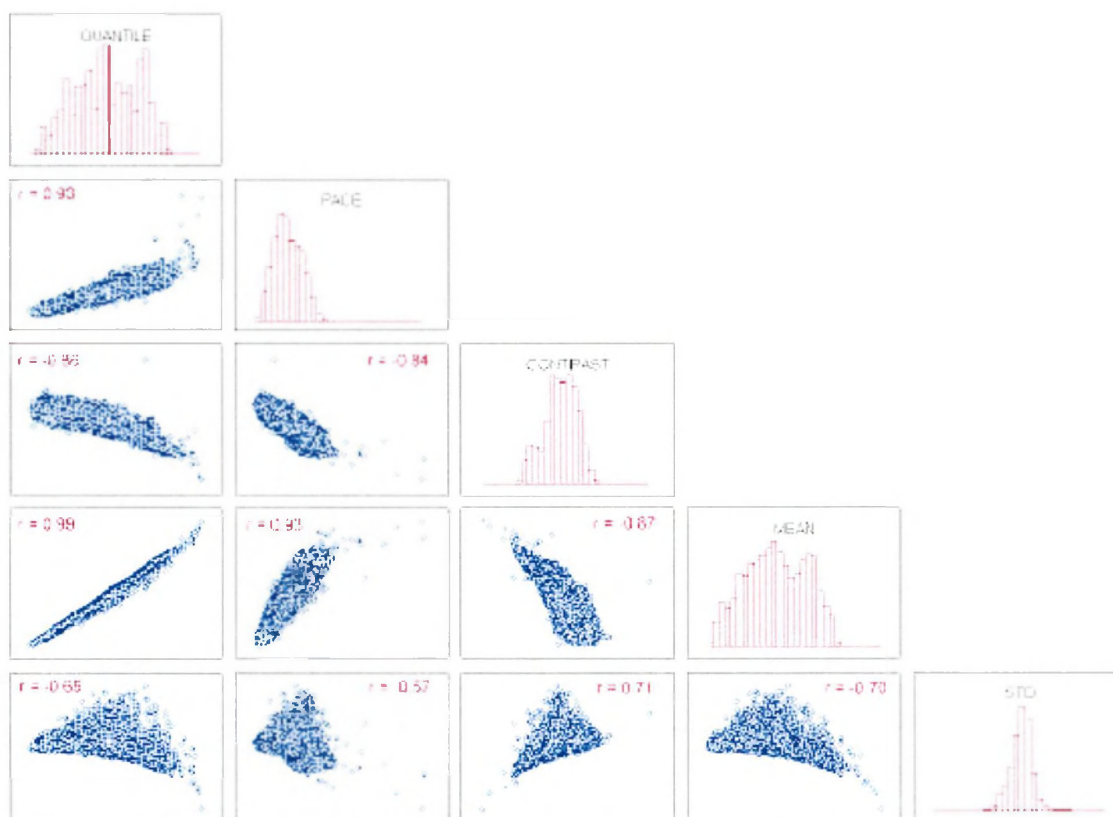


Figure 39 : Diagramme multivariable de corrélation pour l'ensemble des valeurs extraites à partir des lignes de navigation de la campagne 0131 (nb de mesures = 36413).

L'analyse statistique met en évidence la forte corrélation linéaire (r de Pearson) entre les 5 variables prises deux à deux. Tous les coefficients de corrélation sont significatifs pour un seuil de probabilité de 0,95. En toute logique, le Quantile et la Moyenne montrent le coefficient le plus élevé (0,99). Les paramètres STD et Contrast qui reflètent la variance de BS dans chaque parcelle (« patches ») sont corrélés négativement avec la moyenne et le quantile. Les zones de forte rétrodiffusion moyenne sont aussi les zones où la variance de la rétrodiffusion est la plus élevée. Le PACE qui mesure la dispersion spectrale est corrélé avec la Moyenne et le Quantile.

D'autre part, la comparaison entre les moyennes des 5 paramètres extraits avant et après le post-traitement bathymétrique des sondes révèle que le post-traitement n'a quasi aucune influence sur les valeurs BS. Contrairement aux recommandations de Kongsberg Simrad, il n'apparaît pas nécessaire d'effectuer un post-traitement bathymétrique pour entreprendre la classification acoustique.

	QUANTILE	MEAN	PACE	CONTRAST	STD
Sans PTB	34.67	30.19	58.66	6.56	5.61
Avec PTB	34.72	30.23	59.06	6.53	5.61

Tableau 14 : Comparaison des moyennes des 5 paramètres avant et après post-traitement bathymétrique (Ensemble des données de la campagne 0131 ; PTB = post-traitement bathymétrique).

5.3.2.2. Définition des classes

Les classes ont été définies spatialement par le traçage de polygones délimitant des aires où les paramètres présentent des gammes de valeurs relativement homogènes.

Deux approches sont possibles :

- soit des polygones restreints : classes aux limites nettes, de variance interne faible mais dont la signification spatiale est restreinte.
- soit des polygones étendus : classes plus larges, aux limites « plus floues », mais dont la signification spatiale est élevée.

Cette deuxième approche a été adoptée dans le cadre de ce travail en raison :

- du caractère relativement graduel de la rétrodiffusion en particulier dans la zone MA et S2 révélé par la mosaïque sonar¹²;
- de l'objectif de définir des classes de valeurs régionales qui vont pouvoir être utilisées pour la classification acoustique de l'ensemble de la concession 2

Au total, 5 classes acoustiques ont été définies dans le cadre de ce travail. Les domaines de répartition des classes sont présentés à la figure 40. La cartographie des classes et des 5 paramètres sont fournies figures 41 à 45, pages 51 à 55. Le tableau 15 présente les statistiques des 5 paramètres pour chacune des classes.

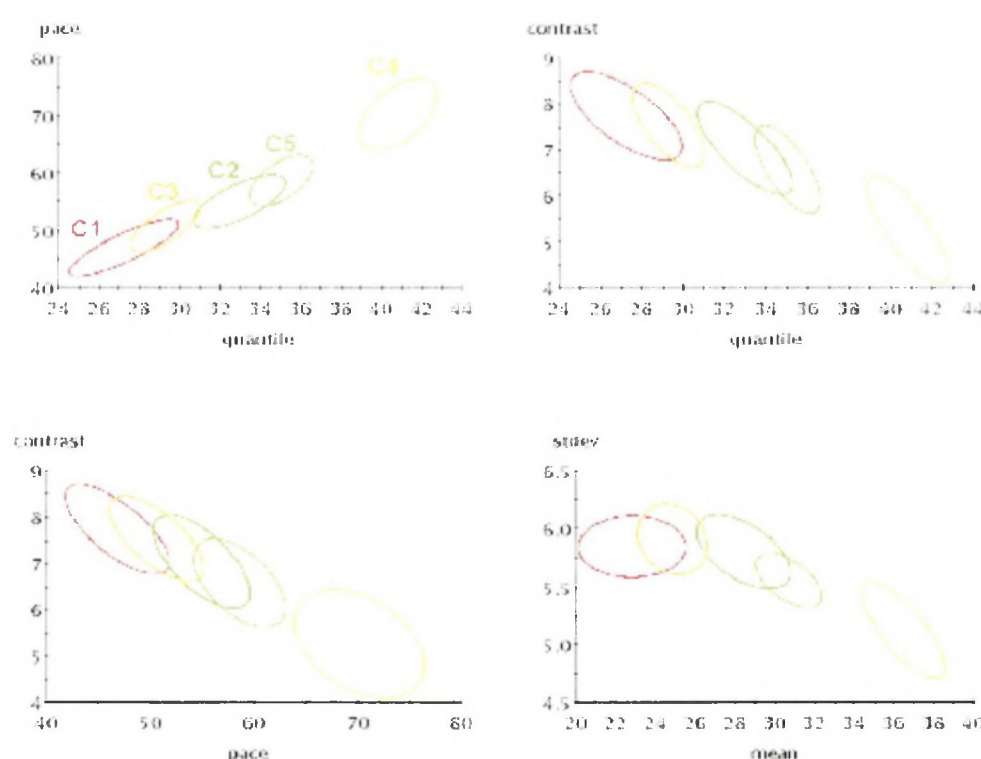


Figure 40 : Ellipses équiprobables (probabilité = 0,68) montrant les domaines des classes C1 à C5.

¹²voir point 5.3.1. page 46

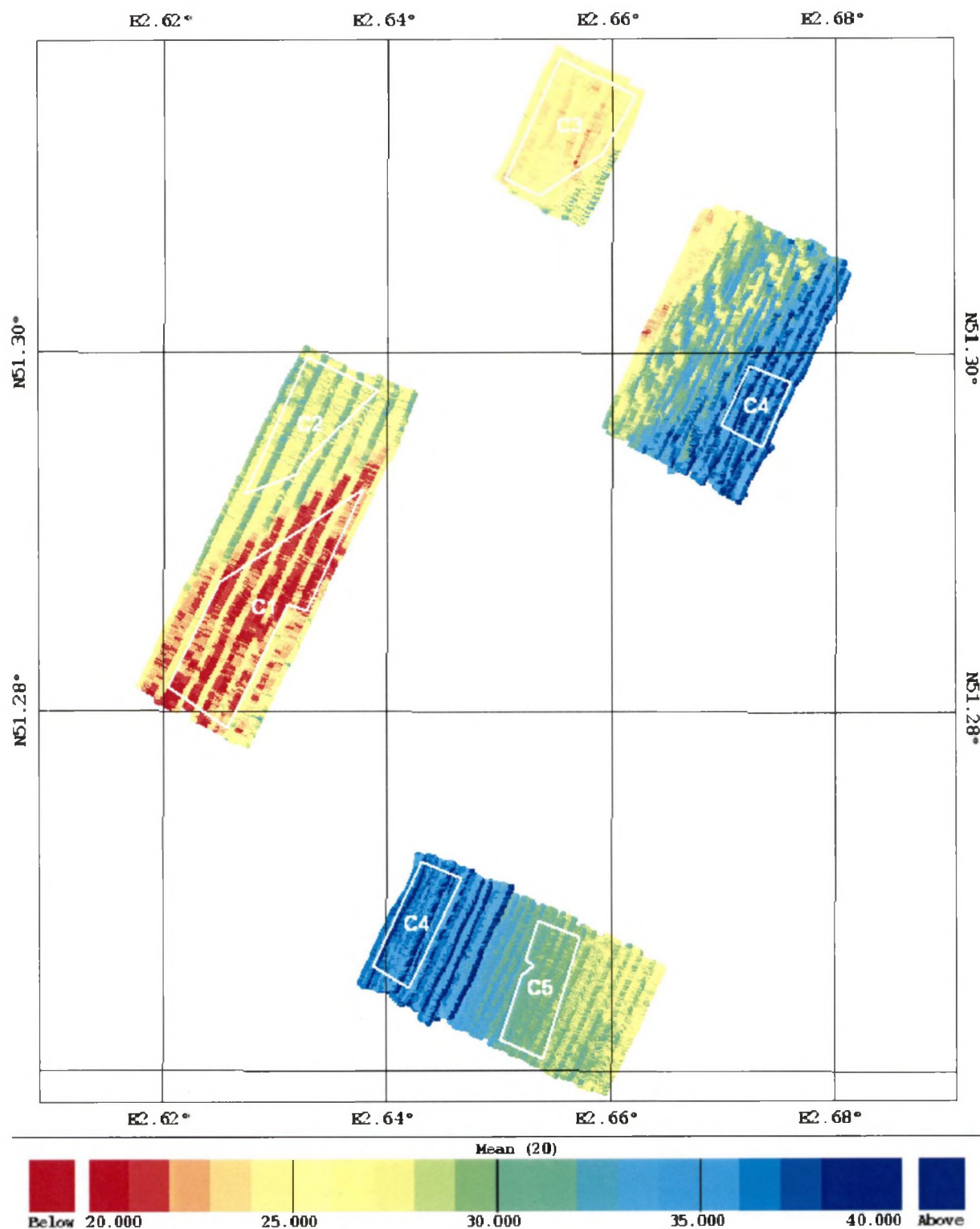


Figure 41 : Position des polygones définissant les classes sur la carte des valeurs de la moyenne.

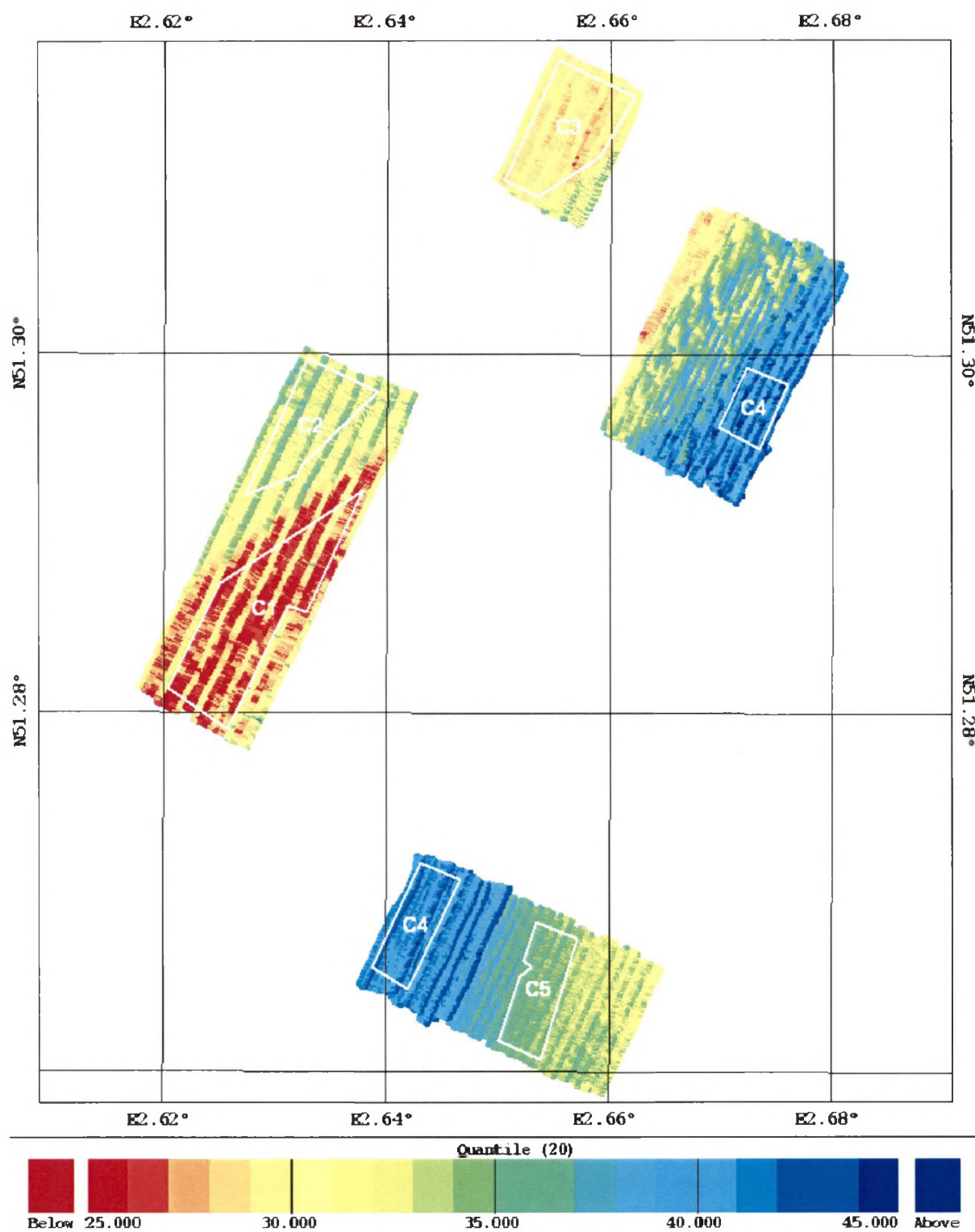


Figure 42 : Position des polygones définissant les classes sur la carte des valeurs du quantile 80 %.

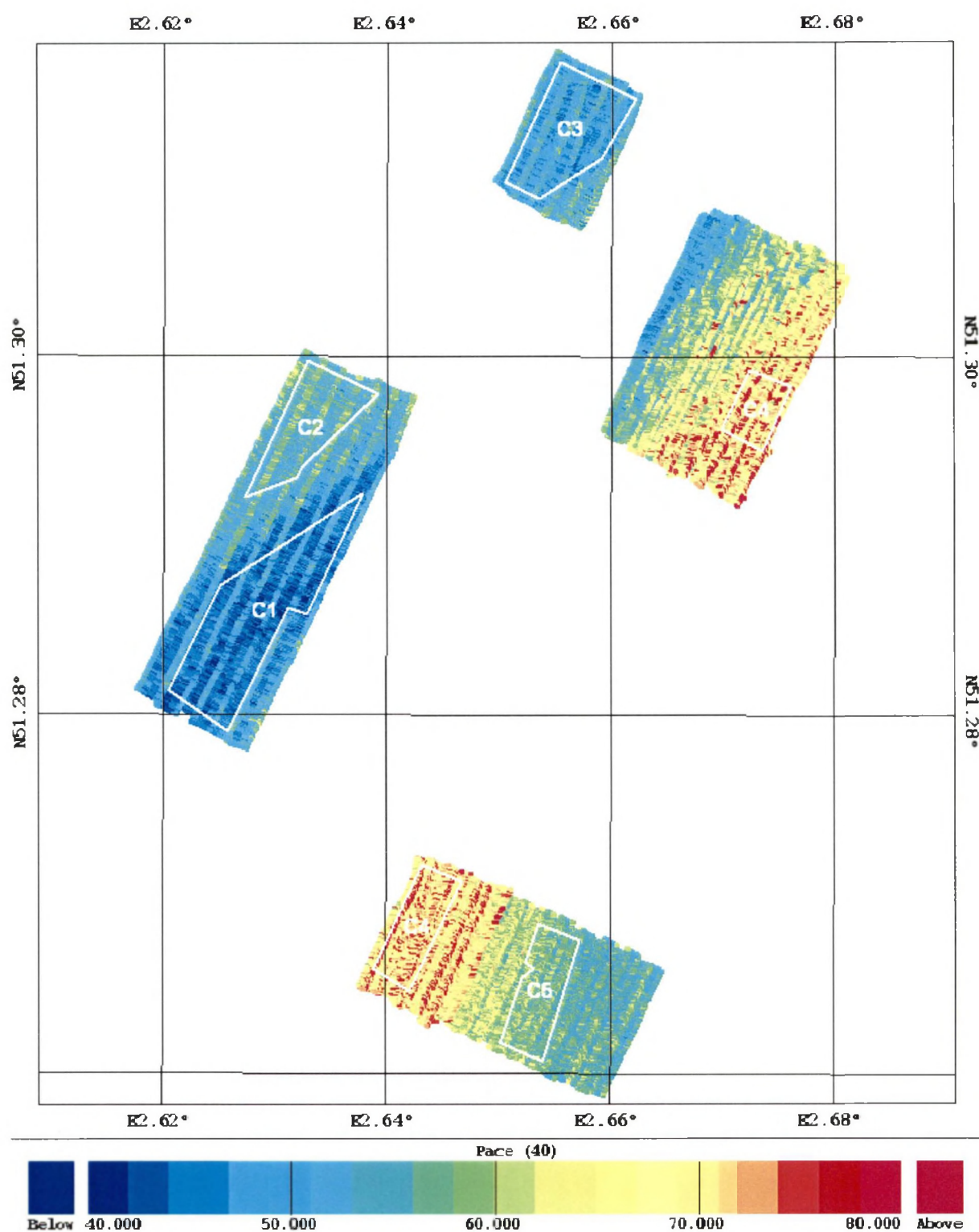


Figure 43 : Position des polygones définissant les classes sur la carte des valeurs du PACE .

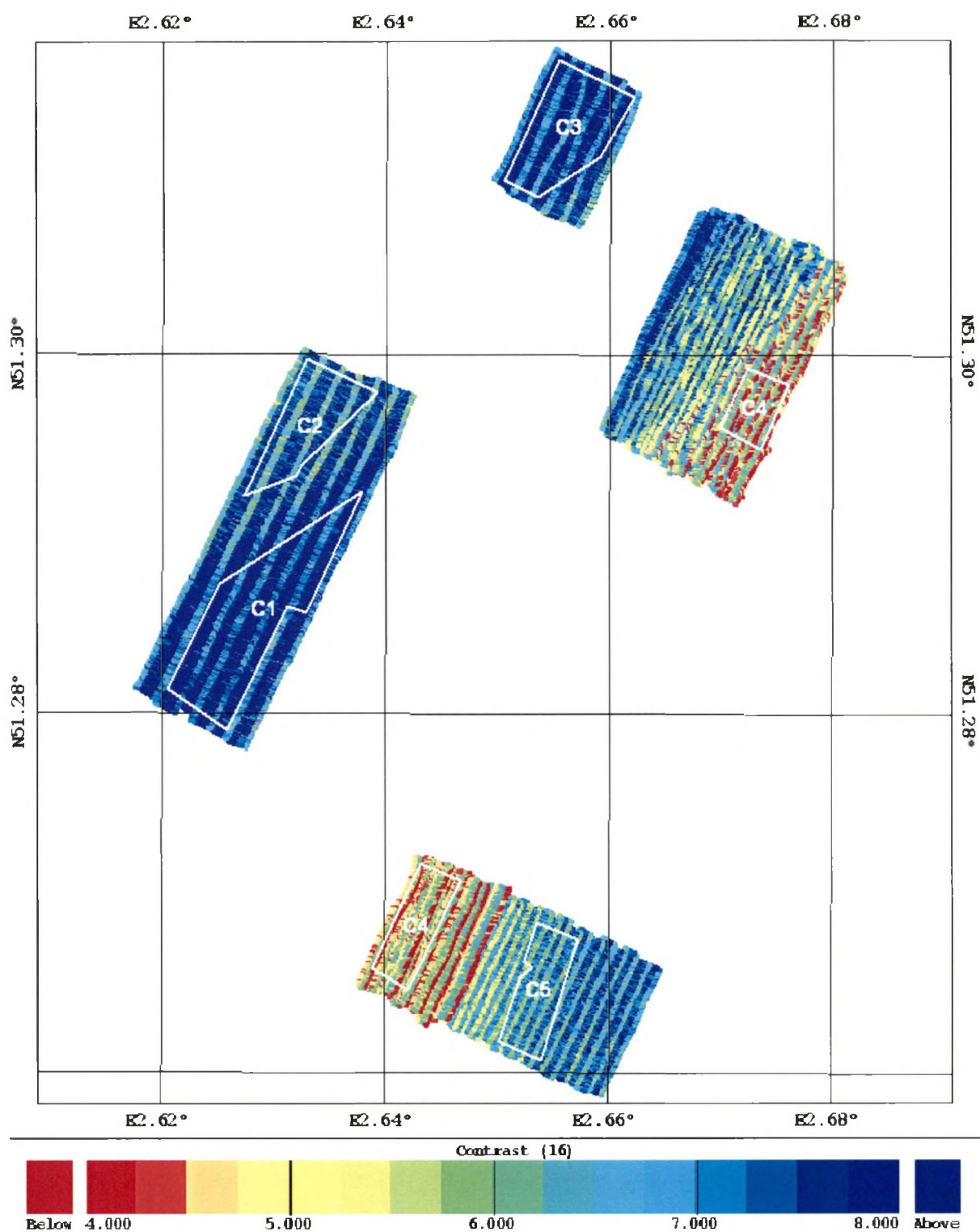


Figure 44 : Position des polygones définissant les classes sur la carte des valeurs du contraste.

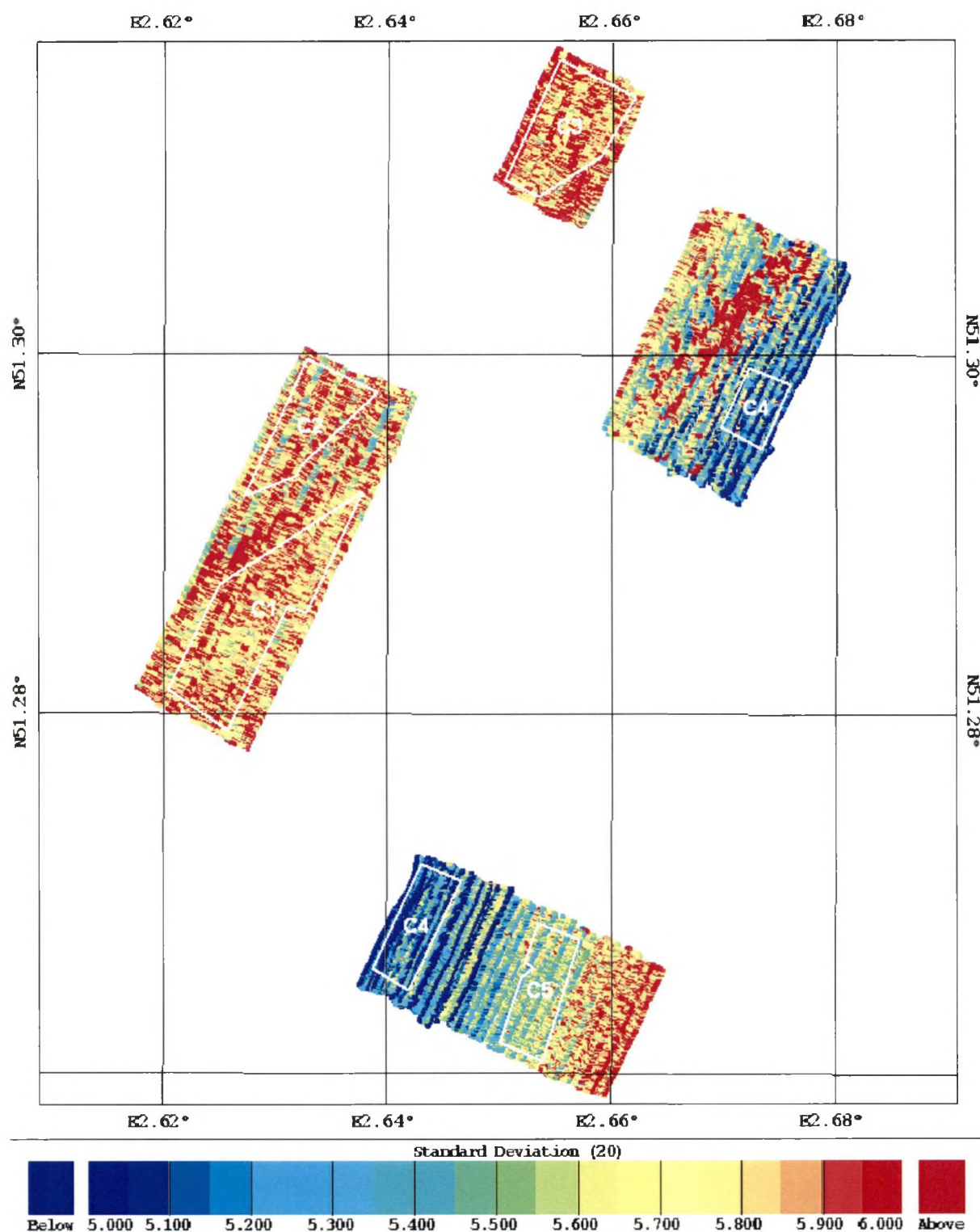


Figure 45 : Position des polygones définissant les classes sur la carte des valeurs de l'écart type (STD).

C1 - N = 2918									
	Mean	Median	Minimum	Maximum	Lower Quartile	Upper Quartile	Percentile 10%	Percentile 90 %	STD
QUANTILE	27.3	27.0	23.5	36.5	25.5	29.0	25.0	30.0	1.9
PACE	46.8	46.3	39.0	59.4	44.1	49.4	42.6	51.9	3.5
CONTRAST	7.7	7.8	6.1	10.0	7.2	8.3	6.8	8.6	0.7
MEAN	22.9	22.3	19.4	29.2	21.3	24.4	20.7	25.7	1.9
STD	5.8	5.8	5.3	8.3	5.7	5.9	5.6	6.1	0.2

C2 - N = 1307									
	Mean	Median	Minimum	Maximum	Lower Quartile	Upper Quartile	Percentile 10%	Percentile 90 %	STD
QUANTILE	33.0	33.0	28.5	37.0	32.0	34.5	31.0	35.0	1.6
PACE	55.0	54.8	46.2	68.4	52.6	57.3	50.7	59.4	3.3
CONTRAST	7.0	7.2	5.5	8.6	6.4	7.6	6.1	7.9	0.7
MEAN	28.4	28.2	24.1	32.7	27.1	29.9	26.4	30.7	1.7
STD	5.8	5.8	5.1	6.5	5.7	5.9	5.5	6.1	0.2

C3 - N = 1928									
	Mean	Median	Minimum	Maximum	Lower Quartile	Upper Quartile	Percentile 10%	Percentile 90 %	STD
QUANTILE	29.3	29.0	26.5	35.5	28.5	30.0	28.0	31.0	1.2
PACE	50.6	50.5	41.5	62.4	48.3	53.0	46.6	54.9	3.2
CONTRAST	7.5	7.6	6.0	9.3	7.0	8.0	6.6	8.3	0.6
MEAN	24.9	24.6	21.7	29.6	24.0	25.9	23.4	26.7	1.2
STD	5.9	5.9	5.4	7.3	5.8	6.0	5.7	6.2	0.2

C4 - N = 3215									
	Mean	Median	Minimum	Maximum	Lower Quartile	Upper Quartile	Percentile 10%	Percentile 90 %	STD
QUANTILE	40.9	41.0	36.0	46.0	40.0	41.5	39.0	43.0	1.4
PACE	70.2	69.9	56.5	88.4	67.0	73.1	64.4	76.1	4.5
CONTRAST	5.2	5.5	3.2	7.0	4.5	6.0	4.1	6.2	0.8
MEAN	36.5	36.4	31.6	41.8	35.5	37.2	34.7	38.8	1.5
STD	5.1	5.2	4.1	7.3	4.9	5.3	4.7	5.5	0.3

C5 - N = 1632									
	Mean	Median	Minimum	Maximum	Lower Quartile	Upper Quartile	Percentile 10%	Percentile 90 %	Std.Dev.
QUANTILE	35.1	35.0	32.0	39.0	34.5	36.0	33.5	36.5	1.1
PACE	58.6	58.5	50.2	68.8	56.3	60.7	54.7	62.7	3.1
CONTRAST	6.6	6.7	5.1	8.1	6.0	7.2	5.7	7.4	0.7
MEAN	30.7	30.7	27.8	34.4	29.8	31.6	29.2	32.2	1.2
STD	5.6	5.6	5.1	6.2	5.4	5.7	5.3	5.8	0.2

Tableau 15 :
Statistiques des classes acoustiques C1 à C5 (N = nombre de mesures, Quantile et Mean en -dB).

5.3.2.3. Classification

Finalement, les 4 zones investiguées ont fait l'objet d'une classification¹³. Les figures 46 et 47 présentent les cartes résultant de cette classification.

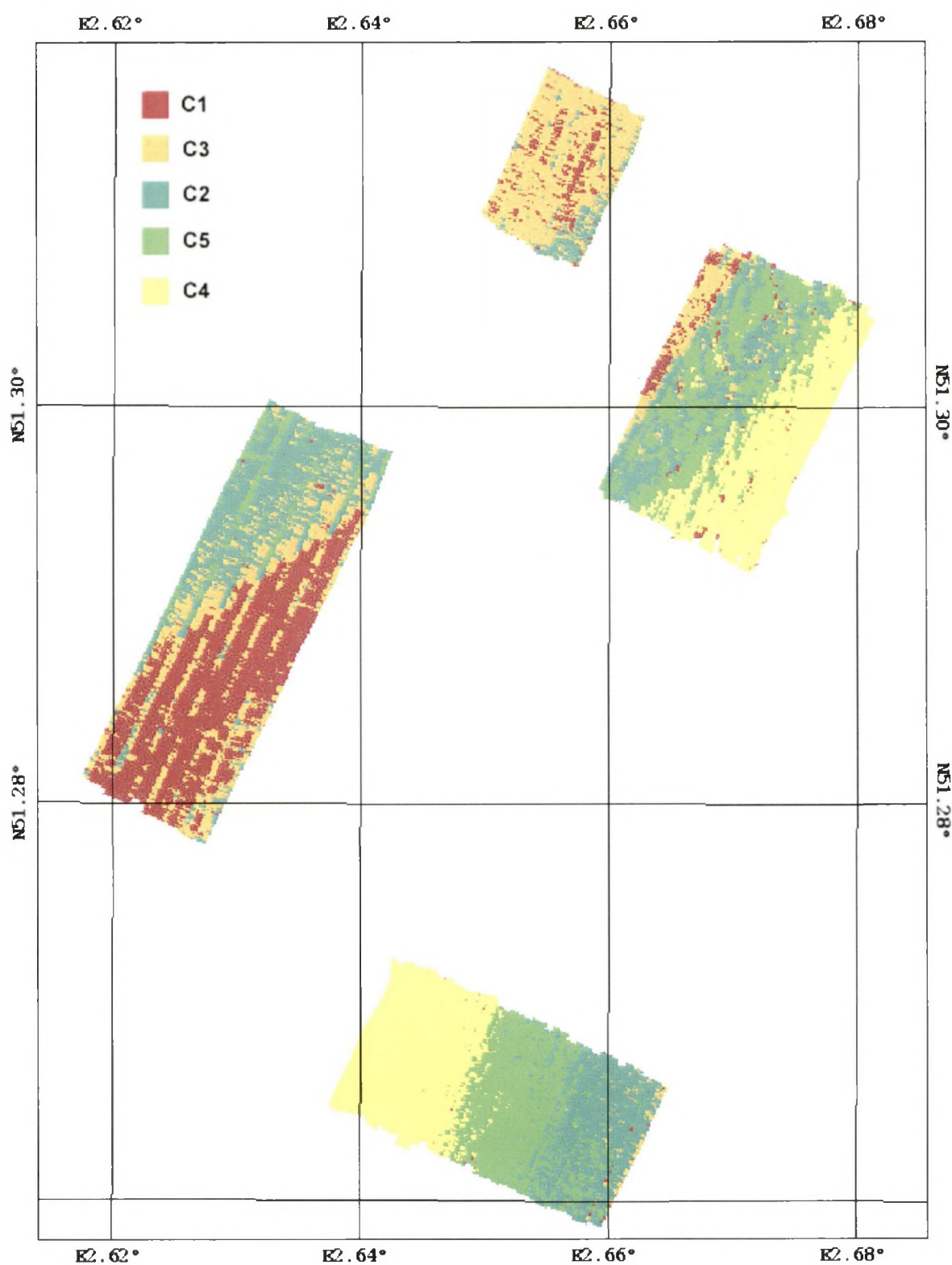


Figure 46 :
Classification acoustique des 4 zones (résolution : 10 x 10 m ; classification brute sans segmentation)

¹³ voit point 4.3.2.3. page 39

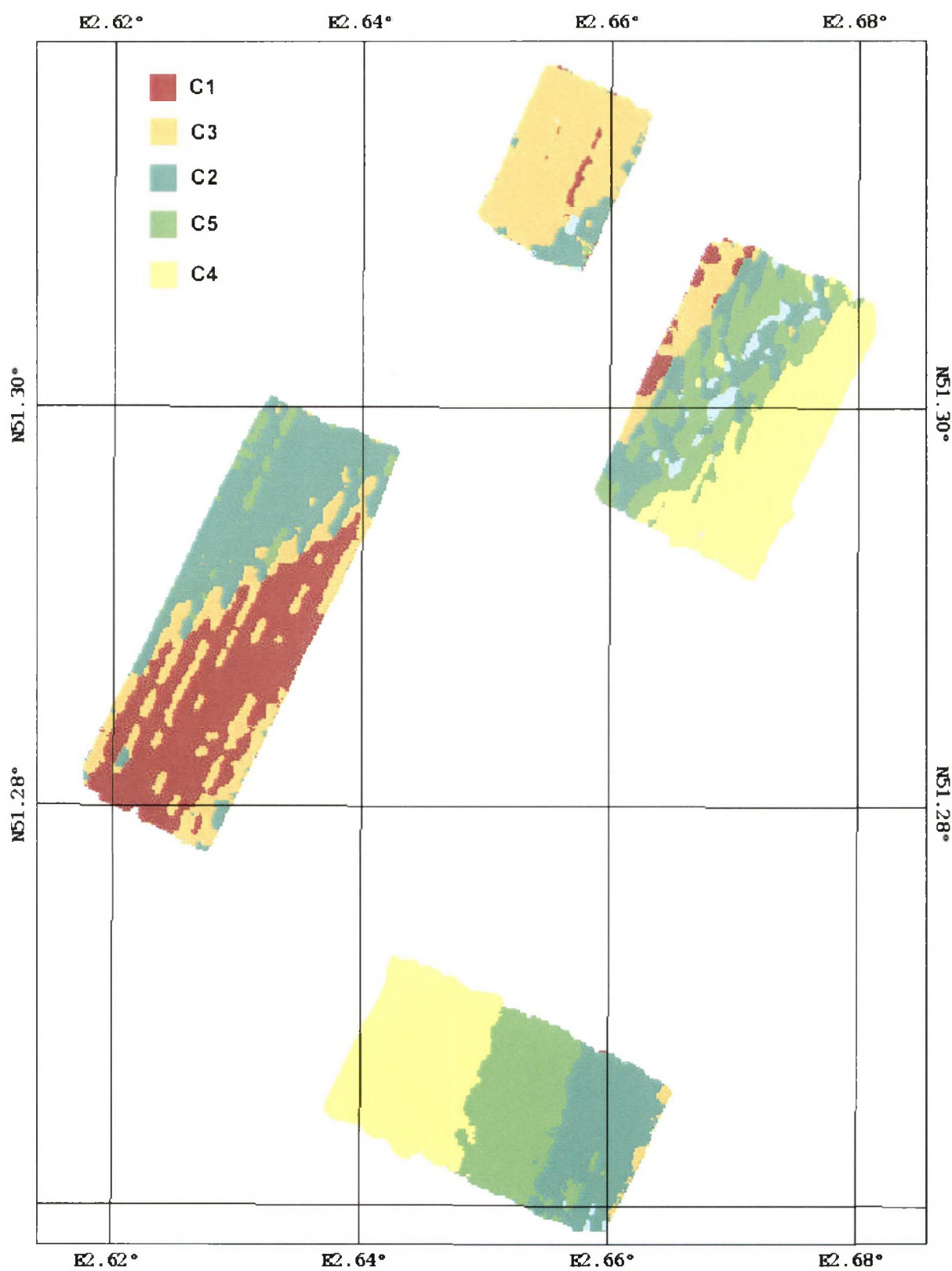


Figure 47 :
 Classification acoustique des 4 zones
 (résolution : 10 x 10 m ; classification brute suivie d'une segmentation de l'image avec filtre = 5)

6. Validation des classes

La validation des classes constitue l'étape finale de ce travail. Le but est de corrélérer les résultats obtenus en sonar multifaisceaux avec la réalité de la nature du fonds marin. Cette réalité est matérialisée par les échantillons prélevés à la benne Van Veen. Rappelons que l'organisation de la campagne 0131 a permis de minimiser l'intervalle de temps séparant la mesure en sonar multifaisceaux et la prise d'échantillons de telle sorte que les échantillons soit le plus possible représentatifs de la nature du fonds marin au moment de l'insonification.

Les analyses granulométriques des échantillons prélevés lors de la campagne 0131 sont en cours au Laboratoire de Géographie de l'Université de Gent. Actuellement, les résultats finaux ne sont pas disponibles. Pour cette raison, dans le cadre de ce rapport, la corrélation entre les résultats fournis par l'approche indirecte du fonds marin par l'utilisation du sonar multifaisceaux et l'approche directe par la prise d'échantillon à la benne Van Veen sera essentiellement qualitative.

La figure 48 page 60 présente la position des échantillons sur la carte résultant de la classification. Associée au tableau 12 page 42 qui décrit la nature des échantillons, la figure 48 permet de dégager des corrélations claires entre les classes acoustiques et la nature des échantillons prélevés dans les zones attribuées à ces classes.

La tendance générale est résumée par la figure de synthèse 49 page 61 qui présente l'ensemble des données à l'échelle du Kwintebank.

Globalement, les classes s'ordonnent suivant un gradient granulométrique :

- La classe 1 à laquelle correspondent les valeurs BS les plus élevées correspond aux sédiments les plus grossiers. Cette classe cartographie clairement le champ de gravier de la zone GS du chenal. De plus, à cette classe 1 est associée une morphologie particulière « en mamelon » ;
- A l'opposée, la classe 4, nettement démarquée par rapport aux autres, montre les valeurs BS les plus faibles et correspond précisément aux sables les plus fins et les mieux triés observés sur le banc ;
- Les classes 2 et 5 montrent des valeurs BS intermédiaires. Ces classes caractérisent les zones sableuses de granulométrie variable, où se développent des dunes : champs de petites dunes en nappe dans le chenal, zone des très grandes dunes sur le banc ;
- La classe 3 est représentée essentiellement sur une aire plate de la zone S1 du chenal et localement sur le flanc occidental du banc. Bien que montrant des valeurs BS paradoxalement élevées (chevauchant même les valeurs de la classe 1), les échantillons associés à cette classe correspondent à des sables fins silto-argileux. Ces valeurs BS élevées pourraient être liées à l'abondance de terriers d'annélides polychètes (*Lagis koreni*) qui cimentent le sédiment, lui conférant des propriétés acoustiques proches de celles des graviers ;

Un résumé des caractéristiques de chacune des classes, accompagné de photos de sédiments, est présenté en pages 62 à 67.

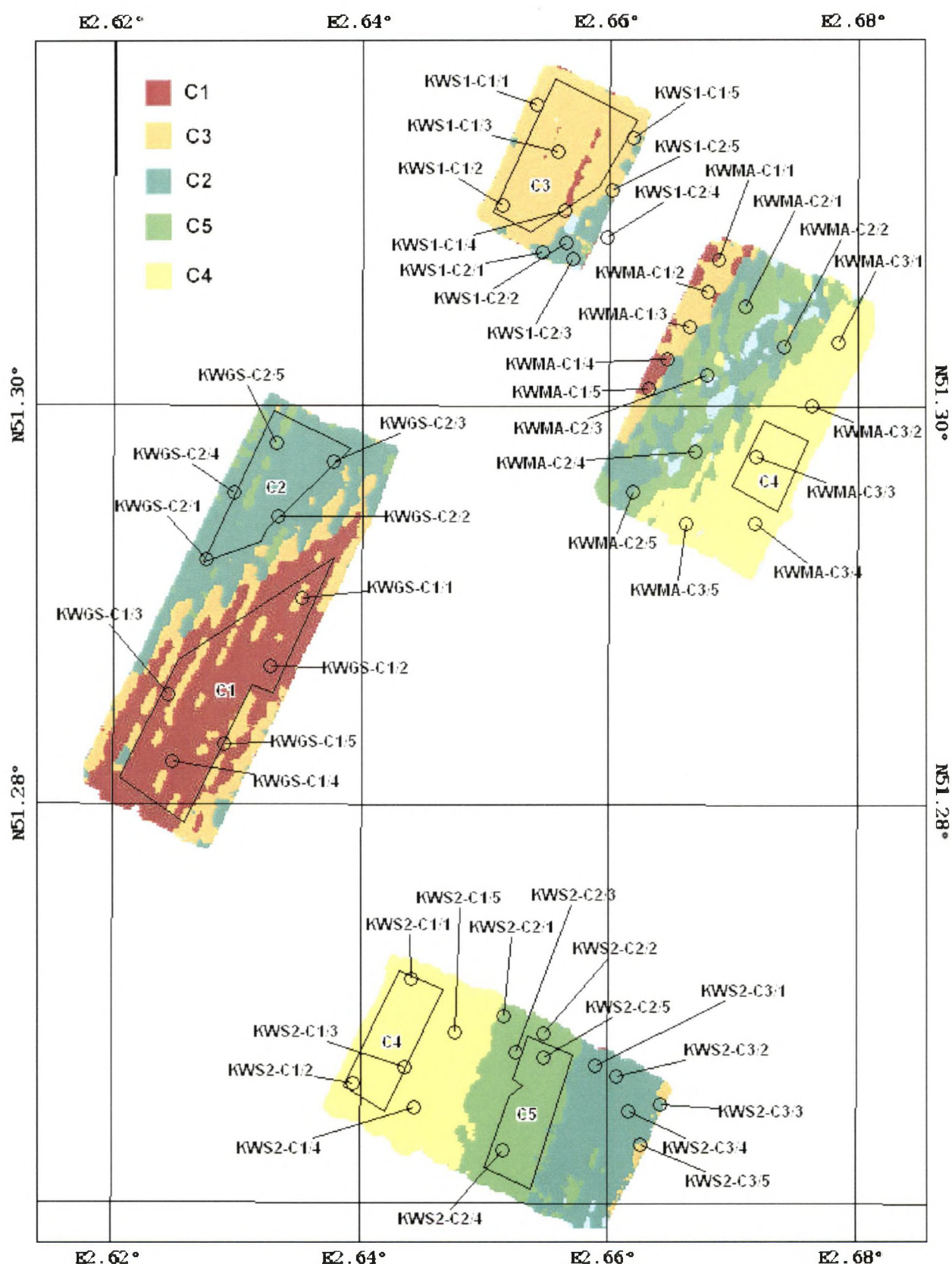


Figure 48 : Position des échantillons prélevés à la benne Van Veen sur la carte résultant de la classification (résolution = 10 x 10 m, filtre de segmentation = 5 ; les polygones labellisés représentent les zones qui intègrent les valeurs définissant les classes).

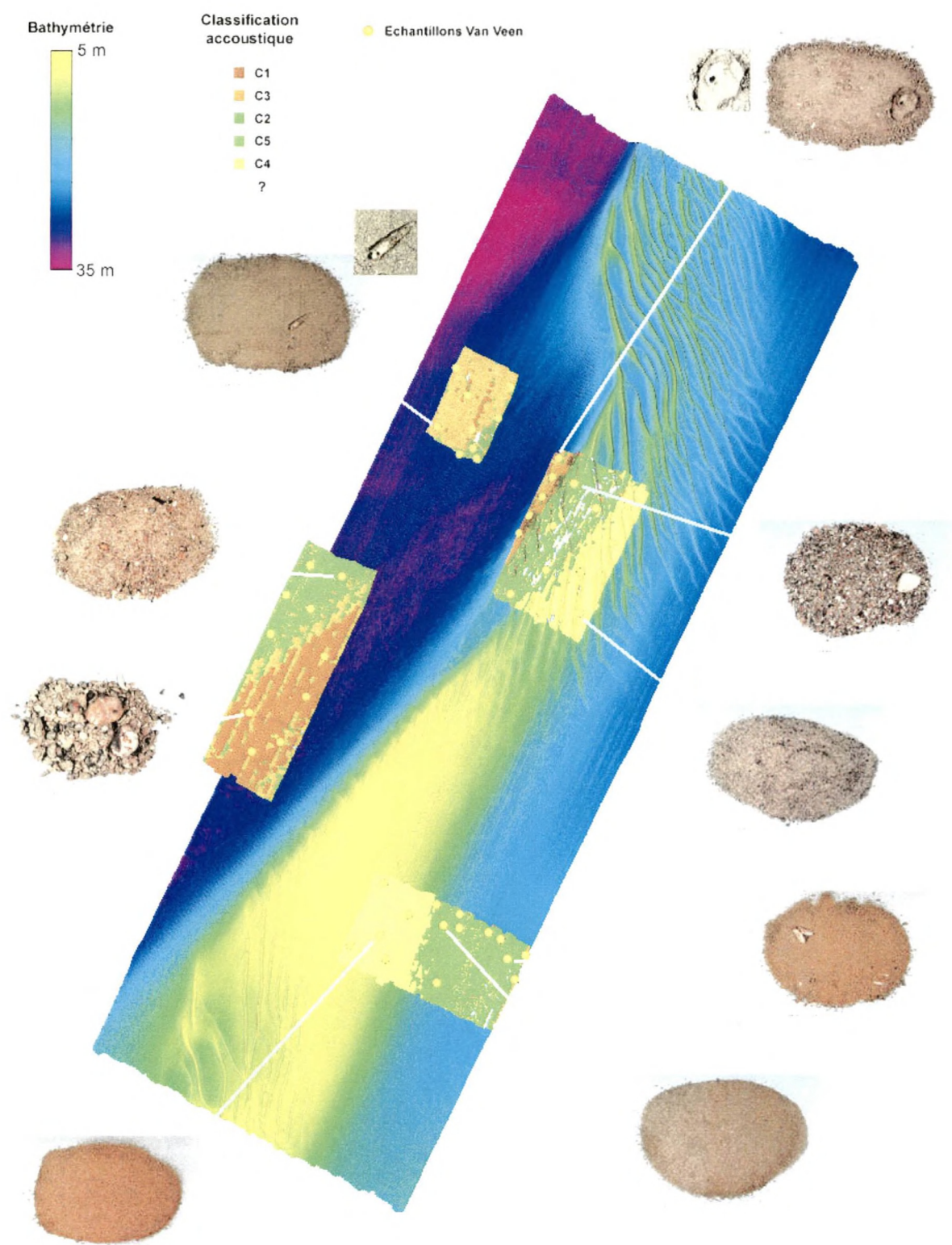


Figure 49 : Synthèse des données et validation des classes : zones classifiées (résolution = 10 x 10 m) sur le modèle de terrain du Kwantebank (résolution = 5 x 5 m) ; position des échantillons prélevés à la benne Van Veen lors de la campagne 0131 ; photos d'échantillons représentatifs de la nature des classes acoustiques.

Classe 1

BS	LITHOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> - QUANTILE : -27 dB - PACE : 47 - CONTRAST : 7.7 - STD : 5.8 	<ul style="list-style-type: none"> - Cailloutis à matrice sableuse ou argileuse - Sables riches en coquilles entières - Sables graveleux
<p>La classe 1 correspond aux zones de valeurs de BS à la fois les plus élevées et les plus variables. Elle englobe les échantillons de granulométrie grossière, du cailloutis aux sables graveleux et sables riches en coquilles entières. Dans le chenal, la partie sud de la zone GS assignée à la classe 1 correspond à un champ de graviers. Les échantillons les plus grossiers proviennent de cette zone.</p>	
<p>La classe 1 est associée à une morphologie « en mamelon » caractéristique.</p>	



KW-GS-0131-C19

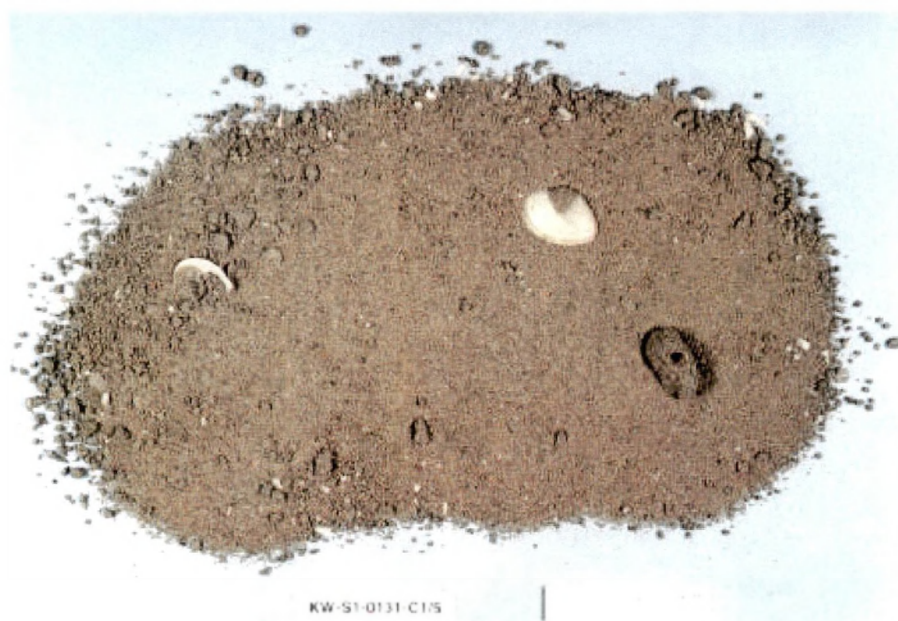


KW-GS-0131-C12

Classe 3

BS	LITHOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> - QUANTILE : -29 dB - PACE : 51 - CONTRAST : 7.5 - STD : 5.9 	<ul style="list-style-type: none"> - Sables fins silto-argileux - Coquilles entières - Faune généralement abondante - Terriers d'annélides polychètes (<i>Lagis koreni</i>)

La classe 3 est représentée essentiellement sur une aire plate de la zone S1 du chenal et localement sur le flanc occidental du banc. Bien que montrant des valeurs BS paradoxalement élevées (chevauchant même les valeurs de la classe 1), les échantillons associés à cette classe correspondent à des sables fins silto-argileux. Ces valeurs BS élevées pourraient être dues à l'abondance de terriers d'annélides polychètes (*Lagis koreni*) qui cimentent le sédiment, lui conférant des propriétés acoustiques proches de celles des graviers de la classe 1.



Classe 2

BS	LITHOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> - QUANTILE : -33 dB - PACE : 55 - CONTRAST : 7.0 - STD : 5.8 	<ul style="list-style-type: none"> - Sables graveleux - Sables fins à débris de coquilles et coquilles entières
<p>La classe 2 caractérise les champs de dunes moyennes dans le chenal sur les zones BS et S1 et la partie orientale de la zone S2, également modelée par des dunes moyennes. Elle englobe des sables de granulométrie variable, plus grossiers dans le chenal, plus fin sur le flanc du banc dans la zone S2.</p>	



KW-GS-0131-C2/2



KW-S2-0131-C3/4

Classe 5

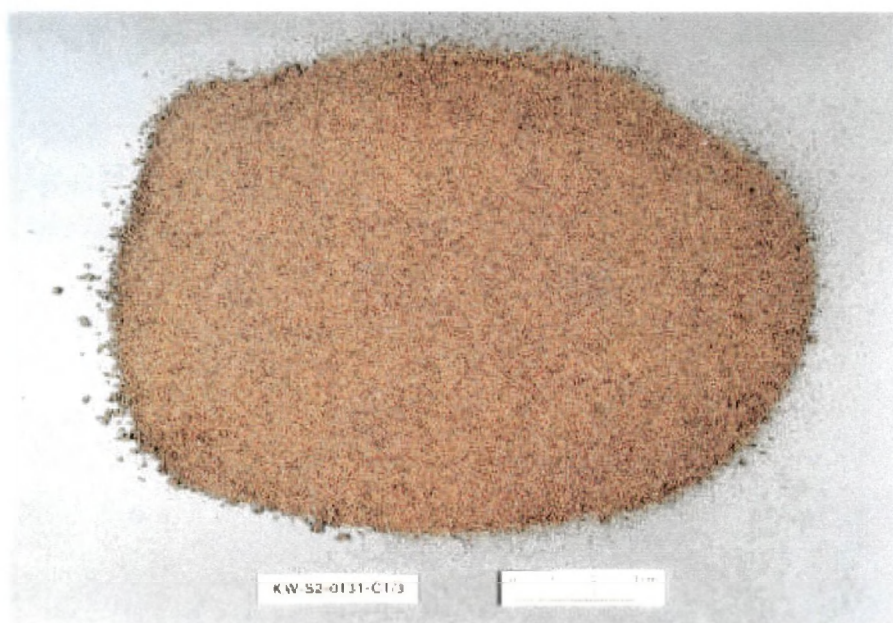
BS	LITHOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> - QUANTILE : -35 dB - PACE : 59 - CONTRAST : 6.6 - STD : 5.6 	<ul style="list-style-type: none"> - Sables très riches en débris de coquilles - Sables fins à rares débris de coquilles
<p>La classe 5 caractérise en grande partie la zone en dépression de la partie centrale du Kwintebank. Cette zone fait l'objet d'une exploitation intensive. Malgré une granulométrie d'apparence plus fine, la partie centrale de la zone S2 est assignée à cette classe.</p>	



Classe 4

BS	LITHOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> - QUANTILE : -41 dB - PACE : 70 - CONTRAST : 5.2 - STD : 5.1 	<ul style="list-style-type: none"> - Sables fins homogènes

Cette classe 4 montre les valeurs BS les plus faibles. Toute la partie orientale de la zone MA et la partie la plus haute de la zone S2 sont assignées à cette classe. Grande homogénéité de faciès, confirmée par les valeurs les plus faibles des mesures de dispersion de BS (CONTRAST et STD).



7. Conclusions

Contrairement aux sables dont la granulométrie peut laisser supposer un renouvellement par transit sédimentaire sous l'action des courants de marée, les graviers du plateau continental belge, de par leur nature, sont le type même de la ressource non-renouvelable.

En accord avec le plan fédéral de développement durable, un projet d'adaptation des droits de concession en cours d'évaluation au sein du Fonds prévoit la distinction entre sable et gravier pour la redevance perçue sur le volume extrait. Du point de vue de la mission de contrôle du Fonds, il semble difficile de concevoir un système de redevances différenciées pour les sables et graviers qui ne s'appuierait pas sur une cartographie des ressources minérales dans les deux zones de concession.

Dans cet esprit de gestion durable, l'objectif initial de ce travail était d'évaluer les potentialités du sondeur multifaisceaux Kongsberg Simrad EM1002S pour la discrimination des sables et des graviers dans la zone de concession 2.

Cette étude de faisabilité repose sur une campagne de mesures spécifiques effectuées à bord du navire de recherche Belgica. Les données acquises par sonar multifaisceaux sur quatre zones, deux situées sur le Kwintebank et les deux autres sur le chenal occidental bordant le banc, ainsi que les prélèvements simultanés de sédiments constituent le point de départ de cette étude.

Le traitement approfondi des données d'intensité rétrodiffusée enregistrées par le sonar multifaisceaux conduit à définir 5 classes acoustiques. L'analyse cartographique met en évidence des corrélations entre les classes acoustiques et la nature des échantillons prélevés dans les zones attribuées à ces classes.

Globalement, les valeurs d'énergie acoustique rétrodiffusée suivent un gradient granulométrique. La classe 1 qui montre les valeurs d'intensité rétrodiffusée les plus élevées correspond aux sédiments les plus grossiers.

Cette étude met en évidence une différence de la réponse acoustique des champs de graviers par rapport aux zones de sables et confirme le potentiel du sonar multifaisceaux pour la cartographie des sédiments : la combinaison de l'image sonar avec l'information bathymétrique devrait permettre de reconnaître avec une grande précision les limites des champs de graviers.

Les classes définies dans le cadre ce travail constituent une base solide pour une classification acoustique du fonds marin des deux zones de concession.

Pour finir, à court terme, la mise en relation des données acoustiques avec les données granulométriques quantitatives devraient nous permettre de mieux comprendre les différences de réponses d'intensité rétrodiffusée observées dans les zones de sable.

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.

Augris C., Clabaut P. & Tessier B. avec la collaboration de Carré D., 1995.

Le domaine marin côtier du Nord - Pas de Calais. Cartographie des Formations superficielles. Carte à l'échelle 1/100 000 (50° 50' N) Projection Mercator. Edition IFREMER – Région Nord-Pas de Calais.

Augris C. & Clabaut P. avec la collaboration de Denis J. & Pergent G., 2001.

Cartographie géologique des fonds marins côtiers. Exemples le long du littoral français. Connaissance et exploration des fonds océaniques, bilans et prospectives, Editions IFREMER, 75 p.

Berné S., Allen G., Auffret J. P., Chamley H., Durant J. & Weber O., 1989.

Essai de synthèse des dunes hydrauliques géantes tidales actuelles. *Bulletin de la Société Géologique du Nord*, 6, 1145-1160.

Cameron D., van Doorn, Laban C. & Streif H. J., 1993.

Geology of the Southern North Sea Basin. Coast lines of the Southern North Sea, Proceedings, 8th Symposium on coastal and ocean management, America Shore and Beach Preservation Associations, July 19-23, 1993, New Orleans, Louisiana, 14-26.

Ceuleneer G. & Lauwaert B., 1987.

Les sédiments superficiels de la zone des « vlaamse banken ». Unité de Gestion du Modèle Mer. Document explicatif de huit cartes sédimentologiques, publiées séparément et portant les références MUMM/SED/87/01 à 08, 34 p.

Clarke J. H., 2001.

Lectures 1, 11, 17, 21, 23, 26, 28 and 34 in 25th UNB Ocean Mapping Group Multibeam Course, Hogeschool van Amsterdam, 15-20 October 2001

Degrendele K., Roche M. & Schotte P., 2002.

Synthèse des données acquises de novembre 1999 à avril 2001 quant à l'incidence des extractions sur le Kwintebank. Rapport interne Fonds – Ministère des Affaires Economiques, 23 p.

Degrendele K., Roche M. & Schotte P., 2002.

Birkenfels post-processing and results of the surveys 090701 and 100701 – Belgica Campaign 2001-19. Rapport interne Fonds – Ministère des Affaires Economiques, 5 p.

De Moor G., 1984.

Morfodynamiek an sedimentdynamiek rond the Kwintebank. Brussel, Ministerie Economische Zaken, Vol. I, II, III, IV, V ; 219, 71, 65, 39, 36 p.

De Moor G., 1985.

Shelf bank morphology off the Belgian coast. Recent methodological and scientific developments. In *Recent trends in physical geography. Liber Amicorum L. Peeters* (M. Van Molle, ed.), Brussels, VUB Study Series, 20, 47-90.

De Moor G. & Lanckneus J. Editors, 1993.

Sediment mobility and morphodynamics of the Middelkerke bank. Final Report. Mast Project -0025-c, Relation between Seafloor Currents and Sediment Mobility in the Southern North Sea. Brussels, Commission of European Community, Directorate General XII, 244 p.

De Moustier C., 2001.

Lectures 2, 4, 8, 9, 10, 16, 20, 29 and 33 in 25th UNB Ocean Mapping Group Multibeam Course, Hogeschool van Amsterdam, 15-20 October 2001

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.

Goethals H. & Roche M., 2001.

Méthode permettant la digitalisation des profils sismiques pour l'établissement d'un modèle numérique de terrain dans la zone de concession 2 du plateau continental belge. Rapport inédit Service géologique – Fonds.

Hammerstad E., 1994.

Backscattering and sonar image reflectivity. EM12/950/1000, Kongsberg Simrad Technical Note, 10 p.

Hartsuiker F.E.A.P., 1992.

Mariene Geodesie: Practische toepassingen. in *The Hydrographic Society, Benelux Branch* (Editor) Mariene Geodesie, Meten op zee: p35-45.

Henriet J. P. & De Vos K., 1983.

Detail profielen over de Kwintebank in Seismic onderzoek op het Belgisch continentaal plat. Eerste Fase. Ontginningszone 2. Rapport Ministerie van Economische Zaken, Administratie van het Mijnwezen, 31 p.

Henriet J. P. & De Moor G. Editors, 1989.

The Quaternary and Tertiary geology of the Southern Bight, North Sea. A monography initiated by the International Colloquy on the Quaternary and the Tertiary of the Southern Bight, North Sea, Ghent, Belgium, May 23-30 1984. Published by the Ministry of the Economic Affairs – Belgian Geological Survey, 241 p.

Kongsberg Simrad, 1999-2001.

EM1002 Multibeam echo sounder. Product Description, 160866, 23 p.

EM1002 Multibeam Echosounder. Operator Manual – Base Version. Doc. 850-160977, 423 p.

Neptune Bathymetric post-processing. Doc. 850-130021, 481 p.

Triton Instruction Manual. Doc. 160146A, 58 p.

Poseidon Operator Manual. Doc. 850-164063C, 90 p.

Laga P. & Vandenberghe N., 1989.

A geological profile along the Belgian coast. In Henriet J. P. & De Moor G. (Ed.). *The Quaternary and Tertiary geology of the Southern Bight, North Sea*. Published by the Ministry of the Economic Affairs – Belgian Geological Survey, 241 p.

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*. Published by the Ministry of the Economic Affairs – Belgian Geological Survey, Chapter 18, 229- 241.

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, 119 p.

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.

Lurton X., Augustin J.-M. & Voisset M., 2001.

La cartographie acoustique sous-marine. In *Le monde des sons, Dossier Pour La Science*, Juil 46-53.

Mayer L., 2001.

Lectures 3, 6, 19, 22, 25, 27, 32 and 35 in 25th UNB Ocean Mapping Group Multibeam Course, Hogeschool van Amsterdam, 15-20 October 2001

Michaux P., 2001.

Acquisition et traitement des données / Sondeurs multifaisceaux (SMF) - Site internet du SHOM - http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_acquisition/smf.htm.

- Milvang O., Schistad Solberg A., Andersen T., Huseby R. B. & Weisteen Bjerde K., 1995.
Seabed classification from sonar data. Norsk Regnesentral Anvendt Dataforskning. Internal Report, 45 p.
- Stolk A., 1993.
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 p.
- 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, Chapman and Hall, 95-125.
- Trentesaux A., 1993.
Structure et dynamique sédimentaire du Middelkerke Bank, Mer du Nord méridionale. Thèse en Géologie et Géochimie sédimentaires, Université des Sciences et Techniques de Lille, n° d'ordre 1194, 227 p.
- Trentesaux A., Stolk A. & Berné S., 1999.
Sedimentology and stratigraphy of a tidal sand bank in the southern North Sea. *Marine Geology*, 159, 253-272.
- Tytgat J., 1989.
Dynamics of gravel in the superficial sediments of the Flemish Banks, southern North Sea. *In* Henriët J. P. & De Moor G. (Ed.), The Quaternary and Tertiary geology of the Southern Bight, North Sea. Published by the Ministry of the Economic Affairs – Belgian Geological Survey, Chapter 18, 217- 228.
- Van Cauwenberghe C., 1971.
Hydrografische analyse van de Vlaamse banken langs de Belgisch-Franse kust. *Ingenieurstijdingen*, 4, 141-149.
- Van Cauwenberghe C., Dekker L., Schuurman A., 1993.
M2 Tidal Reduction Method for Coastal Zones. Rapport nr. 33 van de Hydrografische Dienst der Kust, Ministerie van Openbare Werken.
- Vande Wiele T., 2001.
Routines C pour l'établissement des fichiers de correction marégraphiques suivant le modèle M2 (Adviesdienst Vlissingen, Directie waterhuishouding en waterbeweging) - Non publié - RUMACOG - Université de Gent.
- Vernemmen C. & Degrendele K., 2000.
Project Westbank III. Ministerie van Economische Zaken, Eindverslag, 106 p.
- Vanzielegheem T., 1998.
Kwaliteitscontrole van DGPS plaatsbepaling op zee, scriptie aangeboden tot het behalen van de graad van licentiaat in de wetenschappen optie landmeetkunde, academiejaar 1997-1998, Universiteit Gent.

Index et légende des figures

<i>Figure 1 :</i> <i>Situation des zones concédées à l'extraction de sable et gravier sur le plateau continental belge.</i>	3
<i>Figure 2 :</i> <i>Evolution de l'extraction de sable et gravier marins de 1979 à 2001.</i>	4
<i>Figure 3 :</i> <i>Répartition des bancs sableux en Manche orientale et dans le domaine sud de la Mer du Nord (extrait de Augris & Clabaut, 2001).</i>	7
<i>Figure 4 :</i> <i>Modèle de terrain général du plateau continental belge (résolution 200X200 m) ; données de base : points acquis en sonar monofaisceau par le Service Hydrographique d'Oostende ; modélisation : Fonds ; en rouge : limite nationale ; en jaune : limites de concession.</i>	8
<i>Figure 5 :</i> <i>Vue 3D (SW-NE) du modèle de terrain général du plateau continental belge (voir figure 3 pour échelle) ; 1-6 = Bancs de Flandre ; 1 = Bergues, 2 = Oostdyck, 3 = Buitenratel, 4 = Kwintebank, 5 = Middelkerke et 6 = Oostende.</i>	9
<i>Figure 6 :</i> <i>Cartographie des structures sédimentaires transverses associées au Kwintebank ; modèle de terrain du Kwintebank établi à partir des données sonar multifaisceaux acquises par le Fonds ; les structures d'échelle inférieure aux dunes moyennes (rides et petites dunes) sont en deçà du pouvoir de résolution du sonar.</i>	10
<i>Figure 7 :</i> <i>Carte géologique pré-quaternaire du plateau continental belge (Source : BGS-RGD-BGD, 1991 ; Ostend Sheet 51°N-02°E ; échelle originale : 1/250 000).</i>	11
<i>Figure 8 :</i> <i>Unités géomorphologiques de la surface de base du Quaternaire (d'après Liu, 1990).</i>	13
<i>Figure 9 :</i> <i>Carte de la surface de base du quaternaire et de la bathymétrie actuelle du Kwintebank ; les deux surfaces topographiques sont présentées strictement aux mêmes échelles horizontale et verticale ; données sismiques de base : Henriët & De Vos, 1983 ; digitalisation et modélisation : Goethals & Roche, 2000 ; sonar multifaisceaux : Fonds, 1999-2000.</i>	14
<i>Figure 10 :</i> <i>Architecture générale d'un banc de sable (d'après Augris & Clabaut, 2001).</i>	15
<i>Figure 11 :</i> <i>Coupe sismique dans la partie médiane du banc de Middelkerke (extrait de la carte « Middelkerke bank Southern North Sea », Project RESECUSED, Coordination and edition : De Moor & Lanckneus, 1993).</i>	16
<i>Figure 12 :</i> <i>Benne Van Veen pour le prélèvement de sédiment de surface; la benne treuillée est mise à l'eau en position ouverte, un système de loquet permet sa fermeture lorsqu'elle touche le sédiment.</i>	17
<i>Figure 13 :</i> <i>Classification des sédiments ; a : échelle granulométrique ; b : diagramme triangulaire gravier-sable-boue; c : définition des domaines du diagramme triangulaire (Source : BGS-RGD-BGD, Ostend Sheet 51°N-02°E ; Sea bed sediments and Holocene geology).</i>	18
<i>Figure 14 :</i> <i>Carte des sédiments superficiels (Source : BGS-RGD-BGD, 1991 ; Ostend Sheet 51°N-02°E ; Sea bed sediments and Holocene geology ; échelle originale : 1/250 000).</i>	19

Figure 15 :	
Superposition de la carte du pourcentage des graviers sur le modèle de terrain général du plateau continental belge limité à la zone de concession 2 (Sources : carte du pourcentage des graviers : Ceuleneer & Lauwaert, 1987, échelle originale : 1/40 000 ; Modèle de terrain général du plateau continental belge (résolution 200X200 m) ; données de base : points acquis en sonar monofaisceau par le Service Hydrographique d'Oostende ; modélisation : Fonds).....	20
Figure 16. a :	
courbe marégraphique ; b : vitesse des courants mesurés lors d'un cycle de marée ;	
c : vitesse et orientation des courants mesurés lors d'un cycle de marée ;	
station G1 bord NW du banc de Middelkerke (Stolk in De Moor et al., 1993).....	21
Figure 17 :	
Schéma illustrant le mécanisme de maintenance des bancs de sable par apport résiduel bi-latéral à partir des chenaux sous l'effet des courants tidaux (C = chenal, B = Banc, Fd = courant de flot, Ed = courant de jusant ; simplifié d'après De Moor, 1987).	22
Figure 18 :	
Principe de base d'un sonar (Source : de Moustier, 2001).	23
Figure 19 :	
Géométrie générale d'un sonar multifaisceaux (Source : Clarke, 2001).	24
Figure 20 :	
Principe des faisceaux croisés (Source : Kongsberg – Simrad).	24
Figure 21 :	
Détection par décalage de phase (Source : Kongsberg-Simrad).....	25
Figure 22 :	
Le sondeur multifaisceaux Kongsberg-Simrad EM1002S installé à bord du navire de recherche Belgica ; 1 : station de l'opérateur ; 2 : Seatex MRU5, senseur de mouvement du navire ; 3 : unité de contrôle, de transmission et de réception ; 4 et 5 : système mécanique de remontée du « transducteur » dans le sas ; 6 : le « transducteur ».....	28
Figure 23 :	
Modèle numérique de terrain du Kwintebank établi par le fonds ; Résolution : 5 x 5 m.	32
Figure 24 :	
Diffusion de l'énergie d'une onde acoustique à l'interface eau-sédiment; a : cas d'une interface de faible rugosité ; b : cas d'une interface rugueuse (d'après Luton et al., 2001).....	33
Figure 25 :	
Géométrie de la rétrodiffusion (Source : de Moustier, 2001).....	33
Figure 26 :	
Equation du Sonar : $EN = SL - 2TL - NL + BS$ (en dB) (Source : de Moustier, 2001).....	34
Figure 27 :	
Relation BS - angle d'incidence pour différent type de sédiments (Source : de Moustier, 2001).....	34
Figure 28 :	
Correction Kongsberg Simrad de BS en fonction de l'angle d'incidence Φ ($\Phi = 90^\circ$ - Grazing Angle).....	35
Figure 29 :	
Poseidon ; boîte de dialogue de traitement des valeurs BS par ligne de navigation (Source : Kongsberg Simrad).....	36
Figure 30 :	
Organigramme de fonctionnement de Triton, logiciel de classification acoustique (Source : Kongsberg Simrad, modifié).	37

Figure 31 :	
Représentation spatiale des parcelles « patches », unités spatiales dans lesquelles sont calculés les 5 paramètres (Source : Kongsberg Simrad).....	38
Figure 32 :	
PACE, le spectre des fréquences varie suivant le type de sédiment (Source : de Moustier, 2001, modifié).....	38
Figure 33 :	
Zones de références de la campagne Belgica 0131 sur le Kwintebank et dans le chenal bordant le banc (« Kwintegeul ») ; lignes bleues, noires, jaunes et blanches = lignes de navigation.	41
Figure 34 :	
Cartographie labellisée des échantillons sur le modèle de terrain du Kwintebank.	43
Figure 35 :	
Courbe de correction marégraphique (méthode M2) pour la campagne 0131 (X = temps UTC, Y = hauteur de la marée).....	44
Figure 36 :	
Bathymétrie corrigée des 4 zones de références de la campagne Belgica 0131 sur le Kwintebank et dans le chenal bordant le banc (« Kwintegeul ») ; (Données normalisées, DTM : algorithme « seabed » ; résolution = 2 x 2 m).	45
Figure 37 :	
Artéfact cartographique ; a : vue en plan sur la zone S1; b : coupe A-B ; les rides artificielles ont une longueur d'onde de ± 20 m et une amplitude de ± 0.15 m.....	46
Figure 38 :	
Mosaïque sonar des 4 zones en regard de la carte morphologique (A : Mosaïque sonar : valeurs normalisées, résolution = 2x2 m ; B : Modèle numérique de terrain : résolution = 2x2 m ; voir figure 33 page 41 et figure 36 page 45 pour la localisation et la bathymétrie des zones).	47
Figure 39 :	
Diagramme multivariable de corrélation pour l'ensemble des valeurs extraites à partir des lignes de navigation de la campagne 0131 (nb de mesures = 36413).....	49
Figure 40 :	
Ellipses équiprobables (probabilité = 0,68) montrant les domaines des classes C1 à C5.....	50
Figure 41 :	
Position des polygones définissant les classes sur la carte des valeurs de la moyenne.	51
Figure 42 :	
Position des polygones définissant les classes sur la carte des valeurs du quantile 80 %.	52
Figure 43 :	
Position des polygones définissant les classes sur la carte des valeurs du PACE	53
Figure 44 :	
Position des polygones définissant les classes sur la carte des valeurs du contraste.....	54
Figure 45 :	
Position des polygones définissant les classes sur la carte des valeurs de l'écart type (STD).....	55
Figure 46 :	
Classification acoustique des 4 zones (résolution : 10 x 10 m ; classification brute sans segmentation)	57
Figure 47 :	
Classification acoustique des 4 zones (résolution : 10 x 10 m ; classification brute suivie d'une segmentation de l'image avec filtre = 5).....	58

Figure 48 :

Position des échantillons prélevés à la benne Van Veen sur la carte résultant de la classification (résolution = 10 x 10 m, filtre de segmentation = 5 ; les polygones labellisés représentent les zones qui intègrent les valeurs définissant les classes). 60

Figure 49 :

Synthèse des données et validation des classes : zones classifiées (résolution = 10 x 10 m) sur le modèle de terrain du Kwintebank (résolution = 5 x 5 m) ; position des échantillons prélevés à la benne Van Veen lors de la campagne 0131 ; photos d'échantillons représentatifs de la nature des classes acoustiques. 61

Index et légende des tableaux

Tableau 1 :	
Prix indicatifs de vente des sables et graviers marins.	5
Tableau 2 :	
Ventilation des redevances relatives à l'extraction de sable et gravier marins.	5
Tableau 3 :	
Définition des structures sédimentaires transversales en fonction de leur amplitude A et de leur longueur d'onde λ (Ashley, 1990 & Berné et al., 1989).	10
Tableau 4 :	
Phases d'édification du banc Middelkerke (d'après Trentesaux et al., 1999).	16
Tableau 5 :	
Echelle des mailles des tamis pour les trois grandes classes granulométriques (Vernemmen & Degrendele, 2000).	17
Tableau 6 :	
Paramètres granulométriques (Folk & Ward, 1957).	18
Tableau 7 :	
Tendances de la répartition des sédiments (zone de concession 2 et banc de Middelkerke).	20
Tableau 8 :	
Caractéristiques techniques du sonar multifaisceaux EM1002S (Source : Kongsberg-Simrad).	27
Tableau 9 :	
Date d'acquisition des données sonar multifaisceaux corrigées relatives au Kwintebank.	32
Tableau 10 :	
Cartes du Kwintebank établies à partir des données sonar multifaisceaux.	32
Tableau 11 :	
Coordonnées géographiques et dimensions des zones étudiées durant la campagne 0131.	40
Tableau 12 :	
Coordonnées cartographiques et description macroscopique des échantillons prélevés à la benne Van Veen (les profondeurs Z sont corrigées pour la marée).	42
Tableau 13 :	
Statistiques de base des 5 paramètres pour l'ensemble des valeurs extraites à partir des lignes de navigation de la campagne 0131 (nb de mesures = 36413 ; valeurs en -dB pour Quantile et Mean).	48
Tableau 14 :	
Comparaison des moyennes des 5 paramètres avant et après post-traitement bathymétrique (Ensemble des données de la campagne 0131 ; PTB = post-traitement bathymétrique).	49
Tableau 15 :	
Statistiques des classes acoustiques C1 à C5 (N = nombre de mesures, Quantile et Mean en -dB).	56