



EMR Dunkerque - Dossier « de reconnaissance géophysique »

Volet « Sédimentologie » v2.1

Lot 3 – référence T3.S, + lot 6 – référence T5-A.S

Principes de cartographie des sédiments

T. Garlan, E. Marchès, Y. Le Faou, P. Guyomard, E. Brenon, X. Mathias, I. Gabelotaud, H. Gauduin, E. Guerra

Référence : convention SHOM/MEEM [DGEC], SHOM n°51/2016 – 2201023658 du 17 août 2016, et de son avenant n°1 du 21/06/2017, relative à la réalisation des études de reconnaissance environnementale de la zone d'implantation d'éoliennes en mer au large de Dunkerque

N°	Auteur (s)	Date	Action
V1.0	T. Garlan, E. Marchès, P. Guyomard, E. Brenon	21/12/2016	Création
V1.2	T. Garlan, E. Marchès, P. Guyomard, E. Brenon, X. Mathias	30/01/2017	Edition
V1.3	T. Garlan, E. Marchès, P. Guyomard, E. Brenon, X. Mathias, I. Gabelotaud	07/02/2017	Prise en compte des données acquises en janvier 2017
V1.4	T. Garlan, E. Marchès, P. Guyomard, E. Brenon, X. Mathias, I. Gabelotaud	10/02/2017	Ajout des données dunes
V1.5	T. Garlan, E. Marchès, Y. Le Faou, P. Guyomard, E. Brenon, X. Mathias, I. Gabelotaud, H. Gauduin, E. Guerra	02/03/2017	Ajout des données épaisseur de sédiments
V1.6	T. Garlan, E. Marchès, Y. Le Faou, P. Guyomard, E. Brenon, X. Mathias, I. Gabelotaud, H. Gauduin, E. Guerra	14/03/2017	Prise en compte célérité et dernier levé SBP pour carte épaisseur de sédiments
V1.7	T. Garlan, E. Marchès, Y. Le Faou, P. Guyomard, E. Brenon, X. Mathias, I. Gabelotaud, H. Gauduin, E. Guerra	07/04/2017	Prise en compte des remarques de la réunion Shom-DGEC-CEREMA du 06/04/17
V1.8	T. Garlan, E. Marchès, Y. Le Faou, P. Guyomard, E. Brenon, X. Mathias, I. Gabelotaud, H. Gauduin, E. Guerra	28/09/2017	Intégration du levé 2017 lié à l'avenant n°1
V1.9	T. Garlan, E. Marchès, Y. Le Faou, P. Guyomard, E. Brenon, X. Mathias, I. Gabelotaud, H. Gauduin, E. Guerra	31/10/2017	Prise en compte remarques CEREMA
V2.0	T. Garlan, E. Marchès, Y. Le Faou, P. Guyomard, E. Brenon, X. Mathias, I. Gabelotaud, H. Gauduin, E. Guerra	15/11/2017	Mise à jour carte pente

1. Introduction

Le SHOM mène depuis plusieurs dizaines d'années des travaux d'analyse et de caractérisation des sédiments du Pas de Calais à la frontière belge. Ces travaux axés sur la dynamique des dunes ont donné lieu à de nombreux levés hydrographiques aux abords de Calais et dans le rail du chenal de navigation passant au nord de la zone d'étude : zone EMR de Dunkerque levée en 2016 par le Shom. Il a ainsi réalisé durant ces campagnes de nombreux prélèvements sédimentaires. Mais lorsque l'on fait l'analyse des prélèvements sédimentaires réalisés dans la zone d'étude, il s'avère que la connaissance y est médiocre.

Les données antérieurement acquises, sont essentiellement des descriptions visuelles de sédiments collés sur la semelle du plomb de sonde, dont la cavité inférieure avait été préalablement emplie de suif (plomb suiffé). Il est à noter que la zone située au nord de l'isobathe 10 mètres et à l'est de la bouée, est même avec cette ancienne technique, très peu échantillonnée. A l'exception de ce secteur, les mesures ont été faites sur des profils espacés de 500 mètres, avec un point de prélèvement tous les 80 mètres en moyenne (fig. 1.1). Les 947 descriptions visuelles, acquises par le Service Hydrographique en 1836 et 1879, extraites de la Base de Données Sédimentologiques du SHOM (BDSS), caractérisent des sables (58% des points), des sables fins (28%), et ponctuellement des débris coquilliers (9,5%), des graviers et sables graveleux (4,5 %) et des sables vaseux (0,3 %). Par rapport à l'étude initiale, l'agrandissement de la zone engendre peu de changements. Sont observés une légère augmentation des sables fins (+4%) aux dépens des sables et sables coquilliers, les autres tendances demeurant inchangées.

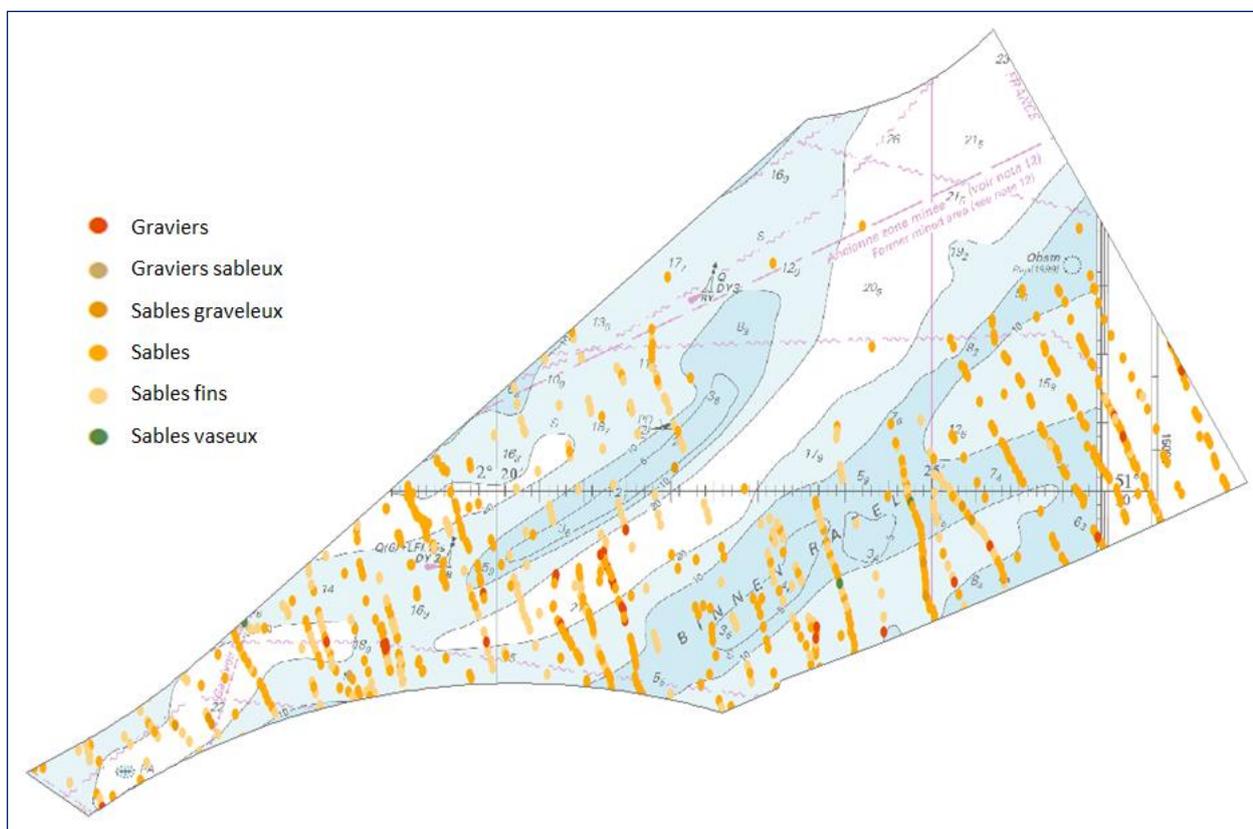


Figure 1.1 : Répartition des données plomb suiffé acquises par le Service Hydrographique (Shom) en 1836 et 1879

Dans ce secteur, des prélèvements à la benne ont été réalisés en 1988 par l'Université des Sciences et Techniques de Lille (USTL) (fig. 1.2). Les 49 analyses granulométriques de ces prélèvements, sont intégrées dans la BDSS, mais sont la propriété de l'Université des Sciences et Techniques de Lille (alain.trentesaux@univ-lille1.fr). En première approche tous ces échantillons caractérisent des sables fins à l'exception de 3 points : l'un au sud-est de la zone présentant un mélange de sables et sables fins et comportant quelques graviers, l'un au centre constitué de sables et de près de 30% de graviers, et à l'extrême ouest présentant un sable vaseux contenant près de 15% de particules inférieures à 0,05mm .

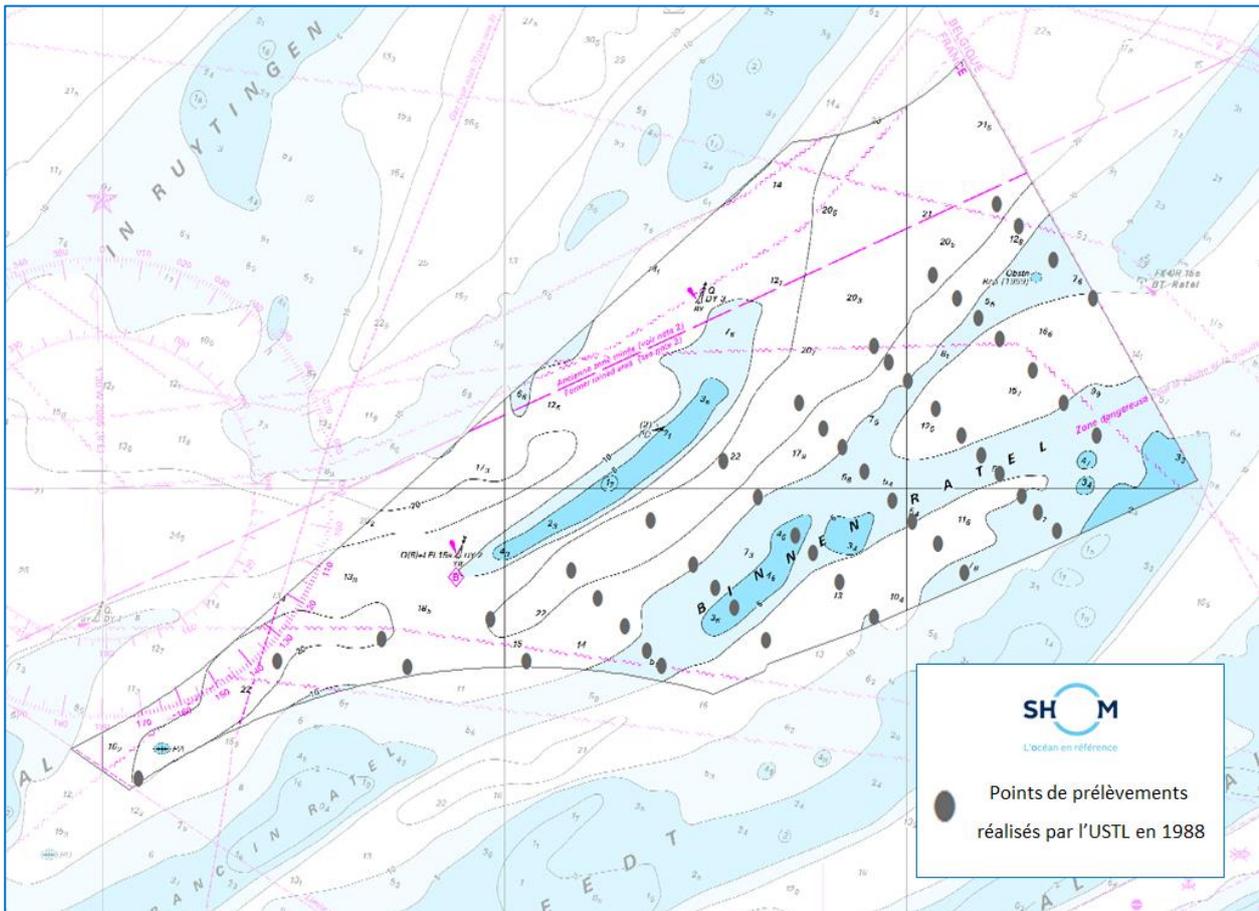


Figure 1.2 : Répartition des prélèvements à la benne acquis en 1988 par l'Université des Sciences et Techniques de Lille (thèse O. Vicaire, USTL-Iffremer-Région Nord-Pas-de-Calais)

Pour accéder aux propriétés des sédiments et compléter ces données anciennes, des échantillons sédimentaires ont été prélevés à l'aide d'une benne Van Veen. Les positions de ces prélèvements ont été définies au cours de la campagne à partir de l'analyse combinée des mosaïques d'imagerie Sondeurs MultiFaisceaux (SMF), de la morphologie du fond et du système de classification des fonds du Shom.

Vingt-cinq prélèvements à la benne ciblés sur les différents types de fonds ont été réalisés sur l'ensemble du secteur. La stratégie de prélèvement est d'effectuer ces prélèvements en différents lieux des flancs de dunes, dans les dépressions et sur les flancs et sommet des bancs, afin de déterminer la variation spatiale de la granularité et des taux de carbonate de calcium (CaCO₃). L'objectif des analyses est de déterminer la qualité des sédiments, leur nature,

calcaire ou siliceuse et leur granulométrie, puis d'utiliser ces données pour la calibration des données acoustiques (imagerie et système de classification des fonds), pour réaliser en fin de processus la carte de nature des fonds.

Après le rappel de quelques éléments sur la connaissance de la sédimentologie et plus particulièrement des dunes et bancs couvrant la zone (cf §2), le présent rapport décrit plus précisément :

- les résultats d'analyses granulométriques effectués sur les nouveaux prélèvements (cf §3),
- les données de turbidité acquises spécifiquement sur la zone (cf §4),
- la répartition des structures sédimentaires et des pentes engendrées (cf §5),
- la cartographie de la nature des fonds (cf §6),
- les données de sismique et la carte d'épaisseur des sédiments (cf §7).

2. Rappel sur la sédimentologie du secteur

Les thèses de Sophie Le Bot (2001) et de Déborah Idier (2002), financées par le Shom, et de D. Aernouts (Université de Dunkerque, 2005) sont les dernières thèses ayant été réalisées sur la dynamique sédimentaire de cette région. Elles concernaient les dunes situées au nord-ouest de la zone d'étude (Le Bot, 2001 et Idier, 2002) et le domaine littoral (Aernouts, 2005). Mais tous ces travaux scientifiques sont à l'écart de la zone d'étude.

Au niveau cartographie sédimentaire, le Shom a réalisé une première cartographie régionale centrée sur le Pas de Calais, dans le cadre du projet Geosynth (projet INTERREG piloté par le BRGM, 2002). La carte 6651G a été publiée en collaboration avec l'USTL (2008). Toutes ces cartes se situent plus à l'ouest et seule la carte G numérique à 1/150 000 de la frontière Belge à Boulogne-sur-Mer, réalisée par le Shom en 2013 (data.Shom.fr) couvre ce secteur. Cette carte de synthèse (Fig. 2.1) représente la zone avec deux bancs de sables graveleux et de graviers, dans un environnement sableux.

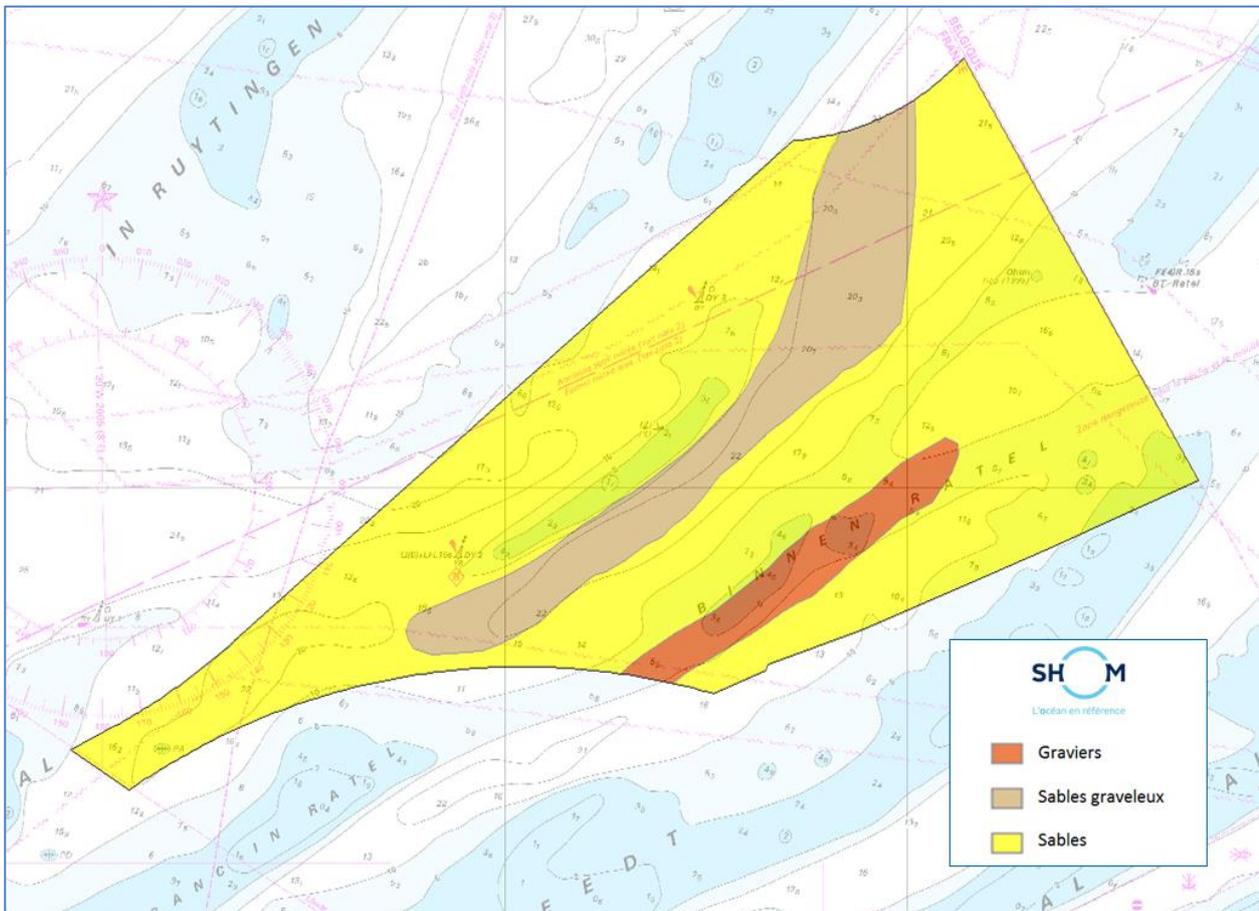


Figure 2.1 : Extrait de la carte de Natures de fond de Boulogne-sur-Mer à la frontière belge à 1/150 000 (Shom, 2013).

Une série de cartes réalisées par le Mumm (Belgique) montre une bonne connaissance de la partie Belge débordant légèrement sur la zone EMR Dunkerque. Ces cartes de 1987 (Données_biblio/cartes_SEDIM) présentent le taux de graviers, le taux de vase, ainsi que le

grain moyen de la fraction inférieure à 4 mm. Dans cette série une carte des structures sédimentaires présentant en particulier la pente est éloignée de la zone EMR mais est n'apporte pas d'information sur la zone d'étude. Les trois autres cartes couvrent une partie nord de la zone EMR (fig. 2.2) et constitue même la seule information sédimentaire de ce secteur. Ceci s'explique en partie par la morphologie des fonds qui les rendent plus accessibles par la Belgique que par les ports français, parce que la frontière marine franco_belge était différente et non précisément définie à l'époque.

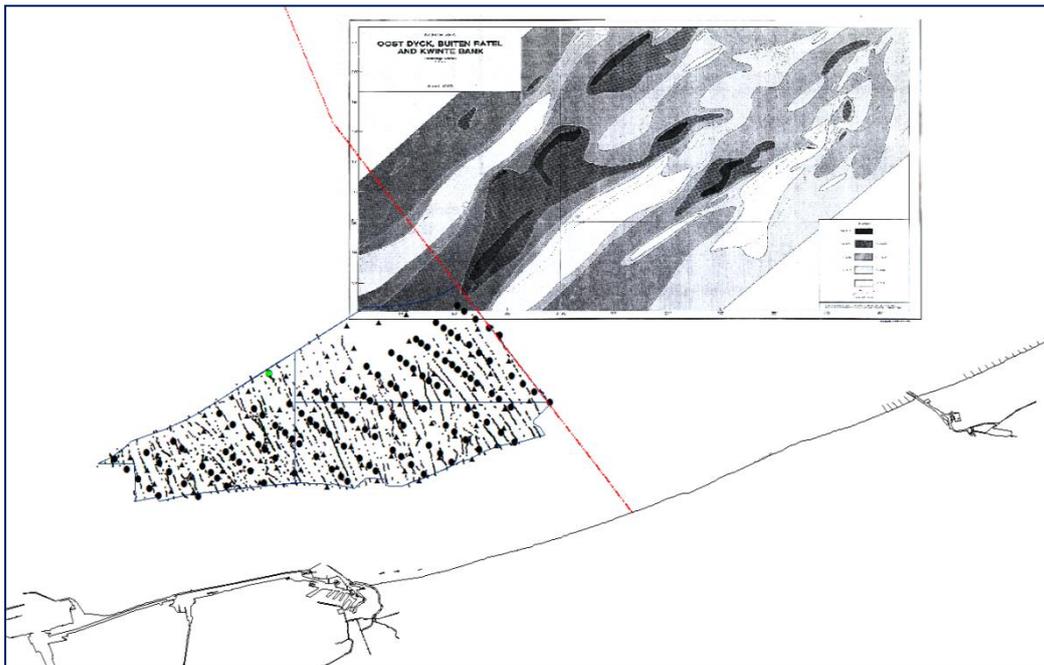


Figure 2.2 : Répartition des prélèvements extraits de la BDSS et de la carte du taux de graviers publiée par le Mumm en 1987.

Du point de vue de la nature des fonds, la connaissance de la zone est qualifiée de bonne qualité à l'ouest de Dunkerque, grâce aux travaux synthétisés dans la thèse d'O. Vicaire (*Dynamique hydrosédimentaire en Mer du Nord méridionale*, 1991), et médiocre pour la zone frontalière incluant la zone d'étude. Dans cette zone EMR la dynamique des dunes demeure totalement indéfinie.

3. Analyses granulométriques des prélèvements sédimentaires

3.1 La granularité des sédiments

Les 683 descriptions visuelles des descriptions de plombs suiffés de 1836 et 1879 ont permis de réaliser la carte de la sédimentologie ancienne, présentée dans le chapitre 6 (Fig. 6.1). Les 47 prélèvements à la benne réalisés par l'USTL en 1988 ont été pris en compte dans la synthèse cartographique régionale (Fig. 2.1).

L'ancienneté de ces prélèvements et l'absence de connaissance de leur emplacement sur les structures sédimentaires ont nécessité de réaliser un nouveau plan de prélèvements, non plus basé sur un maillage régulier, mais défini à partir des données de la morphologie et des données acoustiques. Trente neuf échantillons sédimentaires ont été prélevés à l'aide d'une benne Van Veen. Les métadonnées des échantillons sont données dans le tableau suivant (tableau 3.1).

La figure 3.1 présente la répartition de ces prélèvements replacés sur la carte marine du secteur, le tableau 3.1 fournit les métadonnées des prélèvements effectués.

Tableau 3.1 : métadonnées des prélèvements effectués à la benne en 2016 et 2017

Porteur	Numéro de l'échantillon	Date de prélèvement	Heure Z	Latitude	Longitude	Z (m)	Précision loc.	Description visuelle à bord
Vedette Goeland	S2016043_001	2016 10 07	13h59	51,16472	2,44650	11	5 m	Coq. (80%) et sables
	S2016043_002	2016 10 07	14h10	51,17228	2,44708	12	5 m	Sable, coq. brisées
	S2016043_003	2016 10 07	14h25	51,17578	2,42643	18	10 m	Sable moyen
	S2016043_004	2016 10 07	14h38	51,15948	2,39587	12	5 m	Sable moyen
	S2016043_005	2016 10 07	14h45	51,15705	2,39967	7,5	5 m	Sable moyen
	S2016043_006	2016 10 07	14h53	51,15157	2,39685	20	10 m	Sable moyen
	S2016043_007	2016 10 08	9h55	51,18123	2,38025	9	5 m	Sable, Coq. brisées
	S2016043_008	2016 10 08	10h07	51,16942	2,38117	24	10 m	Sable
	S2016043_009	2016 10 08	10h20	51,15668	2,35470	28	10 m	Sable, Coq. brisées
Vedette Albatros	S2016043_100	2016 10 07	14h04	51,19168	2,40483	25	10 m	Galets, Coq. brisées
	S2016043_101	2016 10 07	14h29	51,19363	2,37035	25	10 m	Sable, coq. brisées
	S2016043_102	2016 10 07	14h52	51,17870	2,34057	19	10 m	Sable, Coq. brisées
	S2016043_103	2016 10 08	06h23	51,16692	2,36367	12	5 m	Sable, Coquilles
	S2016043_104	2016 10 08	06h29	51,16818	2,36180	8	5 m	Sable, Coquilles

	S2016043_105	2016 10 08	06h40	51,16833	2,33930	24	10 m	Sable, Coquilles
	S2016043_106	2016 10 08	06h45	51,16090	2,34252	8,8	5 m	Sable, Coquilles
Felix	SH2017001_201	2017 01 22	08h42	51,19167	2,40478	25,0	10 m	Sable fin
	SH2017001_202	2017 01 22	08h59	51,18953	2,38047	18,0	10 m	Sable fin
	SH2017001_203	2017 01 22	09h13	51,17265	2,37047	9,0	10 m	Sable fin, Coquilles
	SH2017001_204	2017 01 22	09h28	51,16740	2,40305	10,0	10 m	Sable fin, Coq. bris.
	SH2017001_205	2017 01 22	09h40	51,16053	2,42740	16,0	10 m	Sable fin, Coq. bris.
	SH2017001_206	2017 01 22	09h58	51,15373	2,47955	21,0	10 m	Sable fin, Coq. bris.
	SH2017001_207	2017 01 22	10h19	51,18487	2,42855	15,0	10 m	Sable fin
	SH2017001_208	2017 01 22	10h30	51,19623	2,45007	8,0	10 m	Sable fin
	SH2017001_209	2017 01 22	10H46	51,20800	2,42993	26,0	10 m	Sable fin

Porteur	Numéro de l'échantillon	Date de prélèvement	Heure Z	Latitude	Longitude	Z (m)	Précision loc.	Description visuelle à bord
Vedettes Goeland Macareux Phaeton	SO2017003_301	09-17/07/2017	-	51,14090	2,29858	21	5 m	Sable, Sable fin
	SO2017003_302	09-17/07/2017	-	51,14427	2,27727	31	5 m	Sable fin, Coq. bris.
	SO2017003_303	09-17/07/2017	-	51,13072	2,25702	25	5 m	Sable, Sable fin
	SO2017003_304	09-17/07/2017	-	51,14873	2,30222	27	5 m	Sable
	SO2017003_307	09-17/07/2017	-	51,17393	2,32988	16	5 m	Sable
	SO2017003_308	09-17/07/2017	-	51,14770	2,33648	26	5 m	Sable, Coq. bris.
	SO2017003_309	09-17/07/2017	-	51,14408	2,35223	18	5 m	Sable, Sable fin
	SO2017003_310	09-17/07/2017	-	51,14817	2,40225	18	5 m	Sable, Sab. fin, Grav.
	SO2017003_311	09-17/07/2017	-	51,14743	2,38637	19	5 m	Sable
	SO2017003_312	09-17/07/2017	-	51,15392	2,29858	20	5 m	Sable
	SO2017003_313	09-17/07/2017	-	51,20803	2,40327	27	5 m	Coq. bris., Galets
	SO2017003_314	09-17/07/2017	-	51,20803	2,40327	27	5 m	Sable, Sable fin
	SO2017003_315	09-17/07/2017	-	51,09050	2,27297	18	5 m	Sable fin, Coq. bris.
	SO2017003_316	09-17/07/2017	-	51,10130	2,28315	10	5 m	Sable fin, Sable

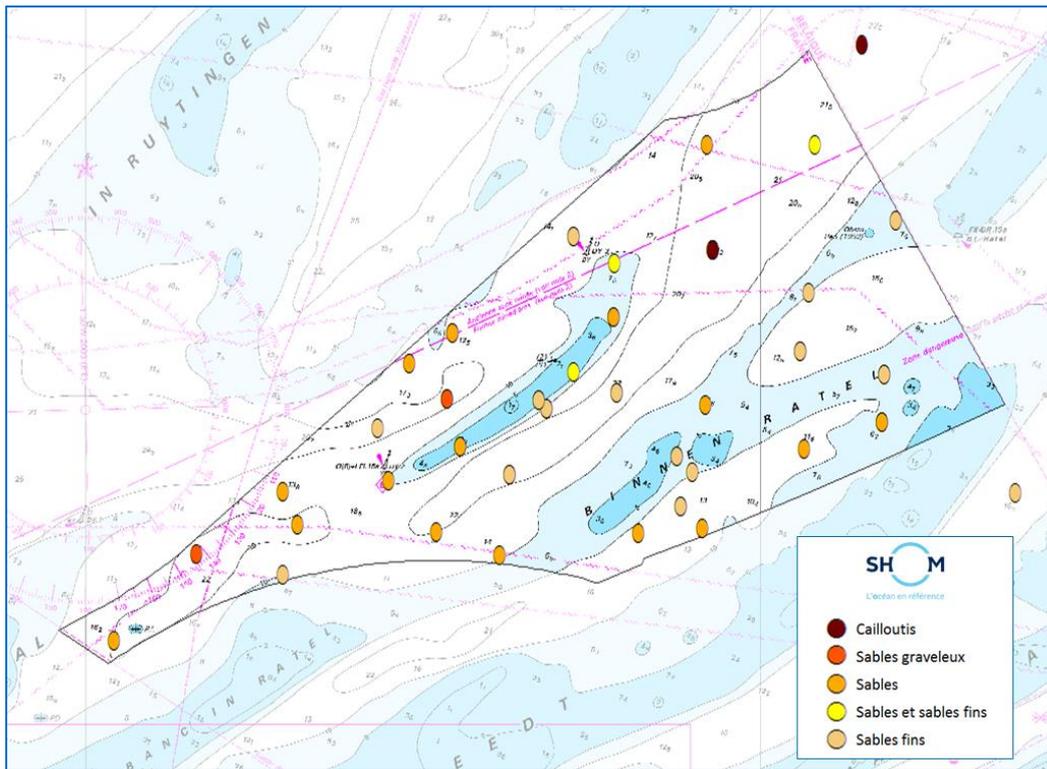


Figure 3.1 : répartition des 39 prélèvements effectués en octobre 2016 (SHOM/GHOA), janvier 2017 (SHOM/IXBlue), et juillet 2017 (SHOM/GHOA).

Il doit être noté que la dynamique des dunes et des mégarides engendre localement des changements de nature de fond en particulier dans les secteurs où le socle de cailloutis et/ou de graviers peut apparaître à l'occasion du départ de la dune ou disparaître par le recouvrement de ces sédiments grossiers par l'arrivée d'une dune.

Les travaux réalisés au laboratoire de sédimentologie du SHOM ont compris :

- la prise de vue des échantillons ;
- la mesure de la granularité par tamisage de tous les échantillons sur une colonne de tamis de mailles : 20 ; 12,5 ; 10,0 ; 5,0 ; 2,0 ; 1,6 ; 1,25 ; 1,0 ; 0,8 ; 0,5 ; 0,3 ; 0,18 ; 0,1 et 0,05 mm ;
- la mesure du taux de carbonate de calcium de tous les échantillons à l'aide d'un Bernard classique ;

Les échantillons ont été analysés puis intégrés dans le logiciel Granush (©SHOM) pour le calcul des paramètres granulométriques. Les résultats des calculs sont donnés en Annexe 2 et dans les fichiers de données. Le tableau 3.2 présente quelques exemples caractéristiques des sédiments de ce secteur. Vingt échantillons sont des sables fins, c'est-à-dire qu'ils contiennent plus de 50% de particules inférieures à 0,05 mm. 13 échantillons sont des sables, c'est-à-dire qu'ils contiennent plus de 50% de particules comprises entre 0,05 et 2 mm. Les autres prélèvements présentent des particules plus grossières de graviers (2 à 20 mm), et exceptionnellement de cailloutis (supérieurs à 20 mm). Il est à noter que le prélèvement de cailloutis nécessite

normalement l'usage d'une drague, mais celle-ci ne peut être mise en œuvre avec les moyens nautiques à faible tirant d'eau devant effectuer le levé par les petits fonds de la zone d'étude. Le pourcentage en carbonate de calcium varie de 8 à 49 %. Les sédiments sont le plus souvent lithoclastiques c'est-à-dire que le pourcentage en carbonate de calcium est inférieur à 30%. Mais 5 échantillons présentent des sédiments litho-bioclastiques, c'est-à-dire que la présence de débris de coquilles engendre un accroissement du taux de CaCO₃ qui varie alors de 31 à 49%. Ces débris coquilliers sont le plus souvent de la même taille que les grains lithiques. Les échantillons plus grossiers, c'est-à-dire les sables et sables graveleux peuvent néanmoins contenir des coquilles entières ou brisées engendrant les pourcentages de carbonate de calcium les plus importants, tel que pour les échantillons 1 (49% de CaCO₃) et 105 (42% de CaCO₃), 308 et 310 (37% de CaCO₃).

Tableau 3.2 : Quelques exemples de sédiments de la zone Dunkerque

N°	Z (m)	Nom du sédiment (Code SHOM)	Grain moyen (mm)	So	% CaCO ₃	Photographie échantillon sec	Granularité							
							C	gG	pG	Sg	Sm	Sf	Stf	Si-A
01	11	S	0,46	1,295	49		<p>(G : Graviers, Sg : Sables grossiers, m : moyen, f : fins, tf : très fins)</p>							
02	12	SF	0,22	1,235	24									
03	18	SF	0,17	0,690	18									
105	24	SG	0,68	2,129	42									
106	8,8	S	0,24	0,874	18									

3.2 La classification des sédiments de la zone Dunkerque

Les échantillons 313 et 100 sont composés de cailloutis purs, mais les galets pourraient avoir favorisé la fuite d'une partie des sédiments plus fins. Les autres échantillons, décrits en annexe 1 sont des mélanges contenant essentiellement du sable fin avec une proportion variable de sables grossiers et moyens. Afin de classer les sédiments, ils ont été regroupés en 3 phases : les particules grossières (Cailloutis et graviers), les sables (grossiers et moyens) et les particules fines (sables fins, très fins) (fig. 3.2).

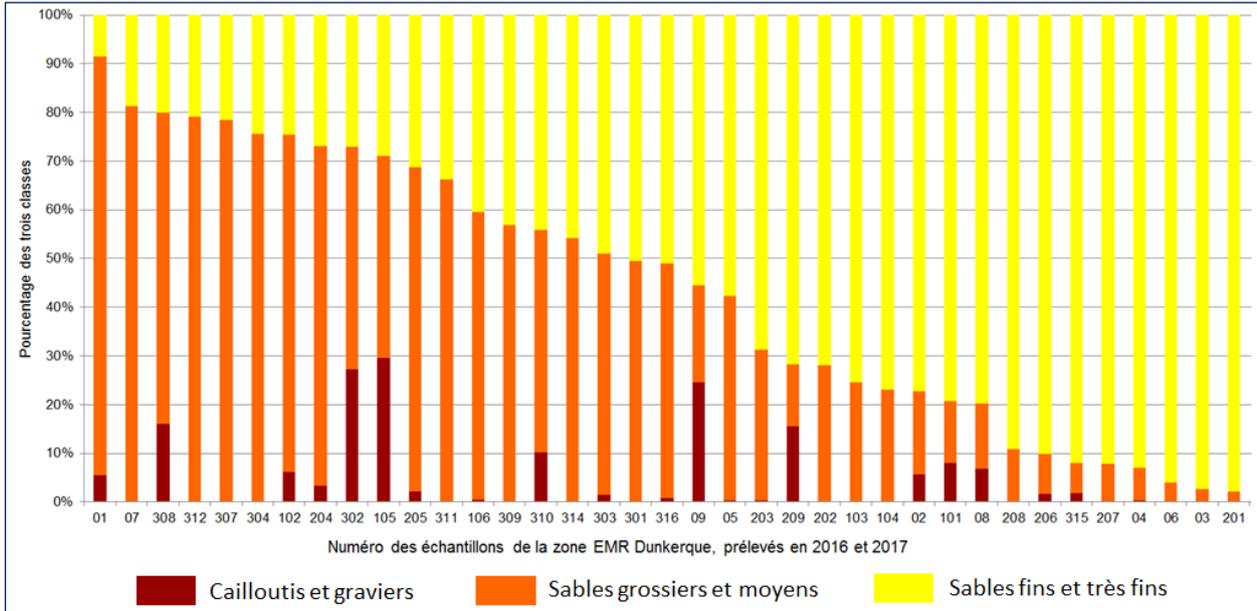


Figure 3.2 : Variabilité de la granularité des prélèvements réalisés en 2016 et 2017

Un tri réalisé à partir du grain moyen et du pourcentage en particules grossières permet de différencier quatre familles principales (fig. 3.3) : les sables et graviers, les sables, les sables et sables fins et les sables fins et très fins.

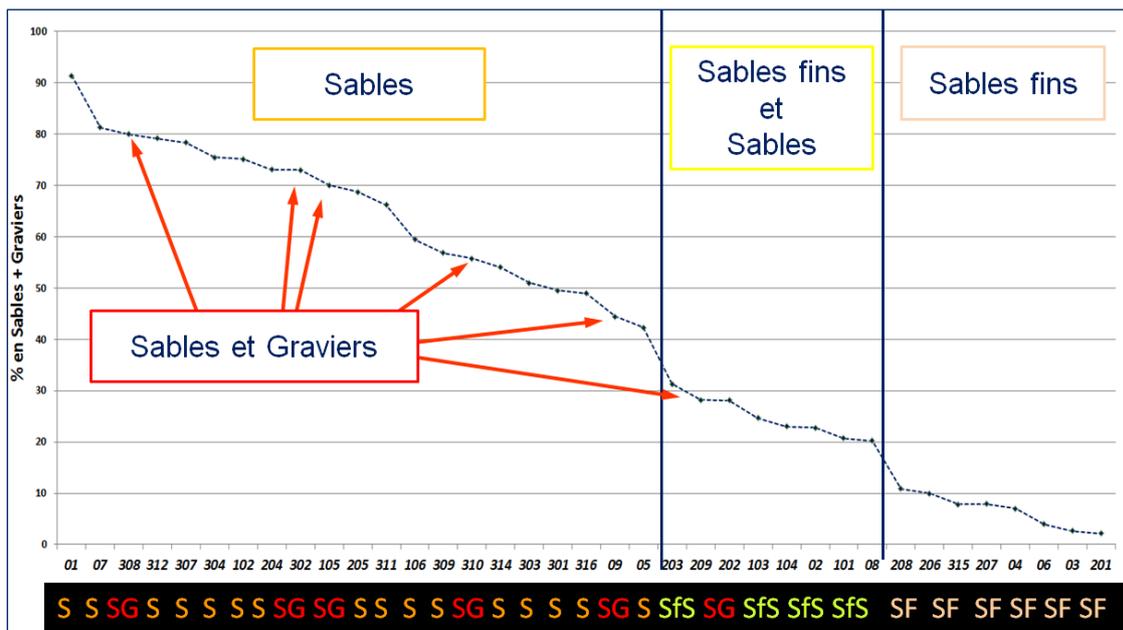


Figure 3.3 : Classification des sédiments de la zone EMR Dunkerque

3.3 Synthèse sur les sédiments du secteur

La classification adoptée pour la carte de nature des fonds (cf. Chapitre 6) est donc composée de 5 types de fonds sédimentaires :

- Les cailloutis contenant plus de 50% de particules supérieures à 20 mm : **C**
- Les sables et graviers, contenant des sables et sables fins et plus de 10% de particules comprises entre 2 et 20 mm : **SG**
- Les sables, contenant plus de 30% de particules comprises entre 0,5 et 2 mm : **S**
- Les sables fins et sables, contenant plus de 70% de sables fins, le reste étant constitué de sables (0,5 à 2mm) et parfois d'une faible proportion de graviers (quelques %) : **SFS**
- Les sables fins constitués de plus de 80% de sables dont les grains ont une taille inférieure à 0,05mm : **SF**

Cette liste est en même temps ordonnée selon l'affinement des sédiments et selon l'accroissement de la représentativité au niveau de la zone d'étude.

4. Turbidité

Le suivi de la turbidité a été réalisé avec les deux mouillagà l'aide de deux stations benthiques constituées des Awak1 (fig. 4.1) et Awak 2 (fig. 4.4) respectivement immergées à 9,5 m et 24,8 m (sonde réduite). Le mouillage Awak1 situé sur un banc sédimentaire peu profond couvert par une série de grandes dunes sableuses. Le mouillage Awak2 est positionné dans le chenal entr deux bancs sédimentaires, à une profondeur plus importante (24,8 m). Les deux environnements où ont été placées les stations sont couverts de mégarides sédimentaires (cf §5).

Les mesures de turbidité ont été acquises avec des turbidimètres optiques qui mesurent l'absorbance et/ou la diffusion d'un rayon lumineux de longueur d'onde connue par un liquide. La lumière incidente ainsi réfléchi vers l'instrument est fonction de la quantité de particules en suspension dans l'eau. Les turbidimètres optiques donnent des valeurs en NTU (Nephelometric Turbidity Unit) permettant d'évaluer la capacité de l'eau à laisser passer la lumière (turbidité). Le turbidimètre instrumenté sur le mouillage Awak1 permettait de mesurer des variations de turbidité sur une gamme allant de 0 à 125 NTU. Le mouillage Awak2 était instrumenté avec un turbidimètre mesurant des gammes de turbidité comprises entre 0 et 500 NTU. De ce fait, le mouillage Awak2 permettait de mesurer des turbidités plus fortes que le mouillage Awak1.

4.1 Série temporelle de turbidité – Awak1

Le mouillage Awak1 a enregistré une valeur de turbidité toutes les 10 min du 01/09/2016 au 23/09/2016 (fig.1). Chaque mesure de turbidité est associée à une mesure de courant réalisée avec un courantomètre ponctuel. Les mesures de courants mettent bien en évidence la période de petits coefficients de marée entre le 10/09/2016 et le 13/09/2016.

La série temporelle complète (fig. 4.1) met en évidence deux périodes bien distinctes (fig. 4.2) :

- une période s'étalant du 01/09/2016 au 15/09/2016 caractérisée par des turbidités relativement faibles (entre 0 et 15 NTU) ;
- une période s'étalant du 15/09/2016 au 23/09/2016 montrant des turbidités très fortes jusqu'à saturation du turbidimètre (125 NTU). Celle-ci implique que la turbidité maximum sur ce point de mouillage n'a pu être mesurée, mais il est établi qu'elle était supérieure à 125 NTU.

Ce changement de turbidité ne semble pas expliqué par une modification des courants puisque qu'aucun changement dans l'intensité des courants n'est observé aux abords du 15/09/2016.

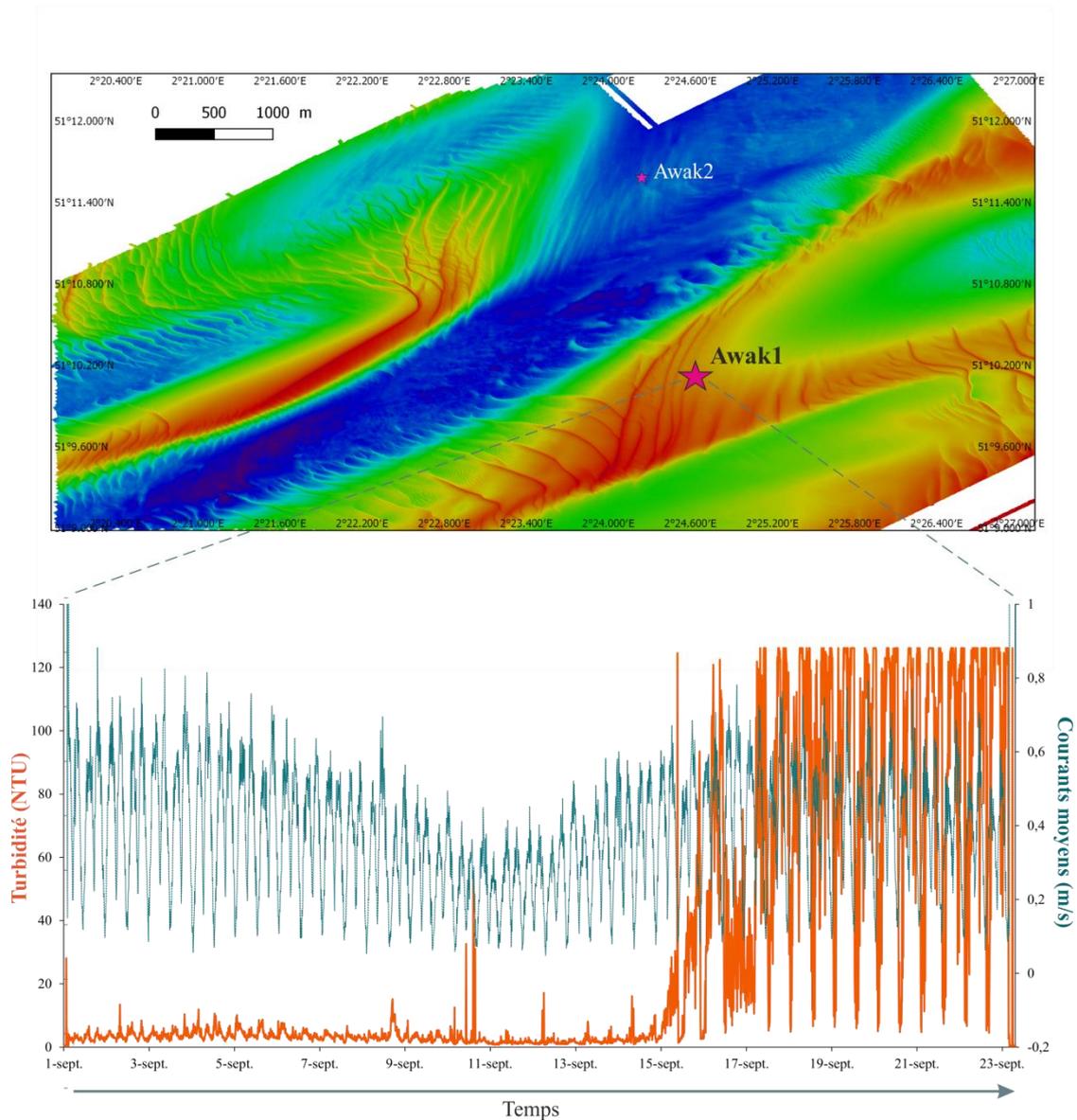


Figure 4.1 : Localisation du mouillage Awak1 et série temporelle de turbidité (courbe orange) et de courants moyens (courbe bleue).

Les courants sont tout au long de la série compris entre $0,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $0,88 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, maximum atteint pendant les plus forts coefficients.

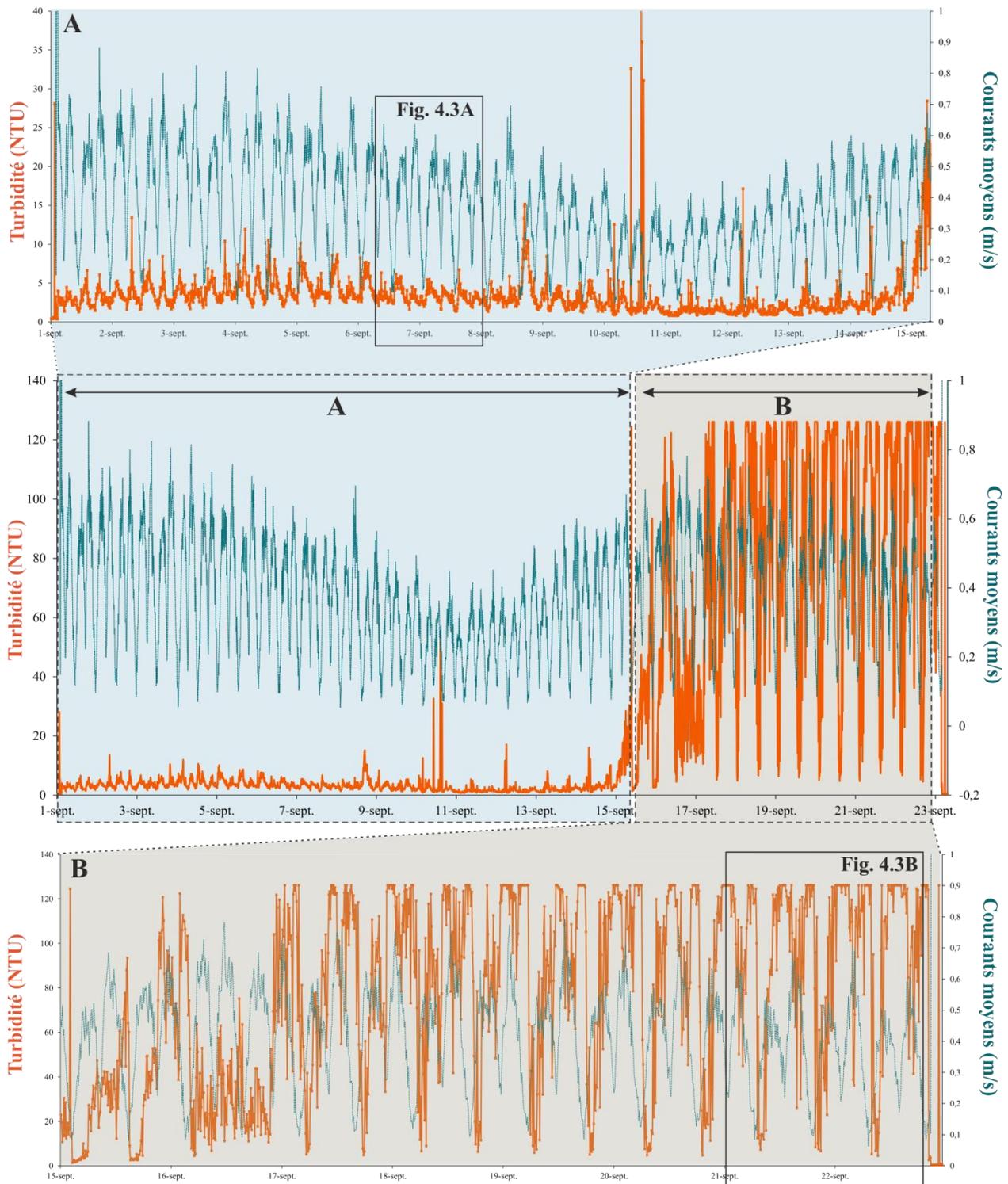


Figure 4.2 : Série temporelle complète et zooms sur les deux périodes mises en évidence : période de faible turbidité (A) et période de forte turbidité (B).

En procédant à un zoom de l'évolution temporelle de la turbidité et des courants moyens sur deux jours, des tendances différentes entre la période de faible turbidité et la période de forte turbidité peuvent être respectivement observées en figures 4.3A et 4.3B.

En période de faible turbidité, c'est-à-dire entre le 01/09/2016 et le 15/09/2016 (fig. 4.3A), les pics de turbidité ne dépassent pas 7 NTU et sont parfaitement corrélés avec les pics de

courants. Les variations de turbidité et de courants montrent une cyclicité d'environ 6h correspondant aux cycles de marées. Il peut être également mis en évidence que les périodes de faible turbidité sont de plus courtes durées que les périodes de turbidité plus élevées.

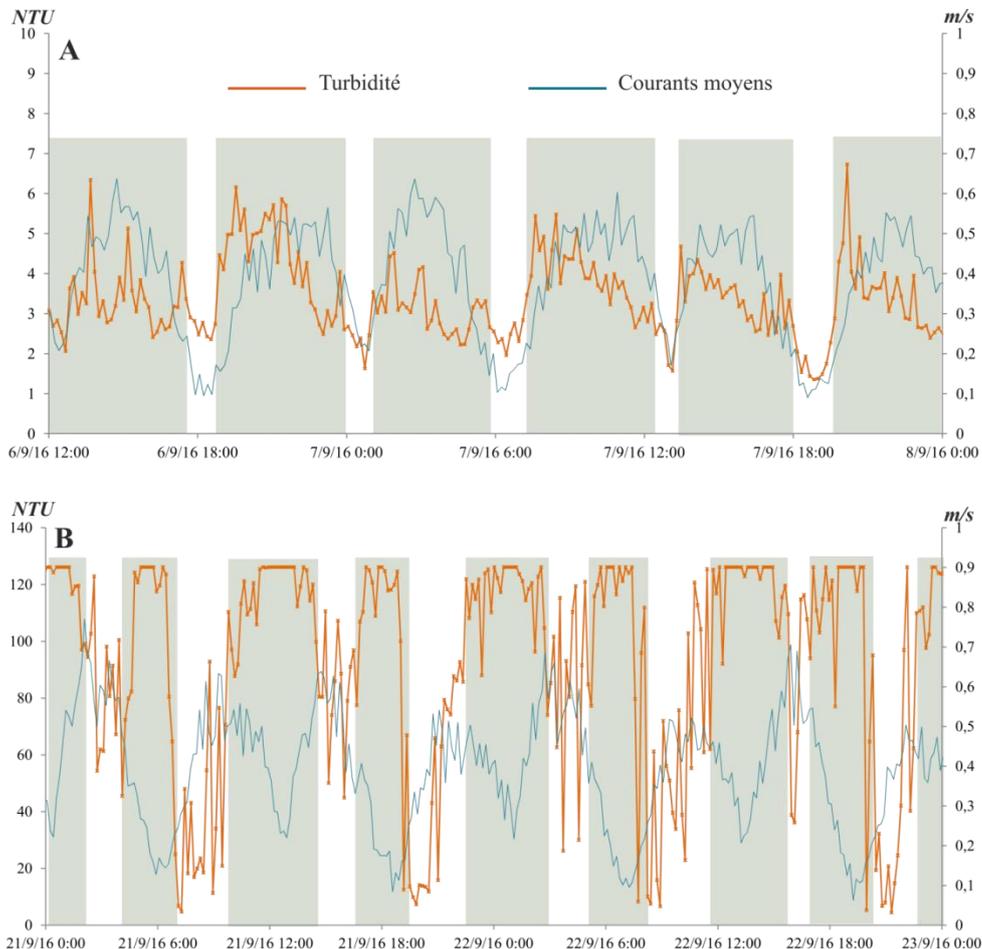


Figure 4.3 : zooms sur l'évolution de la turbidité et des courants en période de faible turbidité (A) et en période de forte turbidité (B).

En période de forte turbidité c'est-à-dire du 15/09/2016 au 23/09/2016 (fig. 4.3B), la tendance est inverse. C'est-à-dire que les pics de forte turbidité, atteignant 125 NTU et provoquant la saturation du capteur, sont anti-corrélés aux pics de courants de marée. De ce fait, les pics de turbidité ne peuvent plus être expliqués seulement par les courants moyens de ce secteur.

4.2 Série temporelle de turbidité – Awak2

Le mouillage Awak2 a enregistré une valeur de turbidité toutes les 10 min du 06/09/2016 au 09/10/2016 (fig. 4.4). Chaque mesure de turbidité est associée à une mesure de courant réalisée avec un courantomètre ponctuel. Les mesures de courants mettent bien en évidence, comme pour le mouillage Awak1, les périodes de petits coefficients de marée entre le 10/09/2016 et le 13/09/2016 puis entre le 23/09/2016 et le 26/09/2016.

Tout comme l'Awak1, un changement se produit aux abords du 16/09/2016. Une augmentation de la turbidité à compter de cette date est observée, permettant de distinguer deux périodes principales dans l'enregistrement (fig. 4.5):

- une période de faible turbidité du 06/09/2016 au 16/09/2016 où les turbidités sont comprises en moyenne entre 3 et 7 NTU avec quelques pics ponctuels entre 15 et 20 NTU ;
- une période de plus forte turbidité avec une augmentation progressive de la turbidité à partir du 16/09/2016 jusqu'au 09/10/2016 (date du relevé de mouillage). Après une progression lente, la turbidité augmente plus rapidement après le 24 septembre. Les valeurs maximales de turbidité observées sont de l'ordre de 350 NTU, sauf le 03/10/2016 où elles atteignent 482 NTU. A noter que le capteur optique n'est jamais à saturation (500 NTU), ce qui signifie que les valeurs maximum de turbidité ont pu être quantifiées en ce point.

Tout comme pour le mouillage Awak1, aucun changement significatif des courants moyens, pouvant expliquer l'augmentation de la turbidité à partir du 16/09/2016. Les courants moyens sont compris entre $0,02 \text{ m.s}^{-1}$ et $0,836 \text{ m.s}^{-1}$. Les valeurs minimales de courants sont donc inférieures à celles observées pour le mouillage Awak1 et les valeurs maximales, quant à elles sont du même ordre.

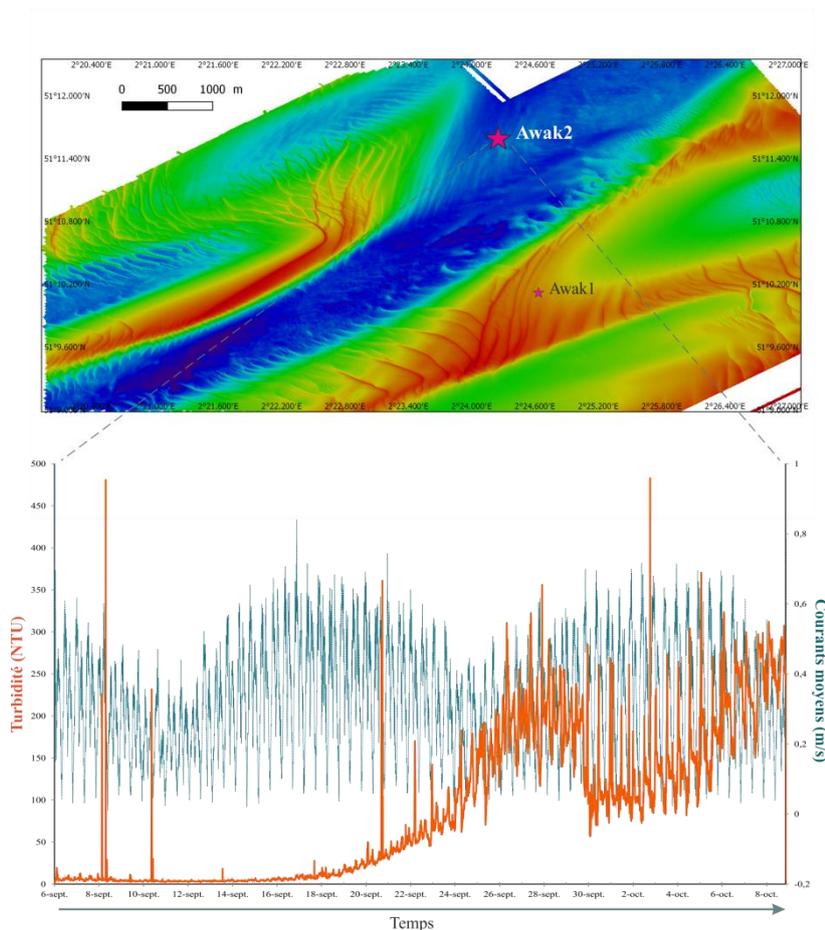


Figure 4.4 : Localisation du mouillage Awak2 et série temporelle de turbidité (courbe orange) et de courants moyens (courbe bleue).

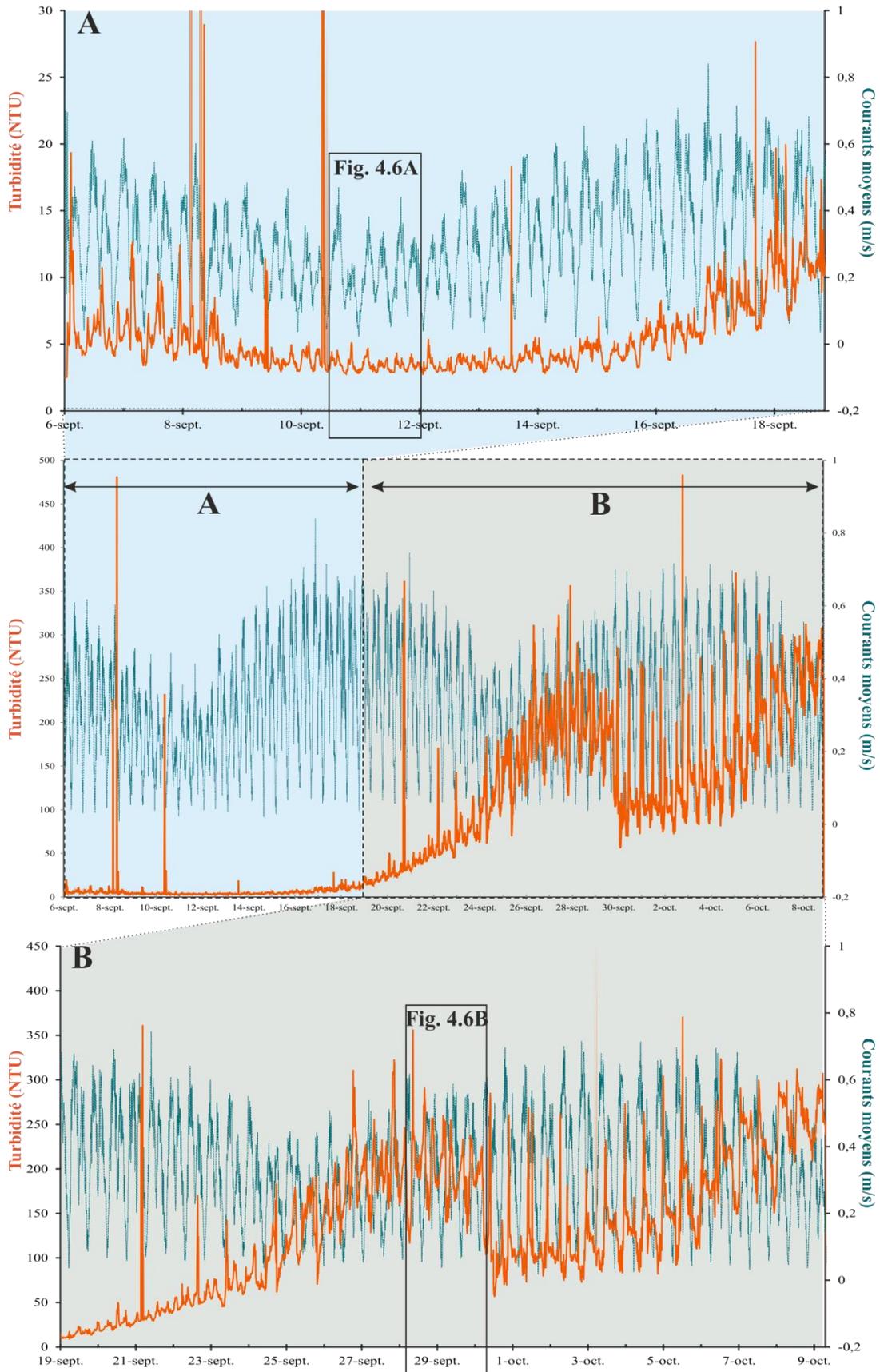


Figure 4.5 : Série temporelle complète et zooms sur les deux périodes mises en évidence : période de faible turbidité (A) et période de forte turbidité (B).

Plus en détail, les zooms sur environ deux jours pour chacune des deux périodes (fig. 4.6A et 4.6B) montrent une bonne corrélation entre les pics de turbidité et les pics de courants moyens en période faible turbidité (fig. 4.6A). Une cyclicité de 6 heures permet de mettre en relation les fluctuations de la turbidité avec les courants de marée pour la période s'étalant entre le 06/09/2016 et le 16/09/2016.

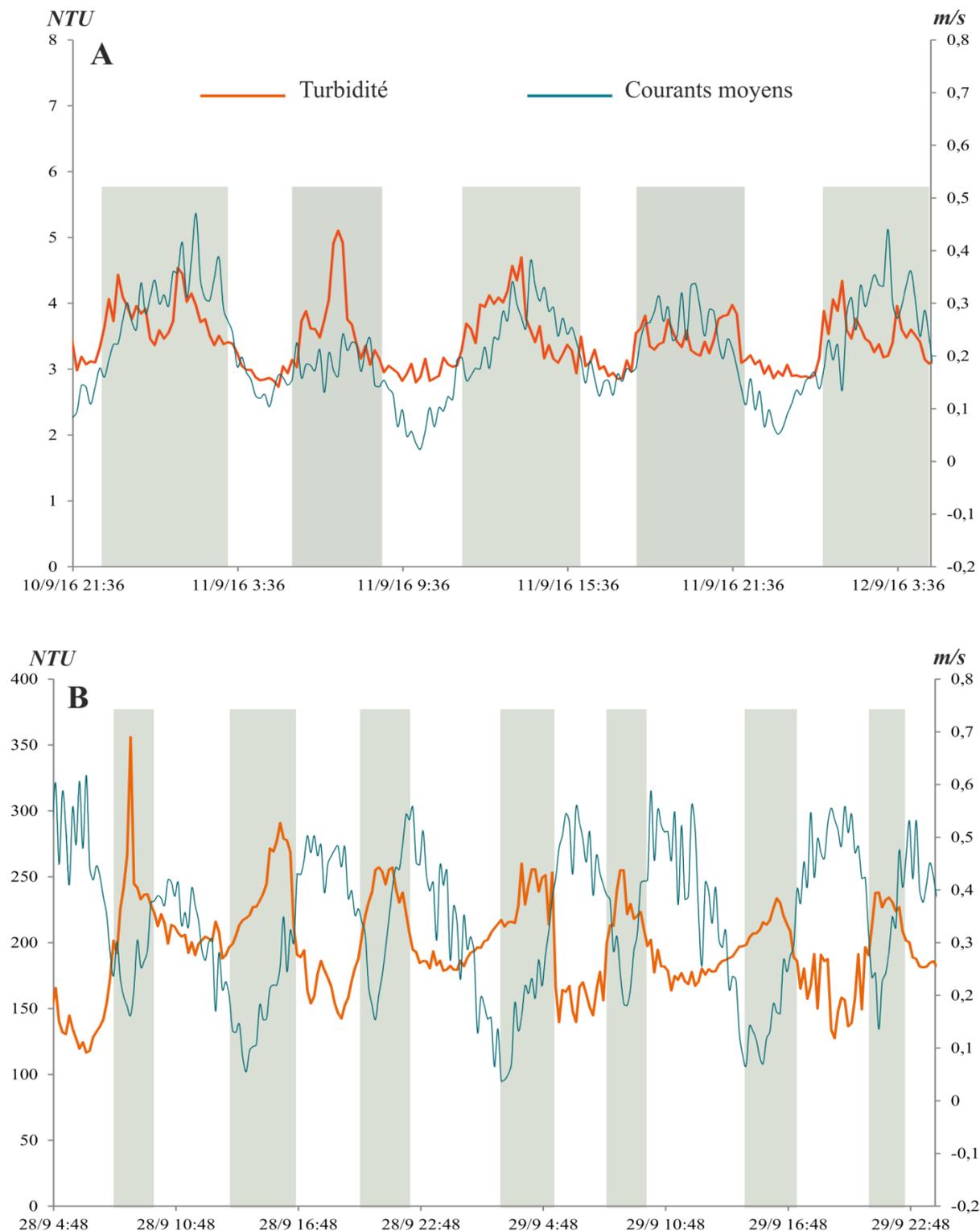


Figure 4.6 : zooms sur l'évolution de la turbidité et des courants en période de faible turbidité (A) et en période de forte turbidité (B).

Pour la période du 16 septembre 2016 au 09 octobre 2016 de forte turbidité, les pics de turbidité sont anti-corrélés avec les pics de courants de marée. Tout comme pour le mouillage Awak1, les variations de turbidité ne peuvent pas être expliquées par les variations de courants moyens.

4.3 Synthèse sur les observations de la turbidité

Les données de turbidité acquises par les deux mouillages ont permis de mettre en évidence deux périodes distinctes. Une première période de faible turbidité avec une eau assez claire du 6 au 16 septembre 2016. Cette turbidité près du fond est comparable à des mesures effectuées par le Shom sur d'autres points du plateau continental métropolitain et caractérise une turbidité « de base » de milieu océanique ouvert, une faible profondeur et un contexte hydro-sédimentaire calme ; c'est-à-dire sans évènement fortement énergétique type tempête et soumis à l'action des courants de marée. Durant cette période, les pics de turbidité présentent une cyclicité de 6 heures en accord avec le forçage hydrodynamique tidal, parfaitement corrélée avec les pics de courants moyens.

Une seconde période de plus forte turbidité à partir du 16 septembre 2016 entraîne la saturation du capteur installé sur le mouillage Awak1 à 125 NTU ne permettant pas de connaître les valeurs maximum de turbidité en ce point. Sur le mouillage Awak2, les valeurs atteignent 350 NTU avec un pic isolé à 482 NTU. Ces valeurs de turbidité extrêmement fortes induisent une très faible visibilité près du fond avec une charge en particules très importante. La non corrélation avec les accélérations des courants pendant cette période suggèrent un forçage différent de celui de la marée seule. L'hypothèse d'altération du capteur peut être écartée car les valeurs redeviennent nulles à la sortie de l'eau de l'instrument, ce qui exclut également l'existence de biofouling. D'autres hypothèses peuvent être envisagées comme l'action d'une houle montante à partir du 16 septembre 2016, des changements météorologiques (vent, précipitations) ou encore l'influence des figures sédimentaires présentes sur le fond (dunes ou rides de sable). Dans ce dernier cas, le déplacement potentiel de ces figures sédimentaires serait susceptibles d'enfouir partiellement le mouillage benthique et ainsi de modifier la distance entre le capteur optique et le fond. Cette diminution de distance entraînerait une mesure plus près de la couche mobile du fond où la turbidité est plus importante.

5. Structures sédimentaires

Les travaux de recherche sur les structures sableuses sous-marines pilotées par le Shom ont donné lieu à de nombreuses publications (Garlan, 1990 ; Mallet, 1998 ; Ehrhold, 1999 ; Garnaud et al, 2000 ; Le Bot, 2001 ; Le Bot et al, 2000a, 2000b, 2001; Desmazes, 2001 ; Idier et al, 2002 ; Idier, 2002, 2003 ; Ehrhold et al, 2003 ; Ferret, 2011 ; Garlan et al, 2013, 2014, 2016). Quelques unes d'entre-elles concernent plus particulièrement les dunes et bancs de la partie septentrionale de la mer du nord (Garlan, 1990 ; Le Bot, 2001 ; Le Bot et al, 2000a, 2000b, 2001; Idier et al, 2002 ; Idier, 2002, 2003 ; Garlan et al, 2013).

En dynamique sédimentaire, le temps est un paramètre primordial classé par Cowell et Thom (1995) selon quatre processus spatio-temporels :

- *instantanés* : impliquant les agents dynamiques primaires tels que la houle et les marées, et s'appliquant aux particules et structures de petites dimensions : rides, mégarides, ... ;
- *événementiels* : comprenant les tempêtes ou les variations environnementales saisonnières ;
- *séculaires* : comprenant des phénomènes à plus long terme comme ceux responsables de l'édification des flèches sableuses ;
- *géologiques* : concernant les modifications à l'échelle d'un bassin et pour des échelles de temps allant de quelques années jusqu'aux variations eustatiques.

Les études ont durant des décennies attribué les dunes sous-marines à des structures reliques formées à la fin de la dernière période glaciaire lors de la remontée du niveau marin. Puis elles se sont focalisées sur les processus instantanés attribuant la dynamique de ces structures aux seuls courants de marée. La dynamique des mégarides, des dunes et des bancs sableux est plus complexe que cela, puisqu'elle intègre les processus instantanés, événementiels et séculaires. Les marées engendrent des mouvements réguliers avec le balancement des mégarides selon le flot et du jusant à des vitesses horaires de l'ordre du mètre. La dynamique de ces petites structures va être à la source de la dynamique des dunes qui présentent quand à elles des mouvements d'ordre décimétrique et pouvant rarement dépasser les 50 mètres par an. Les houles vont engendrer une dynamique qui variera selon que la dynamique sédimentaire engendrée s'additionnera ou se soustraira à l'action de la marée. Le nombre de tempêtes dans le sud de la mer du nord semble fonctionner sur des cycles de 10-11 ans (Le Bot et al 2001), ce qui engendre que la dynamique moyenne doit être calculée sur de telles périodes pour obtenir une prédiction sur plusieurs années de la position future des dunes. Enfin le cycle séculaire vient interférer dans ce processus, le changement climatique et en particulier l'augmentation du nombre de tempêtes semble accélérer le déplacement des dunes sous-marines.

Grâce à la haute résolution des Sondeurs MultiFaisceaux (SMF) il est ainsi possible de disposer d'une parfaite caractérisation de la profondeur et de la morphologie des fonds. Mais durant combien de semaines, de mois ou d'années la morphologie d'une dune ou d'un banc peut-elle être estimée conforme au dernier levé bathymétrique? Peut-on prédire l'évolution de la morphologie de ces fonds? Pour répondre à ces questions, la réalisation de différentiels de données de profondeur est la plus simple des méthodes. Les derniers modèles numériques permettent de calculer l'effet d'une tempête ou de la marée sur une dune. Mais au-delà d'une période de quelques jours, seule la comparaison de levés bathymétriques permet de fournir des résultats valides.

L'étude des structures sédimentaires a tout d'abord porté sur les petites structures car celles-ci couvrent, à quelques pourcent près, l'intégralité de la zone d'étude. Les mosaïques d'imagerie ont été réalisées pour chacun des porteurs. La synthèse de ces mosaïques (Fig. 5.1) met en évidence des variations de réflectivité intégrant des variations de la nature des fonds (cf chapitre 6), des pentes, et de la longueur d'onde des dunes (cf chapitre 5.2) et des mégarides (cf chapitre 5.1). L'imagerie acoustique, comme c'est d'ailleurs généralement le cas, est donc peu corrélée à la nature des fonds, mais elle montre par contre parfaitement les structures sédimentaires.

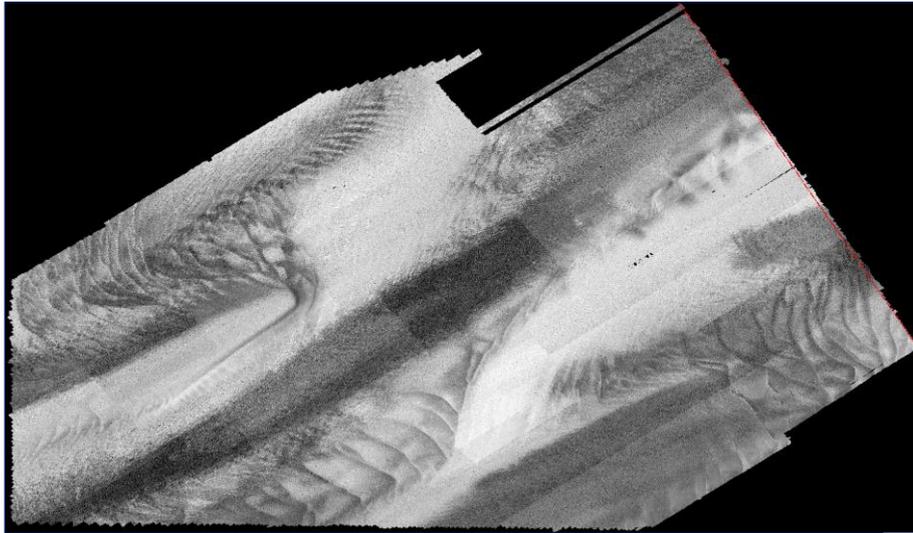
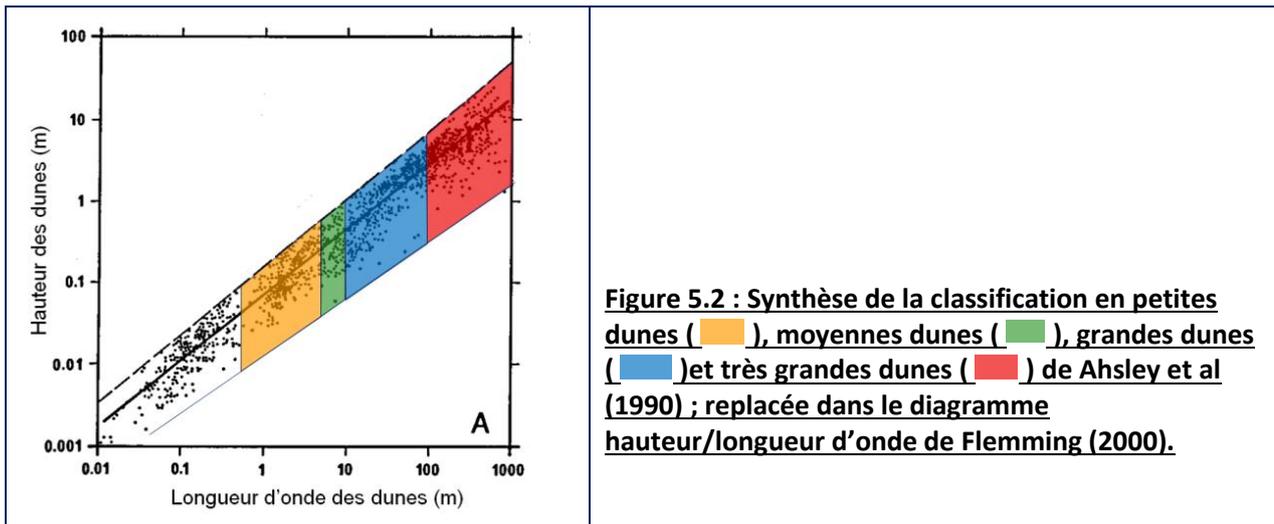


Figure 5.1 : Synthèse des mosaïques d'imagerie SMF du levé Shom 2016

Les fonds de la zone sont intégralement recouverts de structures sédimentaires. Les plus petites, que nous qualifieront de mégarides pour les différencier des bancs et dunes qu'elles recouvrent, forment des champs de structures régulières de longueur d'onde comprise entre quelques mètres et 30 mètres. Elles sont, comme les dunes, perpendiculaires aux courants. Les dunes peuvent être classées en petites, moyennes, grandes et très grandes dunes selon la classification présentée figure 5.2. Enfin les bancs se différencient par leur allongement parallèle au courant, ou plus précisément selon un angle inférieur à 30° par rapport à la direction résultante des courants de marée. IL se particularisent aussi par une vitesse de déplacement très lente : de l'ordre du mètre par an. Les bancs, les dunes et les mégarides peuvent se trouver surimposés en un même lieu comme le montre par exemple la figure 5.8.



Les structures sableuses ayant la forme de ride ont été classées en petites, moyennes, grandes et très grands dunes par un collectif travaillant sur les dunes (Ashley, 1990) le critère de classification se fait alors selon la longueur d'onde avec pour limites 0.6, 5, 10 et 100m. Les formules de Flemming permettent d'obtenir les hauteurs de dunes correspondantes 0.075, 0.4, 0,75 et 5m de haut. La classification obtenue, utilisée dans le reste du document, est la suivante :

- Petites dunes : $7,5 \text{ cm} < H < 40 \text{ cm}$; $0,6 \text{ m} < \lambda < 5 \text{ m}$;
- Moyennes dunes : $40 \text{ cm} < H < 75 \text{ cm}$; $5 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$;
- Grandes dunes : $75 \text{ cm} < H < 5 \text{ m}$; $10 \text{ m} < \lambda < 100 \text{ m}$;
- Très grandes dunes : $H > 5 \text{ m}$; $100 \text{ m} < \lambda < 1000 \text{ m}$.
- Toutes les structures plus petites sont appelées rides.

L'utilisation du diagramme de stabilité des dunes de Southard et Boguchwal (Fig 5.2) permet de comprendre la présence de ces mégarides et des dunes en prenant en compte les vitesses de courant mesurées, ou modélisées, ainsi que la granularité issue des analyses des prélèvements. L'existence de structures sédimentaires superposées pose par contre des questions sur les séparations établies dans ce diagramme.

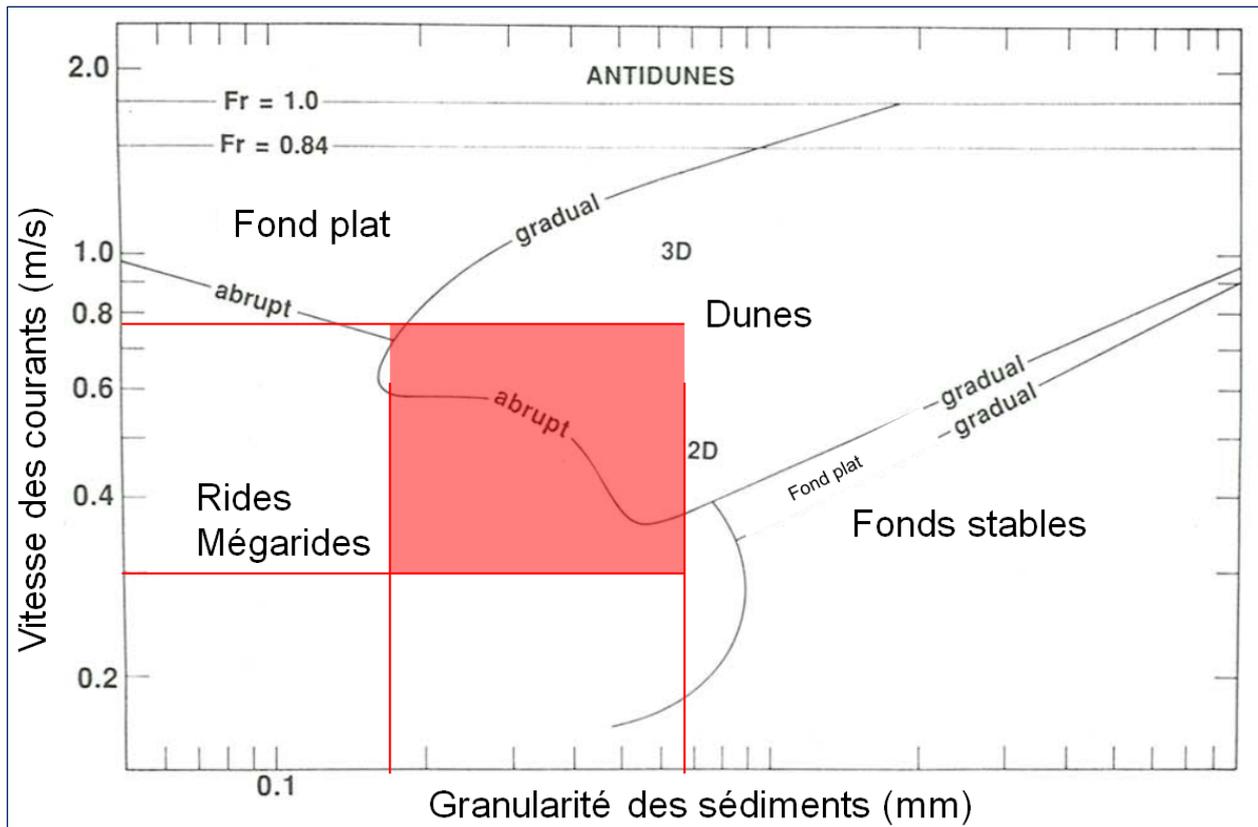


Figure 5.3 : Caractéristiques courantologiques et granulaires de la zone d'étude replacée dans le diagramme de stabilité des dunes de Southard et Boguchwal (1990)

Une première estimation des caractéristiques des vitesses de déplacement des différentes structures sédimentaires, basée sur l'analyse de quelques profils réalisés d'une part les 25 et 26 octobre 2016 et d'autre part les 22 et 23 janvier 2017, est fournie au chapitre 5.3.

5.1 Description et répartition des mégarides

Les mégarides couvrent la quasi-totalité de la zone alors que des dunes bien individualisées et des bancs s'observent dans des secteurs bien localisés. Ces mégarides présentent des longueurs d'onde (distance entre deux crêtes) variant de 3 à 30 m. Même si ces mégarides recouvrent les dunes et les bancs, il s'agit quand même, selon la classification précédemment décrite, de petites, moyennes et grandes dunes. Afin de différencier les dunes de ces structures surimposées nous les appellerons mégarides. Une première analyse de l'évolution latérale de leurs crêtes montre que celles-ci se ramifient et se subdivisent pour doubler à chaque fois la longueur d'onde et former ainsi trois familles principales (figures 5.4, 5.5 et 5.6) que nous nommerons petites, moyenne et grandes mégarides.

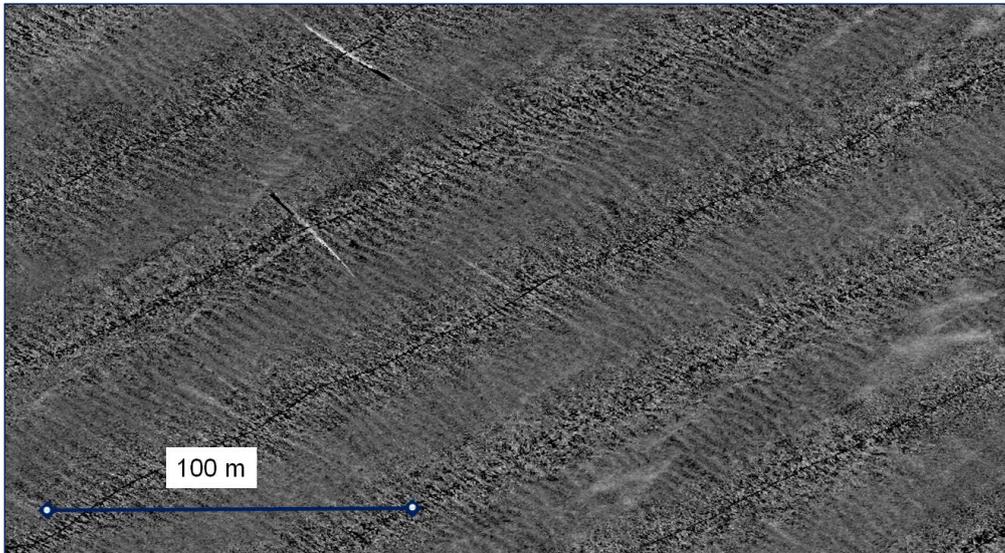


Figure 5.4 : Exemple de petites mégarides de 3 à 6 mètres de longueur d'onde.

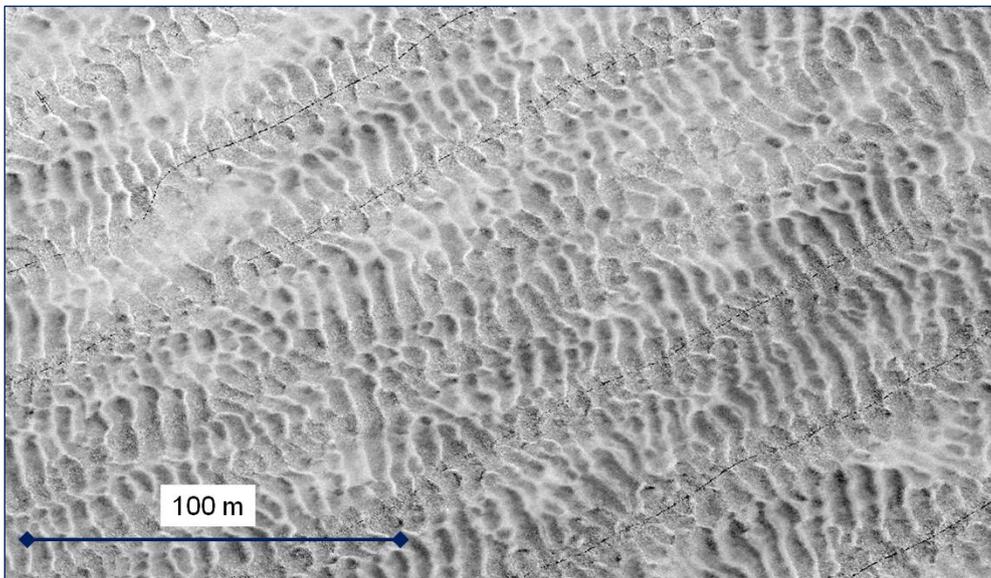


Figure 5.5 : Exemple de moyennes mégarides de 6 à 10 mètres de longueur d'onde

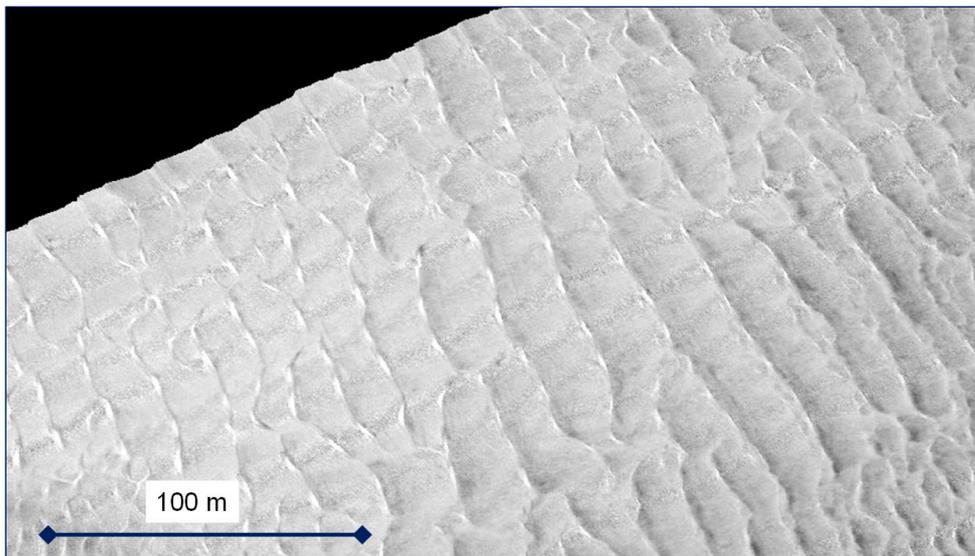


Figure 5.6 : Exemple de grandes mégarides de 10 à 25 mètres de longueur d'onde

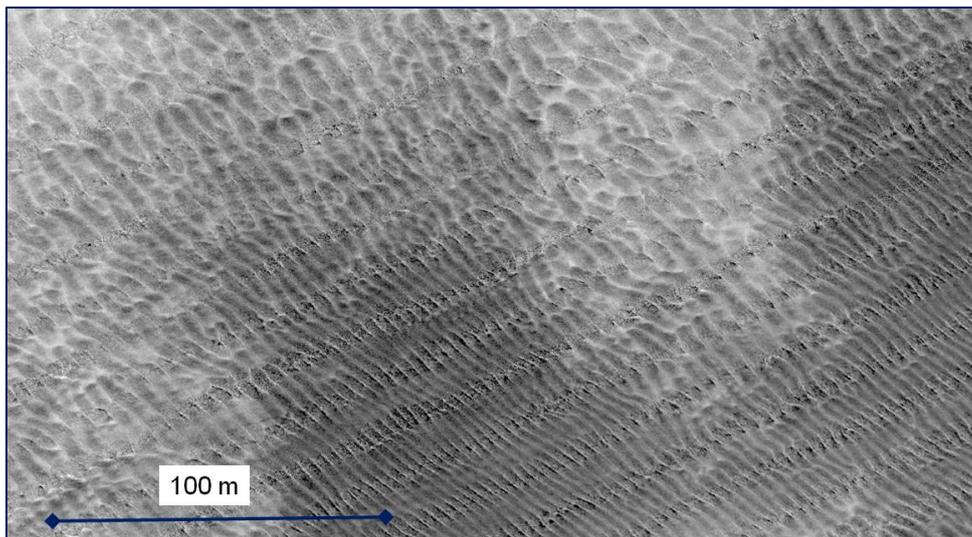


Figure 5.7 : Passage des petites aux moyennes mégarides (longueur d'onde : 6 à 10 m)

La figure 5.8 représente ainsi l'imagerie acoustique d'une de ces dunes. Son sommet est couvert des grandes mégarides alors que son flanc raide et ses bordures sont couvertes de moyennes puis de petites mégarides.

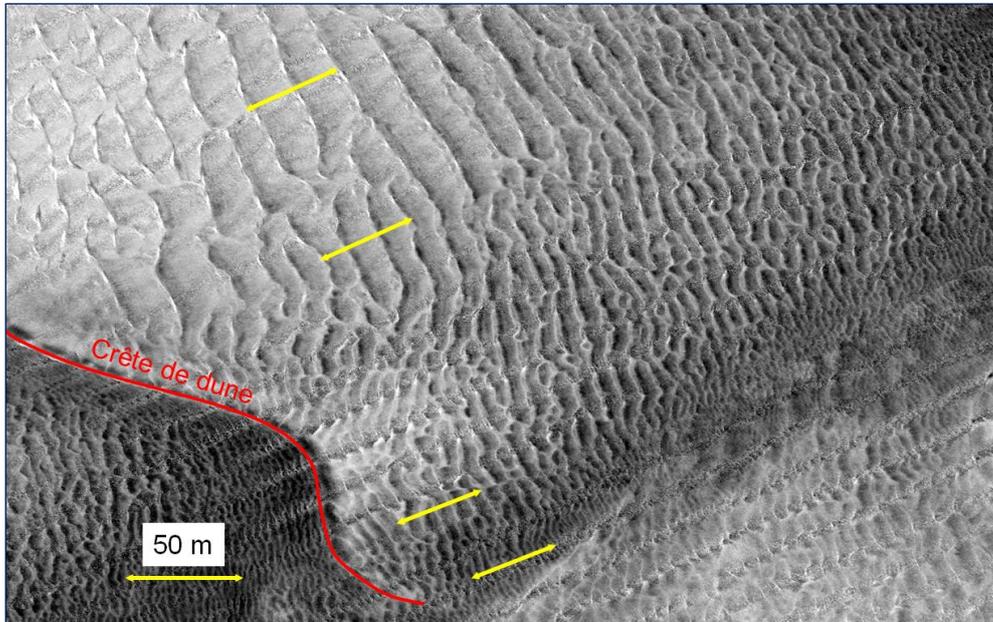


Figure 5.8 : Imbrication des différentes familles de dunes aux longueurs d'ondes variant de 3,5m en bordure de la dune à 25 m sur son sommet en passant par des structures intermédiaires de 10 à 17 m de longueur d'onde.

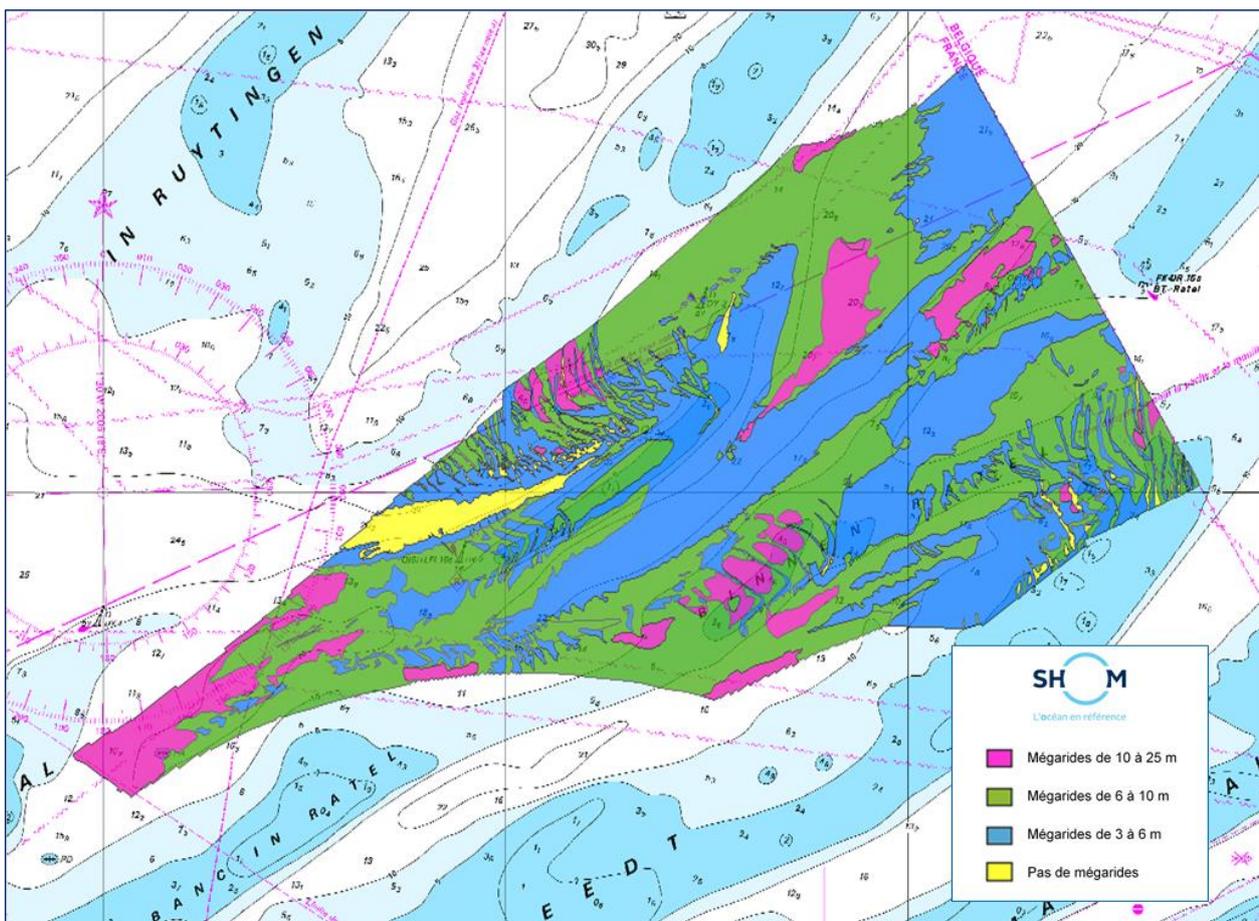


Figure 5.9 : Carte de répartition des 3 classes de mégarides, réalisée à partir des données acquises par le Shom en 2016 et 2017

La figure 5.9 présente la carte de répartition des trois familles de mégarides. La répartition de ces mégarides ne semble pas corrélée à la nature des sédiments, mais plutôt à la morphologie créée par les bancs, les interbancs et les dunes. Ces reliefs engendrent des modifications des courants de fond (gyres, upwelling, turbulence), démontrées depuis les années 2000 par des études en canal, et devant favoriser la mise en place et le déplacement de ses structures. Pour modéliser ces phénomènes il serait nécessaire de créer un modèle hydrodynamique avec un pas de maille métrique sur des surfaces plurikiométriques comprenant les bancs et dunes. En l'absence d'un tel modèle, les modèles hydrodynamiques doivent au moins prendre en compte ces dunes et mégarides au niveau du paramètre de rugosité. Ce sujet peut être estimé secondaire, mais la longueur d'onde et la dynamique de ces structures jouent un grand rôle dans les phénomènes d'enfouissement et d'affouillement (scouring) qui seront différents dans ce genre d'environnement vis-à-vis d'un fond non dunaire (Garlan et al, 2013).

La création d'une très grande dune demande plusieurs dizaines d'années et son déplacement est de l'ordre de un à quelques décimètres/an. Les dunes de la zone d'étude sont donc ici depuis plusieurs décennies et leur évolution temporelle peut être étudiée à partir de levés espacés de quelques années. A l'opposé, la variabilité temporelle de la répartition des mégarides demeure inconnue. Il est possible que ces mégarides soient en accord avec la morphologie et se trouvent donc pérennes et en accord avec les courants de marée. A l'opposé cette répartition pourrait être très changeante au cours du temps, en particulier si elles tirent leur origine de la dynamique des houles. Dans un cas comme dans l'autre, ces mégarides sont de faible hauteur et correspondent donc aux structures les plus mobiles. A notre connaissance, il n'existe pas d'étude de la répartition des mégarides ni de la variabilité dans le temps de cette répartition.

5.2 La dynamique des mégarides

Aucune modélisation de la dynamique des dunes sous-marines n'étant opérationnelle, la connaissance de cette dynamique, qu'il s'agisse des dunes ou des mégarides, ne peut reposer que sur la comparaison de données bathymétriques successives. Les profils anciens au sondeur monofaisceau étant en général trop espacés et ayant été acquis avec une précision de localisation pluridécimétrique, il est préférable de ne pas les utiliser et de limiter les études comparatives aux données de sondeurs multifaisceaux acquises avec la précision métrique permise par la localisation GPS. La zone d'étude n'ayant jamais été levée au SMF avant le levé de 2016, les seules données disponibles pour cette étude sont séparées de moins d'une année et ne fournissent donc qu'un aperçu ne permettant pas de généralisation.

Lors du levé de complément réalisé avec le Félix les 22 et 23 janvier 2017 et du levé complémentaire de juillet 2017, quelques profils déjà effectués les 25 et 26 octobre 2016 ont été refaits. Trois coupes ont été réalisées à titre de comparaison entre le levé d'octobre 2016 et celui réalisé 3 mois plus tard (Fig. 5.10). Une analyse comparative de ces deux levés permet d'établir que les déplacements sont suffisamment importants pour être quantifiés.

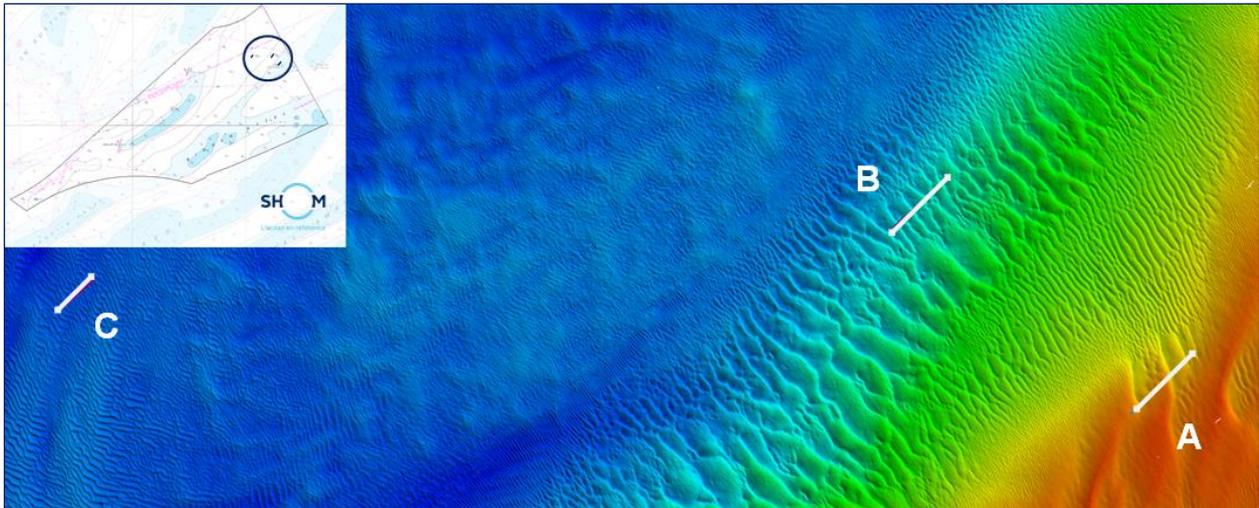


Figure 5.10 : Localisation des profils réalisés sur les 3 classes de mégarides, les 25-26 octobre 2016 et 22-23 janvier 2017

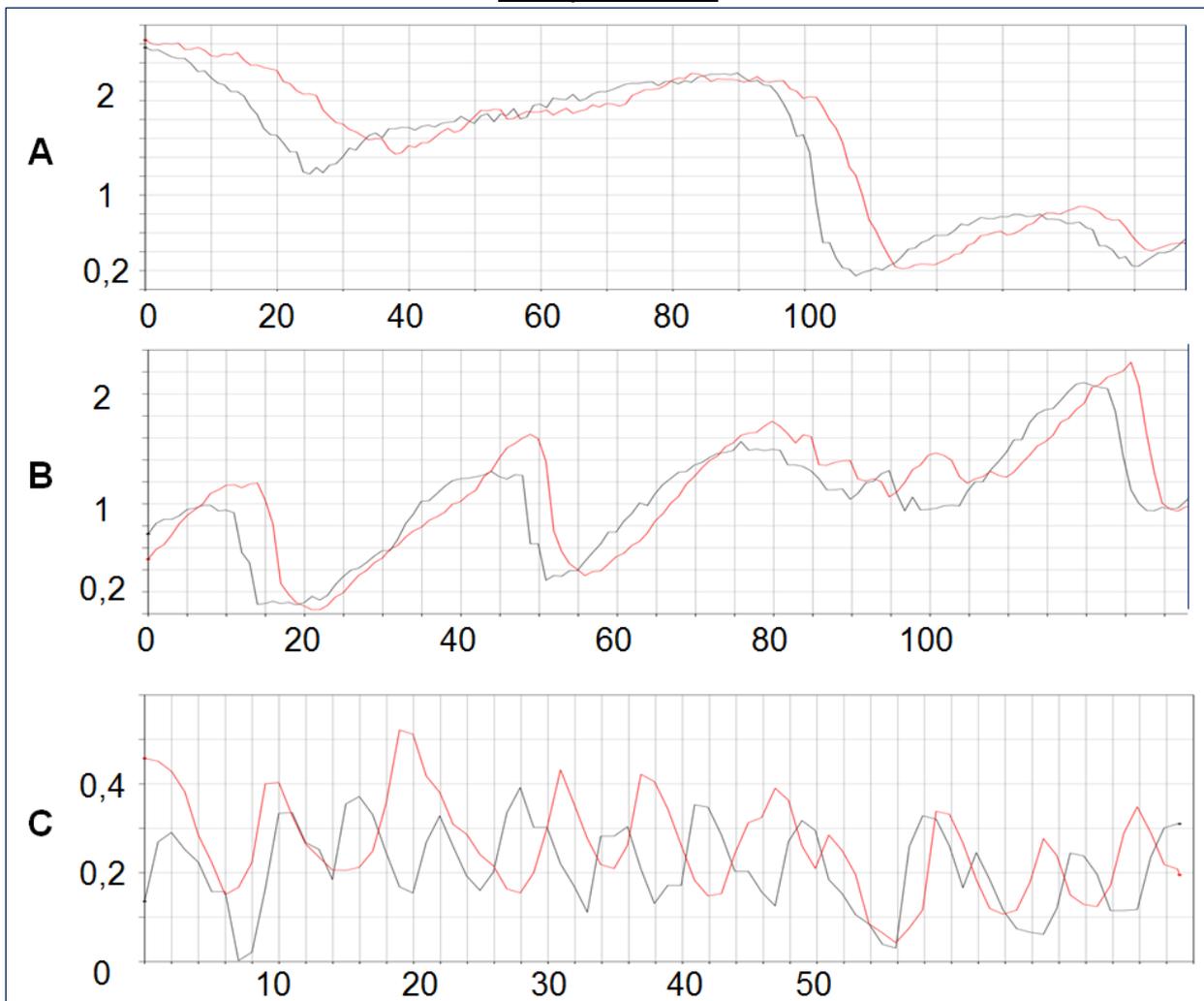


Figure 5.11 : Déplacement des grandes (A), moyennes (B) et petites (C) mégarides, sur les 3 profils localisés sur la figure 5.10 réalisés en octobre 2016 (—) et janvier 2017 (—)

La coupe présentant des grandes mégarides (Fig. 5.11.A), se situe à une profondeur de 8 mètres. La longueur d'onde de ces structures varie de 50 à 100 mètres et leur hauteur de 80 cm à 2 mètres. Leur déplacement résultant est de l'ordre de 10 mètres en trois mois.

Les mégarides moyennes (Fig. 5.11.B) se trouvent à une profondeur de 19 m. Leur longueur d'onde varie de 30 à 50 mètres et leur hauteur de 1 à 1.3 mètres. Leur déplacement résultant est de l'ordre de 5 mètres en trois mois.

Les petites mégarides (Fig. 5.11.C) étudiées sont à une profondeur de 22.5 m. Leur longueur d'onde varie de 3 à 6 mètres et leur hauteur de 0.2 m à 0.5 mètres. Elles présentent des déplacements non quantifiables, car ils semblent pouvoir être de quelques mètres en certains points du profil, mais pourraient tout autant être de plusieurs longueurs d'ondes (Fig. 5.11c).

Le suivi de la dynamique des mégarides nécessiterait la mise en place d'une instrumentation complète (suivi morphologique par exemple par radar, et de la courantométrie et turbidité) posée sur le fond durant une période de plusieurs mois comprenant des tempêtes. En l'absence de telles données, le suivi des mégarides par comparaison de levés successifs espacés de plusieurs mois est impossible car les structures ne peuvent être appariées. A l'opposé la dynamique des dunes peut quand à elle être étudiée car ces structures plus larges peuvent être retrouvées. A partir de profils supplémentaires réalisés en juillet 2017 sur des secteurs déjà levés en octobre 2016, une étude de la dynamique des dunes a donc été effectuée (cf. §5.4)

5.3 La répartition des dunes

Le secteur d'étude comporte 808 dunes qui sont toujours associées aux bancs. 45 % d'entre elles sont au nord-est associées au Dick oriental. 35% d'entre elles se trouvent sur la frange septentrionale et sur les sommets du Binnen et du Buiten Ratel. Les autres dunes sont sur la crête du Banc Breedt et dans l'intervalle entre ce banc et le Buiten Ratel (Fig. 5.12).

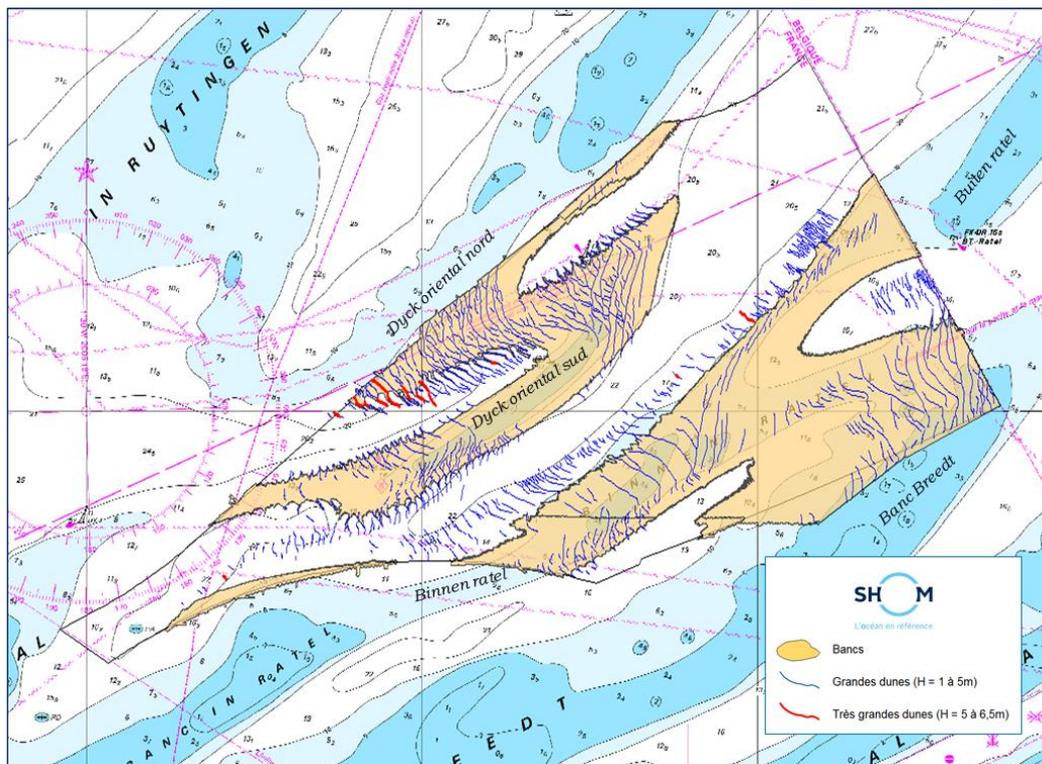


Figure 5.12 : Localisation des 796 grandes (—) et 12 très grandes dunes (—) de la zone d'étude

Il s'agit en majorité de grandes dunes, dont la hauteur est comprise entre 1 et 5 m, et de douze très grandes dunes (Fig.5.12), dont les hauteurs vont de 5,5 et 6,3 m.

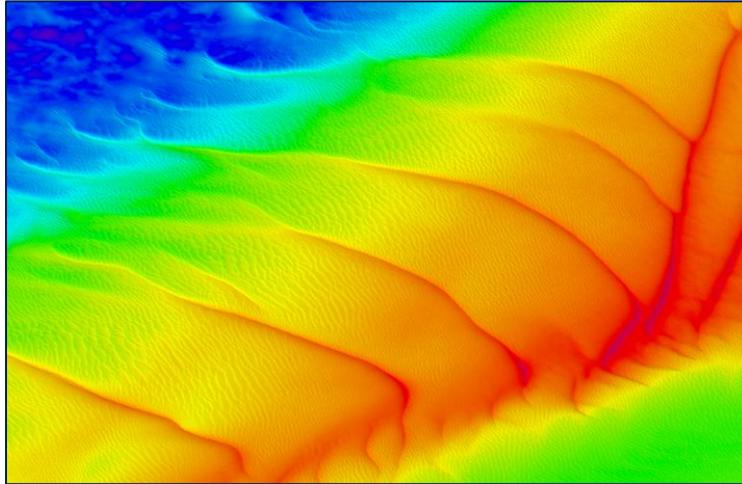


Figure 5.13 : Exemple de relation Mégarides/Dunes/Banc sur le Binnen Ratel

Certaines dunes peuvent traverser la totalité des bancs, allant d'un pied à l'autre de celui-ci et présenter des sens de déplacement opposés à chacune de leurs extrémités (Fig. 5.13).

5.4 La dynamique des dunes

La figure 5.14, issue de l'analyse de l'orientation des flancs des dunes permet en première approche de mettre en évidence la complexité de cette dynamique des dunes. Ce schéma est classique dans cette région (Garlan, 1990 ; Le Bot 2001), il présente des dunes allant vers le sud-ouest et d'autres allant dans le sens opposé, selon des orientations directement liées à la prédominance du jusant et du flot selon la position sur le banc. Des secteurs intermédiaires semblent à l'équilibre et présentent des dunes symétriques.

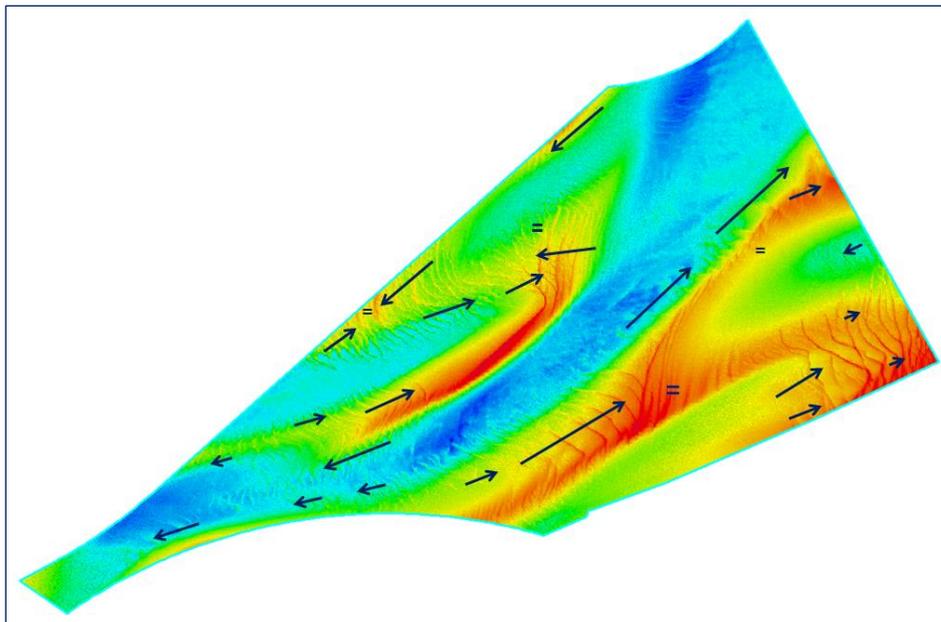


Figure 5.14 : Sens de déplacement des dunes (→) et zones à l'équilibre (=) de la zone EMR Dunkerque

L'étude de la dynamique des dunes repose sur l'analyse de 9 profils effectués en juillet 2017 sur le secteur déjà levé au SMF en octobre 2016. Les écarts observés entre les crêtes de dunes sont moyennés pour chaque dune, puis transcrits en un déplacement en mètres moyen annuel. La dynamique des dunes est affectée par les courants de marée et par les courants générés par la houle, en particulier durant les périodes de tempêtes. Si les forts coefficients de marée sont à peu près constants dans le temps, il n'en va pas de même des tempêtes dont le régime varie au cours du temps. De plus la convergence d'une orientation identique des houles et des courants de marée est un facteur prédominant dans la dynamique des dunes. Dans cette région la période de mesure idéale pour fournir une vitesse moyenne des dunes exacte est de 11 ans (Le bot et al 2000); les vitesses données ici donc données à titre indicatif.

La vitesse moyenne mesurée sur les 106 dunes étudiées est de 19 m/an. Mais les vitesses varient notablement d'un profil à l'autre, certaines zones présentent des dunes symétriques ne présentant pas de déplacement (Fig. 5.14) et quelques dunes présentent des vitesses supérieures à 50 m/an.

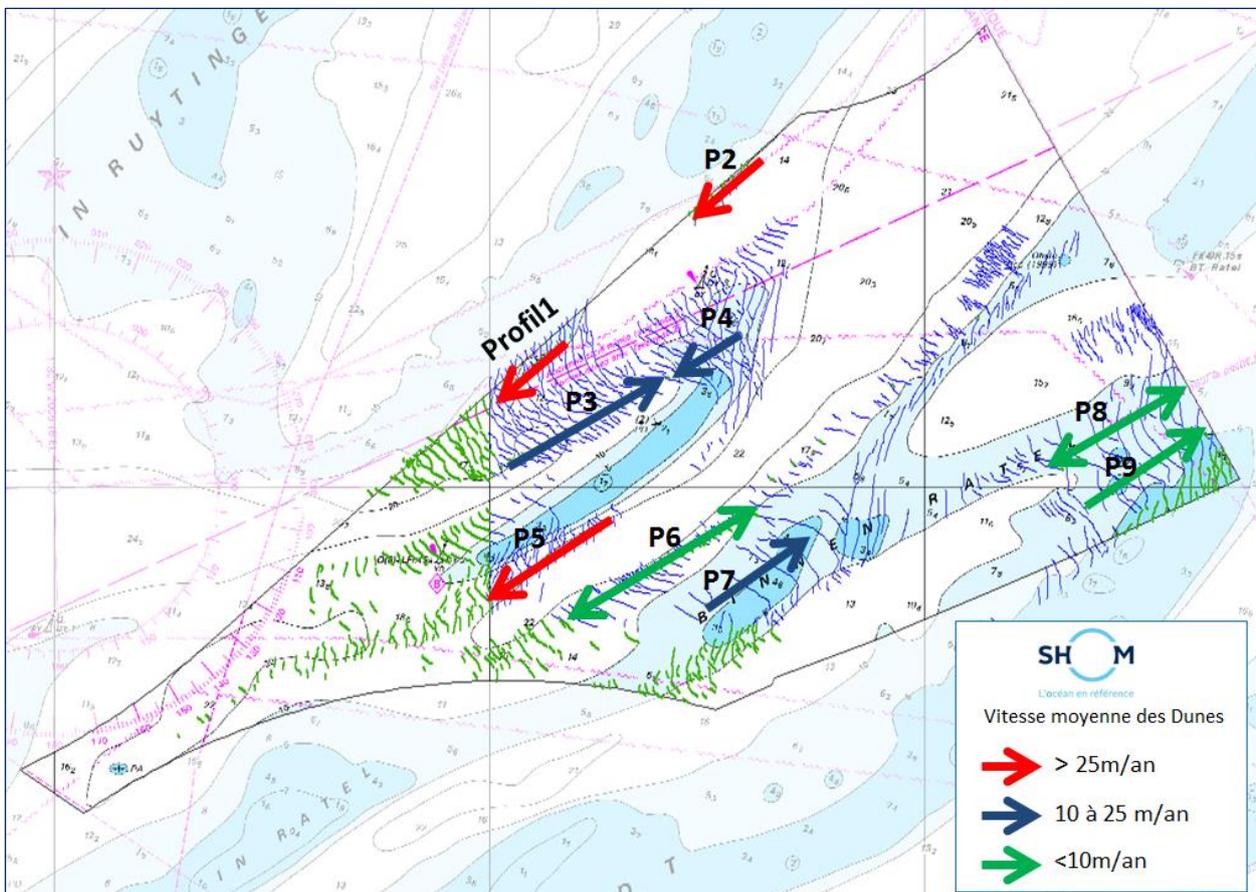


Figure 5.15 : Vitesse moyenne des dunes pour chacun des profils étudiés

La dynamique des dunes est la plus marquée sur les profils du nord de la zone et au sud du Dyck oriental sud. Dans ces trois cas la vitesse moyenne est nettement supérieure à 25 m/an puisqu'elle est respectivement de 38, 43 et 45 m/an pour les profils 2, 1 et 5. Les études en domaine désertique et les mesures en canal ont montré depuis plus de 50 ans que les petites dunes se déplaçaient plus rapidement que les grandes dunes. Ceci a été observé pour la première fois en domaine marin dans les années 2000. Les 9 profils montrent bien ceci au niveau des profils à forte dynamique. Ainsi pour le profil 1 par exemple les dunes de 2 à 3 m de

hauteur se déplacent à une vitesse de 37 m/an en moyenne alors que celles de 1 à 2 mètres atteignent des vitesses de 58m/an.

La figure 5.14 présente la dynamique des dunes et la figure 5.15 l'intensité de cette dynamique à partir des neuf profils effectués. Il en ressort que les zones présentant les plus grandes vitesses de dunes sont toutes liées au courant de jusant et se trouvent sur la façade méridionale des bancs. Dans les autres secteurs la vitesse des dunes est inférieure à 25m/an mais localement des dunes de moins de 3 mètres de hauteur et a fortiori les magarides peuvent y dépasser ces vitesses.

L'analyse complète de la dynamique des dunes de chacun des 9 profils est donnée en annexe 2.

5.5 La répartition des bancs

Le secteur d'étude comporte cinq bancs (Fig. 5.16). Le Dyck oriental y est en fait constitué de deux bancs : le Dyck oriental nord qui ourle le nord du secteur et se développe ensuite sur le plateau belge, et le Dyck oriental sud dont la majeure partie est dans la zone EMR et qui présente un éventail de dunes dans sa terminaison orientale. La partie sud comprend la zone de rencontre : du Binnen ratel qui se prolonge en Belgique par le Buiten Ratel et du Banc de Breedt qui borde toute la partie sud de la zone d'étude. Une accumulation de sable lie ces deux entités orientées sud-ouest nord-est. Enfin, l'extrémité sud est de la zone touche le banc Smal qui est un banc de 23 km de long, allant de Dunkerque à Nieuwport. Les bancs couvrent ainsi 56% de la surface de la zone d'étude.

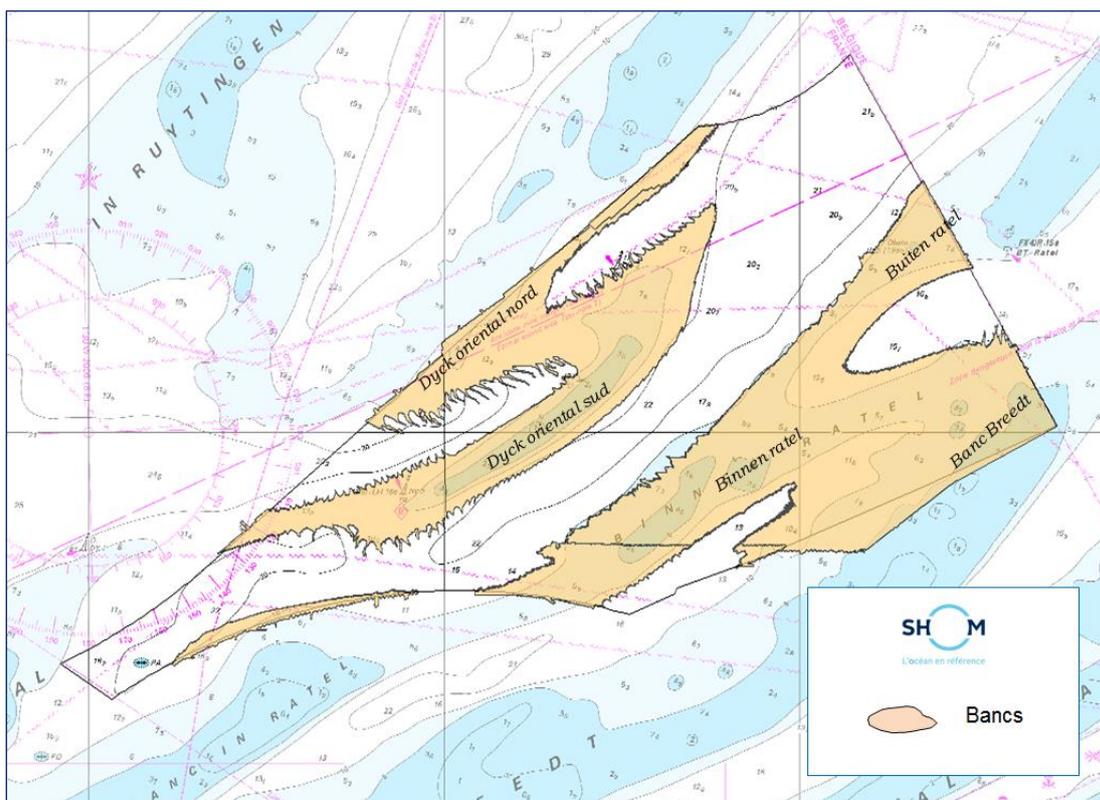


Figure 5.16 : Localisation des bancs de la zone d'étude

La hauteur de ces bancs est limitée par une érosion de leur sommet par les vagues. Cela implique que cette hauteur doit relativement peu varier au cours du temps. Les deux coupes (Fig. 5.17) montrent que ces bancs présentent en coupe un profil de flanc doux et de flanc raide assez similaire à celui des dunes. Le Buiten Ratel présente une hauteur de 16.5m (de 22 à 5,5 m) et une longueur d'onde de 2.1 km. Le Dyck oriental sud présente sur le profil une hauteur de 22m (de 26 à 4 m) et une longueur d'onde de 1.2 km.

Les deux bancs présentent une morphologie similaire la principale différence étant l'orientation de leur flanc raide.

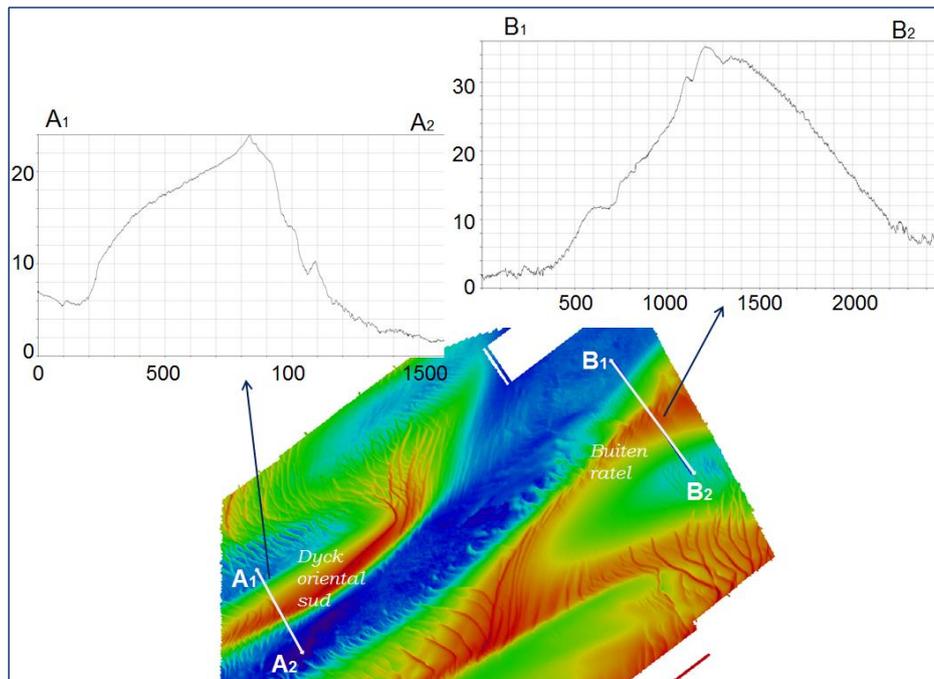


Figure 5.17 : Coupes de deux bancs de la zone d'étude

5.6 Détermination des pentes

En dehors des affleurements rocheux, les structures sédimentaires engendrent les pentes les plus importantes des plateaux continentaux. L'étude de la pente a donc été réalisée afin de mettre en évidence la variabilité de ce paramètre dans la zone d'étude. Pour éviter l'effet de tôle ondulée créé par les mégarides, un MNT a été réalisé avec une maille de 20 mètres. Cette méthode peut atténuer localement la pente, mais permet de filtrer le bruit et d'obtenir un résultat clair. Même ainsi, la carte des pentes (Fig. 5.18) montre une variabilité de la pente sur toute la zone d'étude, permettant de retrouver les structures sédimentaires de différentes longueur d'onde présentées dans les chapitres précédents.

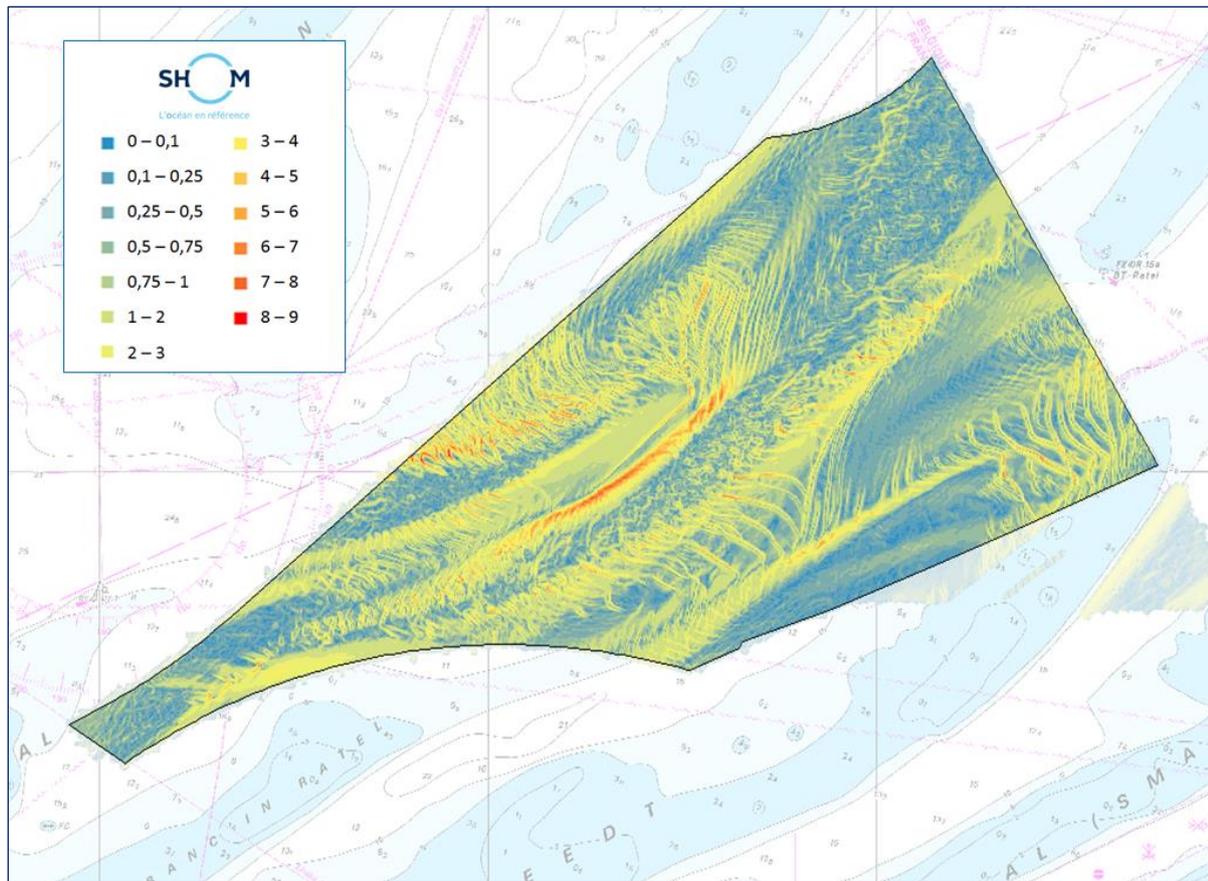


Figure 5.18 : Carte des pentes réalisée à partir des données acquises par le Shom en 2016 et 2017

A partir des mêmes données mais avec une légende réduite, la carte simplifiée (Fig. 5.19) permet d'extraire les zones de faible pente, en gris, et de souligner les zones présentant les plus fortes pentes. Les champs de dunes du nord-ouest et du sud-est présentent des pentes de 5 à 7,5° localisés sur les flancs des dunes. Tout le flanc sud du Dick Oriental, et dans une moindre mesure le sud-est du Binnen Ratel, présente des pentes fortes, le plus souvent supérieures à 2,5° et fréquemment comprises entre 5 et 8,6°.

Ces pentes peuvent paraître faible, mais à titre de comparaison, la carte de pente publiée en 1987 par le MUMM (Management unit of the north sea and Sheldt estuary Mathematical models, Bruxelles, Belgique), pour un secteur situé à une dizaine de kilomètres plus à l'est, à pour légende : "0-1° (Piedmont); 1,0-1,5°, 1,5-2,0° (Gently sloping flank); 2,0-2,5°, >= 2,5° (Steep flank)".

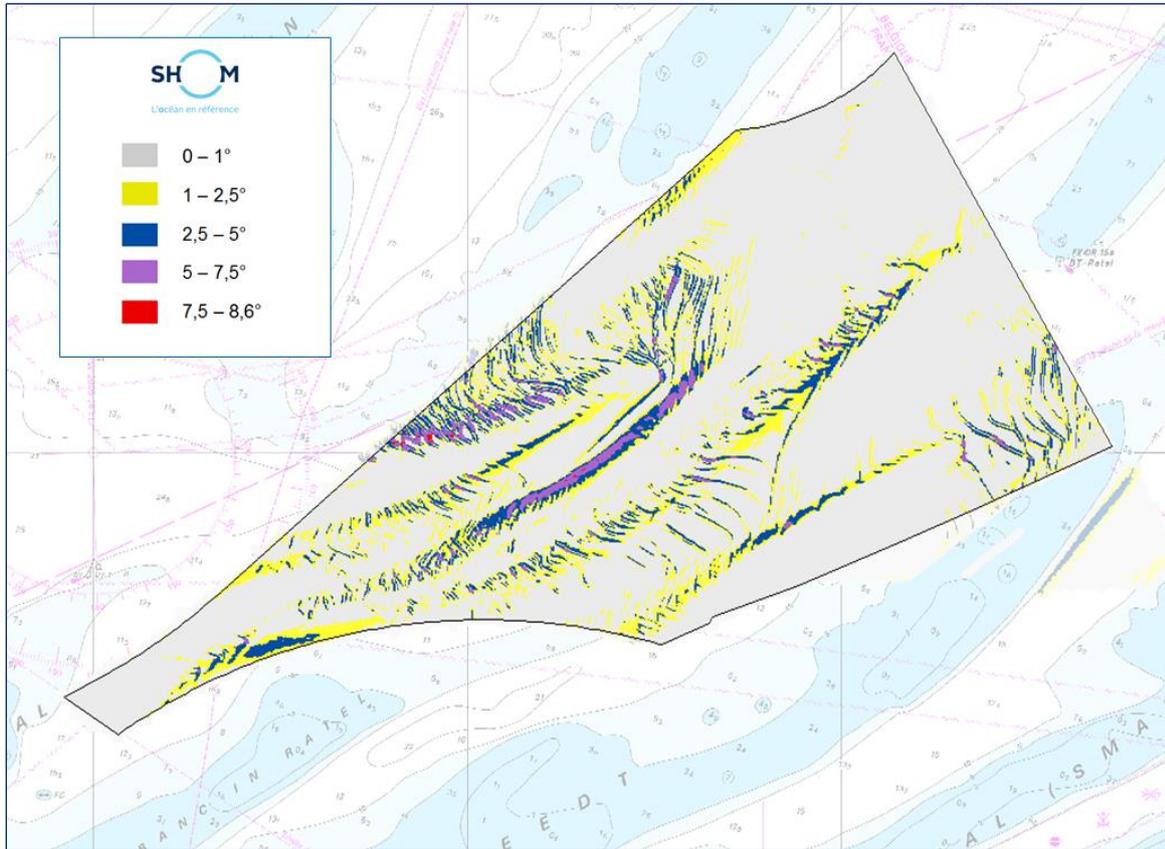


Figure 5.19 : Carte simplifiée des pentes réalisée à partir des données acquises par le SHOM en 2016 et 2017

6. Carte de la nature des fonds

A partir des données plomb suiffé avait été réalisée la carte suivante (figure 6.1) présentant une dominante de sables fins à l'ouest et des sables sur les deux tiers nord et est de la zone.

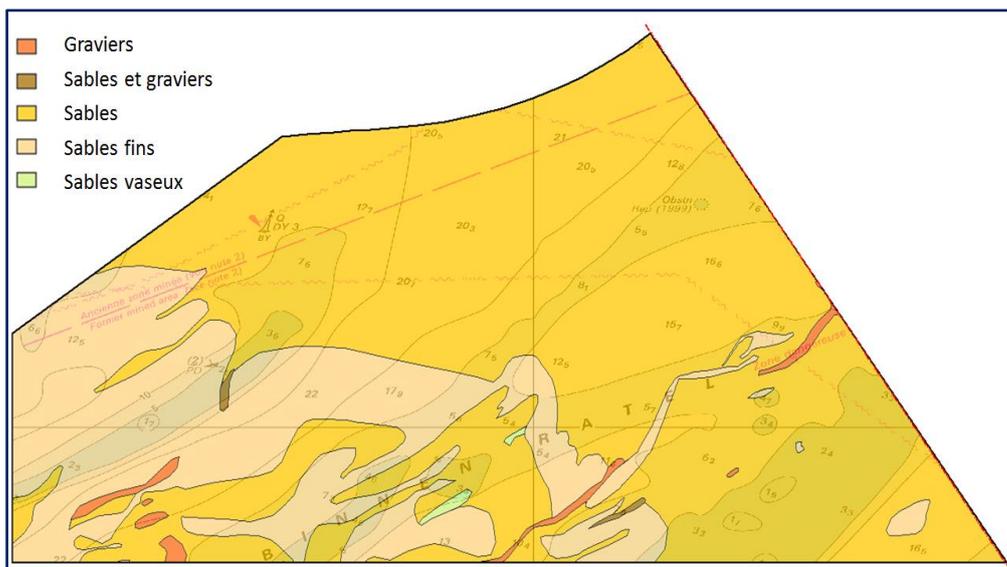


Figure 6.1 : Carte de répartition des sédiments réalisée à partir des données du XIX^{ème} siècle replacée sur un fond de la carte marine actuelle.

Cette carte présente également quelques apparitions de graviers, correspondant au socle grossier se trouvant sous le sable, et quelques taches de sables vaseux correspondant probablement au dépôt de vases temporaires.

La même cartographie réalisée avec les données de l'USTL donnerait une carte uniforme constituée de sables fins dans presque toute la zone et quelques échantillons de sables fins comportant une phase plus grossière au sud.

La carte réalisée par le Shom à partir des données acquises en 2016 et 2017 (fig.6.2) met en évidence des fonds sableux constitués de mélanges de sables moyens et de sables fins. Comme le montre la totalité des données récentes et anciennes, aucun affleurement de roche n'est observé dans la zone. Le nord-ouest présente des sables ayant une proportion variable de sables moyens cartographiés en sables (S), ou en sables fins et sables lorsque la part de sables fins est supérieure à 70% (SFS). Toute la partie centrale entre les bancs est constituée de sédiments plus fins encore il s'agit de sables fins pratiquement purs (SF). Localement, les sommets de bancs et de dunes présentent un accroissement de la granularité et ont été représentés par le faciès sables (S). Les fonds sous-jacents du secteur, constitués de cailloutis et graviers, peuvent se trouver mélangés aux sables de surface lorsque cette couverture sableuse s'affine, ce cas a été rencontré dans les prélèvements n°9, 100, 105, 209, 302, 308 et 310. Les fonds sont alors constitués de sables et graviers (SG) ou exceptionnellement de cailloutis (C) quand la couverture de sables est presque totalement dénudée. Néanmoins ces cas demeurent exceptionnels car les mégarides constituent une sorte de tapis permanent d'ondulations sableuses, entraînant un masquage du pavage sédimentaire grossier et plus encore du socle rocheux se trouvant sous la couche de graviers et cailloutis.

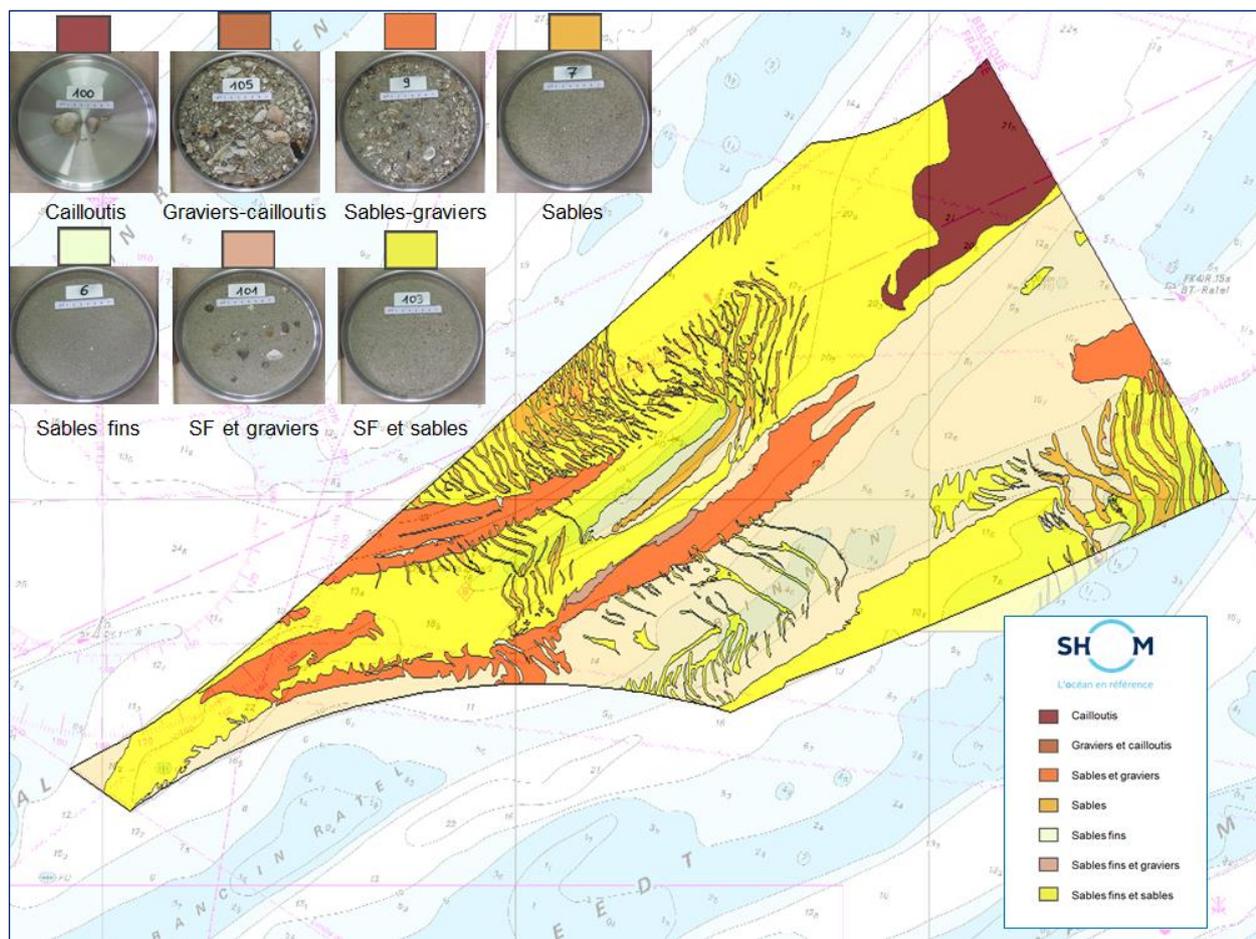


Figure 6.2 : Carte de répartition des sédiments réalisée à partir des données en 2016

L'analyse des surfaces couvertes par les différents faciès sédimentaires de la carte réalisée à partir des nouveaux levés donne l'ordre d'importance suivant : sables fins et sables 38%, sables fins 35%, graviers et cailloutis 9%, sables et graviers 7%, sables 7%, cailloutis 4%, sables fins et graviers 0,4%.

7. Epaisseur de sédiments

L'analyse des profils de sismique réflexion consiste en l'identification de l'interface entre les sédiments meubles et le substrat géologique et en la caractérisation de marqueurs dans les couches sédimentaires. Lorsque des objets se trouvent enfouis dans le sédiment, cette analyse peut permettre de détecter leur présence et venir en complément de la mesure magnétique, voir en remplacement de celle-ci lorsque les sédiments sont sableux et d'une épaisseur supérieure à 4 mètres. La sismique fournit des éléments quantitatifs et qualitatifs des couches sédimentaires du sous-sol. L'analyse des faciès sismiques informe sur les caractéristiques des sédiments traversés sans être précise sur leur nature et permet dans certaines conditions de quantifier l'épaisseur de la couche sédimentaire.

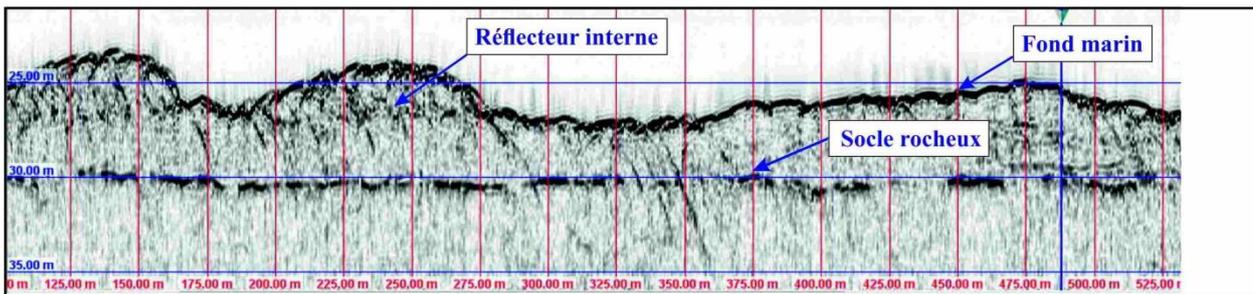


Figure 7.1 : Exemple de profil de sismique Très Haute résolution (THR) permettant de caractériser la profondeur du socle rocheux (Echos 3500 Janvier 2017).

Les profils sondeur de sédiments ne permettent pas toujours d'accéder à l'interface entre les sédiments meubles et la roche indurée. Et ceci devient plus rare encore lorsque les sédiments sont grossiers car ils accroissent l'absorption du signal. Les résultats suivants ont consisté à définir la limite de pénétration des ondes acoustiques dans le sédiment. Cette donnée permet d'obtenir l'épaisseur minimale de sédiments ou l'épaisseur totale de sédiments lorsque le toit du socle rocheux peut être détecté.

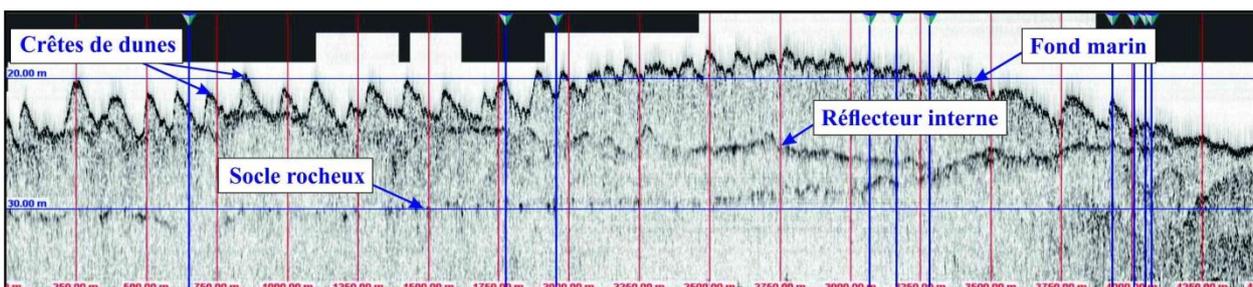


Figure 7.2 : Exemple de profil de sismique THR montrant la disparition progressive du socle rocheux sous un champ de dunes (Echos 3500 Janvier 2017).

Dans la zone d'étude l'épaisseur de sédiments correspond à l'épaisseur des structures sédimentaires au-dessus d'un socle rocheux. Ce socle bien observé dans les zones interbanes est peu penté du large vers le littoral, presque lisse, et son suivi est parfaitement similaire d'un profil à l'autre. Après avoir réalisé une série de profils espacés de 50 mètres (Fig 7.3), l'espacement a donc été adapté à la faible variabilité de la profondeur du socle. Des profils ont été dupliqués avec les deux systèmes Echos 3500 et Echos 10000 pour comparer la limite roche sédiment et des profils croisés ont été réalisés pour pouvoir valider l'absence totale de

paléovallées dans le secteur d'étude (Fig. 7.3). Il est à noter que la dynamique sédimentaire indiquée dans le chapitre 4 montre que la recherche d'une plus grande résolution serait illusoire puisque la variabilité de l'épaisseur est du d'une part à la pente du socle rocheux, mais aussi et surtout au prisme sédimentaire qui présente une variabilité temporelle liée à la dynamique des dunes.

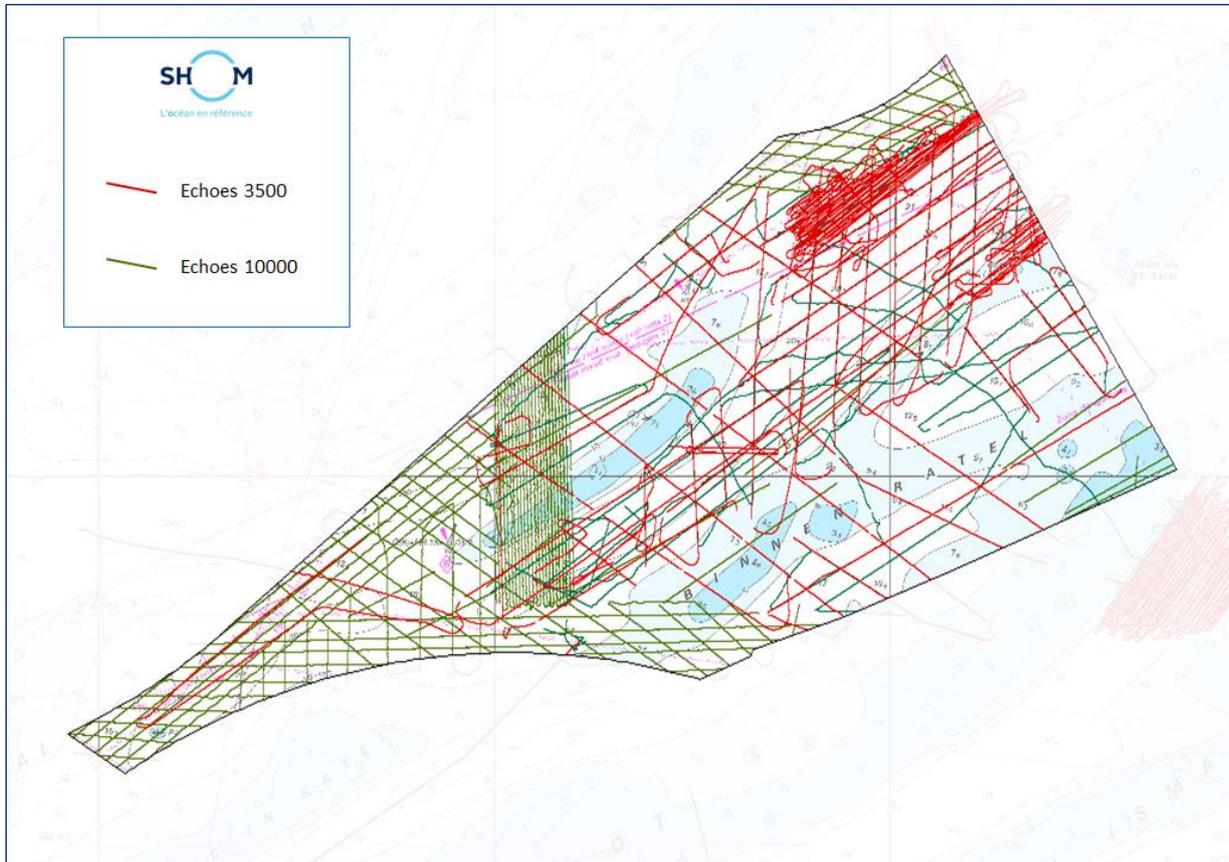


Figure 7.3 : Carte de répartition des profils de sismique THR (Echoes 10000 et Echoes 3500) acquis en 2016 et 2017

Afin de pallier les lacunes dues au masquage du socle par les sédiments grossiers ou la présence de gaz dans les sédiments, nous utilisons les lieux où la limite roche/sédiment est bien caractérisée pour construire un modèle de profondeur du toit du socle rocheux. Ce modèle soustrait au modèle numérique de terrain permet dans un deuxième temps de créer le modèle numérique d'épaisseur de sédiments. Cette méthode est permise dans la présente zone car l'étude des profils sismiques se trouvant entre les bancs démontre une absence totale de paléovallées dans le domaine d'étude. Les épaisseurs sédimentaires ainsi obtenues sont calculées pour une célérité de 1500m/s fournissant ainsi l'épaisseur sédimentaire minimale. Dans un second temps l'épaisseur réelle est calculée en prenant les valeurs de célérité des sédiments.

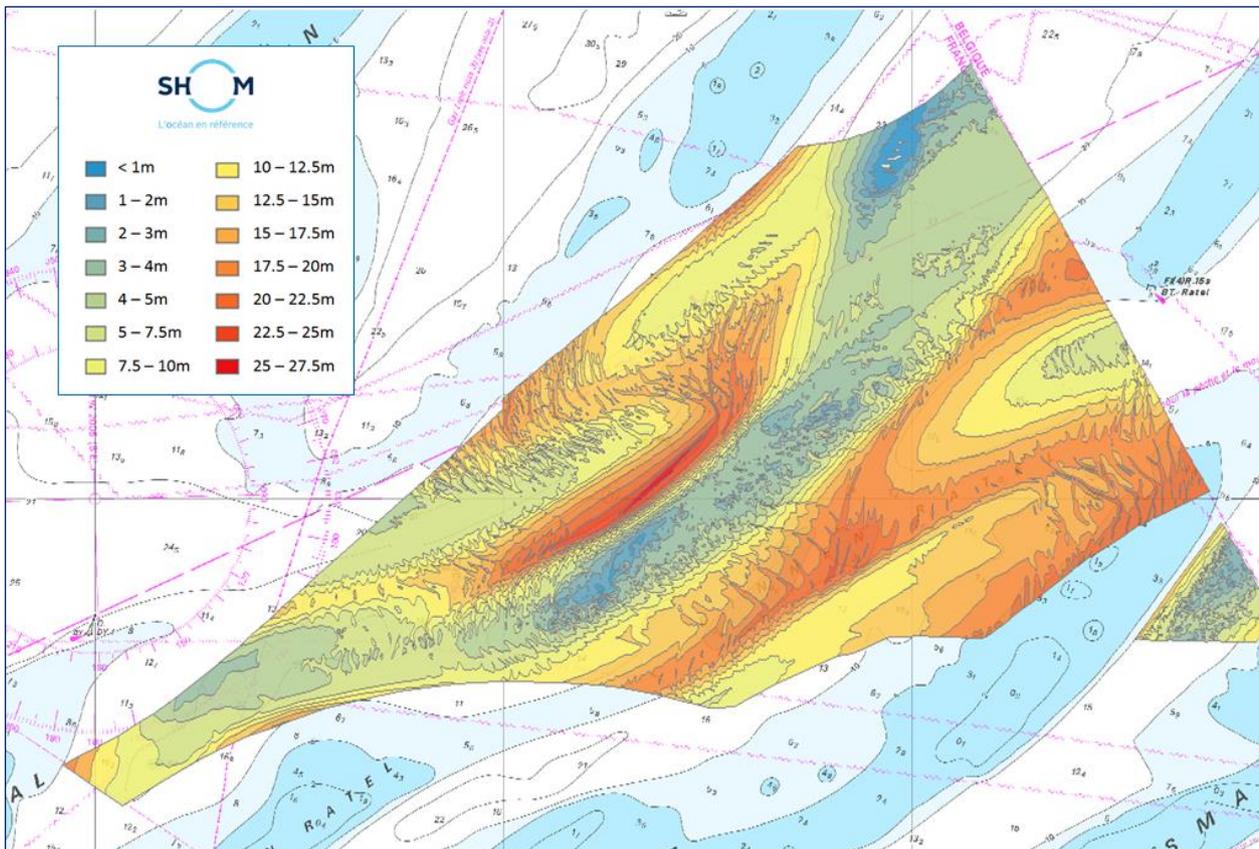


Figure 7.4 : Carte de d'épaisseur de sédiments minimale pour une célérité de 1725m/s reposant sur l'analyse des données sismiques THR acquises par le Shom en 2016 et 2017 (Echoes 10000 et Echoes 3500)

La carte (Fig. 7.4) repose sur la totalité des profils de sismique Echoes 10000 acquises par les vedettes lors du levé bathymétrique réalisé en 2016 et 2017 et intègre les données sondeur de sédiments Echoes 3500 acquises en janvier 2017 sur la partie sud-est et sur une série de profils complémentaires de la partie occidentale. Ces dernières données permettent de suivre la limite sédiment / socle rocheux sur une plus grande surface sous les bancs sableux. Les épaisseurs en millisecondes obtenues par l'analyse des données de sismique sont transformées en mètres en prenant une valeur de célérité moyenne. Cette célérité a été définie à partir de mesures de célérité réalisées dans les sables et sédiments grossiers avec le système de mesure de célérité INSEA, sur des sédiments côtiers de la région de Dunkerque et présentant les mêmes caractéristiques granulométriques. La célérité de 1725 m/s prend en compte la dominante de sables fins et l'existence d'une couche sous-jacente peu épaisse de sables et graviers. L'erreur maximale sur les valeurs d'épaisseur de sédiments présentées sur cette carte est de l'ordre de 10%.

La recherche systématique, sur chacun des profils de sismique réflexion, de paléovallées ou de déformations significatives du toit du socle rocheux met en évidence l'absence totale de paléovallées. La variabilité des épaisseurs sédimentaires vient exclusivement de la pente du socle rocheux, qui tend à se rapprocher de la surface lorsque l'on se rapproche de la côte, et des structures sédimentaires mégarides, dunes et bancs qui peuvent s'ajouter pour engendrer une épaisseur sédimentaire fréquemment supérieure à 17,5 mètres au niveau des bancs et pouvant localement dépasser 25 mètres.

8. Conclusion

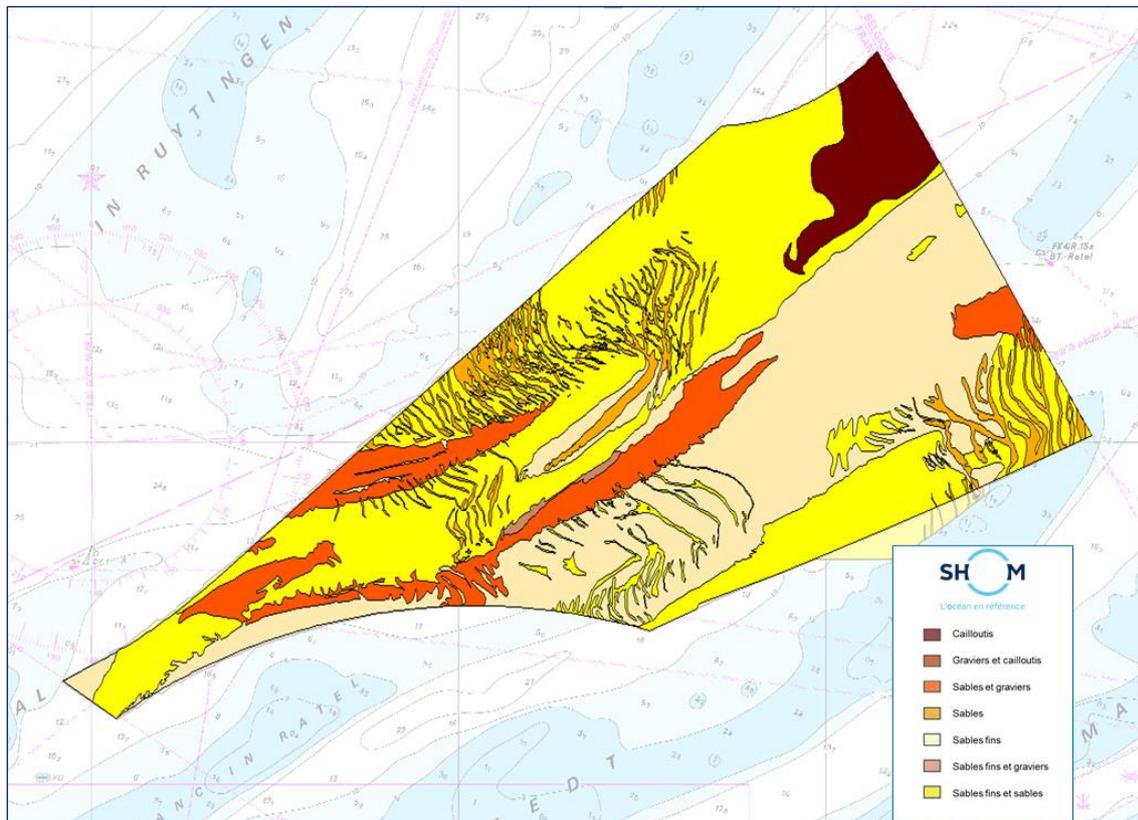


Figure 8.1 : Carte de nature des fonds à 1/10 000 de la zone EMR Dunkerque (Shom, 2017)

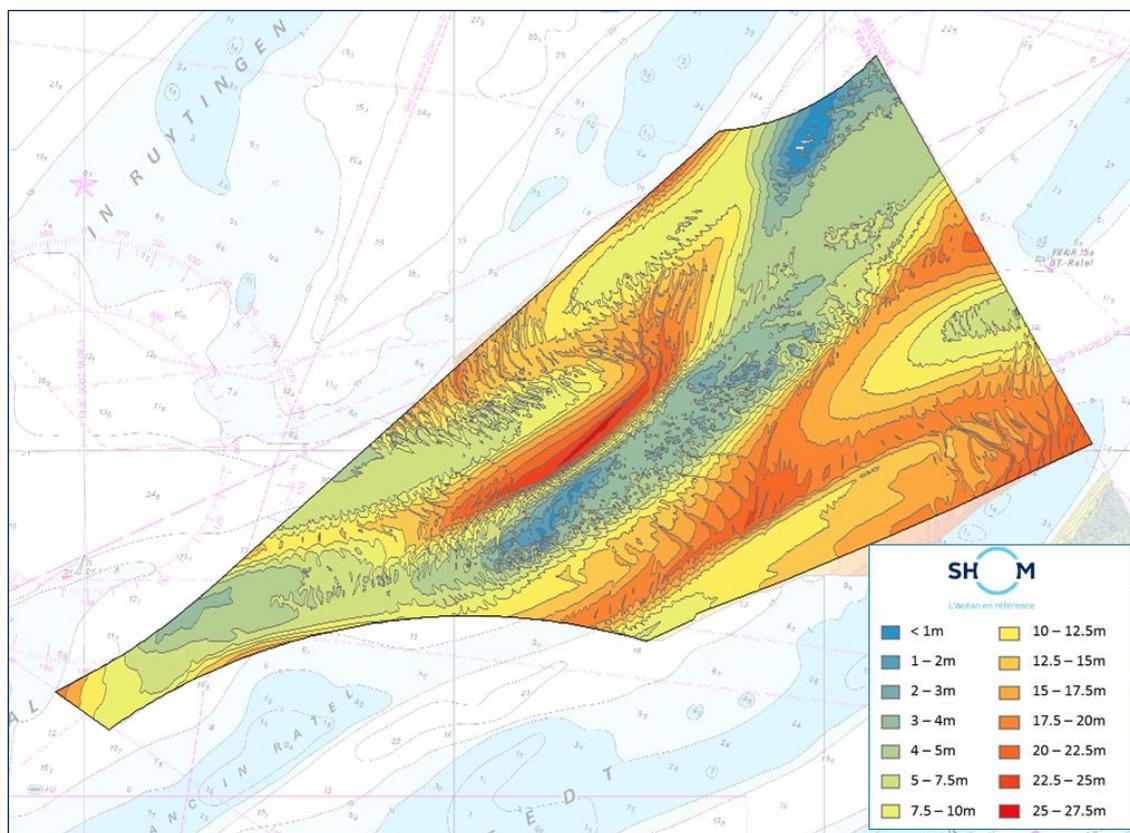


Figure 8.2 : Carte d'épaisseur de sédiments de la zone EMR Dunkerque (Shom, 2017)

L'étude sédimentologique de la zone d'étude met en évidence des fonds de sables fins comportant, dans certains secteurs, un enrichissement en sables, en graviers, voir pour la partie nord-est en cailloutis. La nature des sédiments demeure assez homogène et représente un agencement en grande partie due à la présence des structures sableuses ; les parties ayant les sédiments les plus gossiers correspondant aux zones les plus pauvres en structures sédimentaires .

Bien que la couverture sédimentaires soit exclusivement constituée de particules grossières allant des sables aux cailloutis, la turbidité peut atteindre des pics importants pouvant perturber les opérations de plongée et toutes opérations nécessitant une bonne visibilité sous-marine. Les mesures effectuées présentent des périodes calmes et des périodes de forte turbidité, qui ne sont pas provoquées par les courants de marée. Ces mesures devront être confrontées à des modélisations si un outil de prévision de cette turbidité s'avérait nécessaire.

Dans ce milieu de bancs et de dunes, caractéristique de cette partie de la Mer du Nord, la particularité de la zone est son quasi-total recouvrement de mégarides. Celles-ci présentent une dynamique importante qui en première approche peut être estimée à quelques mètres par mois. Les bancs et dunes présentent également des déplacements mais moins importants. La morphologie des bancs peut être estimée stable à l'échelle de quelques années, mais la forte dynamique des mégarides engendre une obsolescence très rapide de la bathymétrie très haute résolution. Il est possible que le zonage des petites, moyennes et grandes mégarides demeure constant et qu'à l'intérieur de ces zones les déplacements à l'échelle d'une tempête, d'une saison ou d'une année puissent être quantifiés. La dynamique des dunes peut dans certains secteurs être très importante avec des déplacements annuels supérieurs à 35 mètres pour des dunes de plusieurs mètres de haut. Ce secteur présente les mêmes caractéristiques que ceux étudiés plus au nord (Projet Dunes, Shom) et aux abords de Calais (thèse S. Le Bot), avec des sens de déplacement des dunes contraints par le flot ou le jusant selon la protection engendrée par les bancs et des vitesses de déplacement pouvant dépasser la cinquantaine de mètres par an mais variant très rapidement d'un secteur à l'autre et selon la taille des structures.

Le socle rocheux est peu penté du large vers la côte, l'épaisseur sédimentaire se trouve donc essentiellement due à la présence des dunes et des bancs. Cette épaisseur de sédiments varie de quelques décimètres dans les zones inter-bancs à plus de 25 mètres au sommet du Dyck oriental sud.

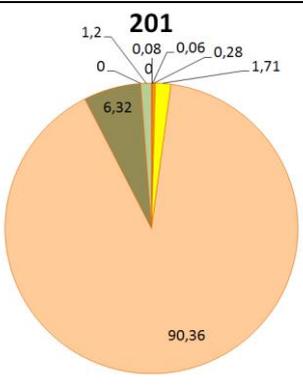
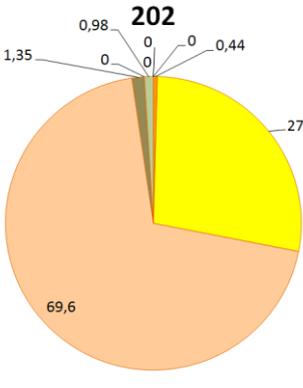
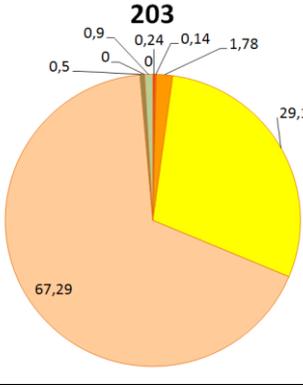
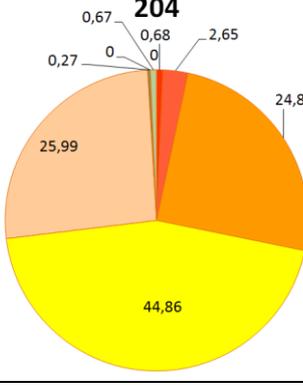
ANNEXE I : Caractéristiques granulométriques des sédiments

N°	Z (m)	Nom du sédiment (Code SHOM)	Grain moyen (mm)	So	% CaCO ₃	Photographie échantillon sec	Granularité
							 (G : Gravier, Sg : Sables grossiers, m : moyen, f : fins, tf : très fins)
01	11	S	0,46	1,295	49		
02	12	SF	0,22	1,235	24		
03	18	SF	0,17	0,690	18		
04	12	SF	0,18	0,719	17		

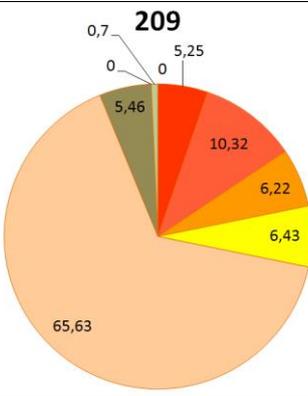
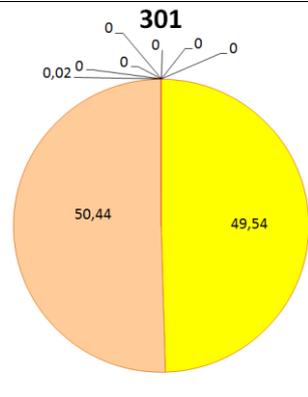
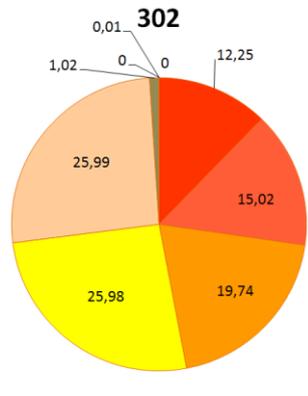
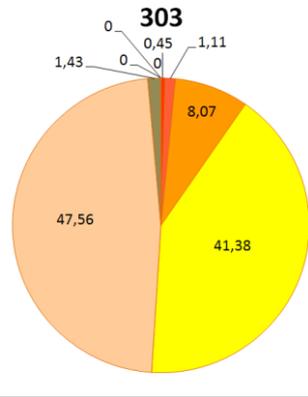
N°	Z (m)	Nom du sédiment (Code SHOM)	Grain moyen (mm)	So	% CaCO3	Photographie échantillon sec	Granularité							
							C	gG	pG	Sg	Sm	Sf	Stf	Si-A
05	7,5	SF	0,22	0,759	17		<p>0,57 0,86 0 0 0,28 3,62 38,41 56,27</p>							
06	20	SF	0,17	0,744	20		<p>0,82 0 0,03 0,27 3,69 9,42 85,78</p>							
07	9	S	0,28	0,832	19		<p>0,78 0,2 0 0 0,04 9,68 17,68 71,62</p>							
08	24	SF	0,23	1,384	-		<p>1,31 1,09 0 0,59 6,27 4,47 8,88 77,39</p>							

N°	Z (m)	Nom du sédiment (Code SHOM)	Grain moyen (mm)	So	% CaCO3	Photographie échantillon sec	Granularité
							 (G : Graviers, Sg : Sables grossiers, m : moyen, f : fins, tf : très fins)
09	28	SF	0,41	1,923	27		
100	25	C	20	-	-		
101	25	SF	0,23	1,583	21		
102	19	S	0,36	1,375	31		

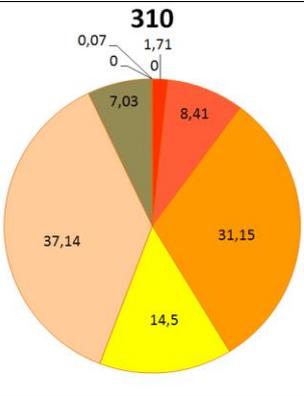
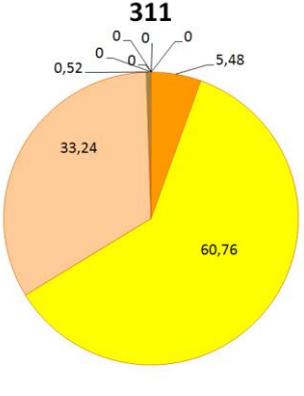
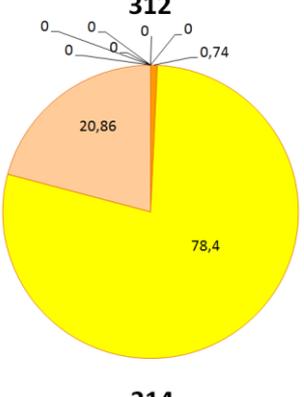
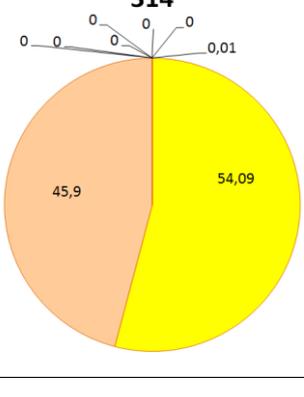
N°	Z (m)	Nom du sédiment	Grain moy (mm)	So	% CaCO ₃	Photographie échantillon sec	Granularité							
							C	gG	pG	Sg	Sm	Sf	Stf	Si-A
103	12	SF	0,20	0,808	18		<p>(G : Gravier, Sg : Sables grossiers, m : moyen, f : fins, tf : très fins)</p>							
104	8	SF	0,19	0,844	18									
105	24	SG	0,68	2,129	42									
106	8,8	S	0,24	0,874	18									

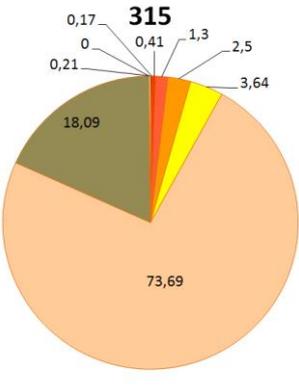
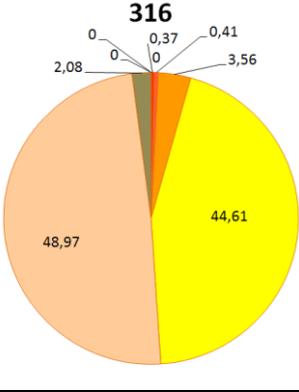
N°	Z (m)	Nom du sédiment	Grain moy (mm)	So	% CaCO ₃	Photographie échantillon sec	Granularité							
							C	gG	pG	Sg	Sm	Sf	Stf	Si-A
201	25	SF	0,17	0,865	14									
202	18	SfS	0,20	0,839	12									
203	9	SfS	0,21	0,872	12									
204	10	S	0,32	1,094	20									

N°	Z (m)	Nom du sédiment	Grain moy (mm)	So	% CaCO ₃	Photographie échantillon sec	Granularité																											
							C	gG	pG	Sg	Sm	Sf	Stf	Si-A																				
205	16	S	0,31	0,901	25		<p>205</p> <p>(G : Graviers, Sg : Sables grossiers, m : moyen, f : fins, tf : très fins)</p> <table border="1"> <tr><th>Fraction</th><th>Proportion (%)</th></tr> <tr><td>0,01</td><td>0,01</td></tr> <tr><td>0,02</td><td>0,52</td></tr> <tr><td>0,05</td><td>0</td></tr> <tr><td>0,1</td><td>2,62</td></tr> <tr><td>0,2</td><td>0</td></tr> <tr><td>0,5</td><td>1,59</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>20,55</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>28,6</td></tr> <tr><td>4,0</td><td>46,12</td></tr> </table>								Fraction	Proportion (%)	0,01	0,01	0,02	0,52	0,05	0	0,1	2,62	0,2	0	0,5	1,59	1,0	20,55	2,0	28,6	4,0	46,12
Fraction	Proportion (%)																																	
0,01	0,01																																	
0,02	0,52																																	
0,05	0																																	
0,1	2,62																																	
0,2	0																																	
0,5	1,59																																	
1,0	20,55																																	
2,0	28,6																																	
4,0	46,12																																	
206	21	SF	0,17	1,102	16		<p>206</p> <table border="1"> <tr><th>Fraction</th><th>Proportion (%)</th></tr> <tr><td>0,01</td><td>1,09</td></tr> <tr><td>0,02</td><td>0,24</td></tr> <tr><td>0,05</td><td>0</td></tr> <tr><td>0,1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0,2</td><td>1,36</td></tr> <tr><td>0,5</td><td>3,55</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>4,78</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>18,7</td></tr> <tr><td>4,0</td><td>70,29</td></tr> </table>								Fraction	Proportion (%)	0,01	1,09	0,02	0,24	0,05	0	0,1	0	0,2	1,36	0,5	3,55	1,0	4,78	2,0	18,7	4,0	70,29
Fraction	Proportion (%)																																	
0,01	1,09																																	
0,02	0,24																																	
0,05	0																																	
0,1	0																																	
0,2	1,36																																	
0,5	3,55																																	
1,0	4,78																																	
2,0	18,7																																	
4,0	70,29																																	
207	15	SF	0,17	0,835	13		<p>207</p> <table border="1"> <tr><th>Fraction</th><th>Proportion (%)</th></tr> <tr><td>0,01</td><td>1,09</td></tr> <tr><td>0,02</td><td>0</td></tr> <tr><td>0,05</td><td>0,02</td></tr> <tr><td>0,1</td><td>0,31</td></tr> <tr><td>0,2</td><td>0</td></tr> <tr><td>0,5</td><td>7,59</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>4,85</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>86,14</td></tr> </table>								Fraction	Proportion (%)	0,01	1,09	0,02	0	0,05	0,02	0,1	0,31	0,2	0	0,5	7,59	1,0	4,85	2,0	86,14		
Fraction	Proportion (%)																																	
0,01	1,09																																	
0,02	0																																	
0,05	0,02																																	
0,1	0,31																																	
0,2	0																																	
0,5	7,59																																	
1,0	4,85																																	
2,0	86,14																																	
208	8	SF	0,17	0,920	12		<p>208</p> <table border="1"> <tr><th>Fraction</th><th>Proportion (%)</th></tr> <tr><td>0,01</td><td>1,32</td></tr> <tr><td>0,02</td><td>0</td></tr> <tr><td>0,05</td><td>0,01</td></tr> <tr><td>0,1</td><td>0,66</td></tr> <tr><td>0,2</td><td>3,83</td></tr> <tr><td>0,5</td><td>10,18</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>84</td></tr> </table>								Fraction	Proportion (%)	0,01	1,32	0,02	0	0,05	0,01	0,1	0,66	0,2	3,83	0,5	10,18	1,0	84				
Fraction	Proportion (%)																																	
0,01	1,32																																	
0,02	0																																	
0,05	0,01																																	
0,1	0,66																																	
0,2	3,83																																	
0,5	10,18																																	
1,0	84																																	

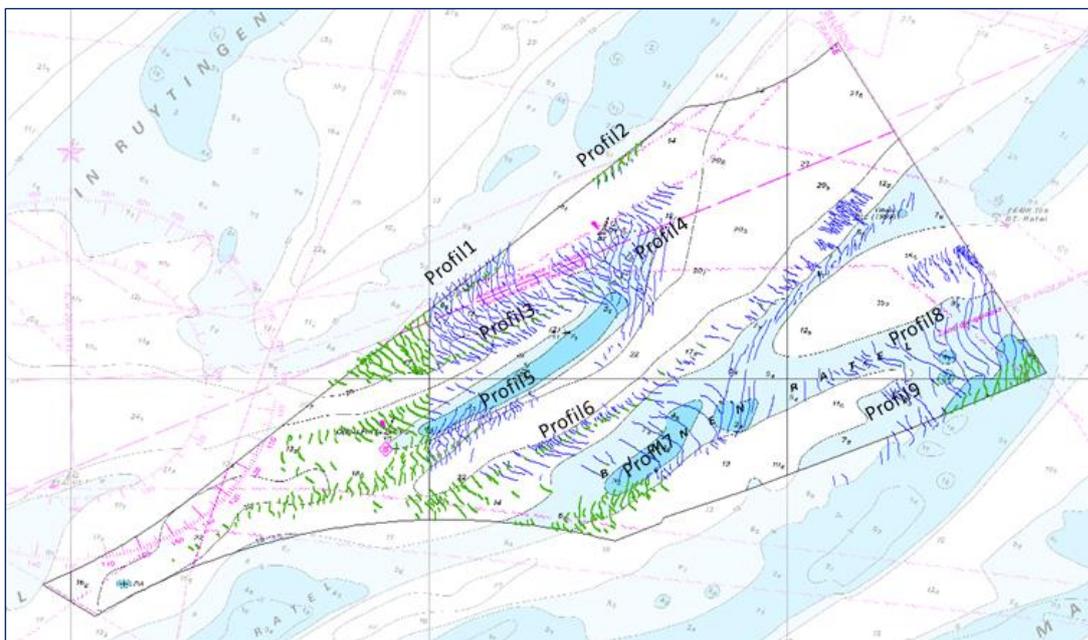
N°	Z (m)	Nom du sédiment	Grain moy (mm)	So	% CaCO ₃	Photographie échantillon sec	Granularité							
							C	gG	pG	Sg	Sm	Sf	Stf	Si-A
209	26	Sfs	0,30	1,715	24		<p>209</p>  <p>(G : Graviers, Sg : Sables grossiers, m : moyen, f : fins, tf : très fins)</p>							
301	21	S	0,24	0,346	0		<p>301</p> 							
302	31	SG	0,59	1,709	26		<p>302</p> 							
303	25	S	0,26	0,743	12		<p>303</p> 							

N°	Z (m)	Nom du sédiment	Grain moy (mm)	So	% CaCO ₃	Photographie échantillon sec	Granularité
							 (G : Gravier, Sg : Sables grossiers, m : moyen, f : fins, tf : très fins)
304	27	S	0,30	0,366	0		
307	16	S	0,31	0,427	0		
308	26	SG	0,54	1,388	37		
309	18	S	0,26	0,393	0		

N°	Z (m)	Nom du sédiment	Grain moy (mm)	So	% CaCO ₃	Photographie échantillon sec	Granularité							
							C	gG	pG	Sg	Sm	Sf	Stf	Si-A
310	18	SG	0,40	1,459	37		 <p>310</p> <p>0,07 1,71 0 0 7,03 8,41 31,15 14,5 37,14</p>							
311	19	S	0,29	0,540	0		 <p>311</p> <p>0 0 0 0 0 0 5,48 33,24 60,76 0,52</p>							
312	20	S	0,30	0,352	0		 <p>312</p> <p>0 0 0 0 0 0 0,74 20,86 78,4</p>							
314	27	S	0,25	0,342	0		 <p>314</p> <p>0 0 0 0 0 0 0,01 45,9 54,09</p>							

N°	Z (m)	Nom du sédiment	Grain moy (mm)	So	% CaCO ₃	Photographie échantillon sec	Granularité							
							C	gG	pG	Sg	Sm	Sf	Stf	Si-A
315	18	SF	0,18	0,854	16		<p>(G : Gravier, Sg : Sables grossiers, m : moyen, f : fins, tf : très fins)</p> 							
316	10	S	0,24	0,608	10									

ANNEXE II : Etudes de la dynamique des dunes de la zone EMR Dunkerque



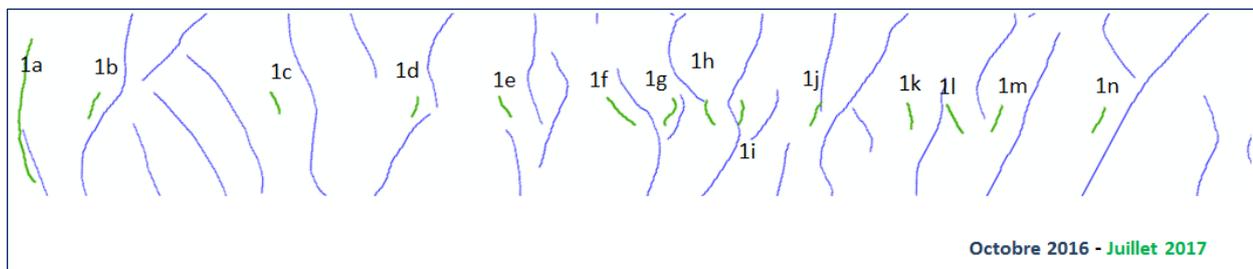
Répartition des profils d'étude de la dynamique des dunes

A : H en mètres

B : Distance en mètres parcourue entre le levé du 25-26 octobre 2016 et celui du 9-17 juillet 2017

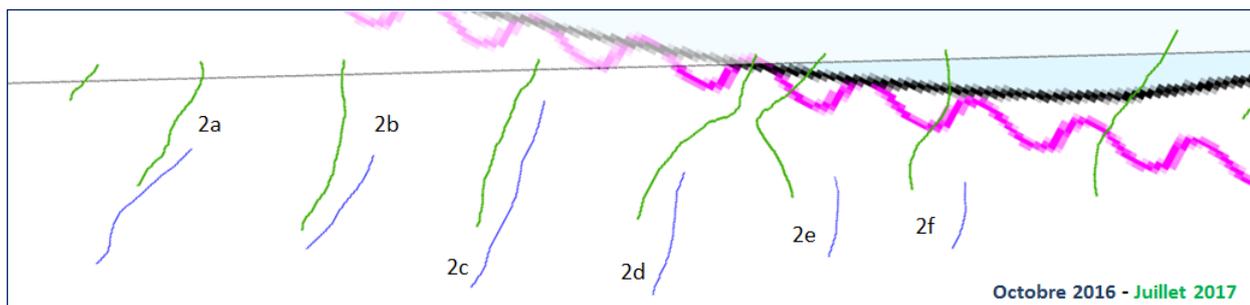
C : Distance moyenne annuelle en mètres

Profil 1 : Déplacement important vers le sud-ouest



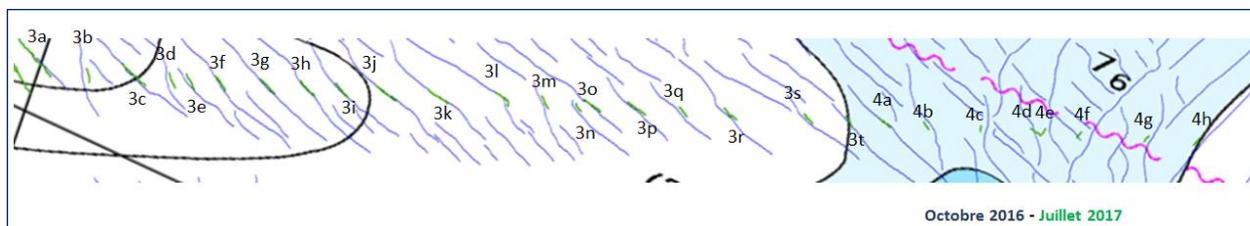
Profil 1														
	1a	1b	1c	1d	1e	1f	1g	1h	1i	1j	1k	1l	1m	1n
A	2,9	4,9	1,7	4,2	1,2	2,0	2,0	2,0	1,7	2,2	2,0	1,6	2,0	1,8
B	11,8	18,1	59,4	16,9	50,5	34,5	13,1	38,3	27,6	23,1	42,2	48,8	31,3	23,9
C	16	25	82	23	70	48	18	53	38	32	58	67	43	33

Vitesse (en m/an) des dunes du profil 1, mesurée sur la période du 25/10/2016 au 17/07/2017						
V_{moy}	V_{min}	V_{max}	Dunes > 4m	3-4m	2-3m	1-2m
43,2	16,3	81,8	24,1	*	37,4	57,9

Profil 2 : Déplacement important vers le sud-ouest

Profil 2						
	2a	2b	2c	2d	2e	2f
A	1,5	2	2,2	1,8	1,5	1,2
B	11,3	19,1	22,5	26,6	42,3	42,5
C	16	26	31	37	58	59

Vitesse (en m/an) des dunes du profil 2, mesurée sur la période du 25/10/2016 au 17/07/2017						
V _{moy}	V _{min}	V _{max}	Dunes>4m	3-4m	2-3m	1-2m
37,7	15,6	58,5	*	*	28,6	32,0

Profil 3 : Déplacement vers le nord-est

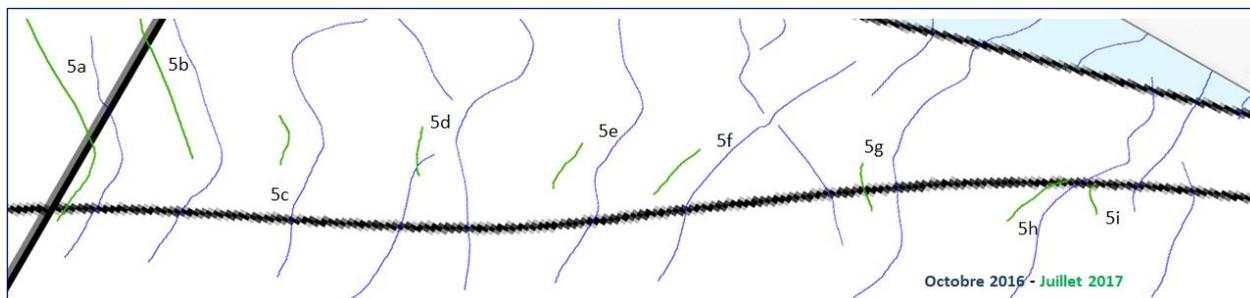
Profil 3																				
	3a	3b	3c	3d	3e	3f	3g	3h	3i	3j	3k	3l	3m	3n	3o	3p	3q	3r	3s	3t
A	4,3	4	3,7	4	3,5	4	4	4,3	3,7	4,2	5,5	4,5	4	2	3,3	2,4	3,7	2,8	3	2,5
B	9,8	27	3,2	21	15	7	9	4	9	4	4	13	13	12	5	7,5	16	13	13	4
C	13	37	4	29	21	10	12	6	12	6	6	18	18	17	7	10	22	18	18	6

Vitesse (en m/an) des dunes du profil 3, mesurée sur la période du 25/10/2016 au 17/07/2017						
V _{moy}	V _{min}	V _{max}	Dunes>4m	3-4m	2-3m	1-2m
14,4	4,4	37,2	15,4	14,0	12,6	*

Profil 4 : Déplacement vers le sud-ouest

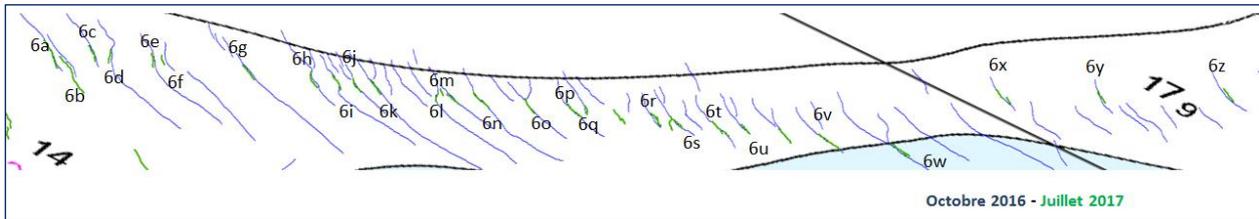
Profil 4								
	4a	4b	4c	4d	4e	4f	4g	4h
A	3,2	2,8	4,9	1,5	1,6	2,8	1,6	2
B	6	21,2	18,8	5	20	36,7	14,1	16,6
C	8	29	26	7	28	51	19	23

Vitesse (en m/an) des dunes du profil 4, mesurée sur la période du 25/10/2016 au 17/07/2017						
V_{moy}	V_{min}	V_{max}	Dunes > 4m	3-4m	2-3m	1-2m
23,8	6,9	50,5	25,9	8,3	34,2	18,0

Profil 5 : Déplacement important vers le sud-ouest

Profil 5									
	5a	5b	5c	5d	5e	5f	5g	5h	5i
A	2	1,5	2,5	3,8	3	3,3	3,2	3,8	1,3
B	28,1	36,7	37,3	43,8	24,3	26,1	39,2	16,9	43,4
C	39	51	51	60	33	36	54	23	60

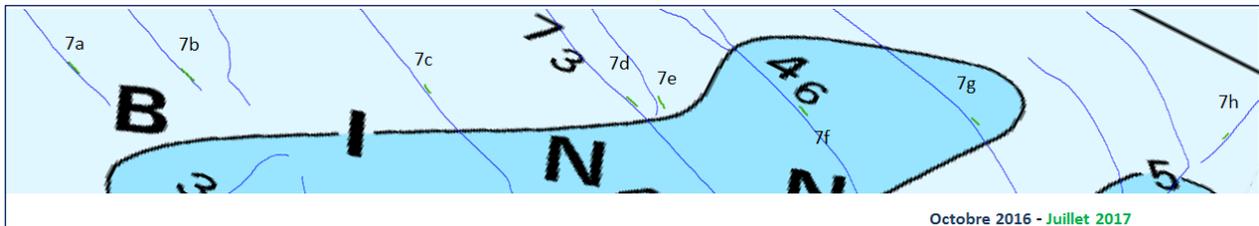
Vitesse (en m/an) des dunes du profil 5, mesurée sur la période du 25/10/2016 au 17/07/2017						
V_{moy}	V_{min}	V_{max}	Dunes > 4m	3-4m	2-3m	1-2m
45,3	23,3	60,3	*	41,4	45,0	55,2

Profil 6 : Déplacement peu marqué vers le sud-ouest

Profil 6													
	6a	6b	6c	6d	6e	6f	6g	6h	6i	6j	6k	6l	6m
A	3	2	3,8	2,1	2,1	2	4	1,6	1,5	2	3	2,6	2,3
B	4	15,7	6,5	7,3	7,5	13,7	8	9,3	2,5	3,2	3,8	0	7,1
C	6	22	9	10	10	19	11	13	3	4	5	0	10
	6n	6o	6p	6q	6r	6s	6t	6u	6v	6w	6x	6y	6z
A	3,5	3	3,6	2,2	1,2	1,3	2,1	2,7	3,3	3,3	4	3,4	3
B	3	2,3	0	8	8,5	2,6	0	4,2	0	0	5,6	0	3,9
C	4	3	0	11	12	4	0	6	0	0	8	0	5

Vitesse (en m/an) des dunes du profil 6, mesurée sur la période du 25/10/2016 au 17/07/2017

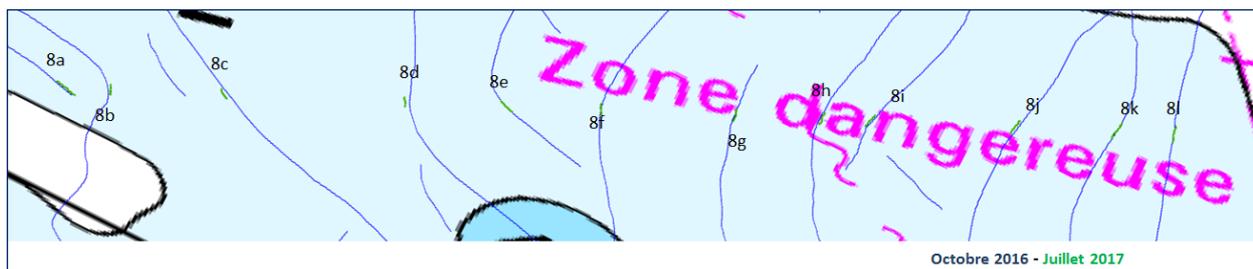
V_{moy}	V_{min}	V_{max}	Dunes > 4m	3-4m	2-3m	1-2m
6,7	0,0	21,6	9,4	3,2	9,2	7,9

Profil 7 : Déplacement peu marqué vers le nord-est

Profil 7								
	7a	7b	7c	7d	7e	7f	7g	7h
A	3,2	2,8	2,1	2,6	2	2,4	3,8	2,3
B	4,9	2	9,2	7,5	15,2	11,2	12,4	6,5
C	7	3	13	10	21	15	17	9

Vitesse (en m/an) des dunes du profil 7, mesurée sur la période du 25/10/2016 au 17/07/2017

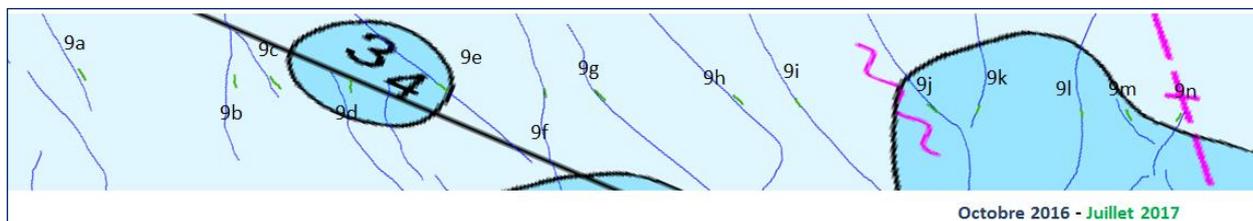
V_{moy}	V_{min}	V_{max}	Dunes > 4m	3-4m	2-3m	1-2m
11,9	2,8	20,9	*	11,9	11,8	*

Profil 8 : Déplacement sans direction dominante

Profil 8												
	8a	8b	8c	8d	8e	8f	8g	8h	8i	8j	8k	8l
A	1,5	2	3,8	2,5	1,5	4,7	3,6	3,5	2	3,5	2	2,2
B	4	5,1	7,8	8,4	1,6	0	2,6	3	3,1	3,8	1,5	1
C	6	7	11	12	2	0	4	4	4	5	2	1

Vitesse (en m/an) des dunes du profil 8, mesurée sur la période du 25/10/2016 au 17/07/2017

V _{moy}	V _{min}	V _{max}	Dunes>4m	3-4m	2-3m	1-2m
4,8	0,0	11,6	0,0	5,9	5,3	3,9

Profil 9 : Déplacement peu marqué vers le nord-est

Profil 9														
	9a	9b	9c	9d	9e	9f	9g	9h	9i	9j	9k	9l	9m	9n
A	4	2,5	1,5	1	3,8	4,7	3,5	3,1	3,5	3,5	2,2	2,6	1,1	2,7
B	10,7	16,2	11	24,6	0	2,8	5	7,5	1,2	4	2,1	0	11,1	4,1
C	15	22	15	34	0	4	7	10	2	6	3	0	15	6

Vitesse (en m/an) des dunes du profil 9, mesurée sur la période du 25/10/2016 au 17/07/2017

V _{moy}	V _{min}	V _{max}	Dunes>4m	3-4m	2-3m	1-2m
9,9	0,0	33,9	9,3	4,9	7,7	21,4

PRINCIPES DE CARTOGRAPHIE DES SEDIMENTS (EXTRAIT HDR T. GARLAN, 2004)

1- La classification des sédiments : des mélanges complexes ramenés à quelques classes.

La classification des fonds est un problème ancien. Thoulet (1907) remarque ainsi : « En résumé, rien de moins précis que la classification ordinaire des fonds ; elle ne satisfait ni le savant ni le marin. » Cette phrase vient pourtant après une description des classes sédimentaires très semblable à celle utilisée près d'un siècle plus tard. Pour cet auteur, « *une classification des fonds marins doit répondre aux conditions suivantes :*

- a) *Se baser sur des caractères tellement précis, indiscutables et si nettement limités, que plusieurs opérateurs examinant le même échantillon soient assurés de toujours lui donner le même nom.*
- b) *Ne présenter aucun caractère vague, ou dont les limites soient susceptibles de dépendre d'une appréciation personnelle ; ne s'appliquer à aucune localité spéciale, et être complètement indépendante du gisement particulier de l'échantillon ; ne s'appuyer sur aucun caractère biologique, comme la présence de tel ou tel animal ou débris d'animal, ce qui ramènerait à la dépendance de conditions géographiques.*

Pour répondre à ces conditions, une classification ne peut être que mécanique et minéralogique. »

Il est étonnant que ces préceptes, toujours aussi pertinents, semblent avoir été en partie oubliés. Leur simple application suffirait pour n'avoir qu'une seule classification quels que soient la zone d'étude et les moyens mis en œuvre pour l'explorer. Les deux conditions ne sont, par exemple, pas respectées avec les méthodes d'imagerie acoustique ; des essais d'analyse d'images sonar latéral, menés au Shom, ont en effet montré l'importance de l'expertise et des écarts entre les interprétations de différentes personnes.

Si la sédimentologie était une science exacte, il serait possible de rattacher toute donnée à une classification de référence. Plus on observe les méthodes et usages appliqués de par le monde et plus on voit la distance qu'il reste à parcourir pour que des références communes soient atteintes.

Après avoir développé une cartothèque contenant plusieurs centaines de cartes sédimentologiques, nous avons étudié les différentes classifications utilisées et recherché pour chacune d'entre elles son intérêt. Il apparaît que les différences observées (d'un pays à l'autre, d'un laboratoire à l'autre, voire de différentes cartes issues d'un même laboratoire) proviennent, dans la grande majorité des cas, de différences d'objectifs. Les autres différences sont issues du système de mesure utilisé, de la latitude (particularités polaires et tropicales) et de la profondeur (classifications du domaine terrestre, des petits fonds et du domaine océanique). La présente synthèse est le premier pas nécessaire pour atteindre une vision générale de la complexité des fonds et des difficultés rencontrées pour les représenter.

1.1 - Granulométrie

Des particules sédimentaires de toutes tailles existent dans le domaine marin, des blocs hectométriques aux particules micrométriques. La multiplicité des modes de déplacement et des facteurs hydrodynamiques favorise l'hétérogénéité des sédiments. Le nom d'un sédiment peut théoriquement comprendre toutes les phases granulométriques, de l'argile au bloc. Les classifications ont été établies à partir de systèmes de mesure réducteurs (tamisage, pipette) en termes de précision et de facilité d'analyse, sur des prélèvements parfois mélangés (verticalement : bennes, ou dans les deux dimensions : drague). Avec la granulométrie laser, il

est possible de décrire plus aisément et profondément la complexité des sédiments. Cette technique, apparue dans les années 1980, permet d'analyser en quelques minutes des sédiments contenant des particules de 2 mm à quelques micromètres. Comme le rappellent Konert et al. (1997), des facteurs techniques interviennent sur les classifications par le biais de la granulométrie. Les méthodes de travail en laboratoire ont de ce fait évolué permettant d'obtenir très rapidement tous les paramètres descriptifs d'un sédiment, sans que les classifications aient été pour autant améliorées. Avec l'acquisition et la mise en œuvre de deux microgranulomètres laser, dont un est installé dans le laboratoire Shom-IFREMER d'analyse d'échantillons marins, nous avons pu améliorer les temps de mesure et la qualité des données granulométriques. Un logiciel de post traitement permet de plus de transférer ces données numériques, et les paramètres qui en découlent, à la Base de Données Sédimentologiques du Shom.

Rivain (1983) utilise dix des classes de la classification de Larssonneur (1977), avec une séparation très fine (vases, sablons fins, sablons, sables fins, sables moyens, sables grossiers, petits graviers, graviers moyens, gros graviers, coquilles entières) permettant de montrer l'importance des relations entre les sédiments et la dynamique des organismes. Une telle classification ne peut être atteinte à partir des systèmes acoustiques. Un maillage important de prélèvements est nécessaire, et devrait être affiné si possible à l'aide d'un système de classification semi-automatique des fonds. Ainsi la granulométrie effectuée de façon très précise, sur un réseau suffisamment dense de prélèvements, offre la caractérisation la plus précise des fonds marins, mais c'est de loin la plus coûteuse et encore faut-il que la classification utilisée soit assez fine pour traduire la complexité de la distribution sédimentaire.

1.2 - Constituants d'un sédiment

Définir un sédiment comme un sable ne constitue qu'une première indication, car ses composants et propriétés peuvent être hautement variables. Si il est composé de grains de quartz, de micas, de débris de coquilles ou de spicules d'éponges, il a nécessairement des propriétés différentes selon le ou les domaines d'application considérés. Les diverses particules sableuses n'ont en effet pas toutes les mêmes propriétés de remise en suspension, ni les mêmes propriétés acoustiques. De plus, un sable peut être homogène, comme pour les dépôts éoliens de milieu désertique, ou très hétérogène comme c'est souvent le cas en domaine marin.

Les vases sont encore plus complexes à définir car l'œil ne suffit pas pour les différencier; elles comportent en proportion variables des argiles (<2 μm), des silts (63 à 2 μm), voire des particules grossières (sableuses, graveleuses ou coquillières). Les sédiments fins possèdent des propriétés acoustiques et géotechniques particulières qui sont très variables selon les phases impliquées. Les argiles ont en particulier la propriété d'échanger des ions, induisant des mécanismes d'absorption de la matière organique et des contaminants, et la capacité de former des agrégats organo-minéraux appelés floes (Lesueur, 2001).

Des blocs plurimétriques aux argiles micrométriques, il existe une suite continue de particules de toutes dimensions et formes. Dans les modèles, ces éléments doivent nécessairement influencer certains phénomènes comme la thixotropie et la cohésion.

Du fait de la continuité des dimensions des particules, les limites définies par les méthodes d'étude revêtent un caractère arbitraire. Wentworth (1922) a repris la classification d'Udden (1898), et défini les limites granulométriques en appliquant une progression logarithmique (-log2). D'autres, comme Bourcart (1941), ont tenté de caractériser les classes à partir des propriétés physiques des sédiments: cohésion des particules, pouvoir absorbant, indice de plasticité et mode de transport par les courants.

Parmi les dizaines de classifications existantes, hormis la limite supérieure des sables à 2 mm, qui paraît la seule valeur généralisée, on observe de grandes divergences de terminologie et de granulométrie. Par exemple la limite inférieure des sables peut varier de 0,05 à 0,2 mm. Ces différences peuvent être accentuées en fonction de la méthode choisie pour mesurer la taille des particules. Ainsi Hommeril (1964) signale que, lors de tamisages à l'aide de tamis à mailles carrées, il est nécessaire de multiplier la dimension des mailles par 1,3 pour obtenir la dimension réelle des grains, afin de prendre en compte les particules allongées pouvant passer en diagonale. Les limites de 0,5 mm et 0,625 mm correspondent à la prise en compte ou non de ce phénomène. En microgranulométrie laser cette erreur persiste, puisque le modèle de calcul du spectre granulaire part du postulat que toutes les particules sont sphériques.

La classification la plus citée dans la littérature est celle de Wentworth, mais il faut signaler que dans de nombreux cas, des adaptations ont été faites engendrant de légères différences avec le découpage original. Cette classification, idéale dans le cas de sédiments homogènes, devient difficilement utilisable lorsque le sédiment est hétérogène. Ainsi, un sédiment marin pris au hasard aux abords de Brest contient presque toujours 5 à 9 phases de la classification de Wentworth; il n'est pourtant pas possible de donner à ces sédiments des noms composés de toutes ces phases. Afin de pallier cet inconvénient, des méthodes de classification par le regroupement en trois phases, replacées dans des diagrammes triangulaires ont été élaborées et sont utilisées pour les études de biologie sédimentaire.

2 - Les différentes classifications des sédiments en cartographie sédimentaire

2.1 - Cartographie basée sur les prélèvements

La qualité des cartes sédimentaires réalisées à partir de prélèvements dépend avant tout de l'échantillonnage. Ce dernier varie selon les quatre facteurs suivants : l'intervalle entre prélèvements, le matériel utilisé (carottiers, bennes, ...) et sa mise en oeuvre, la méthode d'analyse (microgranulométrie laser, tamisage,...), et la classification adoptée. Tous ces facteurs varient selon le temps attribué à l'échantillonnage, selon le matériel disponible et selon les objectifs de l'étude. Le pas d'échantillonnage peut ainsi varier, d'une carte à l'autre, d'un facteur 100. La facture et la résolution des cartes réalisées à partir d'une campagne unique peuvent de ce fait être très variables.

Il existe donc une distorsion entre ce qui serait nécessaire (norme idéale) et ce qu'il est possible de réaliser. Une différence est également perceptible selon les différents laboratoires et pays. Depuis l'apparition des systèmes de télédétection acoustique, les prélèvements paraissent en première approche moins nécessaires, mais ils demeurent en fait primordiaux et doivent, pour une zone donnée, être réalisés en au moins deux exemplaires : sur chaque structure sédimentaire, et sur chaque zone homogène circonscrite par chacun des systèmes acoustiques. L'échantillonnage doit de plus être densifié dans les régions mal connues.

2.2 - Cartographie basée sur la réflectivité acoustique (sonar latéral et SMF)

L'analyse au sonar latéral constitue un réel progrès pour la cartographie des sédiments car il permet d'observer :

- des structures sédimentaires de petite taille ou dont le relief est insuffisant pour être détectés à l'aide des données bathymétriques ; c'est le cas des champs de mégarides, des pockmarks,...

- lorsque leur densité est suffisante, la répartition de certains faciès particuliers ayant une signature acoustique particulière tels que les bancs de crépidules (Blanchard et Ehrhold, 1999 ; Ehrhold, 2000), ou les herbiers de posidonie (Paillard et al, 1993),
- la limite des affleurements rocheux, comme les dômes de sel, et cela d'autant plus que la roche est rugueuse et en relief, et que les blocs épars pluridécimétriques ne sont détectables qu'avec ce système ;
- les traits de chalutage, les traces d'ancres, les câbles, pipe-lines, épaves,...

La cartographie des sédiments paraît facile à réaliser avec les images sonar latéral qui paraissent aussi explicites que des photographies du fond. Pourtant, lors de la réalisation de cartes G, des écarts entre ce que semblaient montrer les données sonar latéral et la vérité terrain ont été rencontrés (Auffret et al, 1995 ; Enet, 1999 ; Mallet, 1998). Ainsi nous avons observé:

- que des mégarides observées sur un profil ne l'étaient pas sur les profils perpendiculaires,
- que des taches noires de l'estuaire de la Vilaine sur un fond gris homogène, semblant montrer des sédiments grossiers ou des fonds rocheux dans un environnement sédimentaire homogène, étaient en fait des vases indurées au sein de vases molles (analyse en plongée),
- qu'aux abords de l'estuaire de la Gironde, des déformations du signal acoustique par réflexion sur la surface pouvaient mimer des champs de mégarides.

Les exemples d'écarts entre la nature réelle des sédiments et les images sonar latéral sont plus fréquents qu'il n'y paraît mais, pour les mettre en évidence, il est nécessaire de confronter ces images à toutes les autres données à la disposition du sédimentologue. Il est ainsi parfois observé, pour une zone homogène sur les données d'imagerie, plusieurs types de sédiments très différents. A l'opposé nous avons reconnu des limites très nettes sur les sonogrammes qui ne correspondaient en réalité qu'à une légère variation granulométrique (passage de sables moyens à des sables grossiers au sud du Raz de Sein, passage de sables fins à des sables fins comportant des coquilles de 2 à 3mm aux abords de Trafalgar, ...).

Des mosaïques ont été publiées dès l'obtention d'images de qualité suffisante ; puis l'édition de telles données, de premier niveau, a été interrompue car ces mosaïques dépourvues d'informations complémentaires s'est avérée peu utilisable pour un non initié. La réalisation de cartes sédimentaires à partir de telles données d'imagerie demeure du reste assez peu développée au niveau mondial. La majeure partie des cartes en notre possession sont les publications de l'IFREMER (Augris et al, 1990, 1992, 1996, 1999, 2000, 2003 ; Paillard et al, 1993), et du BRGM (Guennoc et al, 2002b), les autres cartes proviennent du Canada (cf 3.2.1.4), de Nouvelle-Zélande (Lewis et al, 1998) et du Japon (Ikehara et al.1988, carte 7, annexe 3), ou ont été réalisées dans le cadre du projet Resecused (MAST 1) sur les relations entre la nature des sédiments et leur mobilité (De Moor et al, 1993). Lewis et al (1998) appellent ces cartes des cartes de texture ; ils signalent que la séparation des sables fins et des vases reportée sur leur carte a été établie à partir des prélèvements ; par ailleurs la délimitation des sables correspond à l'observation de mégarides. Ainsi ces documents reposent le plus souvent sur des informations complémentaires telles que la bathymétrie et les prélèvements, ce qui montre bien que la classification des fonds à partir des seules données d'imagerie n'est pas satisfaisante et que la classification par traitement automatique d'images ne peut permettre l'obtention de cartes sédimentaires. Dans tous les cas, les cartes sédimentologiques obtenues ne sont pas issues du seul système de mesure et ont nécessité l'apport des prélèvements pour calibrer les observations effectuées sur les images. Il apparaît ainsi que les systèmes d'imagerie sonar latéral et SMF ne sont pas réellement des outils adaptés pour la cartographie des sédiments, mais plutôt des

systèmes permettant de caractériser la répartition des structures sédimentaires et les processus sédimentaires. Ces systèmes sont ainsi insuffisants pour la cartographie des sédiments mais sont, par contre, indispensables pour la réalisation de modèles sédimentaires régionaux.

2.3 - Cartographie basée sur les données satellitaires

Du fait de la mauvaise pénétration dans l'eau des ondes lumineuses des satellites travaillant dans le visible et de l'expression médiocre de la nature des fonds par l'imagerie radar, les données satellitaires ne peuvent servir qu'à la cartographie de l'estran. Puisque ce n'est pas le corps de notre sujet, nous n'entrerons pas dans le détail. Néanmoins, les résultats obtenus par ces méthodes sont intéressants car très comparables à ce que fournissent les systèmes acoustiques dans le domaine marin. Par exemple, Bartholdy et Folving (1986) montrent que, à l'exception des limites sédimentaires très tranchées comme par exemple des sables côtoyant des argiles, les paramètres granulométriques n'ont pas de relation directe avec les signatures spectrales obtenues avec le satellite Landsat. En fait les images satellitaires permettent, selon ces auteurs, la détection des :

- zones turbides,
- zones à forte porosité qui conservent un caractère humide lorsque la mer se retire,
- fonds très réfléchissants,
- zones rocheuses, algaires ou coralliennes.

Bartholdy et Folving (1986) observent tout de même une distinction des sables et sédiments envasés, mais dans les conditions de leur étude cette limite se trouve au niveau du taux de vase de 4%. Ils ne différencient donc pas les différents sables et les sédiments envasés, mais uniquement les sables qui contiennent moins de 4% de vase et ceux qui en contiennent plus. D'autres auteurs ont fait des observations similaires à partir de données d'imagerie SPOT.

Ainsi comme l'imagerie sonar latéral, les données satellitaires offrent la possibilité de définir des secteurs homogènes, jusqu'à 20 classes spectrales dans certaines études de l'estran, mais celles-ci ne correspondent pas toujours à des différences dans la nature des sédiments.

Les cartes ne reposant que sur l'analyse de prélèvements sont reconnues par la forme des surfaces délimitées qui sont le plus souvent ovoïdes. Ces cartes concernent les paramètres granulométriques mais aussi la répartition des nodules, ... A partir des prélèvements le nom du sédiment peut être établi afin de réaliser des cartes à classification descriptive, et on dispose en outre de paramètres granulométriques. Ces derniers sont très variés et ont fait l'objet de multiples synthèses. L'examen des travaux des années 60 et 70 montre que les résultats doivent toujours être pris avec précaution. Certains auteurs ont ainsi été systématiquement exclus les coquilles, d'autres ont effectué la granulométrie sur des sédiments décarbonatés, d'autres n'ont extrait que les coquilles très fraîches estimant qu'elles n'étaient pas contemporaines du reste des sédiments (Caline, 1981). Cette technique, qui a pu paraître pertinente pour certaines applications, est à proscrire car toutes les opérations qui consistent à modifier l'échantillon ont un impact sur la modélisation du fond. En 1970, Barousseau note l'utilisation croissante du mode, paramètre conduisant à une meilleure compréhension des systèmes sédimentaires et à la délimitation des zones de mélange, aux dépens de la médiane, du classement, de l'asymétrie, de l'index de Trask, ... Il estime ce paramètre plus rigoureux dans la description objective de la distribution granulométrique. La littérature scientifique regorge ainsi d'articles et de livres sur les avantages et inconvénients des divers paramètres issus des analyses granulométriques. Si la recherche d'une description toujours plus fine a été ainsi menée par les sédimentologues, les spécialistes des sciences connexes ont presque toujours pris en compte le seul grain moyen. L'existence de

sédiments bimodaux montre que le recours à ce paramètre peut être justifié pour les sédiments pélagiques des grands fonds mais il devient inutilisable dès que les sédiments sont hétérogènes, ce qui est très fréquent en milieu plus côtier. En résumé, comme le signale Fütterer (2000), il semble ne pas exister de classification combinant toutes les caractéristiques pertinentes d'un sédiment.

2.3 - Cartographie définie pour la géotechnique

Les géotechniciens utilisent habituellement les paramètres issus des analyses granulométriques et n'ont donc pas de classification préférentielle des sédiments. Ainsi dans la définition des matériaux concernés par le dragage d'entretien, Boutin (2000) décrit quelques classifications pouvant être utilisées, dont celle des cartes G. Nous disposons au Shom, comme cartes géotechniques des fonds marins, des cartes réalisées pour les besoins des défenses allemandes et américaines dans les années 1940. Durant la seconde guerre mondiale, les côtes africaines et les mers comprises de la Mer de la Manche à la Russie ont donné lieu à l'édition de plusieurs atlas de sédimentologie destinés à la marine allemande et comportant plus d'une centaine de cartes sédimentologiques à 1/150 000. Chaque coupure géographique est représentée dans ces atlas par deux cartes. La première, essentiellement issue de la compilation des données des cartes marines, décrit la nature des fonds selon une classification simple (sables fins, sables grossiers et graviers, vases, pierres, fonds rocheux). La seconde est une carte d'ordre géotechnique comportant deux paramètres grossièrement classés :

- fonds : très durs (rocheux), durs (sable et graviers), mous (vases sableuses),
- affleurements rocheux : affleurements rocheux connus, pointements rocheux, roche probable, blocs rocheux isolés.

La carte japonaise d'Okinawa Gunto au 1/200 000, publiée par l'US Hydrographic Office pour l'US Navy en 1950, ne comporte que trois classes de sédiments (sand, sand & mud, mud) et trois types de fonds durs (rocks, stony hard bottom et coral). Il faut remarquer que, comme pour les atlas allemands de la seconde guerre, cette carte comporte des informations destinées aux opérations militaires avec une description associée à chaque type de fond ; par exemple la légende pour les roches est : «rock, rough, broken bottom, includes bedrock outcropsand areas covered by boulders», et pour les vases : "mud soft, smooth bottom".

2.4 - Cartographie multicapteurs

Duglas et Kamionko (1988) ont tenté de mixer les données de la géophysique et des analyses de prélèvements afin d'améliorer la cartographie des sédiments superficiels. Contrairement à Pace (1987), ils observent l'incapacité du sonar latéral à distinguer les différents types de sédiments mais remarquent que ce système est le seul à permettre de séparer les sédiments grossiers, les structures sableuses et les microreliefs. Après avoir réalisé un levé avec une multitude de capteurs, ils créent un tableau définissant pour chaque sédiment la susceptibilité magnétique, la radioactivité naturelle, la porosité, la résistivité, la réflectivité, les classes issues de l'imagerie sonar latéral et la morphologie. Cette table d'équivalence étant établie, il suffit ensuite de prendre les séries de paramètres le long des profils pour obtenir une cartographie automatique des fonds. La qualité des résultats obtenus montre que le croisement des données est une bonne solution ; mais la technique exige des levés d'une telle complexité que ces méthodes ne se sont pas généralisées.

2.5 - Cartographie définie pour la biologie : cartes bio-sédimentaires

Sans entrer dans l'analyse de toutes les cartes d'habitat, prenons trois exemples marqués par l'évolution des techniques. Les cartes biosédimentaires du Golfe de Gascogne (Chassé et Glémarec, 1976) décrivent la distribution des espèces animales, et leurs affinités entre elles et vis-à-vis des sédiments, et les caractéristiques sédimentaires écologiquement pertinentes. Leur classification adaptée aux études de biologie et à la pêche comporte les classes suivantes : SHV (sables envasés hétérogènes), GH (graviers vaseux hétérogènes), GV/GB (graviers envasés), GP/GB (graviers propres), SG/SGB (sables grossiers), D (sables dunaires), SF/SFB (sables fins), FV (sables fins envasés), VS (vases sableuses), VV (vases). Il est nécessaire en biologie marine de différencier les sables (fins, grossiers, dunaires, fins, envasés, ...), ce qui n'est pas possible avec les classifications basées sur des diagrammes triangulaires. Les cartes de l'Herbier de posidonie et des fonds marins de la grande rade de Toulon (Paillard et al, 1993), au 1/10 000, repose sur 8 classes concernant les sédiments, les organismes ou les deux : affleurements rocheux, biocénoses infralittorales photophiles de substrat dur, herbier à *Posidonia oceanica*, blocs et galets, sédiments grossiers envasés (galets, graviers, sable grossier), sable moyen à fin envasé, biocénoses de sables fins de haut niveau, biocénose des sables fins bien calibrés (Paillard et al, 1993). On y distingue trois classes de sables fins alors que tous les autres sédiments, des sables grossiers aux blocs, sont regroupés dans deux classes mal différenciées. La présente classification est fonction du besoin (organismes plus développés dans les sédiments fins), de la région et du mode d'acquisition (sonar latéral). L'utilisation d'une telle carte pour d'autres applications comme la modélisation acoustique est risquée, voire impossible pour certaines fréquences. L'exemple de la carte bio-sédimentaire de Puerto Rico (NOAA, 2001) ne présente la nature des fonds que lorsqu'il n'existe aucun autre élément ; sont reportés deux types de sédiments (vase, sable), mais aussi et surtout différents types de fonds rocheux, les algues et les coraux; ces éléments sont reportés sur la carte dès qu'il y a plus de 10% de végétaux sur le fond.

Toutes ces cartes mixant la biologie et la géologie ne sont pas des cartes sédimentaires sensu stricto, mais elles comportent des éléments essentiels pour la réalisation de modèles réellement exhaustifs des fonds marins.

3 - La cartographie des sédiments

Un début de normalisation de la cartographie des sédiments marins nécessiterait d'effectuer une séparation des cartes selon les méthodes d'acquisition et d'analyse utilisées. Nous allons voir en quoi les Bases de Données peuvent, comme le signale Hazelton (1997), apporter un élément de réponse à ce problème, irrésolu depuis les travaux de Thoulet (1907). Il est nécessaire de différencier le modèle sédimentaire de la carte. L'usage des techniques numériques permet de dépasser les limites, présentées dans les chapitres précédents, et liées à l'échelle de représentation, à la classification et au système de mesure. Il ne s'agit donc pas de réaliser une carte mais bien de fonder un modèle sédimentaire tout d'abord en trois dimensions, intégrant la nature des sédiments au sens large (hétérogénéité, classement, asymétrie, particules les plus fines, les plus grossières), les structures sédimentaires existantes (rides de toutes dimensions, pockmarks,...), et les particularités physiques ou biologiques. Puis, en intégrant le temps et l'environnement (profondeur, proximité de la côte ou d'un fleuve, phénomènes météorologiques

locaux, conditions moyennes et extrêmes de vent, de courants de marée,...) on s'efforce d'atteindre le modèle 4D.

Les cartes sédimentologiques publiées jusqu'en 2000, représentaient les constituants du fond marin (granularité, nature, propriétés), de multiples objets (fractures, dunes,...) ou des phénomènes (éventail sédimentaire, volcans de boue...). Les cartes de nouvelle génération doivent constituer une représentation logique, cohérente et compréhensible de Bases de Données numériques d'enregistrements datés et géoréférencés.

Comme les données disponibles vont des descriptions visuelles effectuées depuis près de 200 ans jusqu'aux analyses obtenues avec des microgranulomètres laser ou des bancs XRF, en passant par l'imagerie et d'autres systèmes acoustiques, il est nécessaire de disposer d'une base de donnée dédiée à la sédimentologie conçue selon les besoins et donc préparée à accueillir tous les paramètres nécessaires. Des évolutions étant possibles, il est également nécessaire de prévoir une structure permettant l'accueil de nouveaux paramètres.

Afin de pouvoir archiver les données sédimentologiques les plus anciennes et les données récentes systématiquement acquises lors des levés effectués par les navires hydrographiques, la base de données sédimentologiques du Shom (BDSS), créée en 1990, a subi une refonte complète neuf ans plus tard avec le développement de la BDSS1D. Les principaux objectifs de cette Base de Données sont de permettre la compilation des données sédimentologiques pour la cartographie des fonds, destinée à tous les usages et à la réalisation de modèles de dynamique sédimentaire et d'acoustique (**Garlan et Guyomard**, 1999). Les données intégrées dans cette base concernent, la nature des sédiments de surface, l'épaisseur des sédiments meubles, et la nature du socle rocheux. Si la nature du fond est le seul paramètre indispensable pour toutes les applications, c'est également le plus facile à appréhender. Les propriétés des couches sédimentaires superficielles et leur épaisseur sont, par contre, moins bien connues ou moins facilement intégrables sous forme numérique. Dès le milieu du XIX^{ème} siècle, des études sur la migration des bancs de sable et sur l'extension des sédiments avaient été réalisées par le Service Hydrographique de la Marine. Ces études et les cartes de natures de fond publiées à cette époque reposaient sur les dizaines de milliers de descriptions relevées annuellement, ainsi que sur diverses données hydrographiques. La BDSS1D fait en outre appel aux nombreuses autres bases de données du Shom, qu'il s'agisse de la bathymétrie, de la photogrammétrie, du trait de côte, ... Cette base a donc été conçue en fonction des objectifs, des bases de données sœurs et d'outils logiciels devant permettre la gestion et la réalisation de produits sur les couches sédimentaires superficielles, sans limitation géographique. La BDSS1D ne comprend que des données ponctuelles géoréférencées, regroupées en six familles :

- descriptions visuelles (plomb suiffé, photographies, descriptions de plongeurs,...) (Figure 70),
- prélèvements de surface analysés en laboratoire (bennes, dragues,...),
- logs sédimentaires (carottages, forages) (Figure 69),
- nature du substratum rocheux,
- épaisseur de sédiments,
- nature obtenue par système de classification acoustique (RoxAnn, QTC, ..).

Ces familles sont déconnectées des systèmes ayant permis de les acquérir. Le système d'acquisition ainsi que toutes les caractéristiques du levé sont regroupés dans une série exhaustive de métadonnées. Ces données issues d'une analyse en laboratoire ou d'une analyse

visuelle de données brutes sont de dites niveau 1. Chaque famille est caractérisée par les paramètres qu'elle contient. Ainsi, les descriptions visuelles ne contiennent que le nom du sédiment et des éléments annexes (algues, coquilles, coraux, ...), alors que les logs contiennent des paramètres ponctuels (nom du sédiment, grain moyen, asymétrie, % vase, %CaCO₃, densité,...), des paramètres zonaux (âge, niveaux de Heinrich, ...) et des paramètres continus (densité, couleur, ...).

Les prélèvements sont les seuls à fournir une information riche ; la BDSS1D comporte à leur sujet :

- les paramètres descriptifs des sédiments (taux de cailloutis, graviers, sables, sables fins, vases, carbonate de calcium; nom du sédiment selon plusieurs classifications),
- certaines propriétés physiques, mesurées ou calculées (densité, célérité, porosité)
- les paramètres nécessaires pour les modèles tels que ceux de Gao et Collins (cf §3.5) et Hamilton (cf §5) (Grain moyen, asymétrie, classement, médiane).

Une liste de paramètres complémentaires a été ajoutée récemment afin d'intégrer la rugosité obtenue par des analyses granulométriques, ainsi que les taux de silts et argiles nécessaires à la classification des sédiments océaniques. Si un point de carottage apporte énormément d'informations, le nombre de carottages et forages intégrés dans la base demeure faible. Par contre les données anciennes obtenues à l'aide d'un plomb suiffé se comptent par centaines de milliers et les systèmes de classification acoustique du Shom, fournissent quelques millions de données/an. Toutes ces données peuvent être confrontées, ce qui permet d'apprécier la cohérence entre les données anciennes et récentes ou entre les prélèvements et les données acoustiques.

En résumé nous développons et entretenons donc, depuis près de 30 ans, une base de données sédimentologiques. Cette structure d'accueil et de manipulation permet l'administration, le chargement, la consultation, les modifications, l'extraction et le calcul de paramètres sur des données sédimentologiques géoréférencées et des métadonnées associées.

La difficulté principale d'utilisation des photographies et des films du fond marin réside dans le traitement, la classification et la transcription des données sous forme exploitable. Pour pouvoir les utiliser et les confronter aux autres informations sédimentaires, il est nécessaire d'archiver les données extraites de ces images et de les replacer dans un référentiel géographique. Fox et al. (1988) ont établi une classification adaptée au site hydrothermal de la Ride de Juan de Fuca, où sont distingués :

- les types de fond rocheux : massif, strates, blocs épars...
- la couverture sédimentaire : caillouteuse, grossière, fine, hétérogène, homogène, ...
- la morphologie du fond : plate, en dôme, en micro-falaises, à fissures, en dépression, à dunes, à mégarides...
- la biologie : organismes présents, terriers, algues et herbiers, ...

L'intégration de telles données dans une base est pertinente car ces données fournissent une transition entre l'échelle particulière (micromètre au décimètre) obtenue par prélèvement à la benne, et l'échelle plurimétrique obtenue à l'aide des sonars latéraux et des systèmes de classification des fonds. Si les données de granularité sont intégrées dans la BDSS1D, les informations sur la morphologie du fond sont intégrées dans la BDSS2D sous forme de données surfaciques.

La Base de Données Sédimentologiques du Shom des données surfaciques (BDSS2D) contient des données de niveau 2. Elle comprend :

- les cartes de limites des surfaces et d'objets détectés sur les mosaïques d'imagerie acoustique ;
- les cartes issues de l'interprétation de données de sismique HR et THR, les cartes d'isopaques des sédiments meubles et d'écho-faciès;
- des synthèses sur les données de la granularité des fonds issues d'un ou plusieurs systèmes calibrés par des descriptions et analyses de sédiments (cartes des natures de fond),
- parfois les éléments chimiques caractéristiques, qui sont actuellement limités aux cartes d'isoteneur en carbonate de calcium ;
- la nature de la surface du socle rocheux.

Toutes ces cartes numériques sont introduites et validées dans la BDSS2D accompagnées de leurs métadonnées; de plus sont mentionnés l'échelle de la carte, la gamme d'échelle pour laquelle elle peut être utilisée, la date de la publication, le système géodésique et de projection utilisées, ...

Les cartes de "natures de fond" produites au cours des dernières années par le Shom sont le résultat de l'extraction des BDSS 1D et 2D, mais aussi de données extraites d'autres bases de données hydrographiques (trait de côte, épaves, sondes, isobathes, obstructions, amers, bouées). Toutes ces données spécialisées ainsi regroupées en base de données permettent de supprimer la partie "état des connaissances" que contenaient les anciennes cartes pour ne se consacrer qu'aux informations pertinentes pour les utilisateurs.

Un niveau supérieur de traitement consiste à homogénéiser les différentes cartes et à les intégrer dans un référentiel unique de classification. Des cartes de synthèses sont ainsi réalisées pour différentes gammes d'échelles permettant les représentations depuis les objets métriques jusqu'aux structures océaniques. Ces produits, de niveau 3, ont la particularité d'avoir chacune de leurs zones reliées à une carotte représentative. Si cette démarche est actuellement limitée aux secteurs sur lesquels nous réalisons des études, l'objectif est de progressivement développer cette application afin de constituer des produits en pseudo-3D. Le stade suivant sera de compléter cette approche par l'intégration des profils sismiques.

Une compétence approfondie est nécessaire à tous les niveaux de ces travaux : acquisition, traitement, intégration et validation dans les bases de données; c'est en effet la clef de la qualité pouvant être accordée aux produits finalisés et mis sur le marché. Il faut de plus rappeler que toutes les données sédimentologiques doivent être analysées dans un contexte environnemental complet (**Garlan**, 1993). C'est pourquoi il est nécessaire lors du passage du niveau 1 au niveau 2 et pour réaliser les cartes G par fusion de données de disposer de :

- **la géomorphologie** : modèles numériques de terrain, cartes bathymétriques précises (isobathes espacées de 2 mètres), restitutions photogrammétriques de l'estran et du domaine tidal,
- **l'hydrodynamique** : analyse des courants de marée, des courants résiduels, comparaison de levés bathymétriques, méthode de Gao et Collins.

La réintégration en base de données de cartes sédimentologiques, elles-mêmes issues de données et cartes de la même base, permet ainsi de disposer de données de niveau 3 directement au service des utilisateurs, mais également en vue des études sédimentologiques approfondies.

Pour intégrer la notion de temps, il est nécessaire de disposer de séries de données, s'étalant sur des périodes et avec des récurrences, compatibles avec les phénomènes à représenter. Ainsi, plusieurs campagnes de mesures peuvent être assimilées à une seule série dans les secteurs où le taux de sédimentation est très faible, comme c'est le cas en domaine océanique où il peut être inférieur à 1cm pour mille ans. Par contre, lorsqu'une dune se déplace de quelques hectomètres par an, les données doivent être acquises sur quelques jours et la base de données va permettre non plus de caractériser les fonds mais plutôt leur instabilité. Nous développons dans ce cadre un SIG Dunes contenant leurs paramètres représentatifs, similaire aux bases de données d'épaves et obstructions, afin d'intégrer cette quatrième dimension et ainsi de pouvoir peu à peu se passer des archives analogiques et de leur numérisation.

4 – Conclusion

Une carte sédimentaire avait pour rôle, jusqu'à il y a quelques années, de montrer les constituants du fond marin aux utilisateurs, mais aussi d'enregistrer l'état des connaissances à l'instant de la publication. Désormais, avec la présence des bases de données, les cartes doivent avoir pour objet essentiel de répondre aux besoins des utilisateurs, praticiens et scientifiques. Alors qu'une carte bathymétrique représente toujours la profondeur, une carte dite sédimentologique peut inclure des informations très variées : dimension des particules, composants chimiques, processus physiques, géomorphologie, géologie. Ces cartes ont des échelles variant de 1/5 000 à 1/30 000 000 et reposent sur des données très diverses en qualité et quantité.

Il existe différentes classifications permettant d'intégrer des données très variées et de fournir des produits adaptés à chacun des différents besoins. Le constat global montre l'absence de convergence vers une classification de référence. Nous observons, au contraire, des écarts de plus en plus grands entre deux extrêmes :

- les cartes basées exclusivement sur la granularité : diagrammes à deux ou trois entrées offrant une classification la plus précise possible des sédiments, mais délimitant mal l'extension de ces sédiments ;
- les cartes physiographiques reposant sur l'imagerie et la morphologie mettant bien en évidence les structures et les limites principales, mais caractérisant mal la nature des fonds.

Entre ces deux extrêmes, les cartes à classification descriptive, basées sur de multiples sources d'information, des prélèvements et un Modèle Numérique de Terrain, sont détachées du moyen d'acquisition. Elles sont parfois complétées par des cartes annexes et deviennent alors adaptées à des besoins divers. Toutes ces cartes analogiques ne sont pas directement utilisables pour la modélisation hydrodynamique ou géoacoustique, et sont le plus souvent transcrites en valeurs de grain moyen.

Qu'il s'agisse des classifications par diagrammes triangulaires ou tableaux à deux entrées, le principal intérêt est de pouvoir réaliser la cartographie par calcul non supervisé des paramètres directement extraits des bases de données. Le tracé automatique des limites de zones homogènes par traitement géostatistique est alors possible. Pour avoir une meilleure qualité, ces cartes devraient reposer sur un maillage de prélèvements très dense, afin d'appréhender toute la variabilité des fonds. En l'absence d'un tel maillage le tracé automatique à partir de données de prélèvement n'est pas satisfaisant car il fait abstraction de tous les éléments pris en compte par l'expert lorsqu'il réalise une carte des sédiments : la morphologie, la présence d'affleurements rocheux et de structures sédimentaires, l'existence de processus sédimentaires particuliers, ...