HAL
open science

IMPACTS MORPHO-SÉDIMENTAIRES DE L'EXTRACTION DE GRANULATS MARINS - APPLICATION AU BASSIN ORIENTAL DE LA MANCHE -

P.A. Duclos

To cite this version:

P.A. Duclos. IMPACTS MORPHO-SÉDIMENTAIRES DE L'EXTRACTION DE GRANULATS MARINS - APPLICATION AU BASSIN ORIENTAL DE LA MANCHE -. Interfaces continentales, environnement. Université de Rouen, 2012. Français. NNT : . tel-00795475

HAL Id: tel-00795475

https://theses.hal.science/tel-00795475

Submitted on 1 Mar 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UFR des Sciences et Techniques
Ecole Doctorale Normande Biologie intégrative, Santé, Environnement (EdNBISE)

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE ROUEN

présentée par

Pierre-Arnaud DUCLOS

Discipline : Géologie
Spécialité : Sédimentologie marine

IMPACTS MORPHO-SÉDIMENTAIRES DE L'EXTRACTION DE GRANULATS MARINS

- APPLICATION AU BASSIN ORIENTAL DE LA MANCHE -

Soutenue le 9 juillet 2012

à l'Université de Rouen

Composition du jury :

DURRIEU DE MADRON Xavier	D.R. CNRS, Université de Perpignan	Rapporteur
TRENTESAUX Alain	Professeur, Université de Lille 1	Rapporteur
VAN LANCKER Vera	Docteur, Chercheur au MUMM (Bruxelles)	Examinatrice
DAUVIN Jean-Claude	Professeur, Université de Caen	Examinateur
DELSINNE Nicolas	Docteur, Resp. Dévt. Granulats Marins, CEMEX	Invité
LAFITE Robert	Professeur, Université de Rouen	Directeur
LE BOT Sophie	Maître de Conférences, Université de Rouen	Co-directrice
RIVOALEN Elie	Professeur, Université du Havre	Co-directeur

UFR des Sciences et Techniques
Ecole Doctorale Normande Biologie intégrative, Santé, Environnement (EdNBISE)

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE ROUEN

présentée par

Pierre-Arnaud DUCLOS

Discipline : Géologie
Spécialité : Sédimentologie marine

IMPACTS MORPHO-SÉDIMENTAIRES DE L'EXTRACTION DE GRANULATS MARINS

- APPLICATION AU BASSIN ORIENTAL DE LA MANCHE -

Soutenue le 9 juillet 2012

à l'Université de Rouen

Composition du jury :

DURRIEU DE MADRON Xavier	D.R. CNRS, Université de Perpignan	Rapporteur
TRENTESAUX Alain	Professeur, Université de Lille 1	Rapporteur
VAN LANCKER Vera	Docteur, Chercheur au MUMM (Bruxelles)	Examinatrice
DAUVIN Jean-Claude	Professeur, Université de Caen	Examinateur
DELSINNE Nicolas	Docteur, Resp. Dévt. Granulats Marins, CEMEX	Invité
LAFITE Robert	Professeur, Université de Rouen	Directeur
LE BOT Sophie	Maître de Conférences, Université de Rouen	Co-directrice
RIVOALEN Elie	Professeur, Université du Havre	Co-directeur

Remerciements

Ha !! Vous voilà. Il ne manquait plus que vous pour embarquer. Comment ça ! Vous voudriez débuter par les remerciements sans prendre le temps de découvrir le pont, la passerelle, le labo humide, le labo sec, … ni même le carré !! … mais soit, je vous laisse le choix. Il est important de choyer le curieux qui débute par ces remerciements et le courageux lecteur qui poursuivra son voyage scientifique « par crêtes et par dépressions », accompagné de réflexions morphologiques, d'inspirations hydrographiques ou encore de pensées sédimentologiques … Bref, trêve d'égarement naturaliste, enfilez votre ciré jaune, votre gilet de sauvetage, … place aux Géosciences Marines !!

Mais avant de rentrer dans le vif du sujet, je tiens à remercier les personnes et les organismes qui m'ont accompagné durant ces quatre années de recherche, pleines d'enseignements, d'enrichissements, de découvertes… Toutes ces personnes sont nombreuses et je tiens dès à présent à m'excuser si toutefois j'en oublie certaines.

Tout d'abord, je souhaite remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail : Vera Van Lancker, docteur et chercheur au MUMM, Xavier Durrieu de Madron, directeur de recherche au CNRS CEFREM, Alain Trentesaux, professeur à l'Université de Lille 1, et Jean-Claude Dauvin, professeur à l'Université de Caen et président de ce jury.

Ensuite, je remercie les directeurs de laboratoire qui m'ont accueilli au sein de leur structure. Patrick Lesueur et Robert Lafite qui se sont succédés dans la direction du l'UMR CNRS 6143 M2C et Innocent Mutabazi, directeur de l'UMR CNRS 6294 LOMC.

Sans financement la recherche n'aurait pas lieu, ainsi je remercie grandement l'ANRT, la société LGE et son directeur Jean-François Cantu qui ont établi la convention CIFRE, ossature de ce doctorat. Une mention spéciale pour Nicolas Delsinne de la société CEMEX, « tuteur industriel », aîné scientifique qui a grandement participé à la construction et à la réussite de ce projet.

Pour m'avoir permis d'alimenter mes dernières réflexions, je tiens à remercier l'Université de Rouen et le département de géologie.

Je pense également à la fédration SCALE qui regroupe les laboratoires de Haute-Normandie dont les thématiques s'inscrivent dans l'étude des environnements naturels.

Je tiens à remercier particulièrement le GIS SIEGMA et l'ensemble de ces partenaires qui ont toujours su m'apporter les éléments nécessaires à la réussite de ce doctorat : Michel Desprez, expert benthologue, pilier et secrétaire général du GIS toujours présent pour redonner le sourire au « p'tit jeune » ; Alain Delorme et Alexis Maheut qui se sont succédés à la présidence, Robert Lafite à la direction, Jean-Claude Dauvin, Sophie Le Bot, Elie Rivoalen, Gwenola de Roton et toute l'équipe de la Cellule de Suivi du Littoral Normand, Jean-Paul Delpech et tous les scientifiques associés de l'IFREMER, les comités de pêches de Haute et Basse-Normandie, la préfecture de Haute-Normandie ainsi que l'ESTRAN. Partenaires du GIS, je tiens également à remercier les exploitants regroupés dans le GIE GMN (LGE, CEMEX, GSM Italcementi et Eurovia) pour le site de Baie de Seine et les Carrières et Ballastières de Normandie (Eurovia) pour le site de Dieppe qui ont fait preuve d'une grande réactivité dans la transmission d'information et qui m'ont permis d'intervenir sur les dragues. Je pense particulièrement à Laetitia Paporé, Nicolas Delsinne, Jean-François Cantu, David Claveleau, Alain Delorme, Philippe Desvignes et Amael Macron. Je remercie également l'ensemble de l'UNICEM et de l'UNPG.

Ils pensaient que je les avais oubliés … Comment pourrais-je ? Un immense de chez immense merci que même toi lecteur tu ne peux pas imaginer … à mes directeurs de thèse. Primero ! Sophie Le Bot, maître de conférence au M2C, amatrice de langue de bœuf même avec avis de grand frais dont la rigueur scientifique a su me porter (venga Sophia hay nuestro avión). Elie Rivoalen m'a apporté son regard numéricien. The last but not the LISST et justement tout le contraire, Robert Lafite, un chef qu'on aimerait avoir toute sa vie même si on est soit même chef… merci infiniment pour tout très cher Directeur.

Next, I do not forget the EdNBise, l'Ecole doctorale avec Hubert Vaudry et Patrice Lerouge qui se sont succédés à sa direction.

Que serait cette thèse sans un labo M2C avec une telle richesse humaine, tant de confrères et amis sur qui on peut compter. Tout d'abord mes potos thésards venus m'aider à bord malgré le mauvais temps, ayant partagé nos compétences et/ou philosophé sur la vie rouennaise : Yann, mon collègue de bureau marinologue et non des moindres, Sera, sarde au courage et au cœur énorme, la Baste, compagnon de temps de découverte et toujours partant, La Frite, une crème de sacré bonhomme mais aussi Olivier, aîné toujours disponible pour partager ses compétences en bon humeur et bien sur en calcul de flux … mais aussi tous les autres : Jojo, Issa, Rolf, Marc, Anne, Smaïl, Amer, Johanna, Guillaume, Julie, Maxence, Bouba, Sanae, Stephane, petit Abdel et qui encore les microbio : Kenny, Maïté et Medhy.

Je remercie bien sûr tous les stagiaires que j'ai encadrés ou suivis et dont l'investissement m'a beaucoup apporté : Clément, Laetitia, Rémy, Céline, Romain, Valentin et Sébastien.

Ensuite, bien évidemment tous les titulaires du M2C Rouen : tonton MichMich pour … quoi … ben un peu pour tout : ton accueil, ton investissement et ton attention envers tes Titis et ton Padoune, Maria pour toutes les bonnes choses que tu apportes aux thésards, tata Valérie pour ta qualité de script en « lettre de dernière minute » et ton sourire, Julien pour m'avoir pété les oreilles avec ton pinger qui ne fonctionne que dans un seau☺, Matthieu, grand empereur « Stat »arkus, mais aussi Cécile, Julie G., Irène, Martine, Nicolas, David M., Abder et Jean-Paul Dupont doyen de l'UFR des Sciences de Rouen. Je pense aussi aux ATER de passage comme Claire Marion et son aide précieuse.

Je n'allais pas oublier la Basse-Normandie avec toute l'équipe d'enseignants chercheurs, ingénieurs, techniciens et thésards du M2C Caen. Je pense particulièrement à Carole Brunaud, Patrick Lesueur, Bernadette Tessier et Agnès Baltzer.

Un merci de haut vol pour Antoine Cuvilliez (LOMC) et son talent de photographe aérien.

Je ne peux bien sûr pas oublier les équipes à terre et en mer de l'INSU/CIRMAT/GENAVIR, tout ces marins et capitaines pleinement investis et pleins d'attention envers nous, thésards, chefs de mission junior.

Je remercie également les équipages des DAM (SandHarrier, Charlemagne et Scelveringhe) et les équipages des chalutiers Richard Bruno et Flipper qui ont fortement contribué à la réussite des suivis. Un petit pour Patrice et tous les autres plongeurs.

Je souhaite également saluer Pol Guennoc et Isabelle Thinon du BRGM mais aussi Claude Augris, Laure Simplet, Axel Ehrhold, Romaric Verney et Pierre Le Hir de l'Ifremer qui m'ont aidé au cours de mon stage de fin d'étude puis pendant ma thèse.

Je ne peux oublier ma famille Igalo-LaSalienne et ses enseignants qui m'ont permis d'affûter mes armes de Géologue : Hervé Leyrit, Philippe Ott d'Estevou, Pascal Barrier, Christian Chomat, Dominique Lemaire, Bassam Barakat, Olivier Bain et tous les autres … sans oublier les étudiants lassaliens venus m'aider à bord.

Egalement un grand merci à tous mes amis Géologues IGALiens, EGIDiens et autres STU en tout genre. Et tous les autres, bien moins géologues, je vous remercie pour vos encouragements, votre présence et d'avoir fait comme si vous m'écoutiez quand je vous parlais de choses bien turbides.

Haa… la famille ! Quelle est importante ! Mais on aurait tendance à penser qu'un thésard l'oublie… à tort ! Encore merci à vous tous et veuillez encore m'excuser pour ma distance notamment en fin de thèse. Mille mercis à ma mère au minimum pour sa réactivité dans les dernières lectures mais surtout pour ses encouragements et son soutien … et les soeurettes pleines d'attentions et de bienveillance … et puis ma belle-famille, toujours présente.

Florence à qui le mérite revient, accepter de faire ce chemin commun avec un thésard … quelle patience ! Ingénieur, Docteur et surtout … Epoux et Papa … aucun remerciement ne sera suffisant !!

Enfin Mon Père, Docteur Jean-Claude Duclos, qui m'a apporté bien plus que les moyens d'arriver au bout … à lui.

Tout le monde est à bord ! alors … larguons les amarres …

« Face à la roche, le ruisseau l'emporte toujours,
non pas par la force mais par la persévérance. »

H. Jackson Brown

Table des matières

INTRODUCTION **1**

CHAPITRE I CONTEXTE GENERAL **3**

1. L'EXTRACTION DES GRANULATS MARINS **5**
1.1. LA RESSOURCE 5
1.1.1. L'industrie des granulats 5
1.1.2. Définition et usage 7
1.1.3. Ressource 8
1.1.4. Production 10
1.2. TECHNIQUES D'EXTRACTION DES GRANULATS MARINS 12
1.2.1. Typologie des dragues 12
1.2.2. Cycle d'extraction 13
1.2.3. Typologie des têtes d'élindes 14
1.2.4. Méthode de chargement et criblage 14
1.2.5. Dimensions des DAM et volumes de chargement 15
1.2.6. Surverse 15
1.2.7. Cas particulier : les « mega-dredger » 18
1.3. IMPACTS PHYSIQUES 18
1.3.1. Le panache turbide 21
1.3.2. Impacts sur le fond 26
2. ZONES D'ETUDE **32**
2.1. LA BASSIN ORIENTAL DE LA MANCHE 32
2.1.1. Géographie 32
2.1.2. Géomorphologie 33
2.1.3. Hydrodynamisme 34
2.1.4. La houle 35
2.1.5. Caractéristiques hydrologiques 35
2.1.6. Sédiments, corps sédimentaires et peuplements benthiques 37
2.1.7. L'extraction de granulats marins 39
2.2. LE SITE DE BAIE DE SEINE 40
2.2.1. Localisation géographique 40
2.2.2. Contexte géomorphologique et caractéristiques géologiques du gisement 41
2.2.3. Contexte sédimentaire 42
2.2.4. Contexte hydrologique 43
2.2.5. Caractéristique de l'extraction 43
2.3. LE SITE DE DIEPPE 45
2.3.1. Localisation géographique 45
2.3.2. Contexte géomorphologique et caractéristiques géologiques du gisement 46
2.3.3. Contexte sédimentaire 46
2.3.4. Contexte hydrologique 47
2.3.5. Les caractéristiques de l'extraction 48
3. STRATEGIE D'ETUDE **49**
3.1. CARACTERISATION DE LA DYNAMIQUE DES PARTICULES EN SUSPENSION 49
3.1.1. Stratégie 49
3.1.2. Outils 51
3.1.3. Données 55
3.1.4. Post-traitement en laboratoire 57
3.2. CARACTERISATION MORPHO-SEDIMENTAIRE DES FONDS 60
3.2.1. Stratégie 60
3.2.2. Outils 61
3.2.3. Données 66
3.2.4. Post-traitements en laboratoire 69

3.3. ANALYSE DES DONNEES 72
3.3.1. Interpolation et représentation 3D 72
3.3.2. Analyse sous SIG 73
3.3.3. Statistiques 73
3.4. EXPRESSION DE L'INTENSITE D'EXTRACTION 74

CHAPITRE II PANACHE TURBIDE 77

1. INTRODUCTION 79
2. SITE DE BAIE DE SEINE 79
2.1. CARACTERISTIQUES HYRDOLOGIQUES 79
2.1.1. Hydrodynamisme 79
2.1.2. La houle 82
2.1.3. Caractéristiques hydrologiques 84
2.2. LE PANACHE TURBIDE 95
2.2.1. Caractérisation de la source 95
2.2.2. Evolution des MES en surface 102
2.2.3. Géométrie de surface et mobilité 103
2.2.4. Coupe transversale caractéristique 106
2.2.5. Evolution temporelle des sections transversales du panache 110
2.2.6. Evolution temporelle : dispersion et chute 112
2.2.7. Estimation de l'extension et des volumes des dépôts 116
3. SITE DE DIEPPE 119
3.1. VARIABILITE NATURELLE 119
3.1.1. Hydrodynamisme 119
3.1.2. Vent et houle 120
3.1.3. Caractéristiques hydrologiques 121
3.2. LE PANACHE TURBIDE 124
3.2.1. Caractérisation de la source 124
3.2.2. Evolution des MES en surface 126
3.2.3. Géométrie de surface et mobilité 127
3.2.4. Section transversale caractéristique 128
3.2.5. Evolution temporelle de la section transversale 130
3.2.6. Evolution temporelle : dispersion et chute 132
3.2.7. Estimation de l'extension et des volumes des dépôts 135
4. SYNTHESE/DISCUSSION 137
4.1. FORMATION DU PANACHE TURBIDE 137
4.1.1. Caractéristiques du milieu non impacté 137
4.1.2. Origines du panache 137
4.1.3. Caractéristiques du milieu par le panache 140
4.2. DYNAMIQUE DU PANACHE : COMPORTEMENT ET PROCESSUS 141
4.2.1. Dynamique verticale du panache : phase dynamique vs phase passive 141
4.2.2. Dynamique de la phase passive du panache 143
4.2.3. Influence de l'orientation du courant par rapport à la DAM 146
4.2.4. Estimation de l'extension et des épaisseurs de dépôts 146
4.3. MISE EN PLACE D'INDICATEURS OPERATIONNELS 147
4.3.1. Recherches d'indicateurs 147
4.3.2. Application pour l'évaluation de l'influence des protocoles d'extraction 151
4.3.3. Application pour l'évaluation de l'influence de l'environnement 152
5. CONCLUSIONS PARTIELLES 154

CHAPITRE III IMPACTS ET EVOLUTIONS MORPHO-SEDIMENTAIRES 157

1. INTRODUCTION 159
2. CARACTERISTIQUES MORPHO-SEDIMENTAIRES DU MILIEU 160
2.1. BATHYMETRIE 160

2.2. SEDIMENTOLOGIE 162
2.2.1. Faciès sédimentaire 162
2.2.2. Cartographie morpho-sédimentaire 166
2.2.3. Variations spatio-temporelles 167
2.3. COURANTOLOGIE A PROXIMITE DU FOND ET TRANSPORT SEDIMENTAIRE 171
2.3.1. Courantologie 171
2.3.2. Flux sédimentaires instantanés 172
2.3.3. Transport résiduel 174
3. DEPOTS DE SURVERSE 176
3.1. FACIES ACOUSTIQUE 176
3.2. SEDIMENTS 177
4. L'EXCAVATION 181
4.1. LE SILLON 181
4.1.1. Morphologie 181
4.1.2. Réponse acoustique 188
4.2. DEPRESSION 189
4.2.1. Morphologie 189
4.2.2. Sédimentologie 192
4.2.3. Courantologie 196
4.3. ZONE D'EXTRACTION 198
4.3.1. Morphologie 198
4.3.2. Sédimentologie 200
5. LA RESTAURATION 204
5.1. ZONE DE DEPOT DE SURVERSE 204
5.2. SECTEUR EXTRAIT 205
5.2.1. Restauration morphologique 205
5.2.2. Estimation de la durée de restauration 214
5.2.3. Restauration sédimentaire 218
6. SYNTHESE/DISCUSSION 221
6.1. IMPACTS MORPHO-SEDIMENTAIRES : BAIE DE SEINE ET DIEPPE 221
6.1.1. Caractéristiques du milieu non impacté 221
6.1.2. Caractéristiques des impacts 222
6.1.3. Caractéristiques de la restauration 225
6.2. INDICATEURS 229
6.3. RELATION AVEC LE MILIEU DU VIVANT 234
7. CONCLUSIONS PARTIELLES 235

CONCLUSION GENERALE 237

REFERENCES 243

GLOSSAIRE 255

LISTES DES FIGURES 257

LISTE DES TABLEAUX 262

LISTE DES PLANCHES 263

ANNEXES 265

Introduction

Les besoins en granulats sont croissants à l'échelle européenne liés à une demande de plus en plus forte en matériaux pour les constructions et les infrastructures (Menegaki et Kaliampakos, 2010; UEPG, 2011). Les contraintes environnementales réduisent les possibilités d'exploitation des gisements terrestres traditionnellement exploités et nécessitent le développement du recyclage de matériaux ou l'utilisation de matériaux de substitution. Sur les plateformes continentales marines dont les zones côtières sont proches de grands centres urbains, comme dans le Nord-Ouest de l'Europe, les granulats marins constituent une alternative notamment par leur qualité, leur accessibilité et les volumes présents (Secrétariat Général de la Mer, 2006). Ainsi, lors des dernières décennies, les demandes d'ouverture de concessions minières exploitant les granulats marins ont fortement augmenté en Europe (Velegrakis *et al.*, 2010). Les recommandations internationales (Rio de Janeiro en 1992 et de Johannesburg en 2002) et la directive cadre européenne « stratégie pour le milieu marin » (2008/56/CE), formalisent la nécessaire bonne connaissance des impacts des activités d'extraction sur l'environnement marin dans un objectif de développement durable des régions concernées et de gestion intégrée des zones côtières (e.g. Cayocca, 2011). En particulier, les impacts physiques sur la colonne d'eau et sur le fond marin sont à étudier car ils conditionnent les impacts sur le paysage sous-marin et sur l'écosystème. Cette connaissance doit permettre d'obtenir une meilleure compréhension de la réponse de l'environnement à cette activité.

La bassin oriental de la Manche, mer épicontinentale à régime macrotidal, est un bon exemple d'environnement marin soumis au développement de cette activité d'extraction depuis plusieurs décennies tant en France qu'en Angleterre. Cet environnement subit de fortes pressions anthropiques (extraction de granulats, activités de pêche, trafic maritime évalué à 20 % du trafic mondial, dépôts de dragages et nombreux projets éoliens offshore). De nouvelles réglementations apparaissent afin de préserver l'écosystème comme les zones Natura 2000 et la création d'aires marines protégées (MEDDTL, 2012). Dans ce contexte, le Groupement d'Intérêt Scientifique SIEGMA (Suivi des Impacts de l'Extraction des Granulats Marins) rassemble depuis 2003 les scientifiques, les pêcheurs et les industriels du granulat, afin de construire un programme scientifique et opérationnel qui apporte des réponses sur l'impact de l'extraction de granulats marins (physique, benthique, halieutique, relations trophiques) de l'échelle de l'extraction à la méso-échelle. Deux sites ont été retenus pour l'étude : Dieppe, où une extraction commerciale existe depuis 1980, et la Baie de Seine, où une extraction expérimentale a eu lieu entre 2007 et 2011. Les résultats de ce programme sont repris par le groupe de travail du Conseil International pour l'Exploration de la Mer (CIEM) sur les « Effets de l'extraction de sédiments marins sur l'écosystème » (WGEXT). Ces résultats sont valorisés autour de programmes européens telle que l'action COST 638 MAGGNET sur l'identification et la gestion des impacts de l'extraction de sables et graviers marins et de leur utilisation.

Le cadre scientifique de cette thèse porte sur les impacts physiques à l'échelle des extractions. Cette thèse bénéficie d'une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE) en partenariat avec la société Les Graves de l'Estuaire (LGE), membre du Groupement d'Intérêt Economique des Granulats Marins de Normandie (GIE GMN), et d'un financement CPER Région Haute Normandie. Elle intègre également une collaboration entre les Universités de Rouen et du Havre. L'objectif de l'étude est de caractériser et de quantifier, dans un environnement macrotidal, soumis à l'extraction de granulats marins réalisée sans criblage par des Dragues Aspiratrices en Marche (DAM), les impacts sur le milieu physique, à savoir sur la colonne d'eau et sur la morphologie et les sédiments des fonds, et d'évaluer la restauration de ce milieu. Nous répondons à cet objectif par trois questionnements :

- Quelles sont les caractéristiques et la dynamique du panache turbide créé à l'arrière de la drague lors de l'extraction en fonction des contraintes hydrodynamiques, du substrat et des conditions d'extraction ?
- Quels sont les impacts morpho-sédimentaires induits par l'extraction sur les fonds et leur restauration post-extraction en fonction des conditions de l'extraction et des caractéristiques du milieu ?
- Quels outils de gestion (indices et lois de comportement) peuvent être proposés pour appréhender ces effets et les comparer d'un site à l'autre ?

Pour répondre à ce questionnement, le travail de thèse est articulé en trois chapitres. Le premier chapitre présente : (i) un état de l'art sur l'activité d'extraction des granulats marins et des impacts physiques induits, (ii) le contexte environnemental de l'étude : la Bassin oriental de la Manche et les sites d'étude sélectionnés, et (iii) la stratégie d'étude, les outils déployés et les méthodes d'analyse. Le second chapitre concerne l'étude de la remise en suspension induite dans la colonne d'eau et de la dynamique du panache turbide généré à l'arrière de la drague. Cette caractérisation concerne les deux sites d'étude de la Baie de Seine et de Dieppe. Le troisième chapitre développe les impacts morpho-sédimentaires induits sur le fond et leurs évolutions dans le temps, après arrêt des extractions. Il est basé sur les suivis du site en Baie de Seine. Une comparaison avec les résultats relatifs à cette thématique sur Dieppe, étudiée préalablement, est menée en synthèse de ce chapitre.

Des outils d'évaluation des impacts physiques sont proposés pour une meilleure évaluation des risques environnementaux et une comparaison de ces impacts à plus large échelle (inter-sites). Enfin, la conclusion résume les principaux apports de l'étude et propose plusieurs perspectives.

Chapitre I

Contexte général

1. L'extraction des granulats marins

1.1. La ressource

1.1.1. L'industrie des granulats

Avec plus de 400 millions de tonnes de granulats exploités chaque année en France, soit près de 7 tonnes par habitant, le granulat est après l'eau, la substance naturelle la plus consommée. Cette remarque est applicable à l'ensemble des pays européens et aux Etats-Unis.

Les granulats sont des matériaux d'origine minérale se présentant sous la forme de grain de taille inférieure à 125 mm (Norme NPF18-101). Leur nature et leur forme varient en fonction des gisements et des techniques de production. Ils peuvent provenir de roches meubles, massives, de minerais ou de leur transformation thermique, et de sous-produits de l'industrie.

Différents types de granulats peuvent être distingués en fonction de leur origine et de la nature de leur gisement.

- les gisements alluvionnaires correspondent à des matériaux non consolidés, généralement déposés pendant l'ère quaternaire par les glaciers, les cours d'eau ou sur les fonds marins peu profonds.
- les gisements de roches massives correspondent à une multitude de situations géologiques (couches plus ou moins épaisses, filons, épanchements volcaniques, massifs de granite…) et à des localisations géographiques très différentes.

Ainsi les trois grands types de roches : éruptives, métamorphiques et sédimentaires consolidées (calcaires, grès …) ou meubles (gisements alluvionnaires) peuvent produire des granulats.

Depuis quelques années, des granulats de recyclage sont produits en concassant des matériaux de démolition issus des bâtiments ou des chaussées (bétons, pierre de taille…) et des sous-produits de l'industrie (laitiers de hauts-fourneaux, mâchefers…).

La diversité de ces gisements va directement dépendre de la diversité géologique, géo-structurale et géo-morphologique. Les gisements suivants seront distingués : alluvions glaciaires, sables et graviers alluvionnaires fluviatiles, brèches de pentes et éboulis de piémont, sables, graviers et galets du littoral, alluvions marines, couches de sables ou de sablons, roches sédimentaires consolidées, roches métamorphiques dures, roches éruptives anciennes, roches volcaniques récentes et granulats issus du recyclage des matériaux de démolition (UNPG, 2005). Les granulats couvrent deux usages principaux :

- la fabrication des bétons;
- la confection et l'édification des voies de communication (réseaux autoroutiers, lignes de chemin de fer et aéroports).

L'importance des granulats est une priorité mondiale comme en témoigne la production annuelle des Etats-Unis de 3,3 milliards de tonnes. La forte croissance économique et démographique des pays en voie de développement laisse envisager une augmentation de la production de granulats des pays émergents.

A l'échelle européenne, une étude statistique (Menegaki et Kaliampakos, 2010) basée sur des données socio-économiques de 1997 à 2006 sur 26 pays européens, a montré que les granulats constituaient la plus grande branche de l'exploitation minière par volume de production après le secteur des énergies fossiles. Cette étude montre également que la production des pays d'Europe Centrale et Orientale risque d'augmenter, tandis que celle des pays d'Europe Occidentale restera stable mais soutenue.

En France, la demande en granulats augmente depuis 30 ans (Figure 1). La production a dû augmenter en moyenne de 0,7 % par an entre 1970 et 2009, passant de 280 à 376 millions de tonnes. Cette hausse continue des besoins est expliquée par plusieurs facteurs: l'évolution démographique, conjuguée à l'évolution des modes de vie et de la structure familiale engendrant une forte demande en matière de logements et d'infrastructures, et l'évolution de l'urbanisme (UNPG, 2011). Ces zones urbaines ont généralement épuisé, ou sont en train d'épuiser, les ressources disponibles dans leur département et très souvent dans les départements voisins (Secrétariat Général de la Mer, 2006).

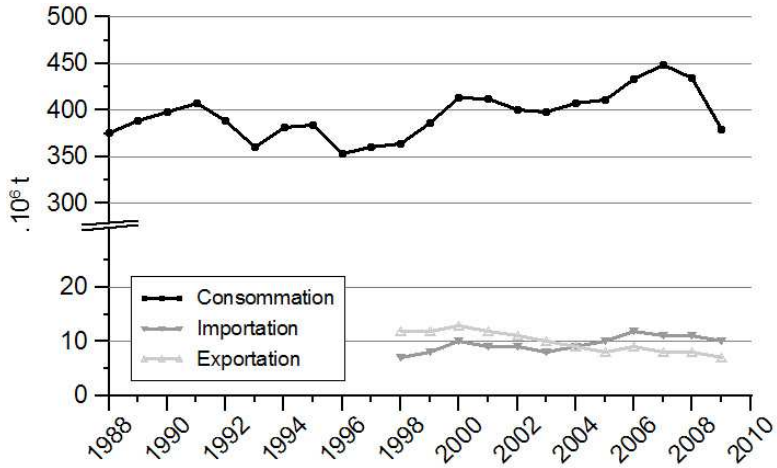


Figure 1 : Evolution de la consommation et du commerce extérieur de granulats en France depuis 1988 (source UNPG).

A l'échelle nationale, la production de roche meuble reste la plus importante de toute l'industrie des granulats. Celle-ci a subi une forte diminution depuis 20 ans liée à une raréfaction des gisements physiquement et administrativement disponibles. Face à une forte demande constante voire légèrement croissante, une augmentation de la production de granulats issus des roches éruptives, calcaires, du recyclage et de l'exploitation en mer a été nécessaire (Figure 2).

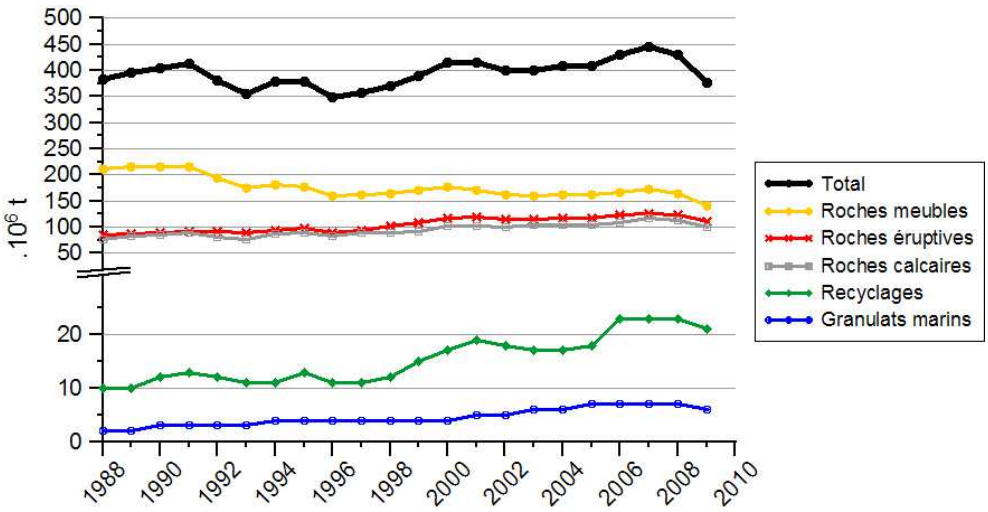


Figure 2 : Evolution de la production française par types de granulats (source UNPG).

1.1.2. Définition et usage

Les matériaux sous-marins extraits actuellement en France sont les granulats marins (sables et graviers siliceux), les sables calcaires ou coquilliers, et les algues calcaires (maërl). Ils se sont accumulés par le biais de processus sédimentaires continentaux ou marins.

Les sables et graviers siliceux sont d'origine détritique et correspondent le plus souvent à des dépôts continentaux anciens sous forme d'alluvions. Ils résultent de l'altération et de l'érosion de roches, puis de leur transport et dépôt. Deux principaux environnements de dépôts vont permettre de distinguer les types de granulats siliceux. Ils peuvent avoir une origine fluviatile où ils se seraient déposés dans les vallées d'un ancien réseau fluviatile, creusé au cours des phases de régression et périodes glaciaires du Quaternaire, lorsque le plateau continental était émergé. Par la suite, ces mêmes dépôts ont pu être remobilisés lors de la transgression. Les granulats marins peuvent également correspondre à d'anciens cordons littoraux, mis en place par la houle, marquant une ligne de rivage et établis aux cours des régressions mentionnées ci-dessus, témoins des différents niveaux de remontée de la mer. Ces derniers dépôts sont constitués de galets et/ou de sables graveleux.

Tout comme les granulats extraits à terre, les granulats marins siliceux sont utilisés pour les travaux de construction. Les granulats marins des paléo-vallées alluviales sont de même nature géologique que les sables et graviers des gisements terrestres. Ils offrent une alternative aux ressources terrestres, en particulier dans les régions maritimes déficitaires (Secrétariat Général de la Mer, 2006). Les granulats marins calcaires, quant à eux, sont utilisés pour l'amendement des sols et le traitement de l'eau.

Les granulats marins sont également largement employés dans certains pays de l'UE pour le réapprovisionnement des plages en sables notamment aux Pays-Bas, Royaume-Uni, Allemagne, Pologne et Espagne. Plusieurs pays destinent une bonne partie de leur production à l'export comme l'Angleterre, la Pologne et les Pays-Bas (Tableau 1).

Tableau 1 : Utilisations des granulats marins en Europe (traduit d'après Velegrakis *et al.*, 2010).

Pays	Volumes extraits (10^6 m^3)	BTP (%)	Entretien des plages (%)	Exportation (%)
Belgique	1,63	93,8	6,2	0
Danemark	7,01	59,9	38,8	1,4
France	2,77	nd	nd	0
Allemagne	7,57	nd	nd	0
Pays-Bas	29,07	49,2	43,4	7,4
Pologne	0,64	2,9	79,6	17,5
Espagne	0,48	0	100	0
R-U	13,13	66,6	4,8	28,8

Les sables coquilliers, d'origine biologique, sont de plus faible importance. Ils correspondent à des dépôts sableux accumulés par les courants de marée. Ces dépôts proviennent des débris des tests calcaires d'organisme benthique. A la mort de l'individu ces tests sont entraînés par les courants et déposés dans des zones de moindre énergie. Ces accumulations sont donc essentiellement calcaires. Leur morphologie dépend de la force des courants, de la profondeur d'eau et du stock sédimentaire mobilisable par les courants. Généralement, ils se présentent sous forme de bancs parallèles aux courants puissants par faible profondeur et perpendiculaires aux courants plus faibles à plus grande profondeur.

Le maërl est d'origine biologique et correspond à une accumulation d'algues rouges à squelette calcaire vivant à faible profondeur dans les eaux agitées. En France, le maërl est exploité depuis longtemps comme amendement agricole. Il est également utilisé pour le traitement de l'eau potable, les compléments alimentaires, la cosmétique et la dentisterie et par les industriels de l'eau pour recarbonater les eaux déficitaires. Les exploitations de maërl, en cours en Bretagne, seront arrêtées d'ici fin 2013 (MEEDDM, 2010).

1.1.3. Ressource

Il n'existe pas de synthèse permettant de connaître les ressources accessibles en granulats marins à l'échelle mondiale.

A l'échelle européenne une étude visant à faire le bilan de l'origine, des besoins, de la production, de l'exploitation et de l'utilisation des granulats marins dans 9 pays européens (Belgique, France, Allemagne, le Royaume-Uni, les Pays-Bas, Pologne, Espagne, Danemark et la Grèce) montre qu'il est difficile d'évaluer les ressources de granulats marins avec précision étant donné la différence des niveaux d'informations d'un pays à l'autre et des classifications employées d'un pays à l'autre (Velegrakis *et al.*, 2010). Les variations eustatiques lors de la dernière glaciation et les réseaux fluviatiles impliquent des ressources préférentiellement piégées sur les mers épicontinentales en Manche, mer du Nord, mer Baltique, mer Adriatique et sur la plateforme continentale de l'Océan Atlantique et de la Mer Méditerranée, notamment au droit des anciennes terrasses alluviales.

Toutefois quelques estimations peuvent être données. Les ressources au large du Danemark sont importantes de l'ordre du milliard de m^3. Les ressources allemandes en mer Baltique sont confinées et

estimées à 40-50 millions de m^3), tandis que les réserves polonaises sont d'environ 100 millions de m^3 (Herrmann *et al.*, 1999). Les estimations pour le Royaume-Uni ont montré que les réserves accessibles aujourd'hui sont de plusieurs billions de m^3 (Humphreys *et al.*, 1996).

A l'échelle française, un inventaire des granulats marins sur la plateforme métropolitaine a été conduit de 1969 à 1981 par le CNEXO sous le programme « Sables et graviers marins » puis à partir 1985 étendu aux Antilles. Les ressources reconnues, en métropole, ont été évaluées à 33 milliards de m^3 (50 milliards de tonnes) dont 600 millions de m^3 considérées comme réserves exploitables.

Ces dernières estimations ont été partiellement réévaluées en 2001 par l'Ifremer, en charge de la partie marine d'une étude conjointe Ifremer-BRGM sur la ressource en granulats, visant à délimiter les zones d'extractions favorables en intégrant les préoccupations d'ordre halieutique et les impératifs économiques et techniques d'approvisionnement en granulats marins dans le cadre d'une mission confiée en 2001 sur le règlement des conflits d'usage dans la zone côtière, entre pêche professionnelle et autres activités, par le 1er ministre. Ces études concernent deux secteurs ayant été jugés comme prioritaires : la façade Manche-Est, constituée des sept départements du Nord, du Pas-de-Calais, de la Somme, de la Seine-Maritime, de l'Eure, du Calvados et de la Manche, et la façade Loire-Gironde constituée des quatre départements de la Loire-Atlantique, la Vendée, la Charente-Maritime et la Gironde.

L'étude de l'Ifremer a permis de recenser et de centraliser l'ensemble des données. Ainsi à partir de traitement SIG et géostatistique les ressources en matériaux ont été réévaluées à 149 milliards de m^3 (à l'intérieur de la ZEE) pour la façade Manche-Est, et 19,8 milliards de m^3 pour la façade Loire-Gironde (Tableau 2).

Tableau 2 : Estimation des ressources en granulats marins sur les façades "Manche-Est" et "Loire-Gironde" (Ifremer, 2006).

Nature des accumulations		Volume moyen limité à la ZEE française (en millions de m^3)
Bancs sableux du Nord-Pas de Calais		28 200 *
Bancs sableux de la baie de Seine		4 200 *
Paléo-vallées du système "Manche"		116 600 *
Total "Manche-Est"		**149 000**
Paléo-vallée de la Loire (Saint-Nazaire)		17 700 *
Pertuis charentais	Pertuis Breton	579 **
	Pertuis d'Antioche	904 **
Gironde		650 **
Total "Loire-Gironde"		**19 833**

(*) calcul par méthode géostatistique
(**) calcul par méthode graphique

1.1.4. Production

Il n'existe pas de chiffre sur les productions mondiales de granulats au sens large et de granulats marins. Le Japon et les Etats-Unis semblent être d'importants producteurs de granulats marins. Cependant les quantités qu'ils produisent sont mal documentées. Dans les années 1980, la production japonaise était déjà de 57 millions de $t.an^{-1}$ (Augris et Cressard, 1984). Avec une production principalement basée sur les granulats marins, le Japon semble toujours en être le premier producteur devant les Etats-Unis mais les chiffres relatifs à leur production sont difficilement accessibles (James *et al.*, 1999). En 2009, les Etats-Unis ont extrait environ 7 millions de m^3 sur la côte (ICES, 2010).

De nombreux pays européens exploitent les granulats marins mais la plupart de ceux-ci ont une production anecdotique. Les plus grosses productions concernent les pays du nord-ouest de l'Europe : les Pays-Bas, le Royaume-Uni, le Danemark et depuis quelques années la France. En 2009, l'extraction totale des sédiments marins était de 195 Mt pour les Pays-Bas, de 33 Mt pour l'Allemagne, de 25 Mt pour le Royaume-Uni, de 11,5 Mt pour le Danemark et de 12,5 Mt pour la France (ICES, 2010). Le recensement des données effectué par le CIEM montre une forte évolution de la production à l'échelle européenne, du milieu des années 70 à 2005. Cette augmentation est plus particulièrement marquée pour les Pays-Bas, le Danemark et la France (Figure 3). Velegrakis *et al.* (2010) précise que les granulats marins constituent une ressource minérale d'une importance croissante pour les États membres de l'UE. Des ressources supplémentaires seront nécessaires pour satisfaire la demande future, qui est appelée à augmenter sensiblement en raison à la fois du développement croissant des zones côtières et de la lutte contre l'érosion côtière.

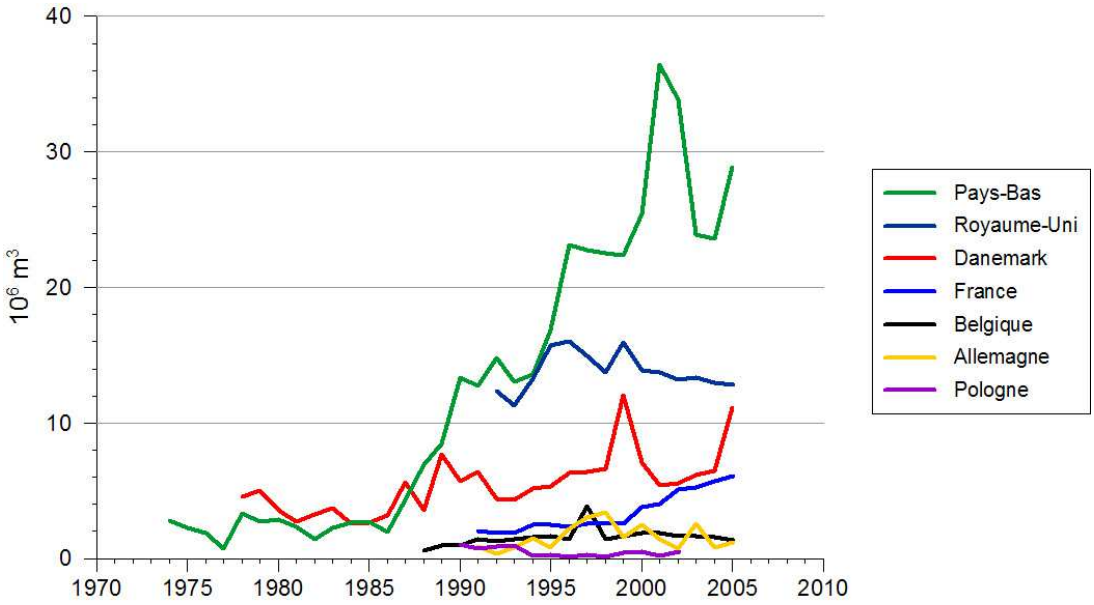


Figure 3 : Evolution de la production annuelle de granulats marins pour les plus gros producteurs européens (source UNPG).

En France, l'extraction de granulats marins, tous types confondus, s'opère sur les façades de la Manche et de l'Atlantique. L'extraction de maërl et de sables coquilliers ne concerne que la Bretagne. Sur les façades Manche et Atlantique, l'extraction de sables et graviers siliceux concernent essentiellement d'anciennes terrasses fluviatiles : en Manche celles du paléo-fleuve Rhin-Seine et pour l'Atlantique les paléo-terrasses de la Loire et de la Gironde (Figure 4).

Les extractions de granulats marins sont généralement réalisées entre 10 et 30 m de profondeur et à une distance comprise entre 8 et 20 km du littoral. Les gisements sont exploités sur une épaisseur moyenne de 1 à 5 m. La surface totale des autorisations d'extractions sur la mer territoriale française est inférieure à 50 km², alors qu'elle atteint près de 1 200 km² en Grande-Bretagne (MEEDDM, 2010).

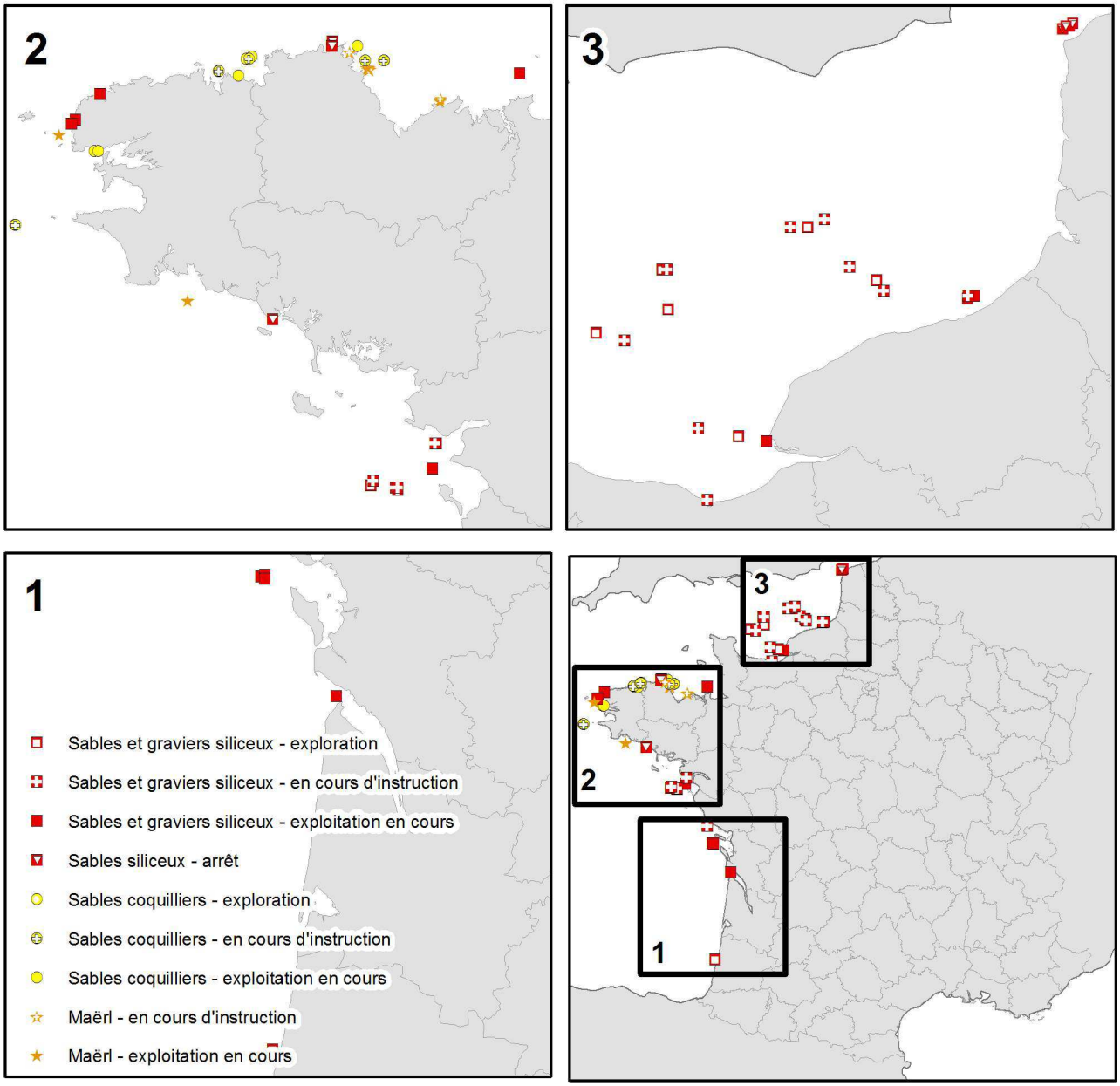


Figure 4 : Carte de localisation des permis d'extractions en cessation, en activité et en exploration en France (source Ifremer).

Les volumes extraits en 2008-2009 montrent que l'exploitation des matériaux marins en France concernent essentiellement les granulats marins (sables et graviers) avec plus de 7 M m^3 extraits pour moins de 500 000 m^3 de maërl et de sables coquilliers (Tableau 3).

Le Secrétariat Général de la Mer (2006) montre à court et moyen terme la contribution possible des granulats marins pour l'approvisionnement des zones en déficit, notamment l'Ile de France. De plus, il montre que les granulats les plus compétitifs économiquement seraient ceux extraits de zones proches, la Manche par exemple pour l'Ile de France.

Tableau 3 : Volumes extraits selon les quotas autorisés pour les années 2008 et 2009 par type de matériaux marins et par région (ICES, 2010).

Secteur	Matériel		Volume (m^3)
Manche	Granulats marins	Sables et graviers	1 172 588
Atlantique		Sables et graviers	5 969 000
Bretagne		Sables et graviers	325 000
Bretagne	Autres matériaux marins	Maërl	285 250
Bretagne		Sables coquilliers	210 250
Total			**7 962 088**

1.2. Techniques d'extraction des granulats marins

Les matériaux marins sont extraits à partir de bateaux, appelés dragues, dont il existe de nombreux types. Ici, seules les dragues utilisées pour l'exploitation de granulats marins sont décrites et non celles destinées à l'entretien portuaire.

1.2.1. Typologie des dragues

Ces dragues sont toutes équipées (Figure 5) :

- d'un système permettant l'extraction du matériel exploité : soit un bras latéral appelé élinde aspiratrice, soit une benne preneuse,
- d'un bassin de chargement, plus ou moins volumineux, pour stocker le matériel extrait,
- d'un système de surverse qui permet l'évacuation du trop plein d'eau aspiré auquel sont mélangées les particules fines : soit par sabords latéraux, soit par puits central,
- d'un système de déchargement du matériel extrait : par bande transporteuse, par clapage ou par refoulement hydraulique.

Deux systèmes d'extraction sont distingués : les bennes preneuses et les élindes aspiratrices.

Les bennes preneuses ne concernent que des petits extracteurs, leur nombre est très limité et elles tendent à disparaître. Elles sont utilisées uniquement en mode statique. Ces dragues ne permettent donc pas

une extraction régulière mais une succession d'excavations dont l'espacement est variable selon la profondeur.

Les élindes aspiratrices permettent l'extraction en continu de granulats. La tête d'élinde repose sur le fond de la mer, aspire le granulat à l'aide d'une pompe hydraulique. Le matériel dragué est acheminé vers le bassin de chargement grâce à la conduite cylindrique de l'élinde reliant la tête de l'élinde à la drague en surface. Les dragues peuvent être conçues pour fonctionner en marche (DAM) ou en point fixe, en aspirant les sédiments de fond, elles créent respectivement des excavations linéaires, ou sillons, plus ou moins profonds, ou bien une succession de trous, comme pour le cas des bennes preneuses. Les DAM parcourent le site d'extraction à vitesse réduite (2-3 noeuds).

Aujourd'hui les dragues les plus modernes et les plus utilisées sont de type DAM. En 2009, 1300 dragues étaient en activité à travers le monde dont 38 % d'entres elles sont des DAM (d'après Clarkson Research Services in Lloyd Jones *et al.*, 2010).

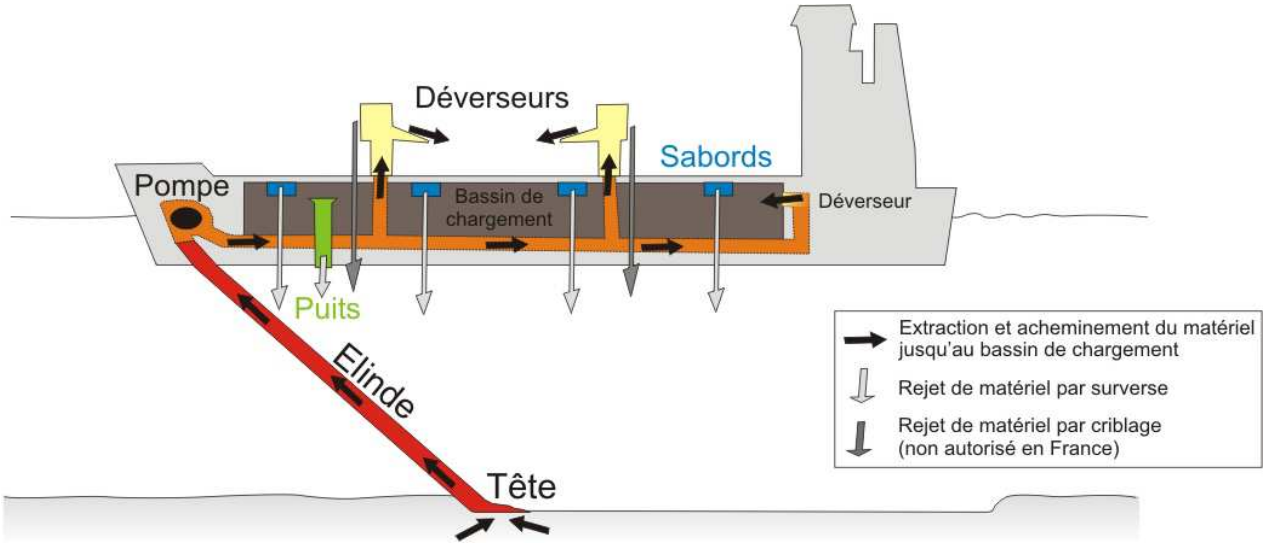


Figure 5 : Schéma du chargement de granulats marins extraits par une drague aspiratrice en marche et des deux principaux types de surverse pouvant être rencontrés (sabords ou puits).

1.2.2. Cycle d'extraction

Un cycle d'extraction comprend le chargement, le transport jusqu'au port de déchargement, le déchargement et le retour sur la zone d'extraction. Sa durée est généralement comprise entre 10 et 15 heures. Ce temps dépend surtout de la distance entre la zone d'extraction et le port de déchargement, mais aussi du marnage qui peut conditionner les entrées et sorties de port dans certains secteurs.

Le temps de remplissage du bassin de chargement d'une drague dépend du débit de la pompe d'aspiration, du volume du bassin de chargement et du matériel extrait. Ce temps est généralement compris entre 2 et 3 heures. Certaines pompes ont des débits d'aspiration élevés permettant un remplissage très rapide. Par exemple, la drague « Wheeler » chargera son bassin d'une capacité de 6120 m^3 en seulement 11 min grâce à un débit d'aspiration de 556 $m^3.min^{-1}$ (Lloyd Jones *et al.*, 2010).

1.2.3. Typologie des têtes d'élindes

La conduite d'aspiration, ou élinde, présente généralement un diamètre compris entre 0,75 et 1 m. Une même DAM peut être équipée de deux conduites d'aspiration. Au bout de chaque conduite, une tête d'élinde est installée. Elle permet d'excaver les sédiments et de les mélanger avec de l'eau de mer pour acheminer le mélange par transport hydraulique jusqu'au bassin de décantation.

En France, les élindes installées sur les dragues sont généralement de type « fixed visor » (Planche 1 A) dont la largeur est comprise entre 1,5 et 2,5 m, ou de type « California » dont la largeur est comprise entre 1,75 et 2,75 m (Planche 1 B ; Hitchcock *et al.*, 1999). Certaines têtes d'élinde peuvent être équipées d'une grille en acier pour augmenter la rigidité de l'élinde et éviter l'aspiration de gros bloc rocheux pouvant obstruer la conduite d'aspiration.

Le temps de chargement du bassin étant fonction des performances de l'élinde, le design des élindes fait l'objet de recherche, principalement par l'industrie d'extraction hollandaise pour en augmenter les performances. Les élindes modernes utilisent des dents ou des lames coupantes et ou des jets d'eau pour faciliter la mobilisation des sédiments dragués (Planche 1 C).

D'autres types d'élinde permettent un meilleur rendement. Au Japon, une élinde de 7,20 m de large équipe la DAM « Sairyu-maru » (Planche 1 D).

Il existe d'autres types d'élinde qui ont été développés aux Etats-Unis avec l'objectif d'extraire des couches fines de sédiments meubles reposant sur un substrat induré.

1.2.4. Méthode de chargement et criblage

Dans certains pays, un criblage antérieur au chargement est autorisé. En France celui-ci est interdit. Le criblage consiste à conserver une partie du fuseau granulométrique du tout venant et de rejeter dans le milieu naturel la fraction granulométrique non souhaitée. Deux systèmes de criblage existent : un premier système central couplant un chenal central et une tour de criblage ou un système rotatif constitué de tours de criblage déverseuses installées sur un côté du bassin rejetant le refus directement par-dessus bord (Planche 2 A et B).

Sans criblage le chargement s'effectuera par l'intermédiaire des mêmes systèmes (chenal central ou tours latérales déverseuses). Certaines dragues verront également un troisième type de chargement pouvant s'associer à l'un des deux premiers, constitué d'ouverture sur la paroi arrière du bassin de chargement (Planche 2 E et F).

1.2.5. Dimensions des DAM et volumes de chargement

Les dimensions des DAM sont très variables (Tableau 4). Leurs longueur, largeur et tirant-d'eau moyens sont en moyenne respectivement de 96, 17 et 6,1 m.

La capacité de chargement dépend de la dimension de la drague et plus exactement de son bassin de chargement. Cette capacité est donc très variable d'une drague à l'autre. Cette capacité est généralement comprise entre 1000 et 5000 m^3 équivalant à 1730 et 8650 t pour une densité moyenne de chargement de 1,73.

Tableau 4 : Dimensions moyennes, maximales et minimales des DAM en activité dans le monde (d'après Clarkson Research Services in Lloyd Jones *et al.*, 2010).

	Longueur (m)	Largeur (m)	Tirant d'eau (m)
Moyenne	96	17	6,1
Maximum	231 TSHD "Queen of the Netherlands"	41 TSHD "Christobal Colon"	15,2 TSHD "Christobal Colon"
Minimum	35 TSHD "Ria de Navia"	7,4 TSHD "Oosterschelde"	1,4 TSHD "New Era"

1.2.6. Surverse

La surverse est le rejet du trop plein d'eau aspirée, mélangée aux particules les plus fines. Cette surverse sera plus ou moins concentrée en sédiments. Les particules fines ou peu denses en suspension dans l'eau du bassin, contrairement aux particules plus grosses et / ou plus denses chutant dans le bassin, seront en partie évacuées par la surverse. La quantité (ou concentration), la nature et la granulométrie des particules rejetées seront fonction de la nature du matériel dragué, de l'agitation dans le bassin de la drague et de la technique de rejet de cette surverse. Le volume de sédiments rejetés lors de la surverse peut atteindre 30-40 % du volume de sédiments chargés dans le bassin de la drague.

Trois phases du chargement sont distinguées en fonction de l'état de la surverse :

- le remplissage jusqu'au niveau de la surverse,
- la phase de surverse,
- la phase finale ou le niveau du chargement est proche de celui des sabords entraînant une augmentation de la concentration de la surverse.

Deux types de systèmes de rejet de surverse existent. Leur objectif est d'évacuer le trop plein et de contrôler le niveau dans le bassin de la drague. Le premier type est une évacuation par des sabords : ouvertures localisées soit sur toute la longueur du bassin de chargement, soit au sommet du bassin de chaque coté de la drague (Planche 2 C et D). Le deuxième type, plus moderne, est un puits situé directement dans le bassin monté sur vérins hydrauliques et donc mobile sur la verticale. Le rejet se fait alors directement dans le milieu naturel sous la drague. Ce deuxième système permet le contrôle du niveau d'eau dans le bassin, le débit de la surverse et la concentration en sédiment de la surverse (Planche 2 F).

Source BMAPA

Source BMAPA

Source IHC, 2005

Source Yano *et al.*, 2006

Planche 1 A: Tête d'élinde de type « fixed visor » ; B: Tête d'élinde de type « california » ; C : Elinde équipée d'un système de jet d'eau ; D : Elinde de grande dimension ; E: Déversement par tour centrale ; F: Déversement par ouverture dans le bassin.

Source BMAPA

Source BMAPA

Planche 2 A : Déversement et criblage par chenal central ; B : Déversement et criblage par tours rotatives ; C : Surverse par sabord continu ; D : Surverse par sabord discontinu ; E : Elinde ; F : Surverse par puits.

Certaines dragues peuvent être équipées d'un système de surverse anti-turbidité. L'objectif de celui-ci est de diminuer la proportion de bulles d'air générées par la surverse qui ont tendance à maintenir en suspension les particules. Ce système a surtout été développé au Japon. La société Jan de Nul a développé au sein du puits de surverse, une valve permettant de réduire le nombre de bulles d'air quittant le bassin. Les sociétés IHC (Pays-Bas) et Krupp Foerdertechnik (Allemagne) ont développé un « green pipe ». Ce système permet de racheminer la surverse directement sur le fond au niveau de la tête d'élinde.

1.2.7. Cas particulier : les « mega-dredger »

Depuis le début des années 2000, des DAM de grande capacité ont vu le jour. Ce type de drague est principalement développée à Singapour, où la demande en granulats est forte, induite par une densité de population élevée et par un développement économique rapide, et dans le Golfe Persique pour les travaux de terrassement et de poldérisation (exemple : Palm Island, The World). Ces navires peuvent extraire profondément et remplir leur cale rapidement. Par exemple la drague « Vasco de Gama » (Jan de Nul) peut draguer jusqu'à 125 m et remplir son bassin d'une capacité de 33 000 m^3 en seulement une heure. Ces dragues sont également utilisées pour l'extraction minière en Afrique du Sud et pour la protection des installations pétrolières contre les icebergs. Les dragues « Cristobal Colon » et « Leiv Eriksson » possèdent la plus grande capacité de 46 000 m^3 et peuvent draguer jusqu' à 155 m de profondeur.

1.3. Impacts physiques

Les impacts sur le milieu naturel liés à l'extraction de granulats marins sont multiples (Tableau 5). Ils peuvent être physiques, chimiques et biologiques. Ces impacts sont interconnectés et découlent souvent des premières modifications physiques de l'environnement.

Les impacts physiques auront pour cible le fond et la colonne d'eau. Les causes de ces impacts sont liées : (i) aux déplacements du navire (valable pour tout navire), (ii) à l'extraction en elle-même, à savoir l'aspiration et l'acheminement du matériel extrait jusqu'au bassin de décantation de la drague, et (iii) les rejets de la surverse et du criblage (Figure 6). Comme pour chaque navire, la mise en mouvement du navire engendrera une consommation de carburant et des émissions de gaz (Tableau 5). Ces derniers seront plus importants dans le cas d'une extraction due à une consommation d'énergie supplémentaire pour alimenter la pompe d'aspiration.

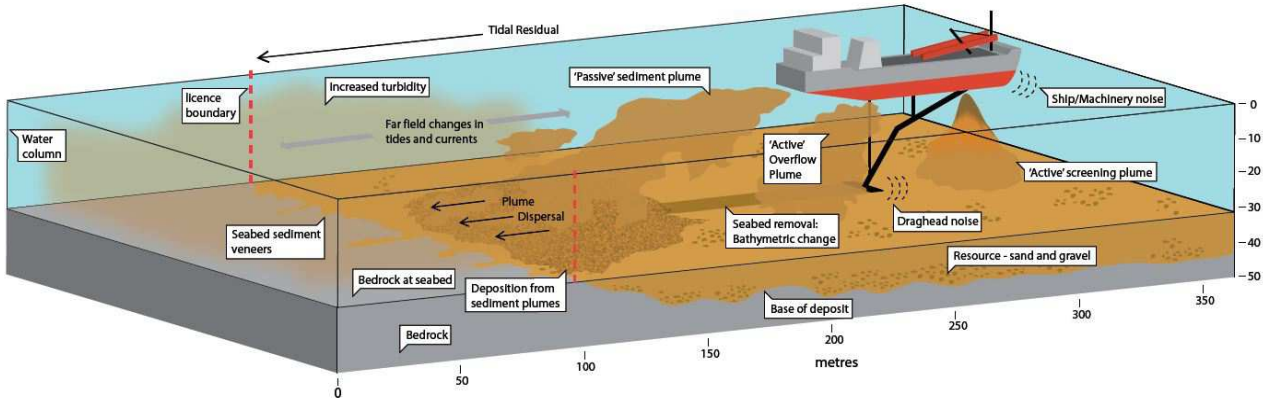


Figure 6 : Bloc 3 D synthétique des impacts physiques liés à l'extraction de granulats marins (Tillin *et al.*, 2011).

Des impacts physiques directs, provoqués instantanément, peuvent se distinguer des impacts physiques indirects, provoqués par la réponse de l'environnement physique aux impacts directs (Tillin *et al.*, 2011).

L'aspiration du substrat provoquera à la fois des impacts directs et indirects. Une modification morphologique directe de la topographie sera engendrée par l'excavation des sédiments au droit de l'élinde. Une modification sédimentaire directe peut également avoir lieu si le substratum présente une hétérogénéité verticale des sédiments. Ces impacts seront localisés au droit de l'extraction. Cet ensemble de modifications directes peut engendrer des impacts indirects. L'excavation pourra engendrer une modification de l'hydrodynamisme au droit des sillons mais aussi au-delà de la zone d'extraction. Cette modification hydrodynamique couplée à la modification sédimentaire au droit du sillon pourra entraîner une modification de la dynamique sédimentaire sur et au-delà de la zone d'extraction. Des modifications morphologiques et sédimentaires de 2nd ordre, cette fois indirectes, pourront être induites par les modifications de l'hydrodynamisme et de la dynamique sédimentaire. Ces impacts indirects agiront sur l'évolution, la restauration de la zone d'extraction mais aussi sur les conditions d'érosion ou de sédimentation de la côte dans le cas d'une extraction proche de celle-ci.

La surverse, le criblage (lorsque celui est autorisé) en surface et le passage de l'élinde sur le fond peut également engendrer des impacts directs et indirects. L'impact direct est une remise en suspension de particules minérales et organiques. Le dépôt de ces particules engendrera des modifications indirectes sur la morphologie, la couverture sédimentaire et la dynamique sédimentaire à l'intérieur et au-delà de la zone d'extraction.

De part leur caractère direct et indirect, ces impacts sont donc à considérer selon plusieurs échelles spatiales (sillon, zone d'extraction et au delà) et temporelles (épisode de l'extraction, cycle tidaux, cycle saisonnier, périodes annuelles à pluri-décennales).

Tableau 5 : Proposition de classification des impacts physiques liés à l'extraction de granulats marins.

Type d'impacts	Causes	Nature de l'impact	Facteurs forçants
Direct	Mise en mouvement de la drague	Consommation de carburant et émissions	Temps de chargement Puissance de la pompe Dimension et poids de la drague
	Extraction: aspiration et acheminement du matériel dragué	Bruit	Aspiration par l'élinde Pompe d'aspiration Acheminement du matériel dragué Chargement dans le bassin Type de moteur et hélice
	Extraction : aspiration du substrat	Modification morphologique (bathymétrie et pente)	Nature du sédiments Pompe d'aspiration Taille élinde Stratégie des extractions : intensif ou étendu Cumul des extractions Temps de restauration
		Modification sédimentaire	Hétérogénéité verticale des sédiments
		Modification hydrodynamique (courant et houle)	Hydrodynamisme naturel Modification morphologique
		Modification de la dynamique sédimentaire	Modification hydrodynamique Modification sédimentaire
	Extraction : aspiration et surverse (et criblage)	Remise en suspension	Nature des sédiments Type de surverse Type d'élinde Nature du criblage Caractéristiques hydrodynamiques Cap de la drague
Indirect	Extraction : aspiration du substrat	Modification morphologique (bathymétrie et pente)	Modification hydrodynamique (courant et houle) Modification dynamique sédimentaire
		Modification sédimentaire	Modification dynamique sédimentaire Modification morphologique (bathymétrie et pente)
		Modification à la côte	Modification hydrodynamique (courant et houle) Modification de la dynamique sédimentaire
	Extraction : aspiration et surverse (et criblage)	Modification morphologique (bathymétrie et pente)	Remise en suspension
		Modification sédimentaire	Remise en suspension
		Modification de la dynamique sédimentaire	Modification morphologique (bathymétrie et pente) Modification sédimentaire
		Modification à la côte	Remise en suspension

Des impacts chimiques et biologiques peuvent découler des impacts physiques. Des impacts chimiques peuvent être engendrés par la mise à jour de sédiments sous-jacents ou autres particules de nature différentes et par la remise en suspension de particules différentes de celles préalablement présentes dans l'environnement. Ces impacts physiques et chimiques peuvent provoquer des impacts biologiques sur les organismes benthiques et pélagiques par la modification des conditions physico-chimique de l'eau, des habitats, de l'énergie du milieu et des modifications de la chaîne trophique.

Enfin, les impacts de l'activité d'extraction de granulats marins vont se cumuler aux effets d'autres activités anthropiques, telle que la pêche, le transport maritime, l'implantation de câbles ou conduites sous-marins, l'implantation d'éoliennes et d'hydroliennes, … Les interactions entre les effets de ces différentes activités sont complexes et peu connues. Leur connaissance constitue actuellement un enjeu, objectif de nombreux projets en cours (e.g. FP7 VECTORS, DCSMM, …).

1.3.1. Le panache turbide

La remise en suspension de particules va engendrer un impact direct à savoir l'augmentation de concentrations de matières en suspension (MES). Ces MES pourront être de nature et de granulométrie différentes de celles contenues préalablement, naturellement, dans la colonne d'eau. La remise en suspension va également engendrer un impact indirect qui est la formation de dépôts issus de la décantation du panache turbide.

Ces impacts physiques peuvent avoir différentes conséquences sur l'environnement (Tableau 6). La modification des concentrations et du type de MES dans la colonne d'eau pourra diminuer la visibilité et la production primaire et ainsi altérer certains comportements biologiques. Le effets de diminution de concentration de chlorophylle sont essentiellement décrits dans le bouchon vaseux des estuaires macro tidaux comme la Gironde (Goosen *et al.*, 1999) pour des concentrations en MES supérieurs à 500 $mg.L^{-1}$. A contrario, cette augmentation de MES, parfois riche en matière organique, peut être également source de nourriture supplémentaire favorisant certaines espèces pélagiques et benthiques. La chute de ces particules sur le fond peut être néfaste pour certaines espèces peu résistantes à l'étouffement et/ou sensibles aux modifications de leur habitat physique.

Plusieurs travaux avec des approches différentes ont permis de caractériser en partie cette remise en suspension. Des mesures in situ ont apporté des informations sur l'origine et le comportement de cette remise en suspension. Des modélisations en canal et numérique permettent d'augmenter notre compréhension du comportement de ces particules.

Tableau 6 : Principaux impacts liés à la remise en suspension et leur conséquences sur l'environnement (traduit d'après Hitchcock *et al.*, 1999).

	Impacts	Conséquences
Matière en suspension	Réduction de la pénétration de la lumière	Réduction de la croissance des algues Réduction de la visibilité Réduction de la production primaire
	Augmentation des concentrations en matières en suspension	Impact visuel Décroissance du rendement d'oxygène Décroissance du rendement de reproduction Décroissance du rendement nourriture Diminution du frai Modification des routes de migration
	Augmentation du flux de nutriment	Augmentation des opportunités de nourriture Augmentation des taux de reproduction
Chute des particules	Augmentation du taux de sédimentation	Etouffement des organismes à mobilité réduite sur le fond Blocage des organismes filtreurs Etouffement de la communauté benthique Etouffement des communautés de substrat dur Envasement des trous de crabe et de homard
	Changement du type de sédiment	Modification de la granulométrie Modification du stock de sables pour le cycle annuel de rechargement des plages
	Modification du régime sédimentaire	Etouffement des sites archéologiques

a. Origine et caractéristiques de la remise en suspension

Une première remise en suspension en surface, visible, est induite par la surverse et par le criblage lorsque celui est effectif. Cette remise en suspension en surface est responsable de la création d'un panache turbide de surface (Figure 7).

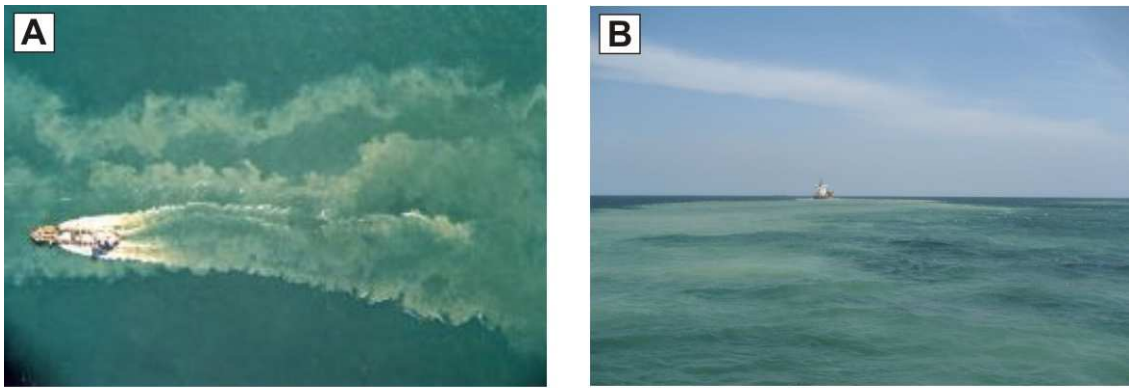


Figure 7 : Photographies du panache de surface généré à l'arrière de la drague.
A : vue d'hélicoptère (Hitchcock et al., 1999). B : vue depuis le navire de suivi sur le site de Baie de Seine.

Des mesures réalisées sur la drague permettent de caractériser les concentrations, les granulométries, la nature des particules rejetées par surverse et criblage et les masses totales rejetées. Van der Veer *et al.* (1985) et Hitchcock *et al.* (1999) obtiennent des concentrations moyennes de 6 $g.L^{-1}$ pour une drague de faible capacité (1309 m^3) : l'Arco Serven. Boutmin (1986), Gajewski et Uscinowicz (1993), Newell *et al.* (1999) montrent également des concentrations de l'ordre du $g.L^{-1}$. Les concentrations du criblage ne sont pas directement connues. A partir du débit d'aspiration et du volume chargé, les masses rejetées par surverse et criblage peuvent être calculées. Hitchcock et Drucker (1996) et Newell *et al.* (1999; 2002) montrent que 30 à 170 % de la masse du chargement retenu dans le bassin de la drague peut être rejeté pour une extraction avec criblage. Pour une extraction sans criblage les proportions de matériel rejeté sont plus faibles de 1 à 16 % (Boutmin, 1986; Hitchcock et Drucker, 1996; Newell *et al.*, 1999).

La granulométrie du criblage sera fonction de la taille des cribles autorisée et choisie par l'exploitant. Les particules solides contenues dans la surverse sont inférieures à 2 mm et la granulométrie varie en fonction du matériel extrait. Gajewski et Uscinowicz (1993) montrent que la surverse est principalement constituée de sable fin alors qu'Hitchcock *et al.* (1999) montrent qu'en Manche celle-ci est principalement silteuse. Au large de l'estuaire de la Loire, Boutmin (1986) montre que les particules constituant la surverse sont inférieures à 600 µm. Whiteside *et al.* (1995) calculent une densité des particules de 1,060-1,160. Newell *et al* (1999) indiquent que la surverse est en partie composée de matière organique.

Avec criblage, la remise en suspension sera nettement supérieure que dans le cas d'une surverse seule. Pour une extraction avec criblage, Hitchcock *et al.* (1999) montre que la part des sédiments rejetés par criblage (88 %) est nettement plus importante que celle des sédiments rejetés par la surverse (12 %) alors que le volume d'eau rejeté par criblage (35 %) est plus faible que celui rejeté par la surverse (65 %).

Une remise en suspension sur le fond, générée par le passage de l'élinde, a été mise en évidence dans de nombreux travaux. Elle constitue le panache benthique. Hitchcock *et al.* (1999) montrent : (i) à partir du signal rétrodiffusé d'un ADCP, qu'à 30 m derrière la drague ce panache est de faible ampleur avec une hauteur de 3 m et une largeur de 2 m et (ii) à partir de caméra vidéo et de pompes installées sur une élinde de type californian (largeur 1,2 m) sur la DAM Arco Dee, que ce panache est de faible amplitude avec une surface moyenne de 2,72 m^2 (0,67-6,78 m^2), avec une concentration moyenne de 31 $mg.L^{-1}$ et une proportion importante de silts (44 %). Ces auteurs calculent un tonnage total de 13 t, remis en suspension par l'élinde pour le chargement de cette drague de 1300 t (751 m^3) durant 5 heures.

Lorsque l'extraction a lieu dans des eaux peu profondes, une troisième remise en suspension peut se produire. La turbulence générée par l'hélice de la drague sur le fond peut remobiliser les sédiments fins de la couverture sédimentaire (Garrad et Hey, 1987). Remarquons que cette remise en suspension n'est pas propre à l'extraction mais à l'ensemble des navires.

b. Comportement des panaches

Le comportement du panache benthique n'a été que peu étudié en raison de sa faible amplitude et de son mélange rapide derrière la drague avec le panache de surface (Hitchcock *et al.*, 1999).

Après l'entrée de la surverse et/ou du rejet de criblage dans le milieu marin, les concentrations vont fortement chuter. Elles seront comprises entre plusieurs centaines de $mg.L^{-1}$ et 5 $g.L^{-1}$ (Hitchcock *et al.*, 1999). La dynamique du panache de surface créé à l'arrière de la drague a été étudiée à partir de suivis *in situ* e.g. Hitchcock *et al.*, 1999; Hitchcock et Bell, 2004) ou de simulations numériques (eg. Whiteside *et al.*, 1995; Spearman *et al.*, 2007).

Pour le panache de surface, Dankers (2002) distingue: (i) un comportement dynamique, défini par une vitesse de chute de l'ensemble des particules supérieures à celles des particules isolées, auquel est associé un courant de densité sur le fond et (ii) un comportement passif qui à contrario présentera une vitesse de chute de l'ensemble des particules inférieures ou égales à celles des particules isolées (Figure 8).

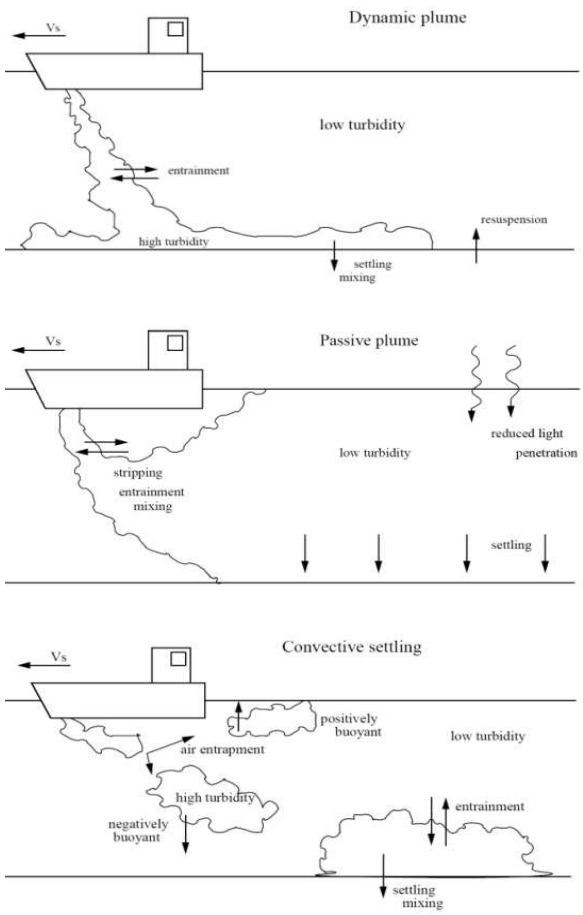


Figure 8 : Les différents comportements de panache de surface généré par l'extraction de granulats marins (Dankers, 2002).

Des travaux antérieurs suggèrent l'existence d'une telle phase dynamique dans le cas d'une extraction de granulats en point fixe sans criblage (Hitchcock et Bell, 2004), dans un intervalle de temps de 5-10 min pour une surverse par puits (Whiteside *et al.*, 1995) et dans les 10-15 premières minutes pour une surverse par puits avec criblage (Hitchcock *et al.*, 1999). Un étalement sur le fond d'une partie des suspensions sous la forme d'un courant de densité appelé panache de fond a été observé (Whiteside *et al.*, 1995; Hitchcock *et al.*, 1999; Hitchcock et Bell, 2004; Spearman *et al.*, 2007). Ce panache de fond s'étend jusqu'à 800 m dans le sens des courants et sur 3-4 m d'épaisseur pour une surverse par puits (Hitchcock et Bell, 2004) et peut s'étendre sur plusieurs km de long, plusieurs centaines de mètres de large et plusieurs mètres d'épaisseur pour une extraction avec criblage (Hitchcock et Drucker, 1996; Dickson et Rees, 1998; Hitchcock *et al.*, 1999; Newell *et al.*, 1999). Le comportement de la phase passive est surtout étudié par l'intermédiaire des vitesses de chutes des particules qui la composent et par sa mobilité sous l'effet des courants de marée. Des études récentes se sont intéressées aux processus de floculation pouvant intervenir au cours de cette phase passive après l'entrée de la surverse dans le milieu marin (Mikkelsen et Pejrup, 2000; Smith et Friedrichs, 2011). Des mesures *in situ* ont montré qu'elle peut se développer sur plusieurs kilomètres dans le sens des courants (Holmes, 1988; Hitchcock et Drucker, 1996; Hitchcock *et al.*, 1999; Newell *et al.*, 2004).

Les concentrations pourront tendre vers celles du milieu naturel rapidement 15 à 20 min après le rejet (Boutmin, 1986; Hitchcock *et al.*, 1999) et pour des distances inférieures au kilomètre (Kiørboe et Møhlenberg, 1981; Hayes *et al.*, 1984; Hitchcock *et al.*, 1999), notamment quand le comportement du panache est principalement dynamique. Cependant d'autres auteurs montrent que des concentrations anormales persisteront plusieurs heures après le rejet (Willoughby et Crabb, 1983; Whiteside *et al.*, 1995). Malgré des concentrations tendant rapidement vers celles du milieu naturel, ce panache peut être encore visible 1h30min après le rejet (Boutmin, 1986).

Les sables qui composent la phase passive chuteront rapidement à une distance de l'ordre de la centaine de mètres (Holmes, 1988). Au-delà, cette phase sera essentiellement composée de silts et de matière organique (Hitchcock et Drucker, 1996; Newell *et al.*, 2004). Une modélisation numérique (HR Wallingford, 1993) montre que pour un environnement macrotidal avec des courants de 1,75 $m.s^{-1}$ et une hauteur d'eau de 25 m, le panache peut persister pendant 3-4 cycles de marée**.**

Fischer *et al.* (1979) ont montré que le comportement des panaches turbides était gouverné par : (i) le nombre de Richardson R_i (équation 1) (ii) le ratio de vitesse ζ (équation 2) entre la vitesse relative des courants par rapport à la drague et la vitesse du rejet de la surverse. Le nombre de Richardson R_i, adimensionnel témoigne de la stabilité d'un écoulement. Il est le rapport de l'énergie potentielle de gravitation sur l'énergie cinétique du fluide. Si ce rapport est inférieur à 1, l'écoulement est turbulent et dans le cas contraire l'écoulement est laminaire.

$$R_i = \frac{\varepsilon.g.d}{W^2} \tag{1}$$

$$\zeta = \frac{U}{W} \tag{2}$$

avec ε l'excès relatif de densité du panache par rapport au milieu, *g* l'accélération de la pesanteur, *d* le diamètre équivalent de la surverse à la sortie de la DAM, *W* la vitesse de l'écoulement de la surverse et *U* la vitesse relative du courant par rapport à la DAM.

A partir d'une expérimentation en laboratoire, Winterwerp (2002) propose une classification du comportement des panaches de surface en fonction de ces deux paramètres : courants de densité où le panache s'étale sur le fond à la manière d'un courant de densité, zone de mélange où le panache est entraîné par le courant ambiant et mélangé rapidement dans la colonne d'eau, ou un intermédiaire (Figure 9).

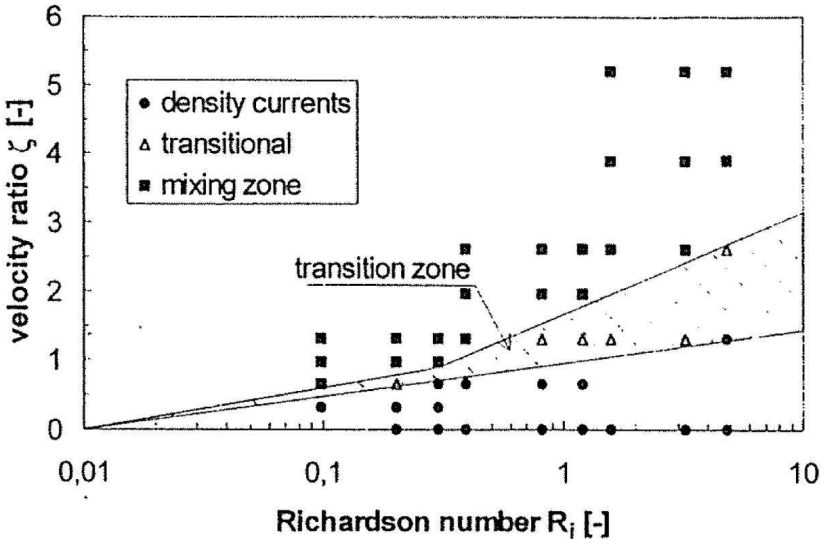


Figure 9 : Comportement des panaches de surface en fonction du nombre de Richardson et du ratio de vitesses (Winterwerp, 2002)

c. Dépôts

La nature et la géométrie des dépôts issus des panaches peuvent être déterminées selon plusieurs approches : l'observation *in situ*, le calcul des distances de chute en fonction des observations *in situ* (taille des particules et courants) et la modélisation numérique. A partir d'observations *in situ*, Boutmin (1986) et Gajewski et Uscinowicz (1993) calculent un rayon de dépôt maximal de 4 et 1 km. Spearman et al. (2007), observent au sonar ces dépôts et à partir d'une modélisation numérique montrent que ceux-ci peuvent atteindre 1,5 kg.m^2 (soit 0,6 mm d'épaisseur) pour un seul chargement. Willoughby et Foster (1983) ont modélisé l'accumulation de dépôts pour une extraction intensive sur deux ans. Pour une distance de 500 m et 2,5 km, ces dépôts atteignent respectivement 23 mm.m^2 et 6 mm.m^2.

Desprez (2000) précise que des dépôts de sables fins se produiront dans un rayon de 200 à 500 m alors qu'Evans (1994) montre que des dépôts similaires pourront dépasser les 3 km. Une modélisation numérique

(HR Wallingford, 1993) montre que pour un environnement macrotidal avec des courants de 1,75 $m.s^{-1}$ et une hauteur d'eau de 25 m, les sables grossiers et les sables très fins chuteront respectivement dans un rayon de 50 m et de 11 km.

1.3.2. Impacts sur le fond

L'extraction de granulats marins engendre des impacts directs et indirects sur le fond. Ils concernent la morphologie des fonds, leur nature sédimentaire, l'hydrodynamisme à proximité du fond et la dynamique sédimentaire.

Les impacts directs sont produits instantanément, suite à l'excavation de sédiments par l'élinde aspiratrice ou par la benne preneuse. Ces impacts sont d'abord morphologiques. Une extraction statique engendrera une dépression circulaire. L'extraction mobile d'une DAM provoquera un sillon lors du passage isolé de l'élinde ou par la création d'une dépression plus importante induite par le passage répété de l'élinde dans un même secteur. Cette excavation de sédiments peut engendrer une modification sédimentaire du fond en fonction de l'hétérogénéité verticale des sédiments. Des modifications hydrodynamiques indirectes pourront avoir lieu au niveau des sillons et de leurs crêtes. Ces modifications directes de morphologie et de sédimentologie associées aux modifications hydrodynamiques indirectes peuvent perturber la dynamique sédimentaire en piégeant une partie du flux sédimentaire au sein des sillons ou dépressions et/ou modifier la nature et l'intensité des flux.

Des impacts indirects sont également liés à l'évolution des sillons dans le temps et aux dépôts du matériel remis en suspension. Cette évolution des sillons peut être morphologique et sédimentaire. Dès lors, les conditions hydrodynamiques et les flux sédimentaires peuvent de nouveau évoluer contribuant à l'évolution morphologique et sédimentaire des dépressions. Le dépôt du matériel remis en suspension pourra contribuer aux modifications morpho-sédimentaires au droit du sillon et donc à celles de l'hydrodynamisme et de la dynamique sédimentaire. Ces dépôts peuvent également dépasser la zone d'extraction et ainsi modifier le contexte morpho-sédimentaire et la dynamique sédimentaire à plus grande échelle.

Un approfondissement important de la bathymétrie peut localement modifier l'effet de la houle sur les fonds. Pour une extraction proche du littoral la dynamique sédimentaire peut être modifiée de manière significative.

a. Modification morpho-sédimentaire directe au droit de l'extraction

Peu d'études concernent l'impact morpho-sédimentaire au droit du sillon. La plupart des travaux ont pour objectif d'évaluer l'impact des excavations sur l'habitat, la communauté benthique et de quantifier la restauration temporelle du milieu.

La plupart de ces études basent leur description morpho-sédimentaire de ces excavations à partir de mesures *in situ* souvent en déphasage avec l'extraction elle-même. L'ensemble de ces descriptions est donc valable pour des objets ayant déjà subi une restauration.

Le type de drague (à benne preneuse ou aspiratrice), les caractéristiques de celles-ci (type et taille des godets ou des élindes, puissance d'aspiration), leur mobilité, l'intensité de l'extraction et la nature des sédiments dragués sont les principaux paramètres influant sur la morphologie des empreintes laissées sur le fond (Figure 10).Une drague à benne preneuse et une drague aspiratrice statique généreront des dépressions circulaires (Figure 10 A). Les DAM généreront des sillons isolés (Figure 10 B) qui se transformeront en plus vaste dépression (Figure 10 C) à la suite du passage répété de la drague dans un même secteur (Millner *et al.*, 1977; Van Der Veer *et al.*, 1985).

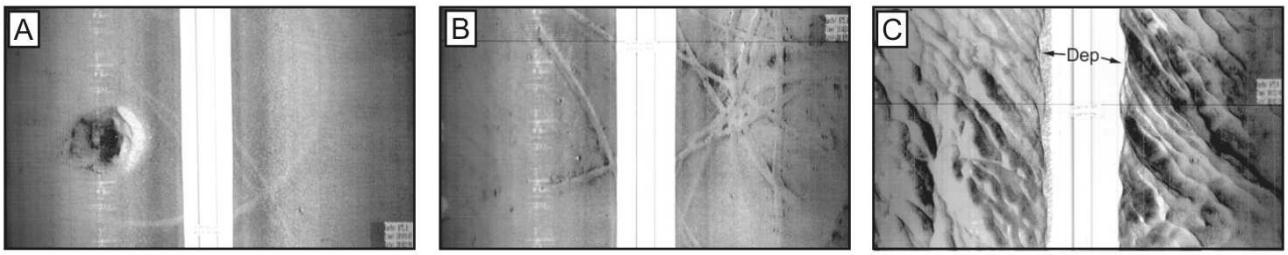


Figure 10 : Images sonar de différents types d'empreintes laissés sur le fond par l'extraction de granulats (Krause *et al.*, 2007).
A : Dépression circulaire générée par une drague statique. B : Sillons isolés formés par une DAM. C : Surimposition de sillons isolés formant de plus vaste dépressions.

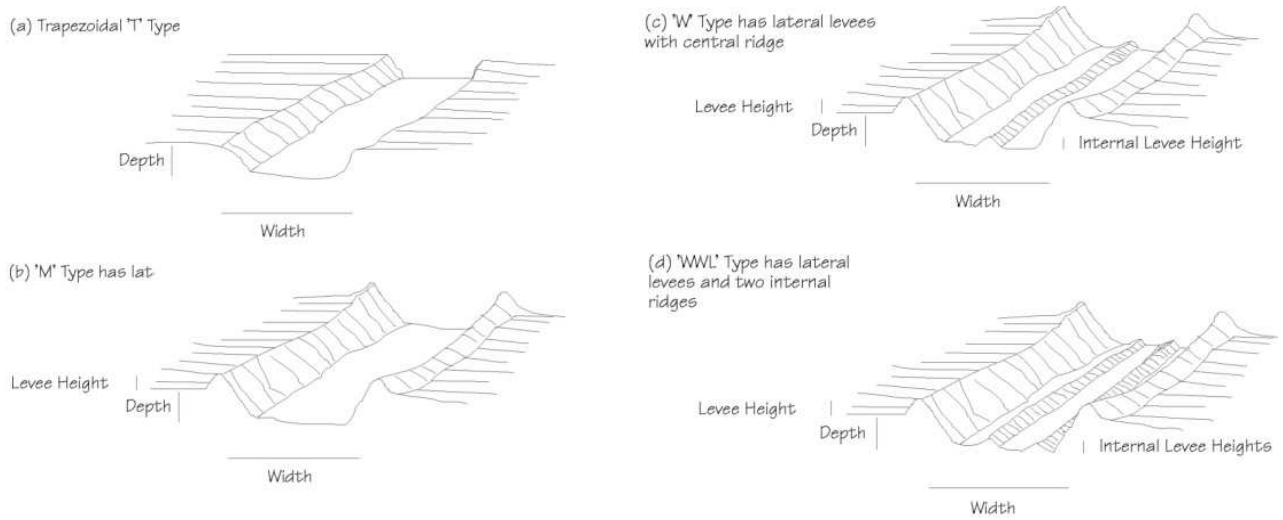
En Mer Baltique, dans un environnement homogène de sables moyens, 10 mois après l'extraction, des sillons de 2 m de large et 0,5 m de profondeur ont été observés (Krause *et al.*, 2007). Dans des environnements mixtes sablo-graveleux, les sillons seront plus larges entre 3 et 5 m mais avec des profondeurs plus faibles, comprises entre 0,2 et 0,3 m (Cooper *et al.*, 2007b; Birchenough *et al.*, 2010).

Une étude focalisée sur la morphologie des sillons (Davies et Hitchcock, 1992) distingue des sillons en fonction du type de tête d'élinde utilisé. Pour des élindes standards, de type « fixed visor » la largeur sera de 2 m et la profondeur de 0,5 m alors que pour une élinde de type « california » les sillons seront plus larges environ 3,5 m (1 m de plus que la largeur de l'élinde) mais moins profonds environ 0,35 m. Quatre types de morphologies de sillon induites par une DAM sont également différenciés (Figure 11):

- T : trapézoïdale, sillon marqué par deux flancs relativement abrupts et dont la pente est orientée vers le centre du sillon. La partie centrale est relativement plane Leur profondeur est d'environ 0,55 m et la largeur d'environ 2,8 m ;
- M : avec levée latérale, ici les parties externes du sillon sont marquées par de petites levées d'environ 0,25 m de haut. La largeur totale (sillon et levées) d'environ 3,9 m est plus importante et les pentes des flancs sont d'environ 11° ;
- W : avec levée latérale et crête centrale. La profondeur d'environ 0,35 m est moins importante mais la largeur total d'environ 4,80 m et les pentes des flanc d'environ 18° sont plus importantes ;
- WWL : avec levées latérales et deux crêtes centrales.

Ces morphologies sont associées au type de tête d'élinde utilisé. Les types M et W sont principalement induits par une tête d'élinde « california ».

Davies et Hitchcock (1992) montrent que le volume de sédiment remobilisé sur le fond est de 3 à 6 fois le volume du chargement dont le tiers par la création de levées.



	'T' Type furrow	'M' Type furrow	'W' Type furrow
Profile Depth (m)	0.547	0.522	0.342
Profile Width (m)	2.822	2.509	3.687
Levée Height (m)	n/a	0.224	0.220
Overall Width (m)	2.822	3.884	4.824
Net Cut Depth (m)	0.547	0.401	0.187
Outer Slope Angle (°)	n/a	10.98	18.07
Profile Cross Section (m^2)	0.665	0.514	0.391
Levée Cross Section (m^2)	n/a	0.113	0.083

Figure 11 : Les différentes morphologies de sillons isolés (d'après Davies et Hitchcock, 1992 in Hitchcock *et al.*, 1999).

Une intensité d'extraction plus élevée impliquera le cumul du passage de l'élinde dans un même secteur. Ce cumul engendrera des dépressions plus profondes et plus larges que les sillons isolés (Cooper *et al.*, 2007b; Krause *et al.*, 2007; Le Bot *et al.*, 2010).

Des changements de nature sédimentaire ont été observés au sein de ces sillons et dépressions. Des sédiments plus grossiers sont mis à jour par le décapage de la couverture superficielle (Kenny et Rees, 1996; Le Bot *et al.*, 2010).

Les dragues stationnaires, travaillant au mouillage, engendreront des morphologies différentes. Les dépressions seront plus ou moins circulaires, avec des diamètres et des profondeurs plus ou moins importants en fonction de l'intensité de l'extraction. En Mer Baltique, dans des sables moyens, 6 mois après une extraction stationnaire des dépressions de 4 m de profondeur sur 10-40 m de large ont été observées (Krause *et al.*, 2007). En Bassin oriental de la Manche, au large de Shoreham, des dépressions pouvant atteindre 1300 m de large et 5 m de profondeur ont été cartographiées dans un environnement mixte constitué de sables et de graviers (Birchenough *et al.*, 2010).

b. Modification hydrodynamique et effets à la côte

Le **courant** sur le fond est en général atténué au centre du site d'extraction, et s'accélère latéralement. Cependant, si le site d'extraction est allongé dans la direction du courant et de grande taille devant la profondeur d'eau, le courant sera canalisé, c'est-à-dire accéléré au centre du site (Klein, 1999). Ceci est vérifié pour la souille du CNEXO située en Baie de Seine, sous 17 m d'eau, longue de 2,5 km et large de 400 m, allongée WSW-ENE, excavée dans des sables fins (Lemoine *et al.*, 1999).

Une modification de la houle au droit du creusement mais aussi à distance de ce creusement peut être observée. Si le site d'extraction est au large de la zone de déferlement, la houle sera atténuée dans l'ombre (derrière le creusement) et sera accentuée de part et d'autre de cette ombre (Cayocca et du Gardin, 2003; Du Gardin et Cayocca, 2008).

Dès lors une extraction pourra **interagir avec le littoral** et l'érosion pourra être accentuée dans les cas suivants (Du Gardin et Cayocca, 2008; Latteux, 2008) :

- le site d'extraction est large et volumineux sous une faible tranche d'eau, proche de la côte,
- le littoral, du site d'extraction jusqu'à la côte, est caractérisé par des houles de grande amplitude, de longue période, de faible étalement directionnel, des courants importants et des sédiments marins mobilisables en abondance et de petites tailles.

Par l'intermédiaire d'une simulation numérique, Armède (1999) montre que la réfraction d'une houle est nulle sous une forte tranche d'eau (29 m) contrairement à la zone de déferlement où la réfraction serait exagérée ainsi que les taux de sédimentation et d'érosion.

Une modélisation numérique a montré que l'extraction sous une faible tranche d'eau (< 20 m) au large de Dieppe n'avait pas d'incidence sur le régime naturel des houles et donc pas d'impact sur l'érosion du littoral situé à 3 km (Baas et Lafite,).

Des extractions de granulats plus proches de la côte ont montré un **comblement des souilles** concomitantes à une érosion des côtes :

- au Japon, pour une souille située à 100 m de la côte, de 200 m de longueur et de largeur, sous 7 à 8 m d'eau, creusée de 4 m dans du sédiment sableux (Uda *et al.*, 1986);
- en Nouvelle-Zélande, pour une souille située à 1km de la côte, de 10 km de longueur, 200 m de largeur, creusée de 0,1 à 0,5 m, sous 5 à 8 m d'eau, dans des sables moyens à fins (Hilton et Hesp, 1996).

Des expériences sur modèle réduit (Migniot et Viguier, 1979; Migniot *et al.*, 1983) ont montré que ce comblement serait lié aux dimensions de la souille, à la hauteur d'eau, la hauteur des houles et aux courants.

c. Restauration

La restauration physique est considérée totale lorsque les empreintes de la drague ne sont plus détectables par les techniques d'imagerie et lorsque la composition des sédiments est redevenue celle qui précédait l'activité d'extraction ou est similaire à un point de référence (Boyd *et al.*, 2004).

L'évolution morphologique des sillons et dépressions se traduit par un élargissement et une diminution de la profondeur. Pour des substrats mixtes composés de sables et de graviers, les temps de restauration sont variables. Des temps de restauration rapide de 2-3 ans ont été plusieurs fois observés mais ne sont pas généralisables à tout type d'environnement (De Groot, 1979; Desprez et Duhamel, 1993; van Moorsel et Waardenburg, 1993; Kenny *et al.*, 1998a; Newell *et al.*, 1998; Desprez, 2000; Van Dalfsen *et al.*, 2000; Boyd *et al.*, 2003). Des temps très rapides peuvent être observés comme sur le Klaverbank ou seulement 8 mois ont été nécessaires pour restaurer des sillons de 0,3-0,5 m (van Moorsel et Waardenburg, 1993). A contrario, d'autres études ont montré des temps beaucoup plus longs. La restauration n'était toujours pas complète 7 ans après l'extraction au large de North Norfolk (Limpenny *et al.*, 2002), 8 ans après sur le Hasting Shingle Bank (Boyd *et al.*, 2004), 10 ans après dans l'estuaire de la Tamise (Boyd *et al.*, 2004) et au large de Dieppe en Bassin oriental de la Manche (Desprez *et al.*, 2010; Le Bot *et al.*, 2010).

La vitesse de restauration va évoluer au cours du temps. Au large de Dieppe, la largeur des sillons évolue essentiellement la première année, d'environ 1-3 m (Le Bot *et al.*, 2010). Sept ans après l'arrêt de l'extraction, un élargissement de 2,5 m et une diminution de la profondeur d'environ 0,15 m sont observés (Cooper *et al.*, 2007b). Pour des dépressions circulaires formées par une extraction stationnaire, la vitesse de restauration diminue de 5 à 1,2 cm.mois^{-1}, respectivement une année et 5 ans après l'arrêt des extractions (Kubicki *et al.*, 2007).

Les sillons et dépressions vont se remplir progressivement de matériels sableux issus du transit naturel ou de la remise en suspension par la surverse, le criblage et ou le passage répété de l'élinde sur le fond. Au niveau de l'estuaire de la Tamise, dans un environnement mixte de sable et de gravier, un enrichissement en gravier est observé pour une intensité de l'extraction faible et à contrario, un enrichissement en sable est observé pour une intensité forte. Ces différences sont induites par une balance négative en sable entre les rejets de criblage et de surverse et l'extraction dans un contexte d'intensité faible (Boyd *et al.*, 2003).

Figure 12 : Sable ridés dans un sillon (Crown Estate, 1994).

Toujours dans des environnements mixtes sablo-graveleux, dans des sillons isolés, des sédiments plus grossiers sont mis à jour mais présentent une accumulation de sédiments fins (Birchenough *et al.*, 2010). Des accumulations de sables ridés (Figure 12) ont été également observées dans ce type d'environnement mixte (Davies et Hitchcock, 1992; Kenny et Rees, 1996; Le Bot *et al.*, 2010).

Une synthèse bibliographique sur les temps de restauration a permis de proposer des temps moyens (Foden *et al.*, 2009) par paysage sous-marin (Connor *et al.*, 2006). Cette synthèse confirme que ce temps de restauration est dépendant de l'environnement, à savoir la profondeur d'eau, les courants tidaux et le substrat (Figure 13).

Les temps de restauration physique seront les plus élevés de l'ordre de la 20^{ne} d'années pour des environnements situés entre la côte et la limite d'action des vagues de tempête (LAVT), constitués de sédiments grossiers et soumis à des courants modérées. Pour le même type d'environnement mais avec des sédiments mixtes, les temps de restauration sont en moyenne compris entre 10-12 ans.

Environnement marin (profondeur)	Substratum	Contrainte tidale (courants)	Abbréviation
Estuaire (0-30m)	Principalement meubles, occasionnellement rocheux	Variable : modérée à forte	EV
Plateforme peu profonde (0 à limite d'influence de la houle)	Grossiers	Faible	PGF
		Modérée	PGM
		Elevée	PGE
	Hétérogènes	Modérée	PHM
	Sables à sablo-vaseux	Variable	PV
Plateforme profonde (0 à limite d'influence de la houle)	Grossiers	Modérée	PPGM
		Elevée	PPGE
	Hétérogènes	Modérée	PPHM
	Sables à sablo-vaseux	Variable	PPV

Contrainte tidale : faible= 0 à 1,8 N m−2, modérée = 1,8 à 4,0 N m−2, et élevée >4,0 N m−2

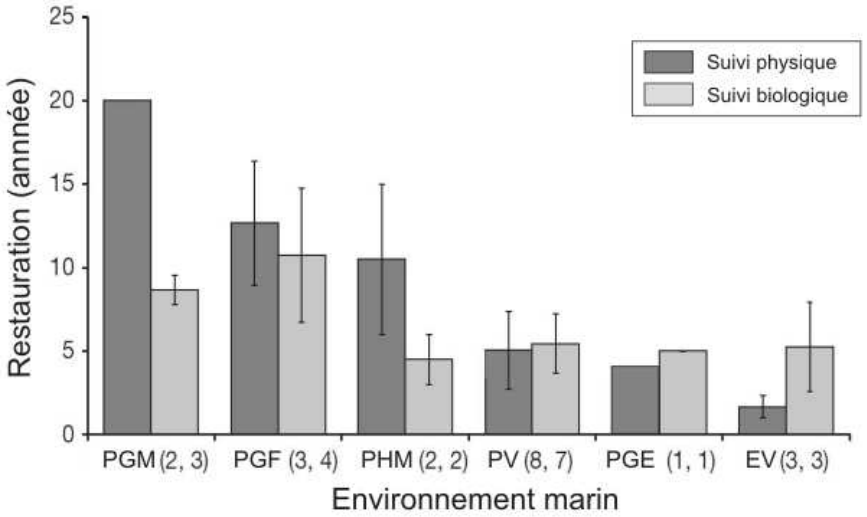


Figure 13 : Synthèse des temps de restauration étudié en fonction du milieu étudié (traduit d'après Foden *et al.*, 2009).

2. Zones d'étude

L'étude est basée sur deux sites d'extraction de granulats marins situés en Bassin oriental de la Manche, dans un contexte de plate-forme continentale soumise à un régime macrotidal dominant, l'un en Baie de Seine, l'autre au large de Dieppe.

Ces deux sites sont caractéristiques d'environnement rencontré en Bassin oriental de la Manche mais se distinguent par leurs couvertures sédimentaires et leurs régimes hydrodynamiques.

Après une description du bassin de la Bassin oriental de la Manche, les caractéristiques hydrosédimentaires et celles de l'activité d'extraction des deux sites d'étude sont brièvement présentées. Le détail des paramètres propres à la colonne d'eau nécessaire pour l'étude du panache turbide appliqué aux deux sites d'études est développé dans le chapitre 2. Les paramètres morpho-sédimentaires du milieu nécessaire à l'étude des impacts sur le fond, pour le site de Baie de Seine, sont développés dans le chapitre 3.

2.1. La Bassin oriental de la Manche

2.1.1. Géographie

La Manche est une mer épicontinentale et intracontinentale du Nord-Ouest de l'Europe. Zone maritime de transition entre l'océan Atlantique et la Mer du Nord, elle forme un couloir entre le sud de la Grande-Bretagne et le nord-ouest de la France (Figure 14).

Elle est délimitée à l'ouest de la mer Celtique par une limite arbitraire entre l'île Vierge (Finistère, France) et le cap Lizard (Cornouaille, Royaume-Uni) et à l'est par le détroit du Pas-de-Calais. Sa longueur est d'environ 500 km. Sa largeur décroît de 150 km à l'ouest à 35 km à l'est. Elle sera plus large au droit du golfe Normand-Breton (250 km) et de la Baie de Seine (170 km) et plus étroite au droit de la presqu'île du Cotentin. Sa profondeur décroît d'ouest en est, d'environ -110 m jusqu'à des profondeurs atteignant les -15 m au niveau du détroit du Pas-de-Calais.

Au niveau de la presqu'île du Cotentin, la Manche se subdivise en deux grands ensembles morpho-structuraux aux caractéristiques hydrosédimentaires différentes : la Manche Occidentale et la Bassin oriental de la Manche (Cabioch, 1968). La Manche Occidentale est un entonnoir synclinal ouvert vers l'ouest, bordé sur ses deux flancs par des massifs hercyniens : le massif armoricain côté français, le massif de Cornouailles et Devon côté britannique. Elle est plus profonde et largement influencée par les eaux atlantiques. La Bassin oriental de la Manche est le prolongement géologique des bassins sédimentaires de Paris et de Londres et est influencée par le seul grand fleuve se déversant en Manche, le long des côtes françaises, la Seine. Elle est peu influencée par les eaux atlantiques contrairement à la Manche Occidentale.

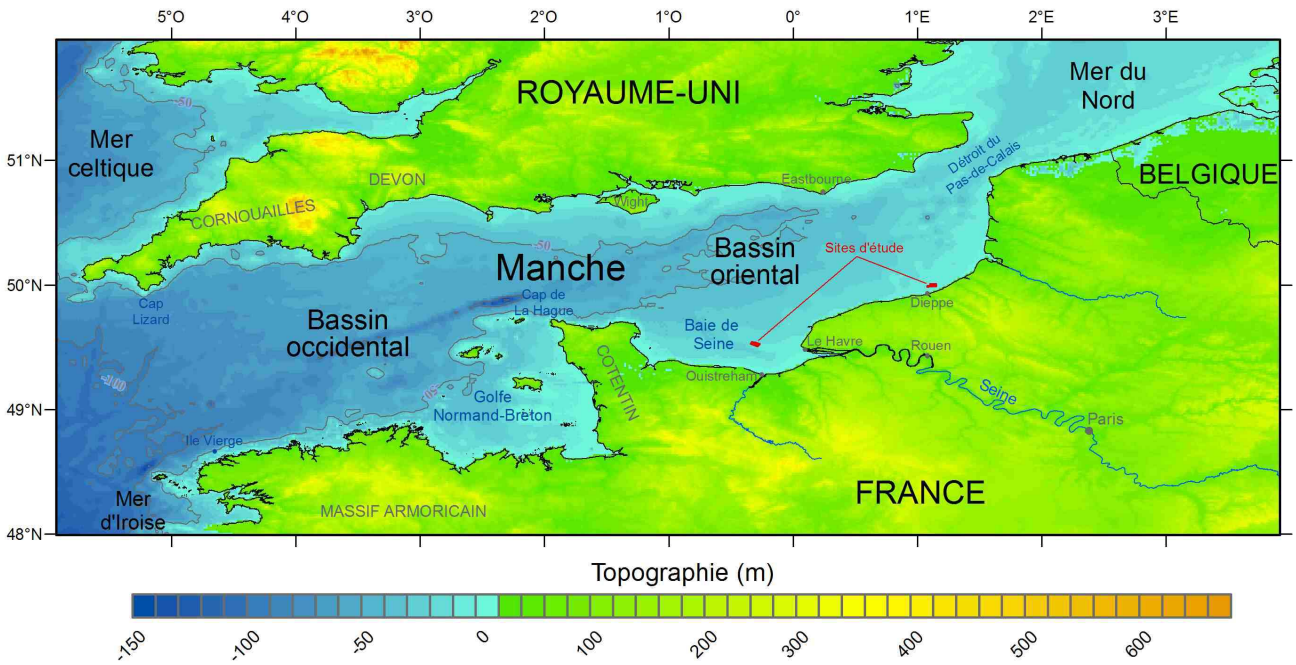


Figure 14 : Topographie de la Manche et localisation des sites étudiés (coordonnées WGS 84).

2.1.2. Géomorphologie

La morphologie de la Manche résulte principalement de l'alternance des transgressions et régressions marines du Quaternaire. Pendant les glaciations quaternaires, le niveau de la mer peut descendre à -110 m (par rapport au 0 des cartes marines), au niveau du rebord des fosses (NE du Cotentin) de la Manche (Lautridou *et al.*, 1999b) et découvre ainsi la totalité du plateau continental. Lors de la dernière période glaciaire du Würm (80 000 / 10 300 B.P.), le Pléniglaciaire (environ 25 000 ans B.P.) définit le niveau marin le plus bas du maximum glaciaire à environ -130 mètres (Lautridou, 1985). La Bassin oriental de la Manche était alors exondée. La dernière transgression, dite flandrienne, débute vers 16 000 B.P. (Larsonneur, 1971) par une phase de hausse rapide du niveau de la mer jusqu'à 7 000 B.P. où le rivage atteint alors la cote de -10 m puis par une phase de hausse plus lente.

La Bassin oriental de la Manche forme une gouttière peu profonde, légèrement inclinée (0,01%) et évasée vers l'Ouest. Sa profondeur peut atteindre 15 m au niveau du détroit du Pas-de-Calais et dépasser les 70 m au large du Cotentin. Elle est formée par une vaste plaine d'érosion sous-marine. Elle est parcourue par un réseau discontinu de dépressions marquant en partie un vaste réseau de paléovallées (paléovallée septentrionale, paléovallée médiane, paléo-Somme et paléo-Seine), creusées lors de la dernière régression et partiellement comblées par des alluvions fluviatiles déposées à cette époque et des sédiments charriés lors de la dernière transgression (Figure 15). Cette plaine est reliée au rivage par un court talus pré-littoral d'une amplitude globale de 20 m avec une pente de 0,3 à 0,5 %. Au nord du Cotentin, le socle anté-Mésozoïque forme un pédiment jalonné de roches dures plus en relief. En Baie de Seine, au large de la Seine et de la Vire et au large de la Picardie et du Nord-Pas-de-Calais, d'importants prismes sableux, modelés de bancs sableux, recouvrent la plaine d'érosion (Auffret *et al.*, 1982; Figure 15).

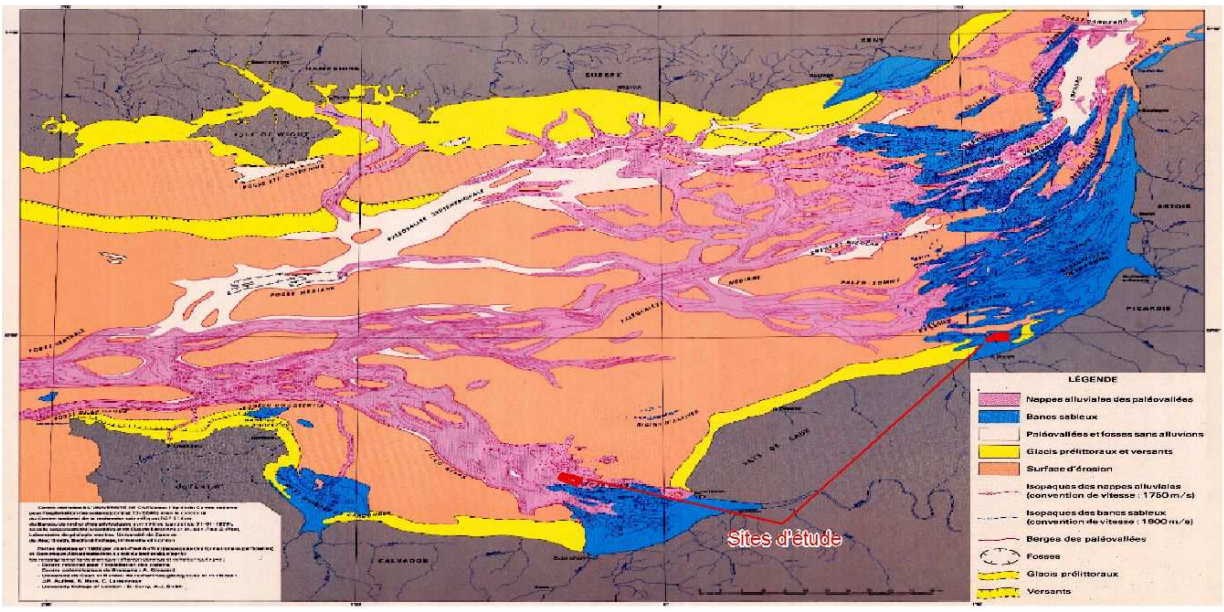


Figure 15 : Isopaques des nappes alluviales et des bancs sableux (Auffret *et al.*, 1982 ; coordonnées WGS 84).

2.1.3. Hydrodynamisme

La Bassin oriental de la Manche est une mer macrotidale dont le marnage est principalement compris entre 4 et 8 m. Le marnage est minimum (2 m) autour de l'Ile de Wight et maximum (9 m) à proximité de la Baie de Somme (Figure 16).

L'onde de marée est de type semi-diurne. Sa phase progresse d'ouest en est avec une période d'environ 12h24min. L'onde se déforme progressivement et devient dissymétrique en direction de l'estuaire de la Seine en raison de la morphologie des fonds et de la résonance de composantes de l'onde de marée.

Les courants tidaux sont globalement alternatifs. Le flot est orienté vers le Nord-Est et le jusant vers le Sud-Ouest. A proximité des côtes, en fonction de leur morphologie, cette alternance peut être déformée comme en Baie de Seine où les courants sont sub-rotatifs.

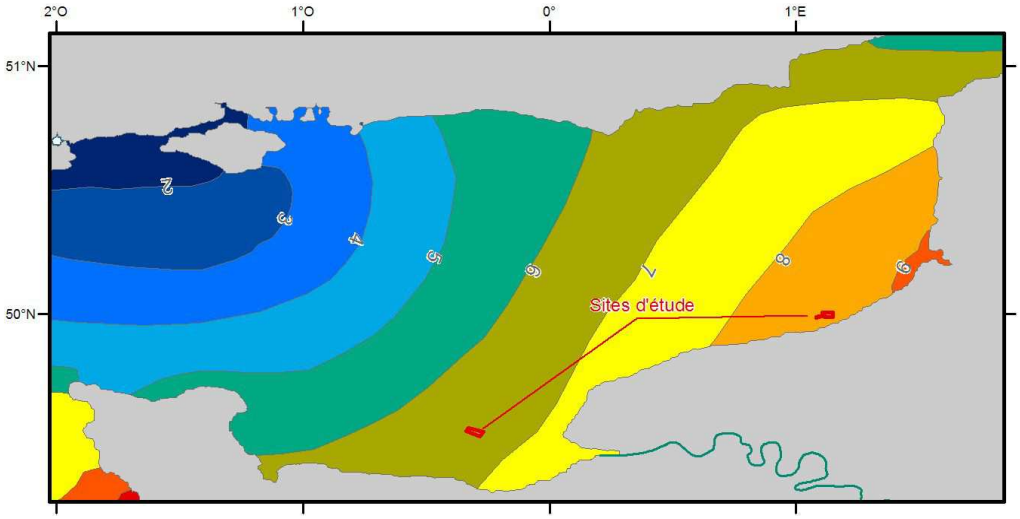


Figure 16 : Carte des marnages en Bassin oriental de la Manche en vive-eau moyenne issue du modèle Télémac (EDF-drd source SHOM ; coordonnées WGS 84).

Ces fortes marées impliquent des courants rapides, dont la vitesse en surface est supérieure à 1 m.s^{-1} sur la majeure partie de la Bassin oriental de la Manche (Figure 17 A). Ils sont particulièrement forts au large du Cap d'Antifer et au niveau des resserrements au droit du détroit du Pas-de-Calais et plus particulièrement au large de la presqu'île du Cotentin où ils dépassent les 2 m.s^{-1} en surface. Ces courants de marée sont dissymétriques avec un flot légèrement plus fort que le jusant. Cette dissymétrie est responsable d'un résiduel en direction du nord-est (Figure 17 B). Ce résiduel est confirmé par des modélisations numériques (Salomon et Breton, 1991; Bailly du Bois et Dumas, 2005) et des traçages *in situ* (Guegueniat *et al.*, 1995) qui ont permis de déterminer la circulation résiduelle des masses d'eau.

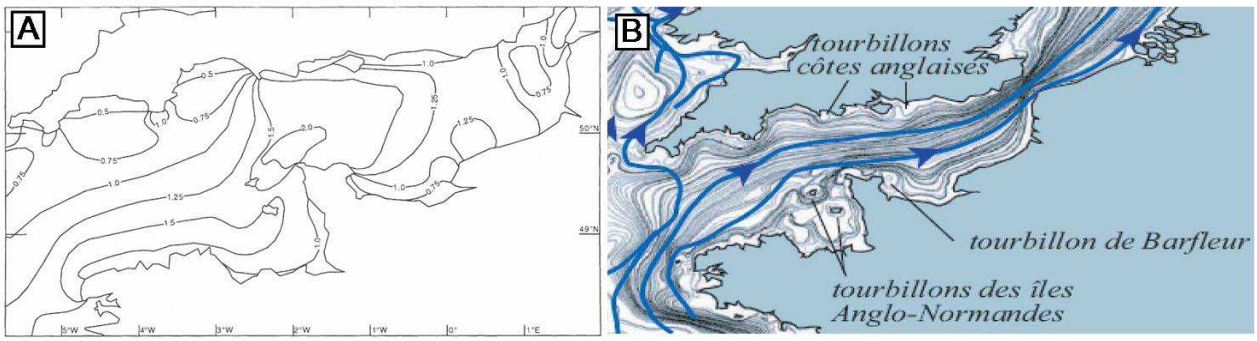


Figure 17 : Distribution en surface des vitesses maximales des courants tidaux en m.s^{-1} (A : Larsonneur *et al.*, 1982) et trajectoires résiduelles lagrangiennes issues de modélisation hydrodynamique avec un vent de secteur sud-ouest (B : Bailly du Bois et Dumas, 2005).

2.1.4. La houle

La géométrie de la Bassin oriental de la Manche implique une houle principalement de type « mer de vent ». En effet, les fetchs sont réduits pour quasiment toutes les directions de vents. Les houles du large, en provenance de l'Océan Atlantique ou de la Mer du Nord, ne sont observées que sur de petites surfaces de la Bassin oriental de la Manche. La Baie de Seine est protégée de ces houles par la presqu'île du Cotentin (Grochowski *et al.*, 1993). De plus ces houles sont très sensiblement amorties par les faibles profondeurs et les phénomènes de réfraction.

La provenance des houles est la plupart du temps analogue à celle des vents locaux. Les houles les plus fortes se constituent entre octobre et mars de provenance Ouest à Sud-Ouest et de Nord-Ouest. Sur l'ensemble du bassin, la hauteur significative est souvent inférieure à 2 m avec une période moyenne de 5 à 7 s. Lors des tempêtes décennales les hauteurs significatives dépassent les 5 m (Augris, 2004).

2.1.5. Caractéristiques hydrologiques

Hormis dans les zones de transition et d'extension des estuaires, la salinité varie peu entre 34 et 35. Des eaux plus douces concernent les zones côtières et plus particulièrement l'estuaire de la Seine.

Les eaux sont homogènes sur la verticale hormis au niveau de l'estuaire de la Seine, du fleuve côtier se développant le long des côtes françaises (Brylinski *et al.*, 1991) et des petits estuaires du nord de la France

où une stratification des eaux est observée (Figure 18). La zone d'influence de ces estuaires varie au cours de l'année en fonction de leur débit, des vents et des coefficients de marée. Cette zone est plus étendue en période de crue, de décembre à mars. L'apport annuel en eaux douces est d'environ 25 km^3, principalement par les fleuves côtiers dont la Seine représente la moitié des apports totaux. Les résurgences de la nappe de la craie, le long de la côte normano-picarde représentent un apport non négligeable (Laignel *et al.*, 2008).

Les variations thermiques annuelles sont contrastées, avec des amplitudes pouvant dépasser les 10°C. En hiver un gradient positif des températures est observé en direction du nord-est. En été, les eaux plus froides en provenance de l'Atlantique vont être à l'origine d'un gradient positif en direction de la côte française.

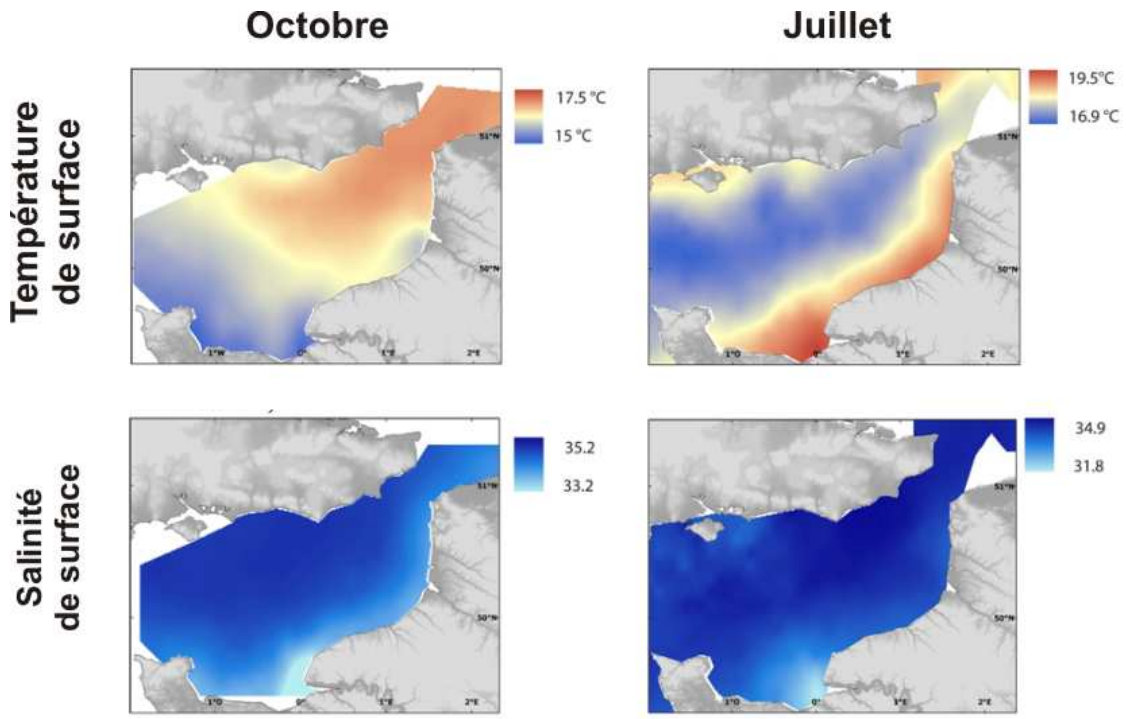


Figure 18 : Moyennes des température et salinité en surface pour les mois d'octobre et juillet de 1989 à 2006 (Carpentier *et al.*, 2009).

Les MES englobent du matériel minéral et du matériel organique détritique ou vivant (phytoplancton). La part liée au phytoplancton est surtout importante durant les périodes productives au printemps et en été. Ces MES ont pour origine l'Atlantique, l'érosion des fonds ou du trait de côte de la Manche, l'activité biologique et la remise en suspension des dépôts intertidaux (Dupont *et al.*, 1993; Lafite *et al.*, 2000). La contribution liée aux fleuves semble peu importante, de l'ordre de 5% (Velegrakis *et al.*, 1997). Les concentrations en MES sont globalement comprises entre 1 et 2,5 $mg.L^{-1}$ (Figure 19). Toutefois les concentrations les plus élevées, dépassant la dizaine de $mg.L^{-1}$, s'observent le long des côtes et au niveau des estuaires. Le long des côtes normano-picardes et du Sussex, la dispersion de la craie des falaises enrichit fortement les concentrations. Les estuaires, notamment celui de la Seine, présentent des concentrations atteignant plusieurs dizaines de $mg.L^{-1}$ et ont une zone d'influence sur la turbidité plus importante

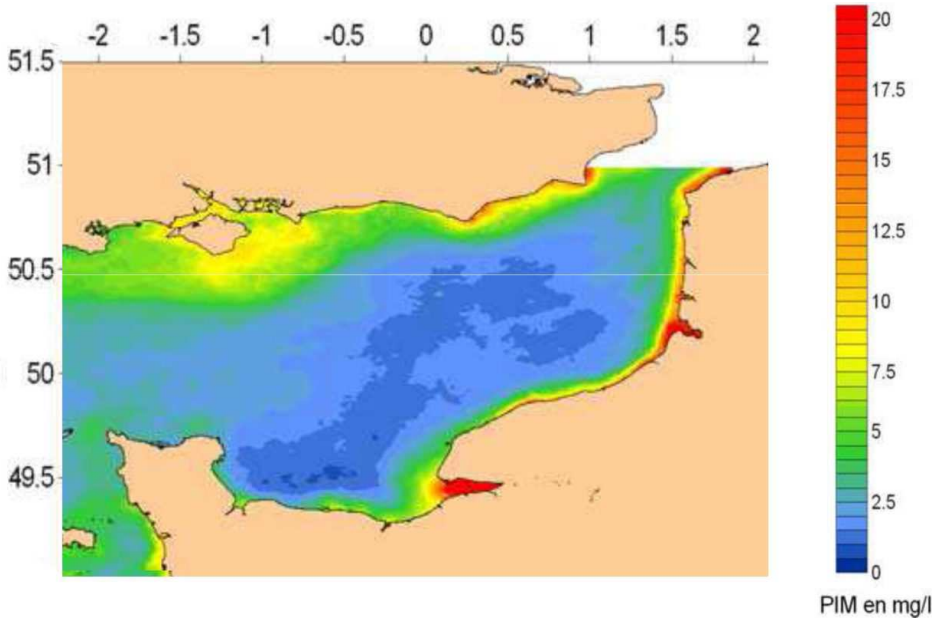


Figure 19 : Moyenne annuelle des concentrations en matière inorganique (PIM) d'après les images claires du satellite MODIS enregistrées en 2007 (Gohin *et al.*, 2005).

2.1.6. Sédiments, corps sédimentaires et peuplements benthiques

La Bassin oriental de la Manche est principalement recouverte par des sédiments sablo-graveleux. Toutefois, la variabilité de la tension de cisaillement est responsable d'une couverture sédimentaire superficielle hétérogène étalée des vases jusqu'au cailloutis (Figure 20).

Les dépôts les plus grossiers associés aux forts courants de marée et à une tension de cisaillement importante s'étalent sur de grandes distances au nord du Cotentin, au large de la Haute-Normandie et au niveau du détroit du Pas-de-Calais. Les sédiments de type vase sont relativement rares et sont principalement observés en estuaire et dans les parties internes des baies comme en Baie de Seine (Deloffre, 2005; Delsinne, 2005), Baie de Somme (Dupont, 1981) et pour les autres baies du nord de la France (Deloffre, 2005). Des gradients d'affinement sont observés depuis le Cotentin jusqu'à l'estuaire de la Seine d'une part, et depuis le Cap d'Antifer à l'Ouest et le détroit du Pas-de-Calais à l'Est en direction de la Baie de Somme et du Sussex (Royaume-Uni) d'autre part (Figure 21).

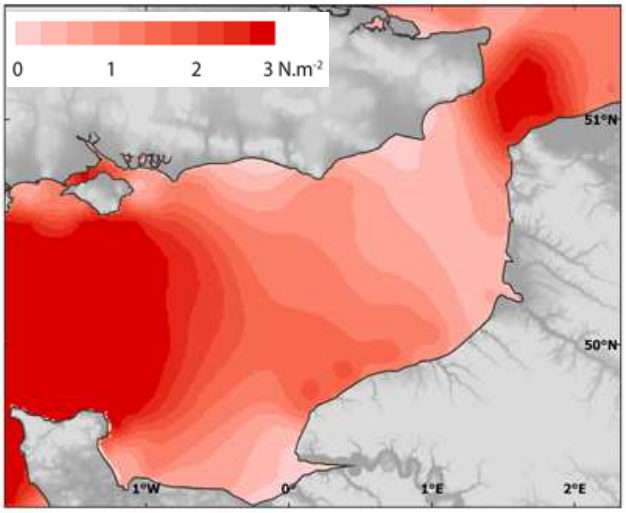


Figure 20 : Tension de cisaillement sur le fond d'après le modèle d'Aldridge et Davies (Carpentier *et al.*, 2009).

Les sédiments marins en Bassin oriental de la Manche présentent une organisation verticale. Au-dessus du substratum rocheux, un pavage de cailloutis, immobiles dans les conditions hydrodynamiques actuelles, peut être observé et surmonté, par endroits, d'une couche sablo-graveleuse mobile (Le Bot, 2001). D'importants prismes sablo-graveleux, modelés de dunes et de bancs sableux, sont en particulier accolés à la Baie de Seine, à la Baie de Somme et aux autres petits estuaires de Picardie et du Nord de la France (Figure 15 et Figure 21).

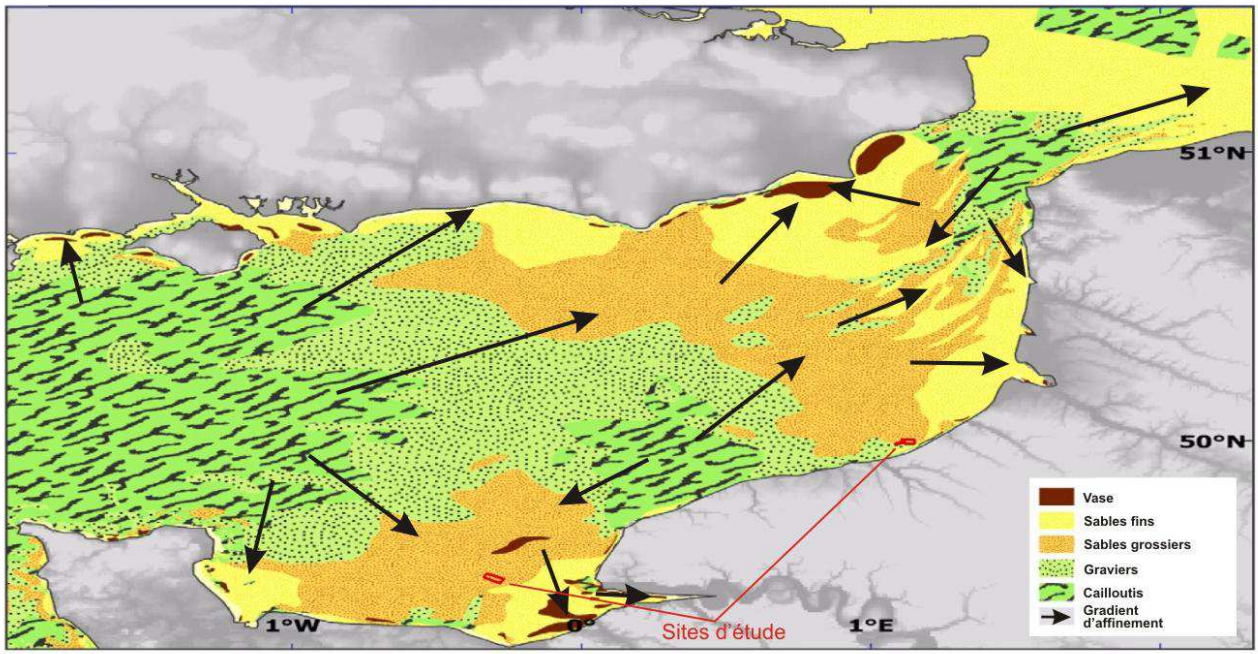


Figure 21 : Carte des sédiments superficiels de la Bassin oriental de la Manche (modifiée par Carpentier *et al.*, 2009 d'après Larsonneur *et al.*, 1979 ; coordonnées WGS 84), des gradients d'affinement (Larsonneur *et al.*, 1978).

Le peuplement benthique en Bassin oriental de la Manche est fortement lié à la profondeur d'eau, au type de sédiments superficiels et aux conditions hydrodynamiques. Les peuplements benthiques sont définis aujourd'hui par certaines espèces communes, grâce à un référentiel d'habitat nommé EUNIS (European Nature Information System), mis en place depuis 1997 par l'Agence Européenne pour l'Environnement. Les travaux de synthèse de l'Ifremer ont permis de produire une carte des peuplements benthiques de la Bassin oriental de la Manche à partir de nombreux travaux anciens (Figure 22).

Les peuplements de cailloutis concernent plus de 70 % de la surface du bassin. Cependant la biomasse y est relativement faible. Un gradient des peuplements est observé en se rapprochant du littoral plus particulièrement en direction de l'estuaire de la Seine et de Newhaven (Royaume-Uni). Les peuplements infralittoraux et de sédiments fins y sont plus développés. Induite en partie par un contexte morpho-sédimentaire plus hétérogène, une plus grande variabilité des peuplements est observée à l'est, de Dieppe jusqu'au détroit du Pas-de-Calais.

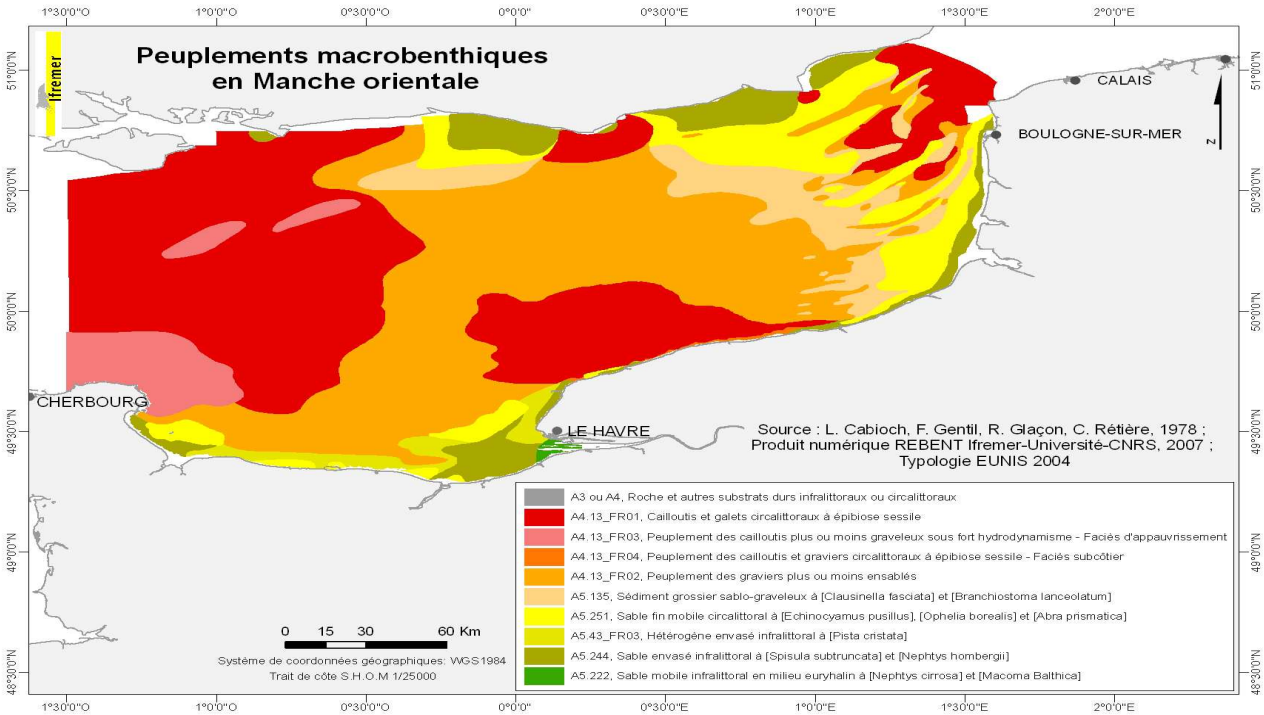


Figure 22 : Cartographie des peuplements benthiques (d'après Cabioch *et al.*, 1978 ; coordonnées WGS 84).

2.1.7. L'extraction de granulats marins

Les extractions de granulats marins en Bassin oriental de la Manche exploitent les gisements siliceux des terrasses des paléovallées et des cordons de galets littoraux. Les carriers titulaires des permis d'exploitation sont français et anglais. La limite géographique de l'origine des exploitants est la Z.E.E. (Figure 23). Les extractions sont essentiellement réalisées par des DAM. Côté anglais, des dragues à godets et des dragues statiques sont encore en activité. Les législations ne sont pas identiques en France et Outre-Manche. Par exemple, l'extraction de granulats au Royaume-Uni autorise un criblage à bord de la drague, ce qui est interdit en France.

Côté français, l'historique des extractions est différent d'un permis à l'autre. Certaines zones ne sont plus extraites depuis plusieurs années, d'autres sont exploitées depuis plus de 10 ans (Dieppe et le chenal du Grand Port du Havre), d'autres sont en activité depuis peu (GMN et GMO) et enfin d'autres permis sont au stade de l'exploration. En France les DAM sont essentiellement étrangères (anglaise, belge et néerlandaise). Celles-ci ont des capacités de chargement variables, possèdent une unique élinde aspiratrice et peuvent évacuer leurs surverses soit par sabords latéraux soit par puits central. Enfin les surfaces extraites et les intensités d'extraction sont directement liées aux arrêtés préfectoraux propres à chacun des permis. De façon générale, les exploitations sont de faibles dimensions et de faibles intensités.

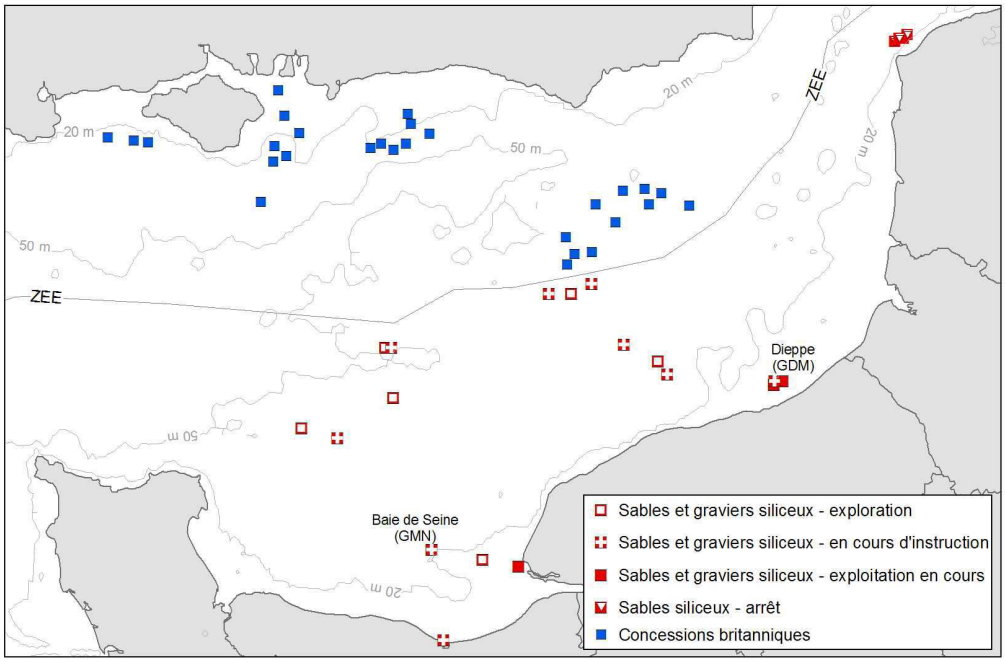


Figure 23 : Localisation des extractions (permis et projets) de granulats en Bassin oriental de la Manche (source Ifremer).

2.2. Le site de Baie de Seine

2.2.1. Localisation géographique

Il est situé en Baie de Seine orientale dans le Domaine Public Métropolitain (*i.e.* bande des 12 milles), à environ 30 km au Nord de Ouistreham et à 30 km à l'Ouest du Havre (Figure 24). Les coordonnées du site sont données dans l'Annexe 1.

La profondeur d'eau moyenne est de 20 à 22 m CMH (côte marine du Havre).

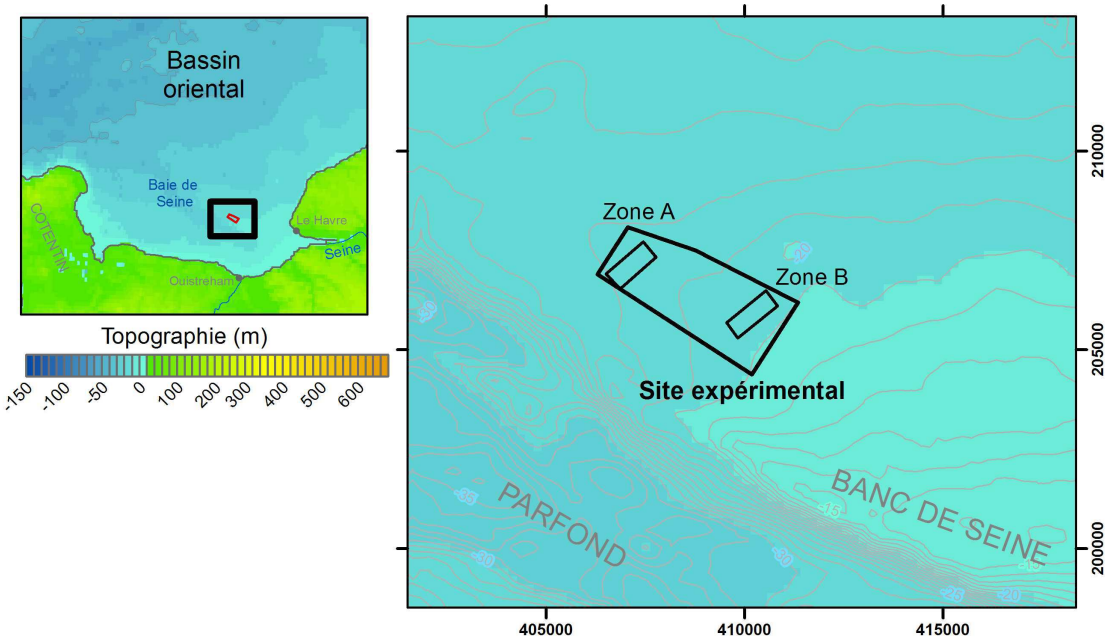


Figure 24 : Localisation du site de la Baie de Seine (coordonnées Lambert 1). Gauche : localisation dans le bassin oriental de la Manche. Droite : localisation sur le banc de Seine.

2.2.2. Contexte géomorphologique et caractéristiques géologiques du gisement

La Baie de Seine est une vaste vallée dont le substratum est principalement constitué par des calcaires du Jurassique moyen, Jurassique supérieur et Crétacé. Ce substratum est entaillé par la paléo Seine successivement creusée et comblée lors des cycles glaciaires du Quaternaire. Elle se développe de l'estuaire de la Seine jusqu'à la fosse du Cotentin (Quesney, 1983; Lericolais, 1997; Lautridou *et al.*, 1999a). Dans sa partie orientale, depuis l'estuaire de la Seine jusqu'au méridien de l'Orne (Alduc, 1979), elle est orientée vers l'Ouest. Dans sa partie occidentale elle se réoriente vers le NO (Alduc, 1979; Larsonneur et Walker, 1982). Son tracé est conservé dans la bathymétrie actuelle (Alduc, 1979) puis disparaît sous le banc de Seine et sous le prisme sédimentaire estuarien (Auffret et Larsonneur, 1971). Comme la plupart des paléovallées de la Manche, le paléo-Seine est partiellement comblée par des nappes alluviales plio-quaternaires. Son remplissage alluvial présente deux morphologies de nappes : (i) des nappes alluviales étagées dans sa partie supérieure (amont), et (ii) des nappes alluviales emboîtées à l'approche des fosses au Nord du Cotentin (Auffret *et al.*, 1980). Plus récemment, la réalisation et l'interprétation de profils sismiques (Benabdellouahed, 2011) montrent que les nappes alluviales du secteur d'étude peuvent correspondre à la fois à des nappes étagées (N4, Figure 25) saaliennes (glaciation du Riss 300 000-120 000 B.P.) et weichsélienne (glaciation du Wurm 80 000-10 300 B.P.) et à des nappes emboîtées (N1 et N2, Figure 25). La carte des isopaques des nappes alluviales et des bancs sableux (Auffret *et al.*, 1982) montre que la majorité du site d'étude présente une épaisseur des nappes comprise entre 10 et 15 m. Le dispositif de terrasses étagées est expliqué par une succession des cycles glacioeustatiques dans le cadre d'un lent soulèvement du Bassin parisien estimé à environ 150 m durant le Quaternaire (Wyns, 1977; Pomerol, 1978; Lefebvre *et al.*, 1994; Lautridou *et al.*, 1999b).

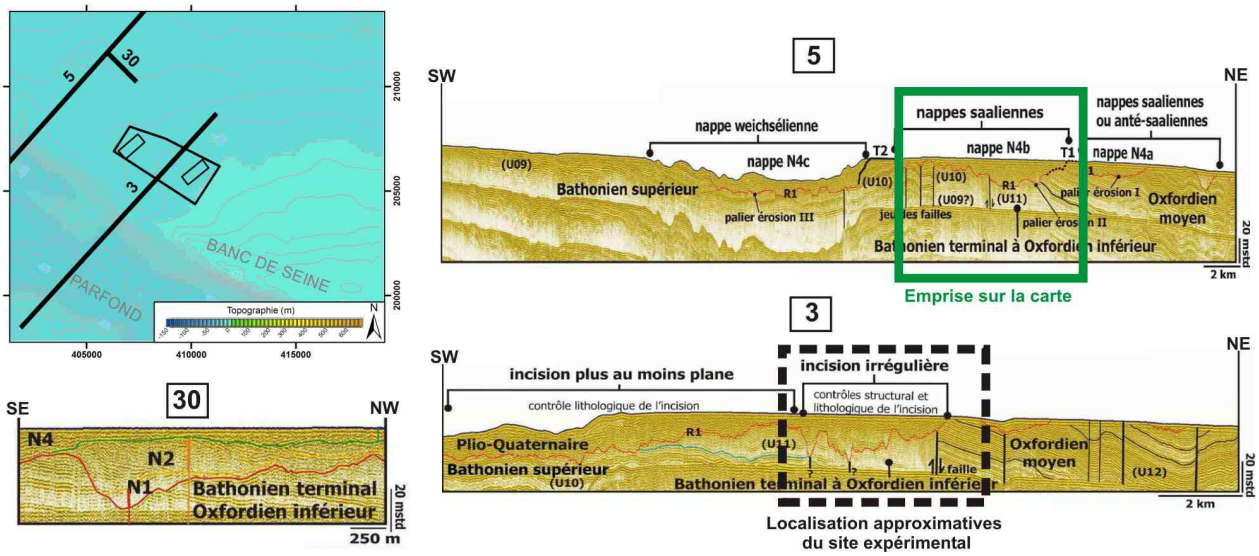


Figure 25 : Interprétation de profils sismiques réalisés à proximité du site de Baie de Seine (d'après Benabdellouahed, 2011).

Dans la partie orientale de la Baie de Seine, le prisme sédimentaire de l'estuaire de la Seine et le banc de Seine (holocène) se surimposent partiellement aux nappes. Le site d'étude se situe à l'aplomb des terrasses alluviales de la paléo-Seine et sur le flanc nord du Banc de Seine.

Le banc de Seine a débuté sa mise en place lors de la transgression flandrienne au cours de l'Holocène dès 7 000 B.P. (Alduc, 1979). Ce banc sableux occupe la partie septentrionale de la paléo-Seine. Il présente un allongement parallèle à cette incision. A l'interface de ces terrasses et de ce banc, des galets marins repris par le régime rapide du début de la transgression flandrienne peuvent s'y intercaler.

Le banc s'est surimposé aux deux nappes alluviales pléistocènes de la dernière glaciation du Würm. Ce sont ces nappes qui constituent le gisement de granulats marins aujourd'hui exploité. La nappe récente correspond à la nappe inférieure encore appelée cailloutis de fonds correspondant à la dernière vallée de bas niveau marin à la fin de la période glacière du Würm (Auffret et d'Ozouville, 1985b). Celle-ci est composée de silex peu altéré. La nappe ancienne est constituée de matériel peu altéré, composé de silex mal roulé et gélifracté (Guyader, 1977) et datée du Würm ancien (35 000 B.P., Lefebvre *et al.*, 1994).

Les carottes réalisées en 1972 par le BEICIP et 1976 par le BRGM ne permettent pas de dater les dépôts de nappes au droit de la zone d'étude et de distinguer clairement la découverte du gisement. Cependant, elles apportent des informations sur les variabilités latérale et verticale de la nature et de la granulométrie de ces dépôts dans le secteur.

2.2.3. Contexte sédimentaire

Le site d'étude est situé sur une couverture sableuse grossière (Larsonneur *et al.*, 1979), discontinue (Figure 26 ; Auffret et d'Ozouville, 1985a).

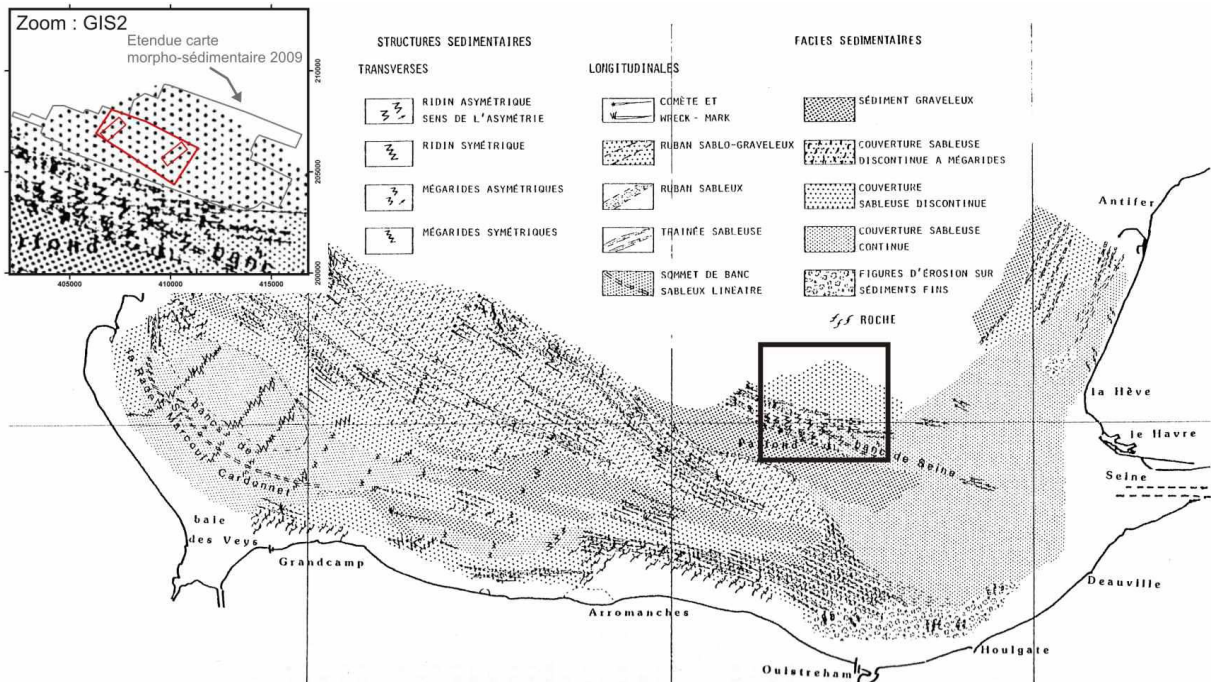


Figure 26 : Localisation du secteur expérimental sur la carte des faciès et figures sédimentaires d'Auffret et d'Ozouville (Auffret et d'Ozouville, 1985a).

Le banc de Seine, allongé NO-SE, constitué d'une couverture sableuse et continue, est situé à proximité de la limite sud du secteur expérimental. Des figures de transit sableux, dunes symétriques et traînées sableuses ont été cartographiées sur le banc de Seine, et dans son prolongement à l'Ouest. Ces ensembles sableux mobiles cartographiés, à moins de 2 km au sud du secteur expérimental, témoignent d'un transit sédimentaire orienté ouest-est (Auffret et d'Ozouville, 1985a).

2.2.4. Contexte hydrologique

Le site est situé dans la zone de transition des eaux estuariennes de la Seine avec les eaux marines. D'après la classification de Connor *et al.* (2006), les salinités comprises entre 32 et 34 correspondent à des zones côtières avec une influence des eaux douces. Toutefois, la différence de température fond-surface inférieure à 0,5° C., indique des eaux non-stratifiées

Le site est soumis à une forte influence de la marée avec un marnage compris entre 6 et 7 m.

Les courants sont sub-alternatifs avec un résiduel faible orienté vers le NE. Les courants sont relativement forts au flot et au jusant atteignant 0,9 $m.s^{-1}$ en surface.

Le milieu soumis à une mer de vent peut être relativement agité. Les houles présentent une hauteur significative inférieure à 1,80 m et des périodes de 7,9 s pendant 95 % du temps (CETMEF, 2010). Selon la classification simplifiée de Foden *et al.* (2009) d'après Connor *et al.* (2006) les caractéristiques hydro-sédimentaires du site, le répertorient en **paysage marin de type PGE** (plate forme peu profonde, à substratum grossier et à contrainte tidale forte).

2.2.5. Caractéristique de l'extraction

Le site de Baie de Seine correspond à une extraction expérimentale encadrée par un Titre Minier prorogé, délivré par le Ministre de l'Industrie et par une autorisation d'ouverture de travaux miniers (A.O.T.M.) qui a été accordée par le Préfet de Seine Maritime après enquête publique (Arrêté Préfectoral du 18 juillet 2005) au Groupement d'Intérêt Economique des Granulats Marins de Normandie (GIE GMN).

Ce site expérimental d'une superficie de 8,63 km^2 inclut deux zones d'extraction : la zone A et la zone B de 0,62 km^2 chacune. Ces deux zones forment des rectangles d'environ 1,2 km de long et de 0,5 km de large, étirés selon un axe NNE-SSO.

L'extraction expérimentale s'y est déroulée sur 4 ans, du mois d'octobre 2007 à celui de juin 2011. Conformément à l'Arrêté Préfectoral :

- les années administratives sont définies du début du mois d'octobre à la fin du mois de septembre de l'année suivante,
- l'extraction n'est autorisée que pour deux périodes : d'octobre à mi novembre et de février à fin juin,
- les extractions ont commencé par la zone A (du mois d'octobre 2007 à celui de novembre 2008) puis se sont poursuivies sur la zone B (du mois de novembre 2008 à celui de juin 2011).

Les volumes annuels exploités pour chacune de ces sous-zones sont synthétisés sur la Figure 27. Les zones A et B sont distingués en sous-zone Nord et Sud du fait du découpage dans le temps des extractions en fonction des moitiés sud et nord de chacune de ces deux zones (Figure 28 A).

Ces volumes ont été extraits par de nombreuse DAM dont certaines présentaient une surverse par puits (Charlemagne, VlanDeren XXI et AndréL) et d'autres une surverse par sabords (SandHarrier, Scelveringhe, SandFulmar et SandFalcon).

Les extractions sur ce site sont indépendantes de l'heure de marée grâce aux zones de déchargement situées dans les bassins du port du Havre, donc indépendantes de la hauteur d'eau.

Précisons que l'étude ne concerne que les impacts générés par les 3 premières années d'extraction (de 2007-08 à 2009-10).

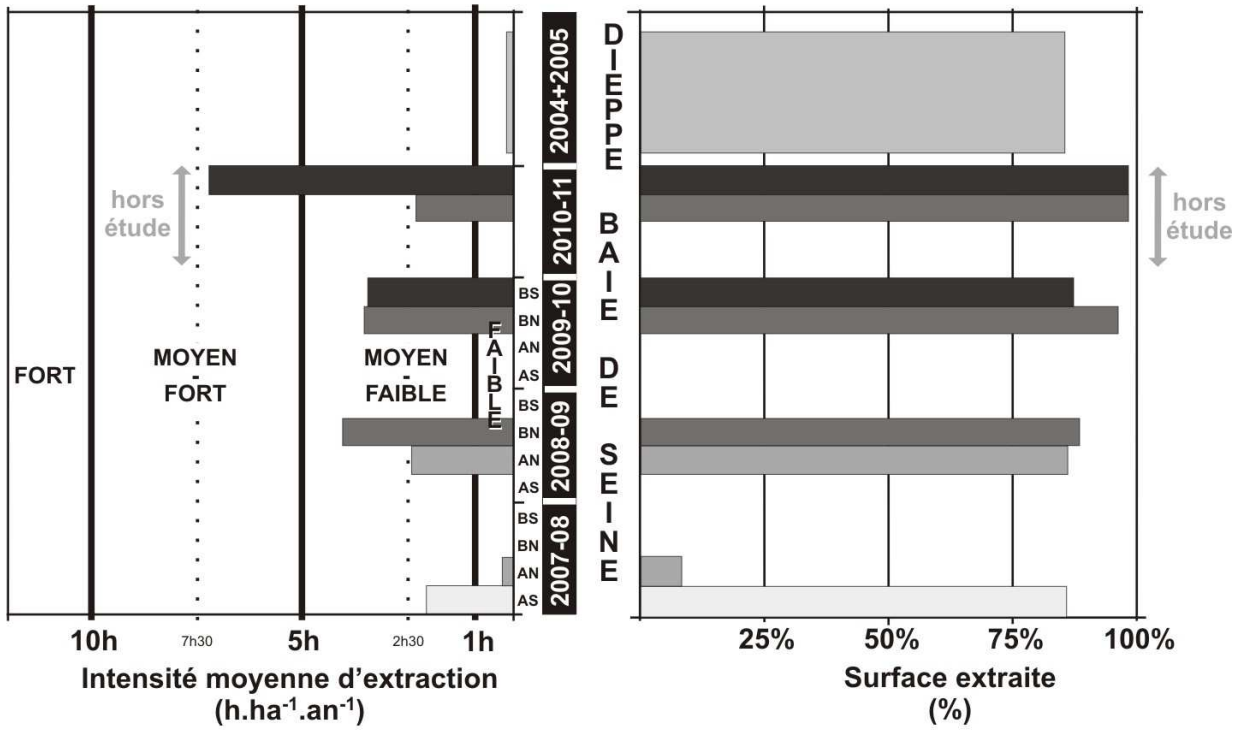


Figure 27 : Intensité moyenne d'extraction annuelle (gauche) et surfaces extraites (droite) sur les sites de Baie de Seine et de Dieppe.

Une restauration expérimentale a été testée sur la sous-zone A Sud (janvier 2009) après l'arrêt des extractions sur la zone A (Figure 28 A). Celle-ci a consisté en un nivellement des fonds par un outil analogue à une charrue tractée par la navette du port du Havre (Figure 28 B). Précisons qu'un premier essai de nivellement non concluant avait été opéré en septembre 2008.

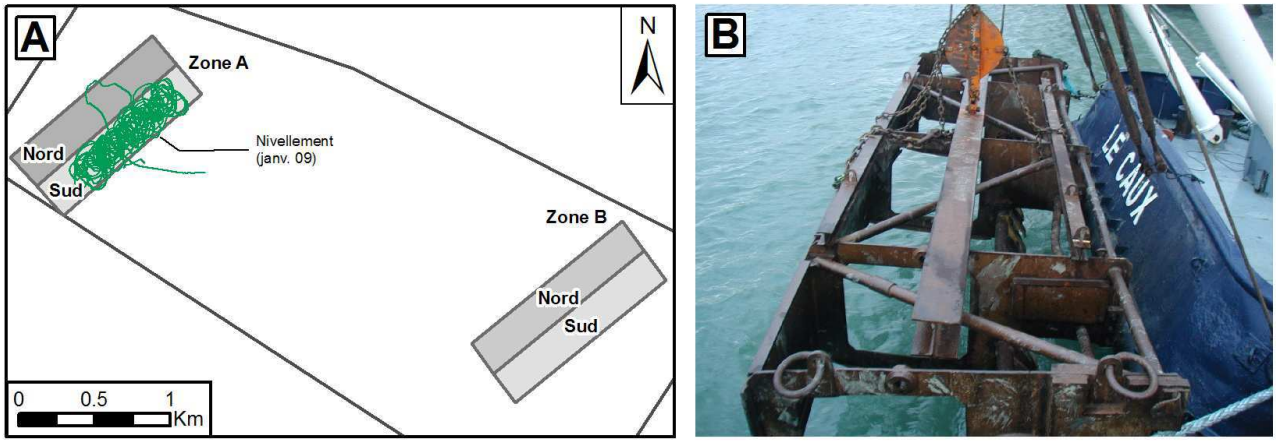


Figure 28 : Restauration expérimentale : l'opération de nivellement.
A : Localisation du nivellement de janvier 2009 et des sous-zones d'extraction. B : Photographie de l'outil de nivellement.

2.3. Le site de Dieppe

2.3.1. Localisation géographique

La zone d'étude se situe à cinq kilomètres au large des côtes de Haute-Normandie à proximité du port de Dieppe (Figure 29). La profondeur est comprise entre 10 à 15 m CMH (côte marine du Havre). Les coordonnées du site sont données dans l'Annexe 1.

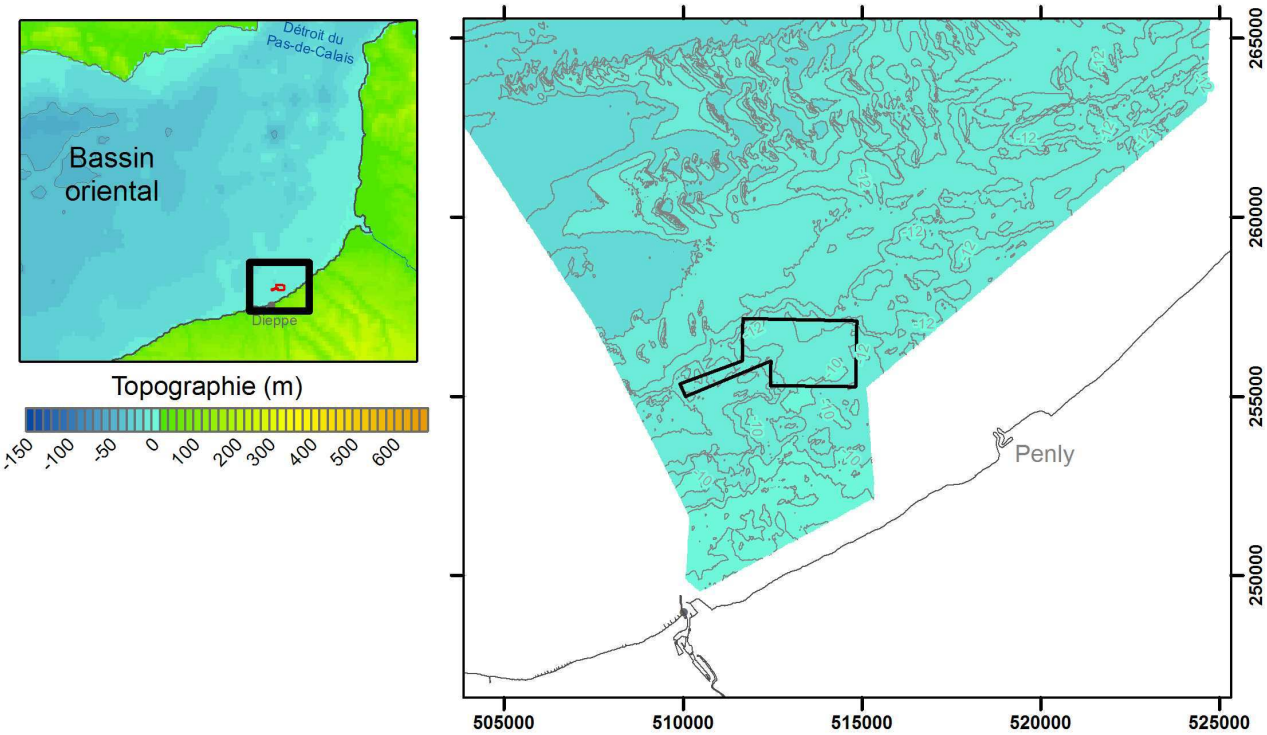


Figure 29 : Localisation du site au large de Dieppe. Gauche : localisation dans le bassin oriental de la Manche. Droite : délimitation du site au large de Dieppe (coordonnées Lambert 1).

2.3.2. Contexte géomorphologique et caractéristiques géologiques du gisement

Le substratum du site d'étude est formé des craies du Crétacé supérieur et plus précisément de celles du Turonien et du Sénonien (Auffret et Larsonneur, 1971). Ces formations anciennes sont recouvertes par le prisme sédimentaire littoral picard qui s'est mis en place au cours de la transgression holocène (Auffret *et al.*, 1982)

La zone d'étude est localisée sur un cordon de galets fossiles marquant une ancienne ligne de rivage et mis en place sous l'effet d'une dérive littorale similaire à celle observée aujourd'hui sur la côte de Haute-Normandie (Claveleau, 2007). Ce cordon s'est développé au cours des différents cycles glaciaires du Quaternaire sous l'effet d'une dérive littorale dirigée vers le N-E. Il se retrouve aujourd'hui submergé, conséquence de la remontée du niveau marin de la transgression holocène (Claveleau, 2007). Les dimensions de ce cordon de galet ont été évaluées à 12 km de long, 4 km de large, et à 6 à 7 m d'épaisseur. Claveleau (2007) distingue trois ensembles (proximal, médiane et distal) découpés des paléovallées et formés de 4 unités progradantes (Figure 30). Ce cordon est essentiellement formé de galets siliceux issus de l'érosion de falaise littorale crayeuse riche en niveau à silex.

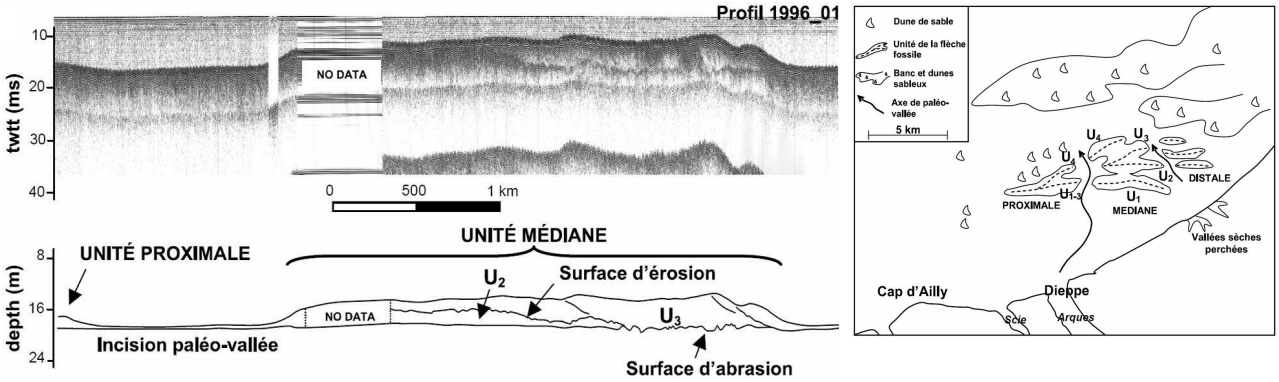


Figure 30 : Profil sismique Nord-Sud montrant les unités progradantes au niveau de l'unité médiane du cordon de galet (Claveleau, 2007).

2.3.3. Contexte sédimentaire

La cartographie de Cabioch et Glaçon (1977) montre qu'antérieurement aux extractions (1980), le secteur était soumis à un gradient sédimentaire décroissant vers l'Est induit par une diminution des vitesses des courants (Figure 31). Cailloutis, graviers, sables graveleux et sables fins à moyens se succèdent progressivement à l'O, dans la moitié occidentale, la moitié orientale et à l'Est du site. Des acquisitions sonar et des prélèvements sédimentaires ont permis d'identifier une importante couverture de sables fins à moyens au dessus des sédiments grossiers à l'E-SE du site. Cette couverture sableuse est souvent façonnée de petite dunes (Augris, 2004; Babut et Le Bot, 2005). La nature du sédiment est hétérogène, dominée par des débris de silex pour les graviers, par des débris coquilliers pour les sables très grossiers à grossiers et de grain de quartz pour les sables moyens aux silts (His, 2005a).

Le secteur montre donc une **variabilité spatiale à l'échelle du site d'extraction et à l'échelle pluri-kilométrique** importante.

La comparaison et la synthèse de cartographie sédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime réalisées en 1989, 1992, 2000 montrent que les surfaces de la couverture sableuse ont augmenté de 20 % de 1989 à 2000 (Augris, 2004). Ces résultats indiquent que la variabilité de la couverture sédimentaire est importante à **l'échelle décennale**.

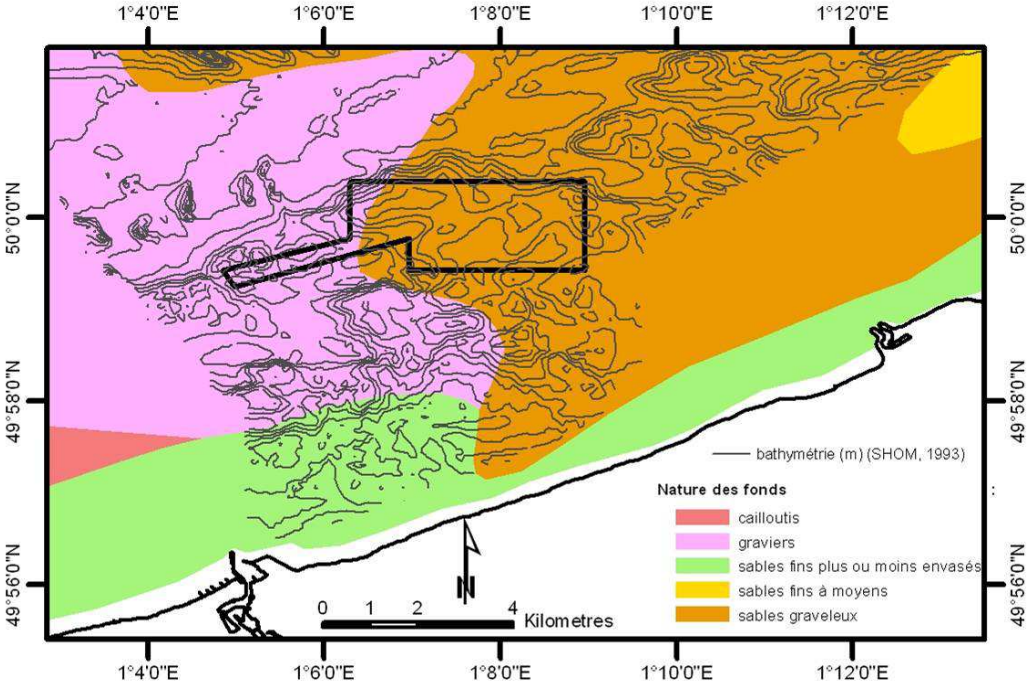


Figure 31 : Carte sédimentaire du site d'étude (d'après Cabioch et Glaçon, 1977).

La dynamique sédimentaire est importante le long de la côte normano-picarde, principalement orientée SO NE. A partir des nombreuses figures sédimentaires observées dans le secteur (dunes et rubans sableux). Les figures sédimentaires cartographiées sur le site montrent un transit orienté vers l'E-NE conforme au transit régional (Augris, 2004).

2.3.4. Contexte hydrologique

D'après la classification de Connor et al. (2006), les salinités comprises entre 32 et 34 correspondent à des zones côtières avec une influence des eaux douces. Toutefois la différence de température fond-surface inférieure à 0,5° C, indique des eaux non-stratifiées.

Le site est soumis à une forte influence de la marée avec un marnage compris entre 8 et 9 m.

Les courants sont alternatifs avec un résiduel orienté vers le NE. Les courants sont relativement forts au flot et au jusant atteignant 1,10 $m.s^{-1}$ en surface.

Le milieu soumis à une mer de vent peut être relativement agité. Les houles présentent une hauteur significative inférieures à 1,60 m et les périodes sont comprises entre 3 et 6 s. Selon la classification simplifiée de Foden *et al.* (2009) d'après Connor *et al.* (2006) les caractéristiques hydro-sédimentaires du

site le répertorient en **paysage marin de type PGE** (plate forme peu profonde, à substratum grossier et à contrainte tidale forte).

2.3.5. Les caractéristiques de l'extraction

Le site de Dieppe correspond à la concession des Granulats Marins de Dieppe accordée au Groupement d'Intérêt Economique (GIE) « Graves de Mer » le 17 avril 2010 par décret.

La superficie du site d'extraction est de 6,1 km^2. Un autre permis d'extraction attribué au GIE « Gris Nez », moins grand (0,9 km^2), est situé à proximité vers l'Est de la concession « Graves de Mer ».

Les extractions ont débuté dès 1980 d'abord dans le corridor ouest du permis puis à partir de 1993 dans la grande surface rectangulaire à l'Est du permis. Précisons que des extractions avaient déjà débuté avant 1980 sur le permis « Gris Nez ».

Ces dernières années, deux DAM, la Charlemagne (surverse par puits) et la Scelveringhe (surverse par sabords) sont les DAM travaillant principalement sur site.

Sur Dieppe, les extractions sont dépendantes de l'heure de marée en raison d'un quai de déchargement situé dans l'avant-port de Dieppe et donc soumis aux variations du marnage. Par conséquent les extractions auront lieu préférentiellement à la fin du jusant et au flot pour pouvoir effectuer un déchargement autour de la PM.

Les études morpho-sédimentaires menées par le laboratoire M2C en 2006 ont suivi une extraction d'intensité faible mais d'extension importante (Figure 27, p 44).

3. Stratégie d'étude

Ce chapitre décrit la stratégie de suivi adoptée pour répondre aux objectifs de caractérisation et d'analyse des impacts de l'extraction de granulats marins sur la colonne d'eau (panache turbide) et sur les fonds, ainsi que les outils déployés en mer. Les données utilisées sont présentées, qu'il s'agisse des données préexistantes ou des données acquises dans le cadre de cette étude. Les post-traitements appliqués aux données ainsi que les outils informatiques utilisés pour l'analyse et la cartographie de ces données sont également présentés.

Pour évaluer les impacts physiques de l'extraction de granulats marins sur la colonne d'eau et le fond, la dynamique du panache turbide formé à l'arrière de la drague et les impacts morpho-sédimentaires sont caractérisés. Les paramètres forçants sont déterminés.

L'étude est principalement basée sur des suivis *in situ* réalisés à partir des navires océanographiques de l'INSU-CIRMAT (n/o Thalia, Côtes de la Manche et Côte d'Aquitaine), de navire de pêche, de la vedette du Grand Port du Havre et des principales DAM qui travaillent sur site (SandHarrier, Charlemagne et Scelveringhe). Cette approche « terrain » est couplée à une approche numérique développée en partenariat avec le LOMC (Université du Havre) afin d'améliorer la compréhension de la dynamique du panache et de quantifier les dépôts associés pour différentes conditions d'extraction et d'hydrodynamisme.

Pour évaluer le réel impact lié aux extractions, la connaissance des caractéristiques du milieu naturel et de leur variabilité est primordiale. Par conséquent la caractérisation morpho-sédimentaire des fonds et celle de la dynamique des particules remises en suspension concernent le milieu naturel et le milieu impacté.

Que ce soit pour les impacts liés à la remise en suspension ou les impacts morpho-sédimentaires, la dimension des objets étudiés (sillon isolé, dépression, zone d'extraction, zone d'expérimentation, panache turbide et zone de dépôt) et la persistance des impacts dans le temps (temps de restauration des sillons, durée de vie du panache) nécessitent d'aborder la problématique selon des échelles spatio-temporelles différentes. Les caractéristiques du milieu naturel doivent être étudiées aux mêmes échelles spatio-temporelles.

3.1. Caractérisation de la dynamique des particules en suspension

3.1.1. Stratégie

Pour la caractérisation de la dynamique du panache turbide les paramètres étudiés sont :

- hydrodynamiques (courant et houle) à partir de courantomètres,
- hydrologiques (température et salinité) à partir d'une CTD,
- particulaires : concentrations des MES par l'intermédiaire du signal rétrodiffusé des ADP et de prélèvements d'eau, granulométrie à l'aide d'un LISST (*in situ* et *ex situ)* et d'un granulomètre laser (*ex situ* sur prélèvements d'eau), nature par l'intermédiaire du MEB.

Les caractéristiques du milieu impacté sont à étudier selon différentes **échelles spatio-temporelles** définies par la durée des processus de création et de disparition du panache turbide, par la cyclicité des facteurs du milieu naturel (semi-diurne, ME/VE, saisonnier) et par les dimensions des objets associés. Pour une réelle discrimination des impacts liés à cette remise en suspension, les variations des caractéristiques du milieu naturel doivent être étudiées selon les mêmes échelles spatio-temporelles

La première **échelle temporelle** à considérer est celle de la **dizaine de minutes** liées aux variations des caractéristiques de la surverse au cours du chargement. Ensuite, l'étude à l'échelle **du cycle semi-diurne** est primordiale du fait de chargement étalé sur 2-3 heures pouvant débuter à tout instant de la marée et une durée de vie du panache également limitée à quelques heures. Les **échelles mensuelles** (cycles tidaux ME-VE) et **saisonnières** sont également à prendre en compte du fait d'une activité d'extraction intervenant tout au long de l'année.

L'activité d'extraction peut avoir lieu dans des conditions relativement agitées. Par conséquent, l'**échelle d'épisode bref de fort vent ou de tempête** est également à prendre en compte.

L'étude du milieu impacté concernera l'étude de la source (de la surverse) et de la réponse du milieu marin à son mélange, ainsi que l'évolution du panache turbide résultant, formé à l'arrière de la drague jusqu'à sa disparition.

Par conséquent, les **échelles spatiales** à prendre en compte sont d'abord **plurimétriques** en raison de la dimension de la zone de contact des eaux de surverse avec l'eau du milieu naturel puis **pluri-kilométriques** du fait de la dimension et de la migration du panache induit par les courants de marée. L'étude de la dynamique du panache turbide sur deux sites différents (Baie de Seine et Dieppe) permet une étude à l'**échelle du bassin oriental de la Manche.**

L'**influence du protocole d'extraction** est étudiée par la distinction des caractéristiques du panache en fonction du type de surverse et du rendement de l'extraction.

Les variations temporelles des caractéristiques naturelles sur l'ensemble de la colonne d'eau sont déterminées à partir de mesures courantométriques toutes les 10 minutes sur un cycle ME-VE à l'aide du mouillage d'un ADP, de mesures des paramètres hydrologiques (salinité, température, granulométrie et concentration des particules en suspension) à partir de mesures en points fixes de 13 heures à différentes périodes de l'année.

Les variations spatiales du milieu naturel sont étudiées à partir de mesures hydrologiques pour chaque suivi du panache sur site avant le début de l'extraction et autour du panache turbide tout au long de sa disparition jusqu'à plusieurs kilomètres au-delà du site d'extraction.

Pour pouvoir caractériser cette remise en suspension en fonction d'un fuseau d'échelles spatio-temporelles étendues (du mètre au kilomètre et de la minute à l'heure), deux protocoles de suivis ont été conçus (Figure 32).

Un premier suivi, synchronisé à bord de la drague et à partir du navire de suivi situé à une distance proche et constante de la drague, a été mis en place pour la caractérisation de la variabilité de la source (surverse) et de la réponse à l'entrée dans le milieu marin. Ce suivi a été répété pour différentes dragues pour évaluer les différences entre les types de dragues et les types de surverse.

Ensuite, un suivi lagrangien d'une même section du panache depuis sa création à l'arrière de la drague jusqu'à sa disparition a été mis en place à partir des navires de suivis. Ce type de suivi a été répété de manière à couvrir différentes conditions hydrodynamiques, afin d'en évaluer l'influence, et à intégrer les différentes échelles temporelles. Enfin, un suivi de l'ensemble du panache généré au cours d'un chargement a été élaboré à partir de photographies aériennes afin d'obtenir une meilleure image de sa dispersion à une échelle pluri-kilométrique.

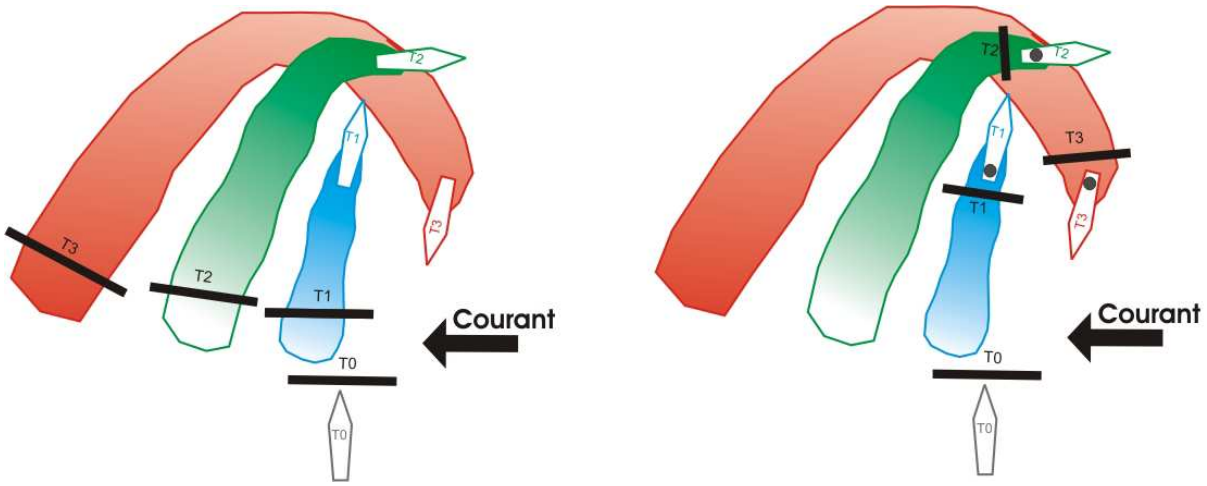


Figure 32 : Les suivis du panache turbide (gauche : Lagrangien à partir du navire de suivi, droite : Distance fixe-DAM synchronisée).

3.1.2. Outils

a. Courantomètres au mouillage

Les courantomètres permettent de mesurer la direction et l'intensité des courants. Les courantomètres employés sont acoustiques. Ils mesurent la vitesse des particules en suspension dans l'eau, à partir du principe de l'effet Doppler, en considérant que celle-ci est similaire à celles des molécules d'eau.

Un transducteur monostatique, utilisé comme transmetteur et récepteur, va générer une onde acoustique à une fréquence connue. Pendant son trajet au travers de l'eau, l'onde sera réfléchie dans toutes les directions par les matières particulaires (sédiment, petits organismes, bulles). Si une portion de l'énergie réfléchie revient au niveau du transducteur, elle est reçue par le courantomètre à effet Doppler qui mesure la variation de fréquence du signal en retour. La dérive Doppler mesurée par un seul transducteur reflète la

vitesse de l'eau seulement sur l'axe de son faisceau acoustique. Généralement, ces courantomètres utilisent trois faisceaux orientés à 25° de l'axe vertical, également espacés sur des angles relatifs de 120° en azimut. Le courantomètre combine les trois vitesses le long des faisceaux et utilise l'orientation relative des transducteurs pour calculer la vitesse de l'eau en 3D.

Les courantomètres à effet Doppler, ponctuels et profileurs, sont distingués (Figure 33 et Figure 34). Un courantomètre ponctuel effectue une mesure ponctuelle à proximité du transducteur et un courantomètre profileur réalise une série de mesures régulièrement espacées à des distances de plus en plus éloignées du transducteur.

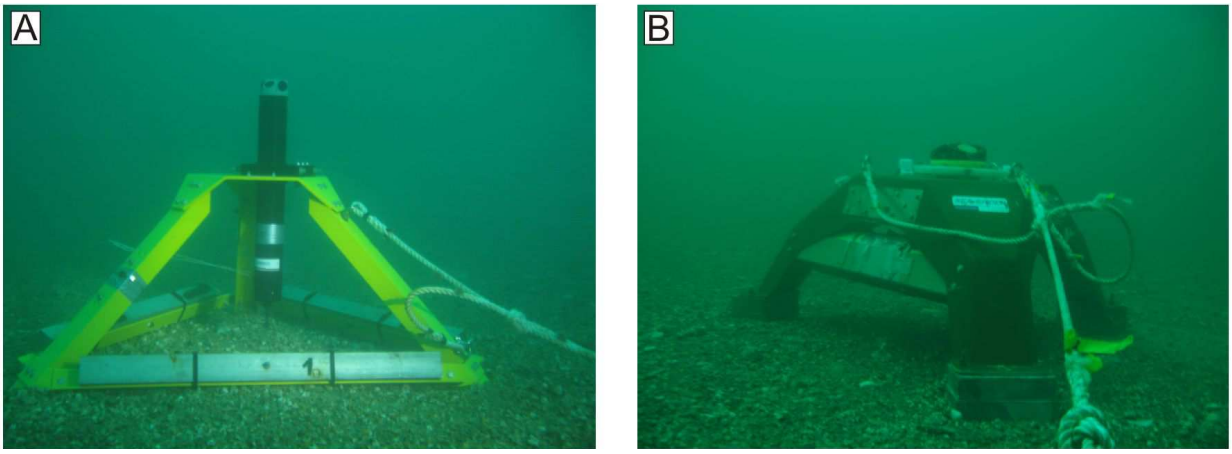


Figure 33 : Les courantomètres à effet Doppler utilisé lors des suivis.
A : ponctuel type Aquadopp. B: profileur type ADP Sontek.

Pour les courantomètres profileurs, le temps d'enregistrement du signal rétrodiffusé est plus important que celui d'un courantomètre ponctuel, permettant ainsi l'enregistrement du signal rétrodiffusé à différentes distances du transducteur. Après traitement de ce signal, le profil des vitesses de l'eau est donc divisé en cellules de même longueur et de plus en plus éloigné du courantomètre. Toutefois la première cellule de mesure d'un profileur sera à une distance plus importante que celle du courantomètre ponctuel en raison d'une bande aveugle (distance minimale de mesure) plus importante pour les profileurs. De plus, à proximité de l'interface colonne d'eau surface libre, le signal subit plusieurs types d'interférence rendant non exploitable les mesures à proximité de la surface libre, jusqu'à 10 % de la hauteur de la colonne d'eau.

Le couplage de courantomètres à effet Doppler profileur et ponctuel, installés au mouillage, permettra de remédier à l'absence de mesure du profileur à proximité du fond (Figure 34).

Une mesure individuelle du profil de vitesse 3D est appelée un ping. Les pings sont moyennés sur l'intervalle programmé par l'opérateur pour produire un profil moyen 3D de la vitesse. Ainsi la périodicité de la mesure peut être très faible (de la seconde à la minute) ou très élevée permettant d'adapter la mesure aux échelles temporelles de l'étude.

Lors des suivis, des courantomètre ponctuels Aquadopp Nortek et un courantomètre profiler ADP Sontek 1000 kHz (Figure 33) ont été déployés au mouillage

La fréquence d'acquisition élevée de la pression hydrostatique qu'offre l'ADP Sontek permet d'obtenir les caractéristiques de la houle telles que sa hauteur significative et sa période

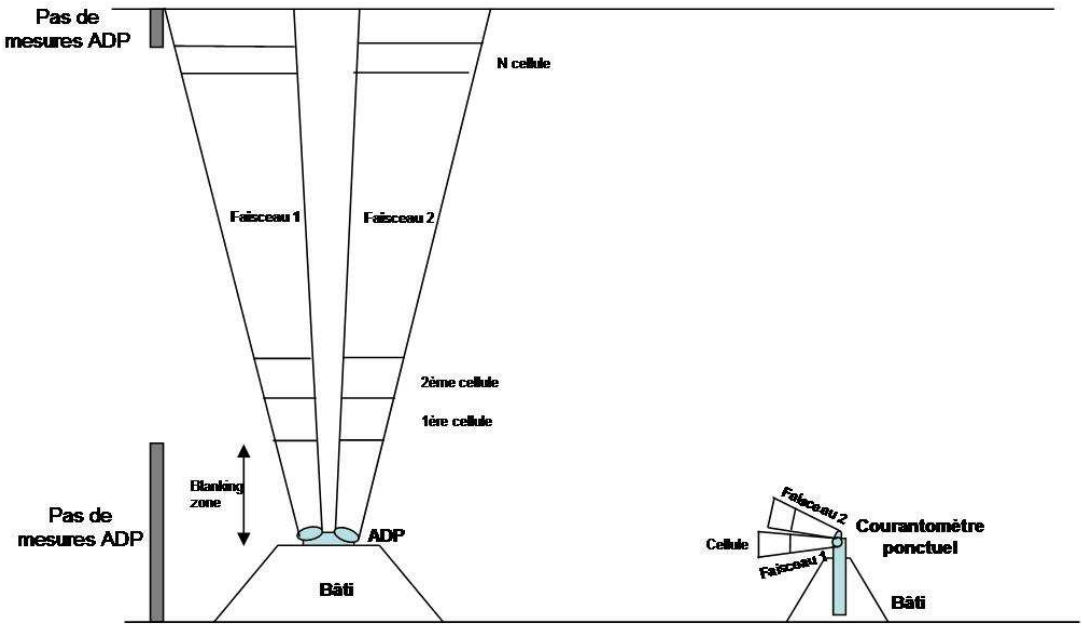


Figure 34 : Principe de la mesure des ADP et du courantomètre à effet Doppler ponctuel.

b. Paramètres hydrologiques

Deux outils ont été utilisés pour mesurer les paramètres hydrologiques : une sonde CTD et une sonde salinité-température. La sonde CTD (Conductivity Temperature Depth) mesure les caractéristiques physico chimiques ou hydrologiques de l'eau directement dans le milieu aquatique. Les principaux paramètres mesurés sont la salinité, la conductivité et la température en fonction de la profondeur. La CTD utilisée lors des suivis est une CTD SBE 19plus V2 SeaCat profiler de la société Seabird (Figure 35). Une petite sonde de salinité-température transportable, de la société Consort (type C535), a été utilisée pour mesurer les paramètres hydrologiques des eaux de surverse prélevées sur les DAM avant conditionnement.

Figure 35 : Sonde CTD 19plus.

- Prélèvements d'eau

Des prélèvements d'eau sont nécessaires pour pouvoir déterminer les caractéristiques des matières en suspension : concentration, nature et granulométrie au droit du prélèvement (Figure 38, p 57). Les prélèvements réalisés dans la colonne d'eau permettront également en post-traitement de calibrer le signal rétrodiffusé des ADCP en concentration en MES.

Lors des suivis du panache turbide, les eaux de surverse ont été prélevées au seau sur la drague au point d'évacuation du trop plein et au contact de la surverse avec le milieu marin. Des prélèvements dans le panache turbide ont été réalisés à partir de bouteilles Niskin dans des masses d'eau du panache, d'âge et de profondeur différents.

- Signal rétro-diffusé des ADCP

La mesure des ADCP est basée sur la mesure des vitesses des particules en suspension dans l'eau à partir de l'effet Doppler (cf. §3.1.2a, p 51). Le post-traitement et la calibration du signal acoustique rétrodiffusé par les particules contenues dans l'eau permettent d'étudier les concentrations en MES au droit des cellules de mesure de l'ADCP.

Pour le suivi du panache turbide, le signal rétrodiffusé d'un courantomètre profiler ADCP Workhorse 600 khZ de la société RDI a été utilisé. Cet ADCP était installé sur le navire de suivi et orienté vers le fond à l'aide d'un bras en acier fixé sur le plat-bord du pont arrière**.**

Pour les deux sites la zone aveugle (blanking zone) était de 2 m et la hauteur des cellules de mesure de l'ADCP était de 50 cm. La fréquence d'acquisition était respectivement de 0,52 Hz et de 2 Hz pour le site de Baie de Seine et celui de Dieppe. La zone sans mesures à proximité du fond était de 3 m pour le site de Baie de Seine et de 2 m pour celui de Dieppe.

- Granulomètre laser

Les granulomètres laser mesurent la distribution granulométrique des particules d'un échantillon grâce à la technique de diffraction laser. L'utilisation de la diffraction laser pour l'analyse granulométrique des particules est développée depuis les années 1970. Aujourd'hui cette méthode est employée dans de nombreux domaines. L'intérêt de la diffraction laser réside dans le fait qu'elle n'est pas dépendante de la composition ou de l'indice de réfraction des particules. Cette méthode donnera la distribution granulométrique des particules en équivalent sphérique.

Un granulomètre LISST (Laser In-Situ Scattering and Transmissometry) type C 100 X de la société Sequoia permet une mesure du spectre granulométrique *in situ* et évite l'analyse d'échantillons ayant pu évoluer ou ayant subi une floculation post-prélèvement. La longueur d'onde du faisceau est de 670 nm. La lumière diffractée est mesurée par un détecteur formé de 32 anneaux concentriques (rings) de tailles différentes. Sa gamme de mesure est comprise entre 2,5 et 500 µm (Figure 36).

Ce LISST a été utilisé au cours des suivis de panache turbide et des mesures en point fixe de 13h. Il a également été utilisé avec sa chambre d'analyse en laboratoire pour les échantillons de surverse prélevés sur les dragues et les échantillons de la colonne d'eau lorsque les conditions météorologiques n'étaient pas favorables à son déploiement *in situ.*

Des granulomètres LISST similaires ont montré de bons résultats pour l'étude des particules en suspension dans des environnement macrotidaux et pour l'étude des panaches turbides liés à l'extraction de

granulats marins (Mikkelsen et Pejrup, 2000; Smith et Friedrichs, 2011), notamment pour visualiser les phénomènes de floculation.

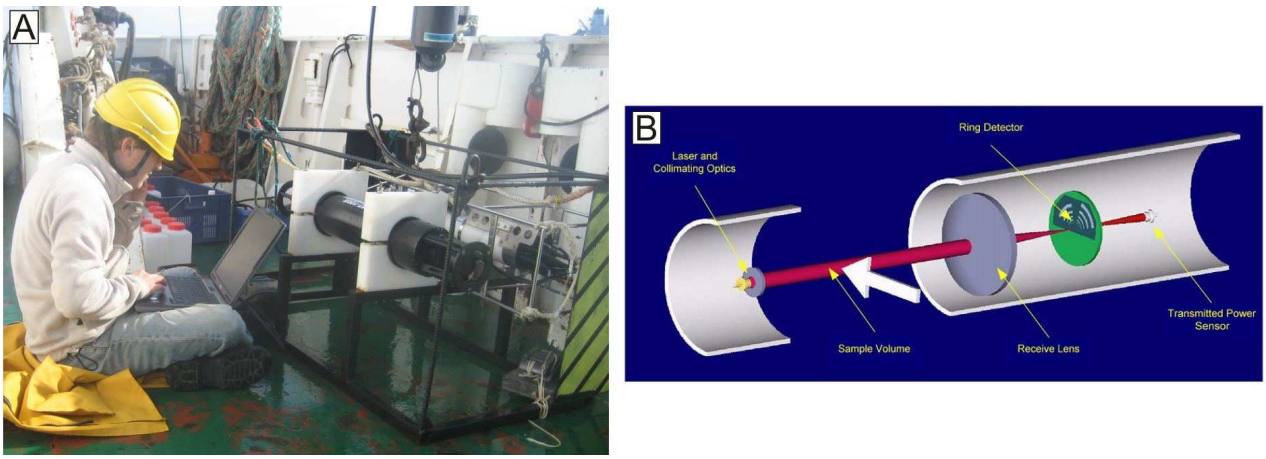


Figure 36 : Le granulomètre laser LISST.
A : Contrôle de l'enregistrement du LISST installé sur le bâti multi-instruments au cours d'une campagne d'acquisition. B : principe de la mesure LISST (Sequoia, 2007).

3.1.3. Données

a. Données antérieures à l'étude

Il n'existe pas de mesures antérieures sur les particules remises en suspension par l'extraction de granulats marins sur les sites de Dieppe et de Baie de Seine.

Ce sont essentiellement des mesures des caractéristiques océanographiques du milieu naturel. Sur Dieppe, le laboratoire « M2C » de l'Université de Rouen a effectué des mesures de courants sur 6 jours en 2006. Sur le chantier Baie de Seine, la campagne Thalia de mai 1978 (Centre Océanologique de Bretagne) offre plusieurs points de mesures des paramètres hydrologiques et de turbidité à proximité du site d'étude sans extractions. Ces données permettront de caractériser l'évolution spatiale des paramètres hydrologiques autour du site d'étude (Figure 37).

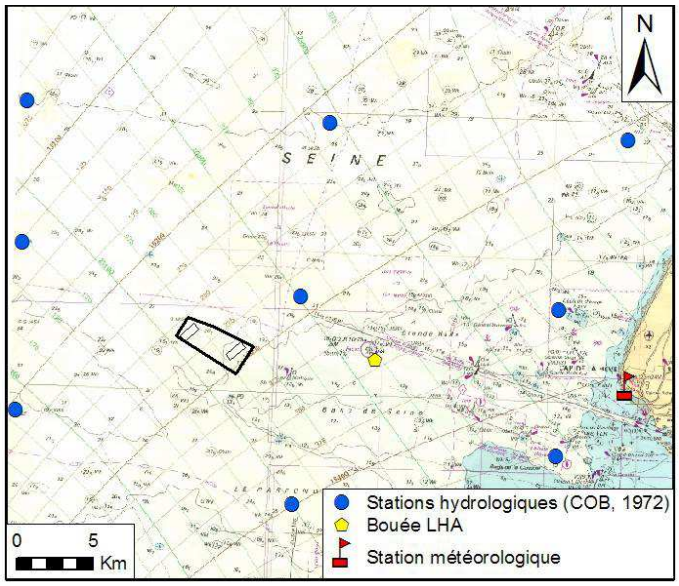


Figure 37 : Localisations des données antérieures utilisées en relations avec l'hydrographie.

Pour les deux sites, les données météorologiques proviennent des mesures de MétéoFrance et celles de houle ont été fournies par le CETMEF.

b. Données nouvelles acquises

Les objectifs des campagnes en mer, conduites au cours de cette étude, en lien avec la caractérisation de la dynamique du panache turbide, ont concerné les deux chantiers : Baie de Seine et Dieppe.

L'acquisition en plusieurs étapes tout au long de cette thèse du matériel adapté pour ce type de suivi a logiquement entraîné une augmentation progressive de la pertinence des mesures. L'acquisition de ces différents outils implique une maîtrise de ceux-ci tant dans leur utilisation que dans leur déploiement en mer.

Les protocoles de suivi du panache turbide ont été adaptés et affinés en fonction des outils employés et au fur et à mesure de l'amélioration de nos connaissances sur la dynamique du panache. Lors de chaque campagne à bord des navires de l'INSU-CNRS, plusieurs journées étaient consacrées à l'adaptation et à la validation des protocoles de suivis.

Pour répondre aux objectifs de l'étude, six campagnes de mesures ont été réalisées entre 2007 et 2010 par l'UMR CNRS 6143 « M2C » de l'Université de Rouen (en collaboration avec le GIE GMN, l'INSU/CNRS, l'IFREMER, Genavir et l'Université du Havre). Le déroulement de ces campagnes (chronologie, navires utilisés et travaux effectués) est synthétisé dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Synthèse des données sur la remise en suspension acquises lors des campagnes à la mer effectuées entre 2007 et 2010.

Campagnes	Dates	Navire	Organisme	Opérations/Matériels	Chef de Mission
Granimp08a	avr-08	Côte d'Aquitaine (INSU-CIRMAT)	Université de Rouen	**Prélèvements d'eaux** Seau : 23 (surverse Charlemagne) Niskin : 6 (M.N.) 47 (P.T. Charlemagne)	S. Le Bot, **P-A Duclos**
Granimp08b	oct-08	Thalia (GENAVIR-CIRMAT)	Université de Rouen	**Profils verticaux** CTD: 4 (M.N.) 12 (P.T. Scelveringhe) Lisst: 2 (M.N.) 3 (P.T. Scelveringhe) **Prélèvements d'eaux** Niskin : 10 (M.N.) 7 (P.T. Scelveringhe) **Courantométrie :** ADP Sontek 1 MHz (UMR CNRS 6143, M2C / IRSN) : 30 jours Aquadopp 2 MHz : 4 jours	**P-A Duclos**
Granimp09a	mai-09	Côte d'Aquitaine (INSU-CIRMAT)	Université de Rouen	**Profils verticaux** CTD: 22 (M.N.) 56 (P.T. Sand Harrier) Lisst: 6 (M.N.) **Transects rétrodiffusion accoustique:** Workhorse 1 MHz (RDI) 1 (M.N.) 17 (P.T. Sand Harrier) **Prélèvements d'eaux** Niskin : 62 (M.N.) 30 (P.T. Sand Harrier)	**P-A Duclos**
Granimp09b	oct-09	Thalia (GENAVIR-CIRMAT)	Université de Rouen	**Profils verticaux** CTD: 6 (M.N.) 34 (P.T. Sand Harrier) Lisst: 5 (M.N.) 10 (P.T. Sand Harrier) **Transects rétrodiffusion accoustique:** Workhorse 600 kHz 3 (M.N.) 33 (P.T. Sand Harrier) **Prélèvements d'eaux** Seau : 26 (surverse Sand Harrier) Niskin : 5 (M.N.) 21 (P.T. Sand Harrier)	**P-A Duclos**
				Photographie aérienne	A. Cuvillez, **P-A. Duclos**
Granimp10a	mars-10	Côte de la Manche (INSU-CIRMAT)	Université de Rouen	**Courantométrie :** Aquadopp 2 Mhz : 5 jours **Profils verticaux** CTD: 27 (M.N.) 8 (P.T. Sand Harrier) Lisst: 26 (M.N.) 1 (P.T. Sand Harrier) **Transects rétrodiffusion accoustique:** Workhorse 600khz 25 (M.N.) 35 (P.T. Sand Harrier) **Prélèvements d'eaux** Niskin : 59 (M.N.) 7 (P.T. Sand Harrier)	**P-A Duclos**
Granimp10b	oct-10	Thalia (GENAVIR-CIRMAT)	Université de Rouen	**Profils verticaux** CTD: 4 (M.N.) 5 (P.T. Scelveringhe) **Transects rétrodiffusion accoustique:** Workhorse 600khz 3 (M.N.) 38 (P.T. Scelveringhe) **Prélèvements d'eaux** Seau : 17 (surverse P.T. Scelveringhe) Niskin : 12 (M.N.) 37 (P.T. Scelveringhe)	**P-A Duclos**
				Courantométrie : Workhorse 600khz XX	

La caractérisation du milieu naturel sur le chantier Baie de Seine a été effectuée tout au long de ces campagnes à l'exception de Granimp07. Des mesures de courantométrie ont été réalisées au cours de Granimp08b et Granimp10a. Plusieurs mesures en points fixes de 13 h ont permis d'apporter une connaissance détaillée des variations hydrologiques du milieu au cours des cycles de marée lors de Granimp09a, -10a et -10b.

Les campagnes Granimp08a et -08b ont permis une première compréhension des caractéristiques du panache turbide pour deux types de surverse différentes (par puits et par sabords), à l'aide de prélèvements d'eau et de profils CTD. Les campagnes Granimp09a, -09b et -10a ont permis d'acquérir une connaissance détaillée des caractéristiques du panache turbide et de sa dynamique notamment grâce au prêt d'un ADCP puis de son achat. Lors de la campagne Granimp09b des photographies aériennes réalisées à partir d'un hélicoptère ont permis d'une part une visualisation de la globalité du panache turbide, une meilleure compréhension de la dynamique et de la géométrie du panache en surface et d'autre part de démontrer la faible influence du navire de suivi sur le dynamique du panache.

Les campagnes Granimp08a et -09b ont permis d'étudier les caractéristiques de la source, au niveau de la surverse, sur deux dragues présentant des systèmes de surverse différents (par puits et par sabord).

Pour l'étude du panache turbide sur le chantier de Dieppe, l'intégralité des mesures, du milieu naturel, sur drague et au sein du panache turbide a été réalisée au cours de la campagne Granimp10b.

3.1.4. Post-traitement en laboratoire

a. Prélèvements d'eau

- Filtration et détermination des concentrations en MES

Pour déterminer les concentrations en MES de ces échantillons, une analyse gravimétrique a été effectuée sur l'ensemble de ces prélèvements (Figure 38). Les échantillons sont filtrés à travers des filtres pré-pesés GF/F Whatman en fibre de verre, d'une porosité de 0,7 µm. Ils sont ensuite séchés en étuve. Le rapport entre la différence de masse du filtre « sale » et du filtre vierge avec le volume d'eau filtrée donne la concentration en MES de l'échantillon.

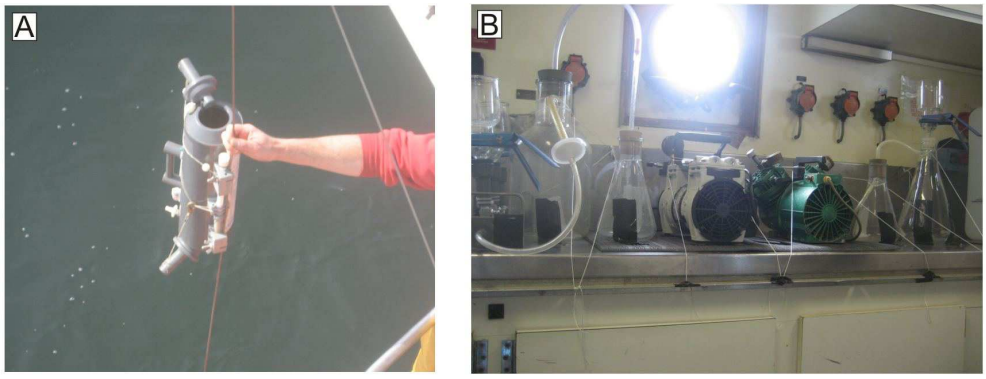


Figure 38 : Bouteille Niskin armée avant échantillonnage (A) et poste de filtration dans le laboratoire d'un navire océanographique (B).

- Granulométrie laser

La granulométrie des échantillons, prélevés sur drague et dans le panache turbide lorsque l'état de la mer ne permettait pas de déployer le granulomètre laser *in situ* Lisst (p 55), a été analysée en laboratoire à partir du LISST en utilisant la chambre de mesure de laboratoire et/ou le laser de laboratoire de type LS230.

- MEB

La nature et la structure des MES d'échantillons sélectionnés en fonction de leur concentration, de leur granulométrie, de leur position dans le panache turbide et des conditions hydrodynamiques ont été déterminées à partir d'analyse de filtres polycarbonates vivascience 47 mm au MEB.

Un microscope électronique à balayage permet d'analyser la nature des particules d'un échantillon. Le MEB balaie l'échantillon par un faisceau très fin d'électrons, monocinétique. Des interactions électron-matière vont se produire à la surface de l'échantillon dont les principales utilisées pour l'analyse de la nature des échantillons sont : (i) l'émission d'électrons secondaires arrachés à la matière par les électrons incidents et d'énergie plus faibles et (ii) l'émission d'électrons rétrodiffusés, d'énergie comparable à celle des électrons incidents.

La réception, l'amplification et le traitement de ces électrons permettent de restituer l'information sous forme d'image en teinte de gris pour chacune de ces émissions.

Le rendement d'émission des électrons secondaires est fonction du numéro atomique des atomes constitutifs de l'échantillon, mais surtout de l'angle entre le faisceau incident et la surface analysée. L'image obtenue sera représentative de la topographie de l'échantillon avec des résolutions de l'ordre de quelques nm.

Le rendement d'émission des électrons rétrodiffusés est proportionnel à la racine du numéro atomique et relativement peu sensible à l'inclinaison de la surface de l'échantillon. L'image obtenue est en contraste de composition.

Le MEB utilisé est un Eo40 de la société Zeiss. Des échantillons de la colonne d'eau non impacté, de la surverse et du panache turbide définis ont été analysés après avoir été filtrés rapidement après prélèvements sur les filtres polycarbonates.

b. Calibration du signal rétrodiffusé des ADP

Le signal acoustique rétrodiffusé des ADP peut être calibré en concentration de MES. Ceci permet une mesure particulaire sur la quasi-totalité de la colonne d'eau avec une fréquence d'échantillonnage élevée. La calibration de ce signal a montré de bons résultats pour l'étude des variations naturelles de MES pour de nombreux types d'ADCP, utilisés au mouillage et orientés vers la surface (Gartner, 2004; Tessier *et al.*, 2008). Cette calibration a également été concluante pour l'étude de la remise en suspension par les tempêtes à partir d'un ADCP RDI de 300 kHz également installé au mouillage et orienté vers la surface, et par le chalutage à partir du même ADCP installé sur un navire de suivi et orienté vers le fond (Ferré, 2004; Durrieu de Madron *et al.*, 2005; Tessier *et al.*, 2008). Pour l'étude des panaches turbides, des études relativement

récentes ont également utilisé les ADCP déployés sur des navires de suivi. Hitchcock et Bell (2004) utilisent un ADCP RDI de 1200 kHz sans calibration pour localiser et étudier la morphologie du panache en profondeur. Récemment, Smith et Friedrichs (2011) ont étudié un panache turbide de surverse en Baie de San Francisco en calibrant le signal rétrodiffusé d'un ADCP RDI de 1200 kHz déployé en bottom tracking en point fixe.

Pour notre étude, nous avons utilisé un ADCP Whorkhorse 600 kHz installé sur le plat-bord des navires de suivis, immergé sous environ 50 cm d'eau et orienté vers le fond.

La calibration du signal rétrodiffusé est réalisée en deux temps. Premièrement l'intensité des échos (I_{counts}) est convertie en intensité acoustique rétrodiffusée (I_{dB}) grâce au logiciel Winriver 2 (©TRDI, 2007) qui utilise l'équation de calibration (3) :

$$I_{dB} = C.I_{counts} + 20.\log_{10}\left(\frac{r + 0.5L_{X_{mit}}}{\cos\theta}\right) + 2\alpha R - 10.\log_{10}\left(\frac{L_{X_{mit}}}{\cos\theta}\right) \quad (3)$$

ou r est la distance d'émission entre le transducteur et le milieu de la cellule, θ est l'angle d'ouverture des faisceaux, L_{Xmit} est la longueur transmise, α est le coefficient d'absorption du son et C est un coefficient lié à l'intensité de l'écho. Le coefficient d'absorption du son a été calculé selon la méthode de Francois et Garrison (Francois et Garrison, 1982a, b).

L'intensité acoustique rétrodiffusée est ensuite calibrée à partir des mesures gravimétriques des échantillons d'eau prélevés *in situ*. La relation, entre l'intensité acoustique rétrodiffusée et les concentrations de MES, est logarithmique (4) :

$$SSC = a.e^{b.I_{dB}} \quad (4)$$

Cette calibration a été effectuée sur les deux sites (Baie de Seine et Dieppe). Les coefficients des lois logarithmique de chacune des ces calibrations sont différents confirmant l'effet site de la réponse des particules au signal acoustique. Dans les deux cas le coefficient de corrélation est élevé permettant d'utiliser le signal rétrodiffusé de cet ADCP pour l'études des concentrations en MES du panache turbide généré par l'extraction de granulat marin en Bassin oriental de la Manche (Figure 39).

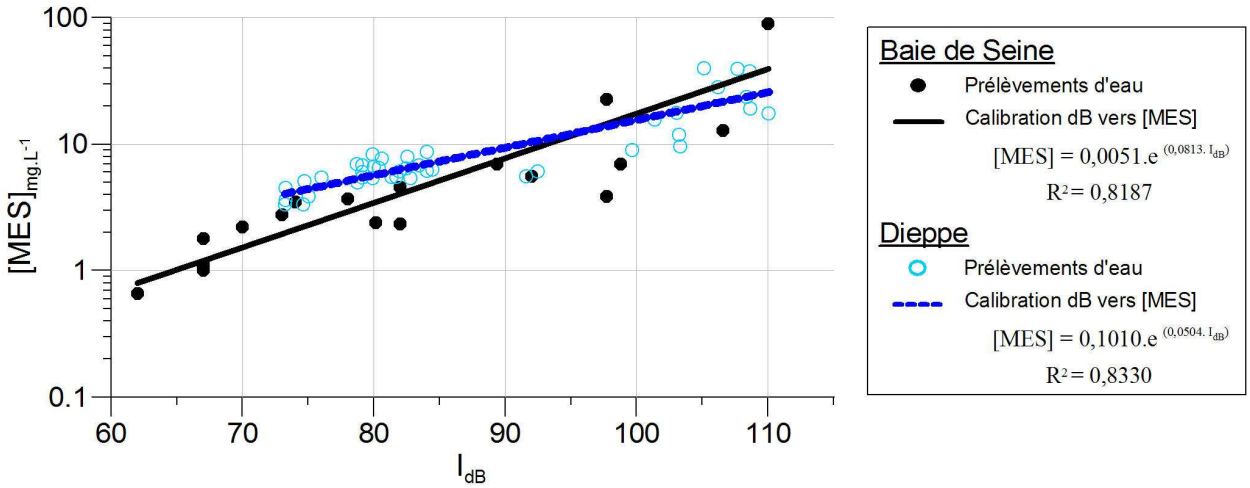


Figure 39 : Calibration du signal acoustique rétrodiffusé enregistré par l'ADCP en concentration de MES pour les panaches turbides étudiés en Baie de Seine et à Dieppe.

3.2. Caractérisation morpho-sédimentaire des fonds

3.2.1. Stratégie

Pour les impacts sur le fond, les caractéristiques morpho-sédimentaires étudiées sont :

- morphologiques (bathymétrie, pente et rugosité) à partir de relevés obtenus par des sondeurs multifaisceaux (SMF),
- acoustiques (faciès) à partir de relevés de sonar à balayage latéral,
- sédimentaires (nature et granulométrie) à partir de la calibration des faciès acoustiques grâce aux prélèvements sédimentaires effectués à partir d'une benne Shipeck.

La dynamique sédimentaire est analysée à partir des informations sur le sédiment et sur les courants près du fond.

Les processus d'excavation et de restauration étudiés ici impliquent une étude à des **échelles temporelles** différentes. L'excavation ou la création du sillon est un impact direct donc instantané. Par conséquent, elle est à étudier à **l'échelle du chargement (2-3 h).** Les échelles temporelles pour l'étude de la restauration seront liées à des épisodes brefs (tempêtes) et à la cyclicité des conditions hydrodynamiques (cycles tidaux semi-diurne et semi-lunaire, saisons). Par conséquent la restauration du milieu sera étudiée à des **échelles mensuelles, semestrielles, annuelles et pluri-annuelles**. Les études antérieures (Cooper *et al.*, 2007b; Kubicki *et al.*, 2007; Le Bot *et al.*, 2010), qui montrent des temps de restauration pluri-annuels avec des vitesses de comblement variant dans le temps, justifient ces choix. Cette dynamique temporelle sera comparée avec la dynamique du système non impacté. Les évolutions des environnements naturels et impactés sont étudiés à partir des relevés bathymétriques et sonar du suivi de stations sédimentaires, effectués à des pas de temps mensuels, semestriels et annuels entre 2007 et 2010. Les variabilités naturelles à l'échelle pluriannuelle sont définies à partir des stations sédimentaires anciennes et des relevés bathymétriques antérieurs du SHOM.

Des **échelles spatiales** différentes sont à prendre en compte du fait d'un impact direct localisé lié à l'excavation et des éventuels impacts indirects générés sur des surfaces plus importantes. Ces échelles sont définies par les dimensions des objets étudiés (Figure 40). La largeur et la profondeur d'un sillon isolé et celles des dépressions nécessitent une étude tridimensionnelle à une **échelle décamétrique**. Les dimensions des zones d'extraction et les distances de dépôts des particules du panache turbide nécessitent une étude à l'**échelle kilométrique.** La comparaison des sites de Dieppe et de Baie de Seine permettra une caractérisation des impacts à l'**échelle de la Bassin oriental de la Manche.**

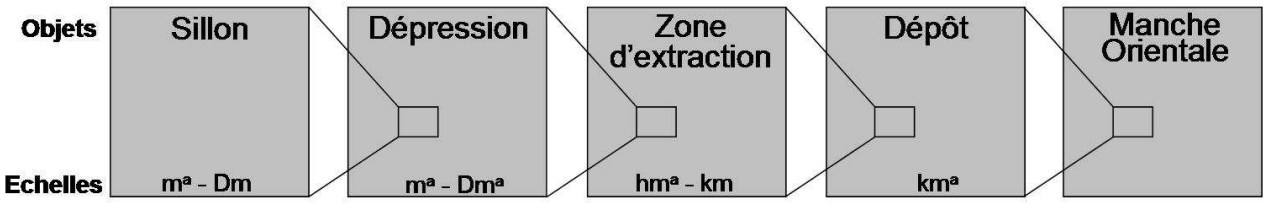


Figure 40 : Les différentes échelles spatiales pour l'étude des impacts morpho-sédimentaires.

La variabilité du milieu et les modifications liées à l'extraction pour l'ensemble des échelles spatiales (métrique à kilométrique) sont étudiées à l'aide de relevés bathymétriques et sonar précis, de prélèvements sédimentaires et de vidéos sous-marines. Les variations sédimentaires naturelles sont déterminées en répliquant jusqu'à 4 fois certaines stations sédimentaires non impactées. La variabilité verticale de la couverture sédimentaire est approchée grâce aux carottages d'Alluvial Mining de 1972 et du Cnexo de 1976. Les variabilités sédimentaires intra-sillon sont déterminées sur la base de prélèvements réalisés par des plongeurs. Les potentielles modifications hydrodynamiques au droit et à proximité des sillons sont comparées aux conditions naturelles à partir de mesures de courants à proximité du fond. A l'échelle hecto- à kilométrique, les impacts sont étudiés sur la concession et la variabilité naturelle est étudiée à partir de grilles de prélèvements et de couvertures bathymétrique et sonar réalisées sur des secteurs non impactés. L'échelle pluri-kilométrique est prise en compte grâce à une couverture bathymétrique et sonar réalisée au-delà de la zone d'expérimentation**.**

L'**influence du protocole d'extraction** est étudiée par la distinction des caractéristiques des excavations et de leurs restaurations en fonction du type de DAM, de l'orientation de l'extraction et de son intensité.

3.2.2. Outils

a. Sondeur multifaisceaux

Un sondeur multifaisceaux, comme un sondeur monofaisceau, mesure le temps aller-retour d'ondes acoustiques réfléchies sur le fond. La conversion temps-distance s'effectue à partir de la connaissance de la célérité de l'eau, déterminée à partir de la salinité et de la température de l'eau.

Un sondeur multifaisceaux mesure la bathymétrie sur une large surface perpendiculaire au navire, appelée fauchée, égale à 5 à 7 fois la profondeur d'eau (Figure 41), et contrairement au sondeur monofaisceau qui fournit une mesure ponctuelle au droit du navire. Les sondeurs multifaisceaux permettent d'effectuer un quadrillage bathymétrique plus rapidement et plus fin que les sondeurs monofaisceau. Pour une profondeur d'eau de 15-30 m, la résolution spatiale de la couverture acquise est de l'ordre du m et la résolution verticale est de l'ordre du cm. Par conséquent cet outil est adapté aux échelles de l'étude.

La plupart des sondeurs multifaisceaux fonctionnent selon la technique dite des faisceaux croisés. Une impulsion sonore est émise au travers d'un lobe d'émission étroit dans la direction longitudinale (de l'ordre de 1 à 5°) mais large transversalement (généralement 150°). La réception se fait à l'aide de faisceaux étroits transversalement (de l'ordre de 1 à 5°). Pour chaque faisceau de réception, la zone du fond explorée (ou insonifiée) correspond à l'intersection entre le lobe d'émission et le faisceau de réception.

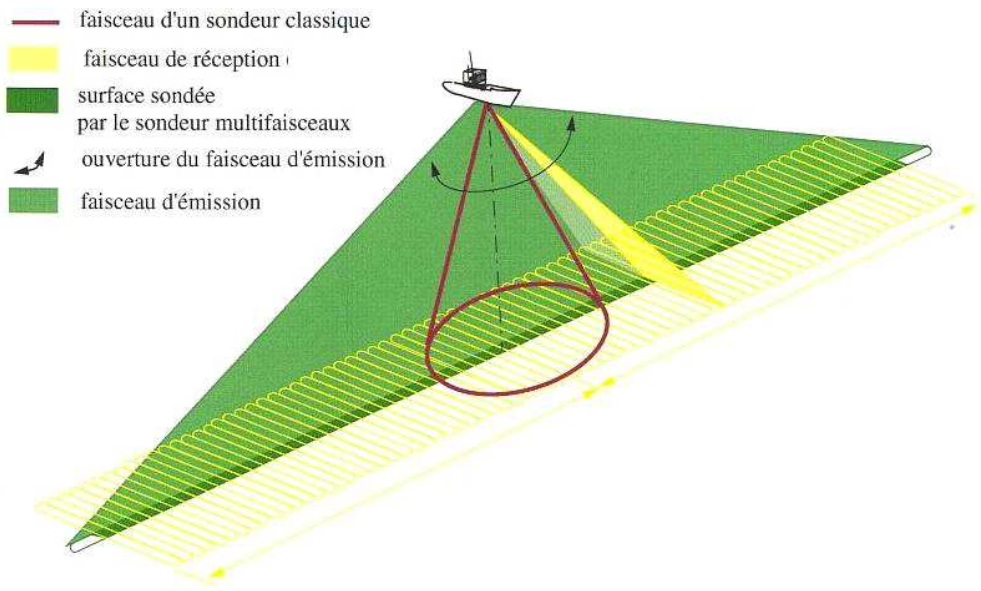


Figure 41 : Principe des faisceaux croisés employé pour le sondeur multifaisceaux (Michaux, 2003).

Le sondeur multifaisceaux utilisé pour la couverture bathymétrique étendue réalisée lors de la campagne Granimp09b est un EM 1000 de la société Kongsberg Simrad dont Genavir est propriétaire. Ses principales caractéristiques sont une antenne circulaire, une plage de profondeur comprise entre 0 et 1500 m, une fréquence de 95 kHz, un nombre de faisceaux de 60, une ouverture angulaire de 150° en émission et une ouverture des faisceaux de réception de 3,3°.

Le sondeur multifaisceaux installé sur la vedette du Grand Port du Havre était un Seabat 8101 jusqu'à la campagne Granimp09b incluse puis un Seabat 7101 de la société Reson. Les caractéristiques principales du Seabat 8101 sont une antenne circulaire, une plage de profondeur comprise entre 0 et 300 m, une fréquence de 240 kHz, un nombre de faisceaux de 145, une ouverture angulaire de 150° en émission et une ouverture des faisceaux de réception de 1,5°. Les caractéristiques principales du Seabat 7101 sont une antenne plane, une plage de profondeur comprise entre 0 et 300 m, une fréquence de 240 kHz, un nombre de faisceaux de 501, une ouverture angulaire de 150° en émission et une ouverture des faisceaux de réception de 1,5°. Du fait d'une ouverture en émission similaire mais d'un nombre de faisceaux en réception plus important, les SMF employés par le Grand Port du Havre présentent une résolution spatiale plus importante que l'EM 1000 employé lors de la campagne Granimp09b.

b. Sonar à balayage latéral

Le sonar à balayage latéral permet d'obtenir une image acoustique du fond qui apporte une information qualitative sur la topographie et indirecte sur le faciès sédimentaire. En effet, ici, les informations ne peuvent pas être replacées en 3D puisque les angles d'émission et d'incidences de l'onde acoustique sur le fond ne sont pas connus. L'image obtenue est donc sur fond plat. Cette image acoustique est obtenue de part et d'autre du navire de suivi sur une largeur variable selon les caractéristiques de l'outil et la hauteur de mise en œuvre au-dessus du fond. Les résolutions latérale et longitudinale de cette image acoustique sont généralement de l'ordre du décimètre et varient en fonction du type de sonar employé, du pas d'émission de l'onde acoustique et de la hauteur d'eau. L'image acoustique discrimine les éventuelles variations de la nature et de la rugosité et peut être interprétée en termes de faciès acoustiques. Les zones d'ombres, zones non insonifiées car masquées par un obstacle, permettront d'appréhender la morphologie d'ensemble. Plus la fréquence sera forte, moins le signal pénétrera dans le sédiment et plus les images reflèteront les propriétés acoustiques de la couche superficielle. Cet outil est donc adapté à l'étude des variations de couverture sédimentaire pour les différentes échelles spatiales étudiées. Cette image acoustique est une information indirecte et nécessite d'être calibrée par des données directes (prélèvements et vidéo sous-marine) pour calibrer les faciès acoustiques en faciès sédimentaires.

Le sonar à balayage latéral émet une onde acoustique à incidence oblique. Il enregistre le retour de l'onde en fonction du temps (Figure 42). Il est constitué d'un poisson immergé, relié au navire par un câble électroporteur. Ce poisson renferme deux antennes ou transducteurs qui émettent une impulsion acoustique dont la fréquence est comprise entre 100 et 1000 kHz (CIDCO, 2006). Cette émission est large transversalement à la route et étroite longitudinalement. Le signal est récupéré par le poisson, après avoir été rétrodiffusé par le fond avec plus ou moins d'intensité en fonction de la nature et de la morphologie du fond. L'émission et la réception successive de signaux permettront de sonder une large bande du fonds sur l'ensemble de la route du navire.

Deux types de traitements sont réalisés par l'enregistreur analogique au cours de l'acquisition. Le premier est la correction de l'obliquité du rayon en relation avec l'altitude du poisson par rapport au fond. Le second est celui de la compression de l'image par asservissement de la vitesse d'enregistrement par rapport à celle du navire (Augris et Clabaut, 2001).

Depuis la fin des années 90, les enregistrements numériques des données sonar permettent de réaliser des mosaïques d'images acoustiques après correction de la navigation.

Le signal reçu est retranscrit en teintes de gris permettant de différencier les zones à forte rétrodiffusion de celles à faible retour. L'image acoustique formée par la succession des réceptions de chaque émission est appelée sonogramme. Celle-ci indique les limites des formations superficielles par les différentes plages de gris ainsi formées.

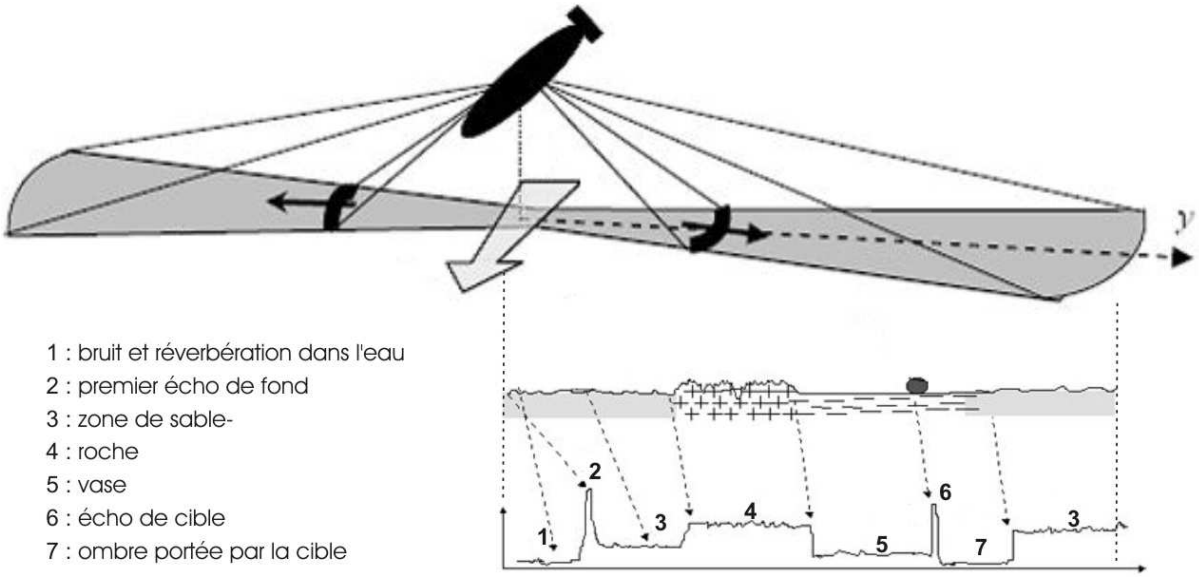


Figure 42 : Principe du sonar à balayage latéral (d'après Lurton, 1998).

Le sonar à balayage latéral, utilisé pour la couverture sonar étendue, réalisée lors de la campagne Granimp09b est un Edgtech DF 1000 dont Genavir est propriétaire. Ses principales caractéristiques sont une fréquence de 100 kHz, une portée de 100 m et une résolution de quelques dcm^2.

Le sonar à balayage latéral installé sur la vedette du Grand Port du Havre est un Klein 3900. Il peut travailler sur deux fréquences 445 kHz et 900 kHz avec des portées respectives de 150 m et de 50 m.

c. Prélèvements sédimentaires

Une benne à prélèvement récolte mécaniquement un échantillon de sédiments superficiels sur une épaisseur plus ou moins importante (fonction du type de benne) à l'aplomb du navire. Elle donne une information sédimentologique directe mais ponctuelle. Ces prélèvements permettent de caractériser la nature et la granulométrie des sédiments. Les faciès acoustiques déterminés à partir des mosaïques sonar sont calibrés en faciès sédimentaires par l'intermédiaire de ces prélèvements couplés à des images vidéo.

Lors de l'ensemble des campagnes Granimp, les échantillons ont été prélevés à l'aide d'une benne de type « Shipeck » (Figure 43). Cette benne est cylindrique. En position ouverte, avant l'échantillonnage, la partie mobile est bloquée à l'intérieur de la partie fixe. Lors du contact de la benne sur le fond, la tension du ressort est libérée permettant la fermeture de la partie mobile, qui emprisonne alors le sédiment. La surface et la profondeur maximum d'échantillonnage sont respectivement de 4 dm^2 et de 10 cm. Cette benne est donc adaptée pour la calibration des images acoustiques issues du sonar et donc pour l'étude des variations de granulométrie et de nature de la couverture sédimentaire

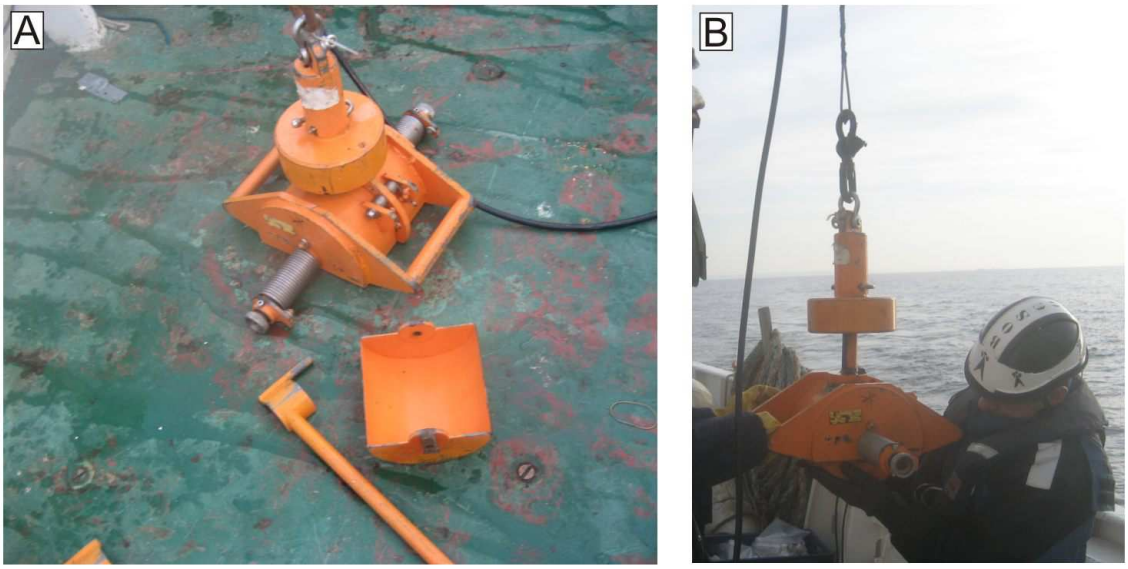


Figure 43 : Benne Shipeck. A: la partie fixe et le demi-cylindre mobile. B: en position fermé après échantillonnage.

L'intervention sur site de plongeurs permet d'effectuer des prélèvements manuels très précis. Des équipes de plongeurs sont intervenues à plusieurs reprises à partir de navires de pêche. Ces interventions ont permis d'effectuer des prélèvements superficiels au droit de sillon et de crête de sillon. Ces prélèvements permettent d'étudier les variations de granulométrie et de nature de la couverture sédimentaire au droit des sillons.

d. Caméra vidéo

Les appareils photos, caméras vidéo sous marins apportent des images en couleurs ou en noir et blanc du fond. Ils apportent des informations qualitatives directes, sur le paysage, la morphologie et la couverture sédimentaire (nature, granulométrie et corps sédimentaires). Pour une photographie, l'information sera ponctuelle. En fonction de l'utilisation de la caméra vidéo (tractée, pendulaire ou installée sur un ROV) et du temps d'enregistrement, l'information sera ponctuelle ou concernera plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètre.

En apportant une image du paysage sous-marin, ces outils offrent une vision des fonds à une échelle métrique selon une résolution pluri-centimétrique, qui complète celles offertes par les prélèvements sédimentaires et les outils acoustiques (sondeur multifaisceaux, sonar à balayage latéral).

Au cours des campagnes en mer, ces informations visuelles ont été acquises par l'intermédiaire des photographies prises par les équipes de plongeurs, d'une caméra vidéo installée sur une troïka ou sur un bâti instrumental et d'un ROV (Figure 44).

La caméra vidéo installée sur la troïka est concue par la société Osprey. Le ROV utilisé est de type LBV200²L de chez Seabotix ; il a été mis en œuvre par Sophie Lozach dans le cadre de sa thèse de doctorat (Lozach, 2011) et est sous la responsabilité de Jean-Claude Dauvin (UMR CNRS 6143 « M2C »). Il peut

aller jusqu'à une profondeur de 200 m (250 m de câble) et pèse 12 kg. Il est équipé de quatre moteurs : trois horizontaux (deux à l'arrière et un latéral) et un vertical. La vitesse de l'engin est réglable et peut aller jusqu'à trois nœuds en surface. Il est équipé de deux caméras, une principale couleur et une secondaire noir et blanc. Les caméras sont orientables sur 180°.

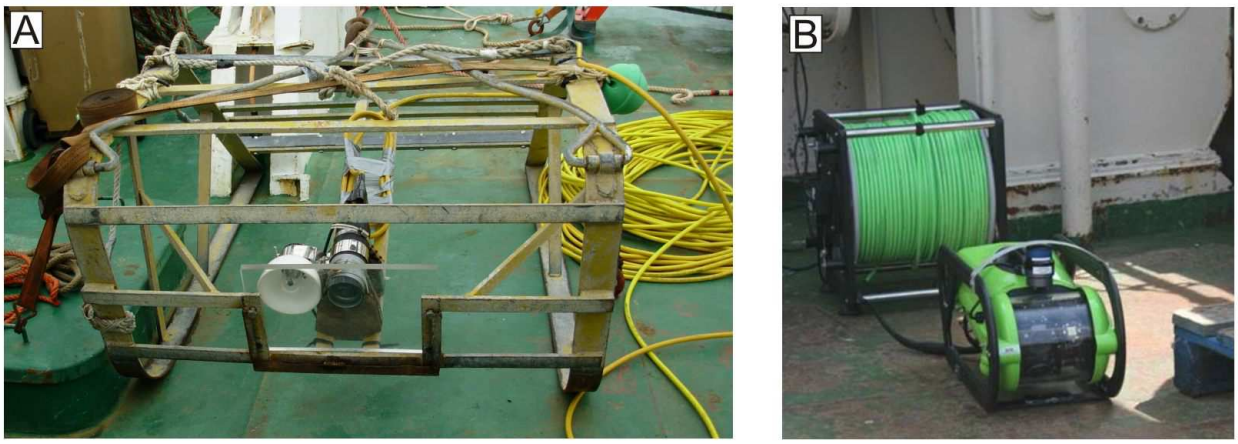


Figure 44 : Les caméras vidéos. A: Caméra Osprey et son projecteur installée sur la troïka. B: ROV LBV200^{2}L.

3.2.3. Données

a. Données antérieures à l'étude

Sur le chantier de Dieppe, d'importants jeux de données ont été acquis par l'Université de Rouen (UMR CNRS 6143 « M2C ») pour la caractérisation des impacts de l'extraction sur les caractéristiques morpho-sédimentaires des fonds sur une période de 4 ans. Ils ont été valorisés dans le cadre de stages (His, 2005b; Czabanski, 2006, 2007; Biville, 2008) et de publications (Desprez *et al.*, 2010; Le Bot *et al.*, 2010). La comparaison des impacts morpho-sédimentaires avec ceux observés en Baie de Seine sera basée sur les résultats issus de ces travaux antérieurs.

Sur le site en Baie de Seine, peu de données sont disponibles au démarrage de la présente étude. Deux campagnes bathymétriques, réalisées par le SHOM en 1968 et 1978 englobent le secteur d'expérimentation. Ces relevés permettront d'étudier l'évolution bathymétrique naturelle du site à l'échelle décennale (Figure 45).

Des prélèvements sédimentaires effectués à la benne Hamon en 1990, 1993, 1998 et 2007, réalisés par l'UMR CNRS 6143 et le GEMEL, permettent de connaître la variabilité spatiale naturelle de la couverture mobile et son évolution décennale (Figure 45).

Deux campagnes de carottages menées par Alluvial Mining en 1972 et le CNEXO en 1976 permettrent de connaître la variabilité verticale et latérale des couches sédimentaires (Figure 45).

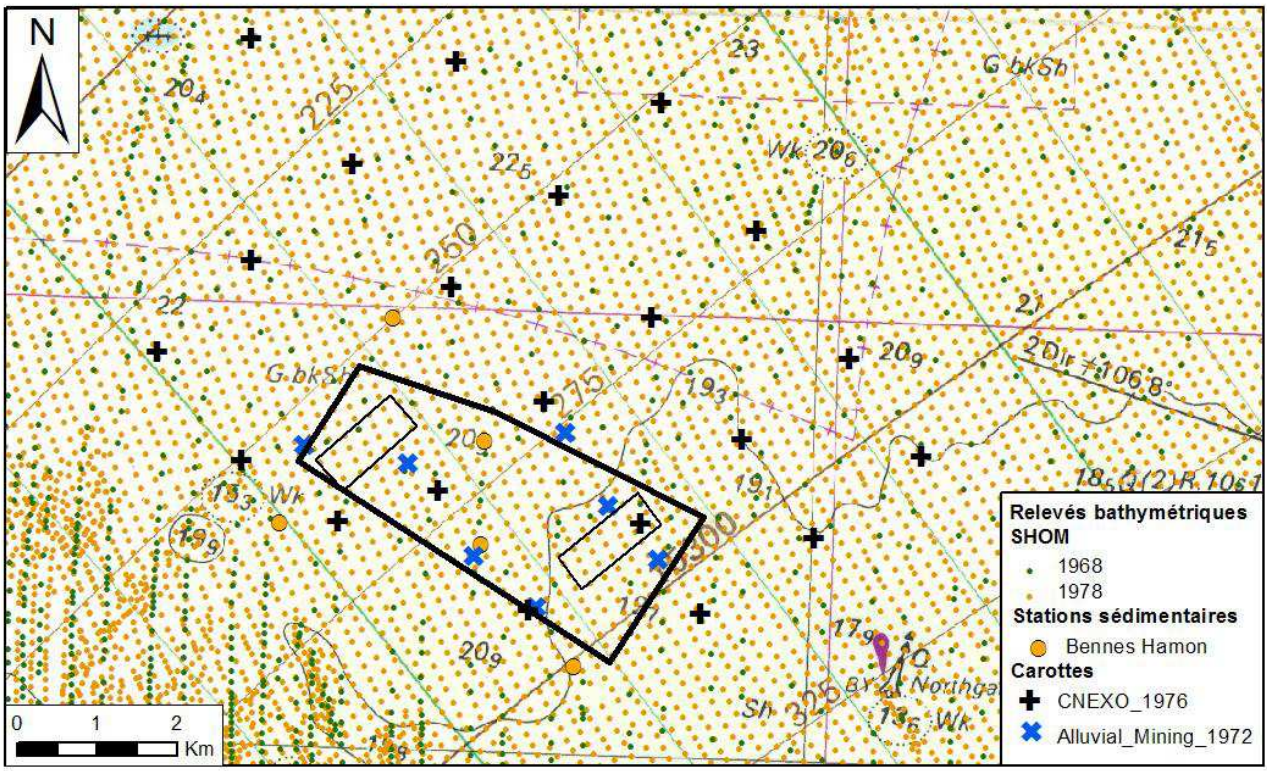


Figure 45 : Localisation des données antérieures utilisées dans le cadre de l'étude pour la caractérisation morpho-sédimentaire des impacts (fond : carte marine n° 6857 du SHOM).

b. Données acquises pour l'étude

Des campagnes ont été réalisées sur le chantier en Baie de Seine pour l'analyse des impacts morpho-sédimentaires sur les fonds.

Pour répondre aux objectifs de l'étude, six campagnes de mesures ont été réalisées entre 2007 et 2010 par l'Université de Rouen (UMR CNRS 6143 « M2C »). Le déroulement de ces campagnes (chronologie, navires utilisés et travaux effectués) est synthétisé dans le Tableau 8. On distingue : (i) les campagnes effectuées sur des navires côtiers de l'INSU/CNRS et de l'IFREMER (mis en œuvre Genavir) en collaboration avec l'Université du Havre (Granimp07, -08a, -08b, -09a, -09b et -10a), et (ii) des suivis bathymétriques et sonar de la concession minière réalisés en collaboration avec le GIE GMN. Pour simplifier ce planning d'acquisition, les suivis de l'exploitation ont été regroupés dans les campagnes Granimp en fonction de leurs dates d'acquisition.

Tableau 8 : Synthèse des données morpho-sédimentaires acquises lors des campagnes à la mer effectuées entre 2007 et 2010.

Campagnes	Dates	Navire	Organisme	Opérations/Matériels	Chef de Mission
Granimp07	18/04/2007	Hyphos (Grand Port du Havre)	GIE GMN / Univ. Rouen	**Couverture bathymétrique** SMF Reason Seabat 8101, XX km (zone A, zone B et proches pourtours)	N. Delsinne
	juin-07	Richard Bruno		**Couverture de Sonar à balayage latéral** sonar Edgetech 272 TD, 22 km (zone A, zone B et proches pourtours) **Prélèvements sédimentaires** Bennes Shipeck : 9 (C.S)	N.Delsinne
Granimp08a	avr-08	Côte d'Aquitaine (INSU-CIRMAT)	Université de Rouen	**Prélèvements sédimentaires** Bennes Shipeck : 105 **Vidéos sous-marine** Troïka : XX km	S. Le Bot, **P-A Duclos**
	12/06/2008	Hyphos (Grand Port du Havre)	GIE GMN / Univ. Rouen	**Couverture bathymétrique** SMF Reason Seabat 8101 XX km (zone A, 2 profils sur zone B) **Couverture de Sonar à balayage latéral** sonar Klein 3900, 6 km (zone A)	N. Delsinne
Granimp08b	oct-08	Thalia (GENAVIR-CIRMAT)	Université de Rouen	**Prélèvements sédimentaires** Bennes Shipeck : 25 (S.S.) **Courantométrie :** ADP Sontek 1 MHz (UMR CNRS 6143, M2C / IRSN) : 30 jours Aquadopp 2 MHz : 4 jours	**P-A Duclos**
	27/01/2009	Hyphos (Grand Port du Havre)	GIE GMN / Univ. Rouen	**Couverture bathymétrique** SMF Reason Seabat 8101 XX km (zone A et zone B) **Couverture de Sonar à balayage latéral** sonar Klein 3900, 14 km (zone A et zone B)	N.Delsinne
Opération de nivellement	fev-09	Le Caux (Grand Port du Havre) Hyphos (Grand Port du Havre)	GIE GMN / Univ. Rouen	**Nivellement** zone A (moitiée S-E) **Couverture bathymétrique** SMF Reason Seabat 8101 XX km (zone A)	N.Delsinne
Granimp09a	mai-09	Côte d'Aquitaine (INSU-CIRMAT)	Université de Rouen	**Prélèvements sédimentaires** Bennes Shipeck : 27 (S.S.) **Vidéos sous-marine** ROV	**P-A Duclos**
	23-24/05/09	Richard Bruno		**Prélèvements sédimentaires** Plongeurs : 3 (sillons) **Courantométrie :** Aquadopp 2 MHz : 1 jour (crête sillon) Aquadopp 2 MHz : 1 jour (sillon)	
	29/09/2009	Hyphos (Grand Port du Havre)	GIE GMN / Univ. Rouen	**Couverture bathymétrique** SMF Reason Seabat 8101, XX km (zone A et zone B) **Couverture de Sonar à balayage latéral** sonar Klein 3900, 7 km (zone B)	N.Delsinne
		Richard Bruno	Université de Rouen	**Prélèvements sédimentaires** Plongeurs : 3 (sillons)	**P-A Duclos**
Granimp09b	oct-09	Thalia (GENAVIR-CIRMAT)	Université de Rouen	**Couverture bathymétrique** SMF EM1000 95 kHz (IFREMER) XX km (expérimentation étendue) **Couverture de Sonar à balayage latéral** sonar Edgetech DF 1000 DCI (IFREMER) XX km (expérimentation étendue) **Prélèvements sédimentaires** Bennes Shipeck : 35 (S.S.), 14 (C.S.)	**P-A Duclos**
	27/01/2010	Hyphos (Grand Port du Havre)	GIE GMN / Univ. Rouen	**Couverture bathymétrique** SMF Reason Seabat 8101 XX km (zone B) **Couverture de Sonar à balayage latéral** sonar Klein 3900 8 km (zone B)	N.Delsinne
Granimp10a	mars-10	Côte de la Manche (INSU-CIRMAT)	Université de Rouen	**Prélèvements sédimentaires** Bennes Shipeck : 41 **Vidéos sous-marine** bâti instrumental, pendulaire **Courantométrie :** Aquadopp 2 Mhz : 5 jours	**P-A Duclos**
	22/09-30/09/10	Hyphos (Grand Port du Havre)	GIE GMN / Univ. Rouen	**Couverture bathymétrique** SMF Reason Seabat 7101 XX km (zone A et zone B étendues) **Couverture de Sonar à balayage latéral** sonar Klein 3900, 30 km (zone A et zone B étendues)	N.Delsinne

S.S. : Stations de suivis **C.S.** : Calibration sonar

La campagne Granimp07 a permis d'effectuer l'état de référence morpho-sédimentaire des sites d'extraction (zone A et zone B) avant le début des activités d'extraction (octobre 2007).

La campagne Granimp08a a permis d'apporter une connaissance détaillée de la variabilité naturelle de la couverture sédimentaire par l'intermédiaire de profils vidéo et de prélèvements sédimentaires. Lors de cette campagne, même avec une faible intensité, les extractions avaient déjà débutées sur la zone A (19 000 m^3 extraits). Par conséquent pour déterminer la variabilité naturelle des grilles de prélèvements ont été effectuées en dehors de la zone A (deux grilles avec un pas de 200 m sur les zones A et B et une grille avec un pas de 600 m sur l'ensemble du site d'expérimentation).

Les campagnes Granimp08a et -08b ont permis d'étudier les impacts d'une extraction peu intensive et de courte durée sur la zone A (de nov. 2007 à oct. 2008) à l'aide de couvertures bathymétrique et sonar, et de stations sédimentaires de suivis réalisés (Figure 46).

Les campagnes Granimp09a, -09b et -10a ont permis d'étudier la restauration naturelle de la moitié nord de la zone A (sous-zone AN) et la restauration forcée de la moitié sud de la zone A (sous-zone AS).

Les campagnes Granimp08b, -09a, -09b et -10a ont permis d'étudier les impacts morpho-sédimentaires à l'aide des stations sédimentaires de suivi (Annexe 2) et des couvertures bathymétriques et sonar sur la zone B où l'extraction a duré plus longtemps et était de plus forte intensité (débuté en nov. 2008).

La campagne Granimp09a a permis une meilleure compréhension des impacts au droit des sillons par l'intermédiaire de prélèvements sédimentaires effectués par des plongeurs et par des mesures de courants au sein d'un sillon et sur sa crête.

La campagne Granimp09b avait également pour objectif d'étudier les caractéristiques morpho-sédimentaire du site à plus large échelle et d'identifier d'éventuels dépôts de surverse à l'aide d'une couverture sonar et bathymétrique étendue au-delà du site d'expérimentation (Figure 46).

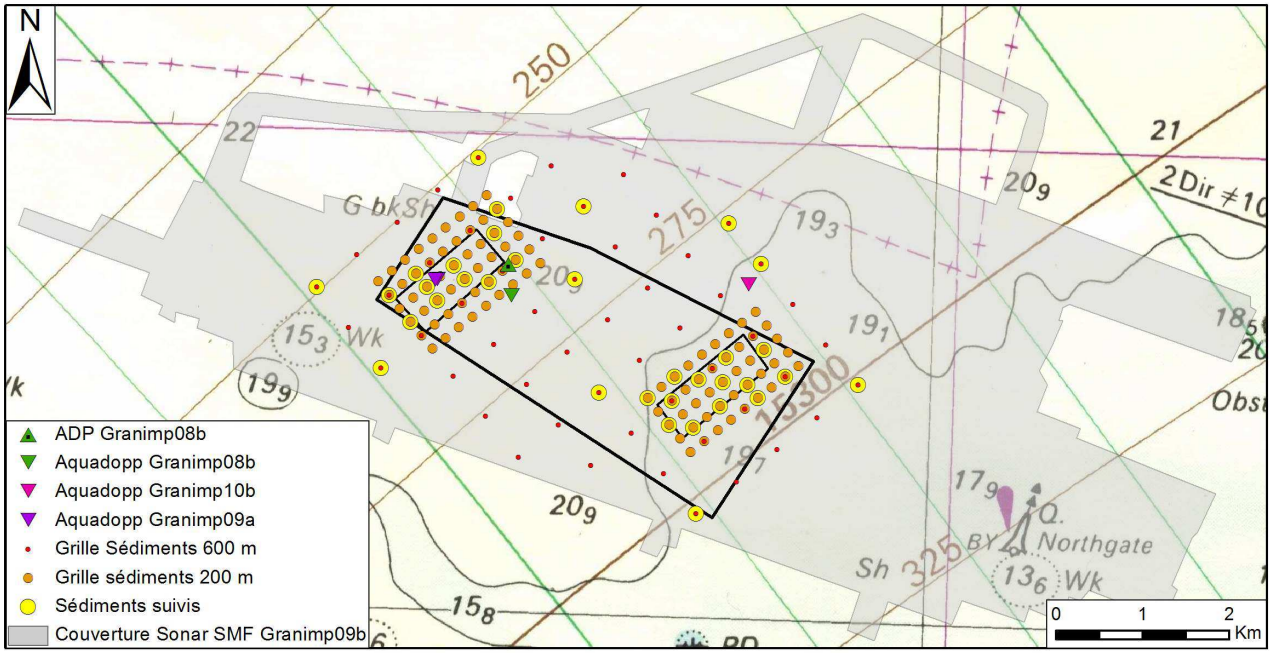


Figure 46 : Localisation des données acquises pour l'étude pour la caractérisation morpho-sédimentaire des impacts.

3.2.4. Post-traitements en laboratoire

a. Sondeur multifaisceaux

Les données bathymétriques multi-faisceaux acquises lors des campagnes Granimp ont été importées et traitées grâce au logiciel CARAIBES®. Le logiciel **CARAIBES** © (**CAR**tographie **A**ppliquée à l'**I**magerie et la **B**athymétri**E** des **S**onars et sondeurs multifaisceaux) est le système Ifremer de traitement des données sondeurs multifaisceaux et sonars latéraux.

Ce logiciel a été récemment acquis par l'UMR CNRS 6143 M2C. La mise au point de ces traitements et leur validation ont représenté une importante partie du travail de cette thèse. Ce traitement est basé sur une chaîne de traitement faisant appel à un ensemble de modules.

Indépendamment des données acoustiques, la navigation est lissée et épurée des positions aberrantes. Les données acoustiques sont alors fusionnées avec les données de navigation pour obtenir des données acoustiques géoréférencées sur lesquelles une série de traitements sera appliquée.

Tout d'abord la marée est corrigée afin de rapporter les profondeurs au zéro hydrographique. La marée a été corrigée grâce aux hauteurs d'eau simulées par le SHOM sur la zone d'étude et en intégrant les surcotes/décotes enregistrées au marégraphe du Havre. Puis, une correction de la célérité est appliquée (grâce aux profils verticaux de la température et de la salinité réalisés à l'aide d'une sonde Sippican plusieurs fois par jour). Ensuite, les données acoustiques sont filtrées et lissées pour atténuer certains artéfacts et les effets de la houle (lorsque celle-ci n'était pas suffisamment corrigée par la centrale d'attitude). Une série de traitements supplémentaires est nécessaire du fait du problème de circularisation que présente l'EM1000 utilisé. Ceci induit une convexité des profils bathymétriques sur leur section transversale, et cela malgré une correction fine de la célérité. Ainsi, plus les sondes sont éloignées de la verticale du bateau, plus la profondeur est surestimée. Une série de traitements développée par Breton (2009) a du être adaptée à nos acquisitions. Un MNT référence avec des mailles d'une largeur proche de celle de la fauchée est réalisé pour chaque profil bathymétrique en ne considérant que quelques faisceaux centraux. Ensuite, ce MNT référence est comparé à chaque profil pour en déduire une courbe de biais propre à chaque profil. En corrigeant les profils, préalablement filtrés et lissés, par leur courbe de biais respective, les profils bathymétriques traités finaux sont obtenus. Par la suite le logiciel Caraïbes permet d'exporter des MNT (format ascii ou raster, au choix) et l'ensemble des profils traités sous format .txt pour une analyse sous SIG.

b. Sonar à balayage latéral

Les données du sonar à balayage latéral, acquises lors des campagnes Granimp, ont été importées et traitées grâce au logiciel CARAIBES®.

La mise au point de ces traitements et leur validation sont chronophages et ont consisté à une grande partie du travail de traitement acquise dans cette thèse. Ce traitement est basé sur une chaîne de traitement faisant appel à un ensemble de module.

Les données brutes contiennent les données de réflectivité et les données de navigation. Avant de débuter le traitement de la réflectivité sensu stricto, il est nécessaire d'extraire la navigation des données brutes pour pouvoir la traiter en la lissant et en épurant les positions aberrantes.

Une fois la navigation traitée, celle-ci doit être fusionnée avec les données de réflectivité pour obtenir des données acoustiques géoréférencées sur lesquelles une longue série de traitements sera appliquée.

Le premier traitement consiste à effectuer une correction de halo sur l'ensemble des profils afin d'égaliser la dérive des valeurs de réflectivité en fonction de l'angle d'incidence. Pour cela, un ou plusieurs fichiers d'antenne (fonction de l'hétérogénéité de la zone étudiée) sont créés pour chaque zone de réflectivité

homogène. Ensuite, ces fichiers d'antenne sont modélisés en calculant une valeur de réflectivité tous les n degrés et le gain de référence de la zone sur un secteur angulaire représentatif. La correction de halo correspond à l'application de ces fichiers modélisés aux fichiers bruts.

Le second traitement consiste à corriger et valider la hauteur et la réduction de portée.

Le troisième traitement a pour objectif de nettoyer et valider des données d'en tête de lignes notamment le cap et l'immersion.

Le quatrième traitement aboutit à la constitution de la mosaïque finale. Deux étapes sont distinguées. Tout d'abord la préparation de la mosaïque en définissant les données d'entrée (fichiers de réflectivité et navigation) et la géométrie de la mosaïque (projection et orientation de la mosaïque). Puis l'image mosaïque, dont les valeurs de réflectivités sont codées en niveau de gris, est conçue à partir des caractéristiques de la mosaïque définies dans la première étape et des profils sélectionnés. Une mosaïque globale ou des mosaïques par profils peuvent être ainsi conçues.

Par la suite, le logiciel Caraïbes permet d'exporter la mosaïque globale ou les mosaïques de chacun des profils (format ascii ou flt) pour une analyse sous SIG.

c. Prélèvements sédimentaires

- Lavage et granulométrie par tamisage

Les échantillons sont lavés à l'eau douce sur un tamis de maille 63 µm afin de séparer la fraction fine de la fraction grossière. L'eau chargée en particules fines est récupérée et laissée à décanter dans de grandes coupelles. Une fois décantée les fines (< 63 µm) sont récupérées et pesées après séchage en étuve (à 60°C). Une fois sec, le refus de tamis grossier est trié granulométriquement sur une colonne de tamis. La colonne est constituée de 26 tamis de mailles carrés (en mm) : 20 / 16 / 12,5 / 10 / 8 / 6,3 / 5 /4 / 3,15 / 2,5 / 2 / 1,6 / 1,25 / 1 / 0,8 / 0,63 / 0,5 / 0,4 / 0,315 / 0,25 / 0,2 / 0,16 / 0,125 / 0,1 / 0,08 / 0,063. Une fois décantée le sous-échantillonnage fin est récupéré et pesé après séchage (à 60°C). Les données granulométriques de chaque classe sont rentrées dans le logiciel GRANUSH développé par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). Ce logiciel permet : (i) de calculer les pourcentages massiques des différents refus de tamis et de dessiner des courbes granulométriques cumulatives, (ii) de calculer les paramètres granulométriques de chaque échantillon selon la méthode des moments statistiques (Rivière, 1977) ainsi que la typologie du sédiment selon la classification de Folk (1954).

- Granulométrie laser

Un granulomètre laser de laboratoire de type LS230 de la société Beckman a été utilisé pour détailler le spectre granulométrique de certains échantillons sédimentaires. Il présente une gamme de mesure comprise entre 0,04 et 2 000 µm. L'échantillon est éclairé successivement à trois longueurs d'onde : 450 nm, 600 nm et 900 nm.

- Calcimétrie

Le calcimètre Bernard est un outil qui permet de mesurer la proportion de carbonate de calcium des composants d'une roche ou d'un sédiment.

Cette technique consiste à utiliser la propriété du carbonate de calcium ($CaCO_3$) à se décomposer, sous l'action de l'acide chlorhydrique, en H_2O et CO_2. Le volume de CO_2 dégagé, issu de la décomposition du carbonate, est mesuré dans une colonne graduée étanche par la variation du niveau d'eau.

3.3. Analyse des données

3.3.1. Interpolation et représentation 3D

La stratégie de notre étude est basée sur des échelles spatiales et temporelles emboîtées. Pour pouvoir analyser au mieux, dans le détail, ou pour avoir une vue globale de chacun, des types de données, il est nécessaire de représenter la donnée et ces variations en 3D, soit sous forme de carte (latitude,longitude et donnée) pour l'étude des variations spatiales d'une donnée sur un plan horizontal (ex : couverture sédimentaire), soit sous forme de profils verticaux temporels (hauteur de la colonne d'eau, temps et donnée) pour l'étude des variations temporelles d'une donnée selon un profil vertical (ex : évolution temporelle des paramètres hydrologiques) ou encore sous forme de transects verticaux dans la colonne d'eau (hauteur d'eau, largeur ou longueur et donnée) pour l'étude du panache turbide par exemple.

Les données acquises présentent souvent un pas d'acquisition (spatial, temporel et spatio-temporelle) irrégulier lié, à l'absence de donnée, induit par des artéfacts ou une interruption de l'acquisition.

Pour pouvoir réaliser de tels documents en 3D mais aussi pour affiner la résolution de ces données, il est nécessaire d'interpoler les données initiales selon un maillage régulier.

Pour effectuer ces interpolations, nous avons utilisé le logiciel Surfer (Golden Software). Cet outil propose un large choix de méthode d'interpolation. Il permet également de modifier de nombreux paramètres pour chacune des méthodes proposées. Par exemple, dans le cas d'une interpolation par krigeage, un variogramme pourra être calculé selon différent modèle proposé, celui-ci pourra être modifié et adapté par l'utilisateur. Ce logiciel permet également de réaliser de nombreux calculs sur grille : dérivé première, dérivé secondaire, soustraction, calcul de volume, etc. Les principaux paramètres statistiques sont également calculés.

Les grilles résultantes de ces interpolations peuvent être exportées pour notamment une utilisation sous SIG.

3.3.2. Analyse sous SIG

Les systèmes d'Informations Géographiques sont devenus un outil indispensable pour la réalisation d'études basées sur l'analyse d'une multitude de données spatialisées. Ils permettent de représenter cartographiquement des données géoréférencées. L'utilisateur peut organiser et regrouper chacun des éléments géoréférencés en fonction des paramètres saisis. Ces différents éléments sont représentés sous forme de couches empilables dont la visualisation graphique peut se faire à des échelles différentes.

Les SIG permettent également des calculs statistiques spatialisés pour une même couche de données ou pour plusieurs couches entre elles. De nouvelles couches peuvent être créées permettant à l'utilisateur de représenter graphiquement ses analyses et ses interprétations. Les SIG facilite donc l'analyse croisée des jeux de données.

Dans le cadre de cette étude, le logiciel ArcGIS® a été utilisé.

3.3.3. Statistiques

Plusieurs tests statistiques sont utilisés dans cette étude. Le test Z (Escofier et Pagès, 1990; Lebart *et al.*, 1995) et celui de Kruskal-Wallis (Kruskal et Wallis, 1952) ont servi à prouver la significativité de la modification des valeurs de paramètres physiques, induite par les impacts engendrés par l'extraction.

Le test z permet la comparaison des moyennes de deux échantillons. Il est paramétrique car il suppose que les échantillons soient distribués suivant des lois normales. Cette hypothèse nécessite d'effectuer au préalable un test de normalité (Shapiro-Wilk et Anderson-Darling). Le test z a été appliqué pour étudier les différences des paramètres morphologiques des excavations en fonction des conditions d'extraction.

Le test de Kruskal-Wallis est un test non paramétrique, utilisé lorsque l'hypothèse de normalité ou d'homoscédasticité n'est pas acceptable. Il est appliqué sur k échantillons indépendants (k>2). Il permet de déterminer si les échantillons proviennent d'une même population. Ce test a été utilisé pour étudier les différences de proportions de chaque classe granulométrique entre les échantillons sédimentaires prélevés dans les zones d'extraction ou de dépôts et ceux prélevés dans le milieu non-impacté. Lorsqu'une différence significative existe entre au moins deux échantillons, un test post-hoc permet d'identifier ces différences et de les qualifier (Annexe 3).

L'utilisation des Analyses Factorielles Discriminantes (AFD) en science de la Terre s'avère être un bon outil pour la discrimination de groupes d'échantillons aux caractéristiques communes (Fournier *et al.*, 2007). De telles analyses ont été effectuées pour différencier les groupes d'échantillons de sédiments dont les proportions granulométriques de chaque classe ont été définies en population par le test de Kruskal-Wallis et post hoc. L'interprétation de ces AFD est d'évaluer et de synthétiser les impacts de l'extraction et les effets de la restauration. Les projections factorielles permettent de distinguer des groupes d'échantillons aux caractéristiques similaires. Les groupes d'échantillons vont être définis à priori pour répondre à la question de l'impact de l'extraction (zone extraite, périphérie proche et périphérie éloignée) et de la restauration (non

impacté, extrait et en restauration). L'AFD est une Analyse en Composante Principale (ACP) sous contrainte d'une variable instrumentale. Le principe d'identification des plans factoriels est identique à celui des ACP, s'ajoute en plus la contrainte d'appartenance des individus (ici groupes d'échantillons sédimentaires) à une variable instrumentale qui sera vérifiée statistiquement par leur probabilité d'appartenance majoritaire en fonction de leur valeurs prisent par variable. La projection des groupes d'échantillons sur les axe des variables les plus représentatives permet d'obtenir deux informations majeures : (i) l'identification des caractéristiques des groupes sur la base de variables explicatives et (ii) l'ampleur de la distinction factorielle de ces groupes permet de discriminer les effets de l'impact de l'extraction et de la restauration.

3.4. Expression de l'intensité d'extraction

L'expression de l'intensité de l'extraction dépend souvent du type d'étude effectuée et des objectifs de l'étude. Généralement, celle-ci est exprimée en heure.ha^{-1}.an^{-1} pour les études de suivis du benthos (*e.g.* Boyd *et al.*, 2003; Boyd *et al.*, 2004; Cooper *et al.*, 2007b) à l'aide d'un maillage réalisé au pas d'un hectare calculant l'intensité pour chaque cellule du maillage.

Etant donné l'intervention de DAM aux débits différents sur le site de Baie de Seine, il est important d'opter pour le volume extrait cumulé, et non, seulement pour une durée d'extraction. En effet, l'intensité exprimée en h.ha^{-1} est directement corrélable avec le nombre de passages mais n'est pas corrélable avec le volume extrait dans le cas d'une extraction employant des dragues aux débits différents (Figure 47). Toutefois pour une conformité avec les études antérieures, l'intensité d'extraction est également exprimée en h.ha^{-1}.an^{-1}.

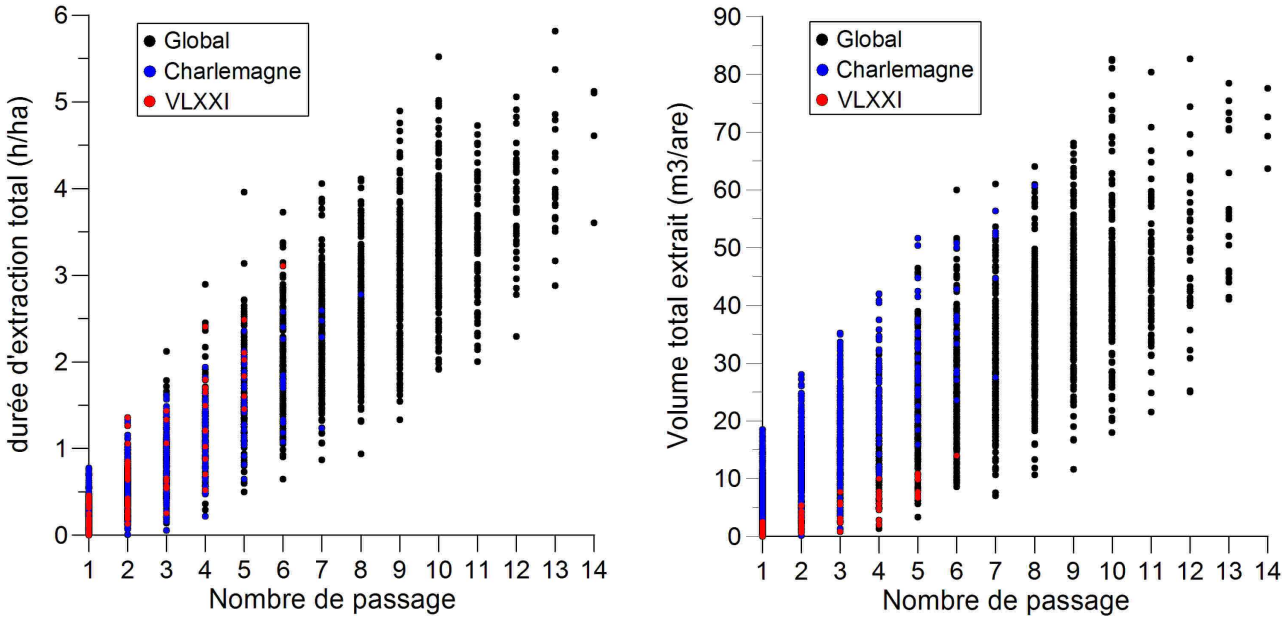


Figure 47 : Durée d'extraction et volume extrait en fonction du nombre de passage de la tête d'élinde sur le site de Baie de Seine.

L'information de surfaces extraites est également importante pour une corrélation des études avec des suivis biologiques (benthos). Cette information est donnée en pourcentage de surface extraite au regard de la superficie totale du permis d'extraction.

Pour une comparaison plus aisée avec la synthèse bibliographique de Foden et al. (2009), l'information d'intensité est également exprimée en $t.km^{-2}.an^{-1}$. Sur le site de Baie de Seine, la conversion entre volume extrait et masse extraite est effectuée à partir d'une densité de 1,55 (communication personnelle GIE GMN).

Chapitre II

Panache turbide

1. Introduction

La caractérisation du panache turbide généré à l'arrière de la drague par surverse a été réalisée sur les deux sites : en Baie de Seine et au large de Dieppe. Le suivi est plus complet sur le site en Baie de Seine que sur le site de Dieppe.

Ce chapitre est organisé en trois parties : une première propre au site de la Baie de Seine, une seconde propre au site de Dieppe et une troisième partie de synthèse. Pour pouvoir qualifier et quantifier le réel impact lié à cette remise en suspension artificielle, il a été nécessaire pour chacun des deux sites de définir d'abord les caractéristiques du milieu naturel et leur évolution spatio-temporelle.

Le panache turbide est décrit par les caractéristiques de sa source, la surverse au niveau de la drague et par l'évolution globale des MES en surface. L'extension et la géométrie du panache en surface puis son évolution temporelle depuis sa formation à l'arrière de la drague jusqu'à sa disparition permettent de caractériser sa dynamique.

Une synthèse des résultats issus de ces suivis est présentée afin de :

- de généraliser les impacts spatio-temporels liés à ce panache,
- de mettre en évidence les processus de la création jusqu'à la disparition du panache,
- de mettre en évidence les facteurs forçants sur la dynamique du panache,
- de proposer des indices d'évaluation de l'impact lié aux panaches turbides.

2. Site de Baie de Seine

2.1. Caractéristiques hyrdologiques

La variabilité de l'hydrodynamisme, dont celle des courants et de la houle, engendre différentes conditions hydrodynamiques pendant les extractions. Les courants et la houle sont les forçages de la mobilité et du maintien en suspension du panache turbide. Les variabilités des paramètres hydrologiques telles que la température et la salinité peuvent influencer des mouvements dans la colonne d'eau et sont importantes à connaître pour pouvoir ajuster la calibration du signal rétro diffusé de l'ADCP. La variabilité des concentrations, granulométrie et nature des MES en suspension dans le milieu est contrôlée par ces forçages.

Les campagnes Granimp08a, -08b, -09a, -09b et -10a (Tableau 7, p 56) ont permis d'acquérir suffisamment de données pour caractériser les variabilités temporelles des caractéristiques de la colonne d'eau. Les variabilités aux échelles pluri-kilométriques sont obtenues à partir de la bibliographie.

2.1.1. Hydrodynamisme

En Baie de Seine, les courants sont alternatifs, orientés NO-SE au NO de la baie puis deviennent progressivement tri-directionnels dans la partie orientale de la baie (Figure 48). Le jusant y est dirigé vers

l'O. Dans la partie orientale, le flot débute vers le SE et se termine vers le NE, parallèlement à la côte (courant dit de Verhaule).

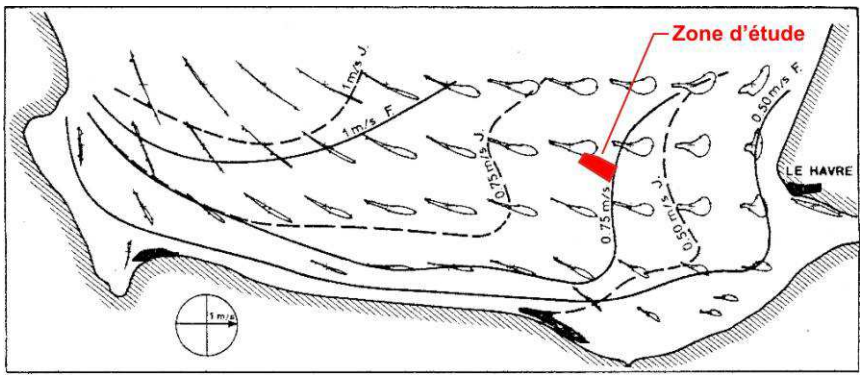


Figure 48 : Simulation des courants de marée en Baie de Seine (Salomon, 1985).

Sur le site d'étude, en VE moyenne, le marnage est compris entre 6 et 7 m. Le cycle de marée dure ici 13 h. En surface les courants sont semi-alternatifs et évoluent dans le sens anti-horaire.

L'analyse des courants et de leur variabilité à l'**échelle des cycles semi-diurnes et de ME-VE** est réalisée à partir des mesures de l'ADP Sontek et de l'Aquadopp installés au mouillage lors de la campagne Granimp08b. Ces mesures sont conformes aux observations antérieures (Le Hir et L'Yavanc, 1985).

L'étale de BM apparaît à BM+1h et dure 1 h. Le flot démarre quasi simultanément avec l'étale de BM soit à BM+1h et dure 3,5 h. Le phénomène de tenue du plein, caractéristique des marées à proximité de l'estuaire de la Seine, engendre une étale de PM de 3 h débutant à BM+4,5h. Lors de cette PM le courant de Verhaule s'installe pendant 2 h de BM+4,5h à BM+6,5h. L'étale de PM apparaît 2 h après la PM soit à BM+6,5h et dure de 1 h à 1,5 h. Le jusant débute à BM+7,5h et dure 5 h. Le flot est plus court que le jusant et présente des vitesses globalement plus importantes que le jusant (Figure 49).

Deux directions sont distinguées au cours du flot. Durant la première moitié du flot, les courants sont orientés vers l'E-SE correspondant au remplissage de l'estuaire de la Seine. Pour la seconde partie du flot, les courants sont orientés vers le NE-E correspondant à la fin du remplissage de l'estuaire et à l'établissement du courant de Verhaule qui longe les côtes havraises vers le N. En un instant donné, les courants présentent des directions sensiblement identiques sur l'ensemble de la colonne d'eau hormis à proximité du fond (5 m) où leur azimut diminue progressivement de 10° jusqu'au fond (Figure 49).

Pour les vitesses des courants, un gradient croissant est observé vers la surface. Les vitesses sont plus fortes en surface qu'en profondeur. Les vitesses instantanées maximales atteignent 1 $m.s^{-1}$ en VE. Elles sont globalement plus fortes lors du flot. En morte eau, le flot peut dépasser les 0,50 $m.s^{-1}$ en surface contrairement au jusant principalement compris entre 0,40 et 0,50 $m.s^{-1}$. Au fond, les vitesses sont sensiblement identiques entre flot et jusant, avoisinant les 0,30 $m.s^{-1}$. En vive eau, le flot et le jusant peuvent dépasser les 0,90 $m.s^{-1}$ en surface et jusqu'au milieu de la colonne d'eau. Au fond, les vitesses au flot et au jusant sont sensiblement identiques, avoisinant les 0,60 $m.s^{-1}$ (Figure 49). Aux étales, les courants ne sont pas complètement nuls. En ME, le courant de PM est orienté vers le NE avec des vitesses variant de 0,10 à 0,40

m.s^{-1} du fond vers la surface. A BM, le courant est orienté vers le S-SW avec des vitesses variant de 0,10 à 0,50 m.s^{-1} du fond vers la surface. En VE, le courant de PM est orienté vers le NE avec des vitesses d'environ 0,10 m.s^{-1} de la surface vers le fond. A BM le courant est orienté vers le S-SW avec des vitesses de 0,30 à 0,40 m.s^{-1} du fond vers la surface (Figure 49).

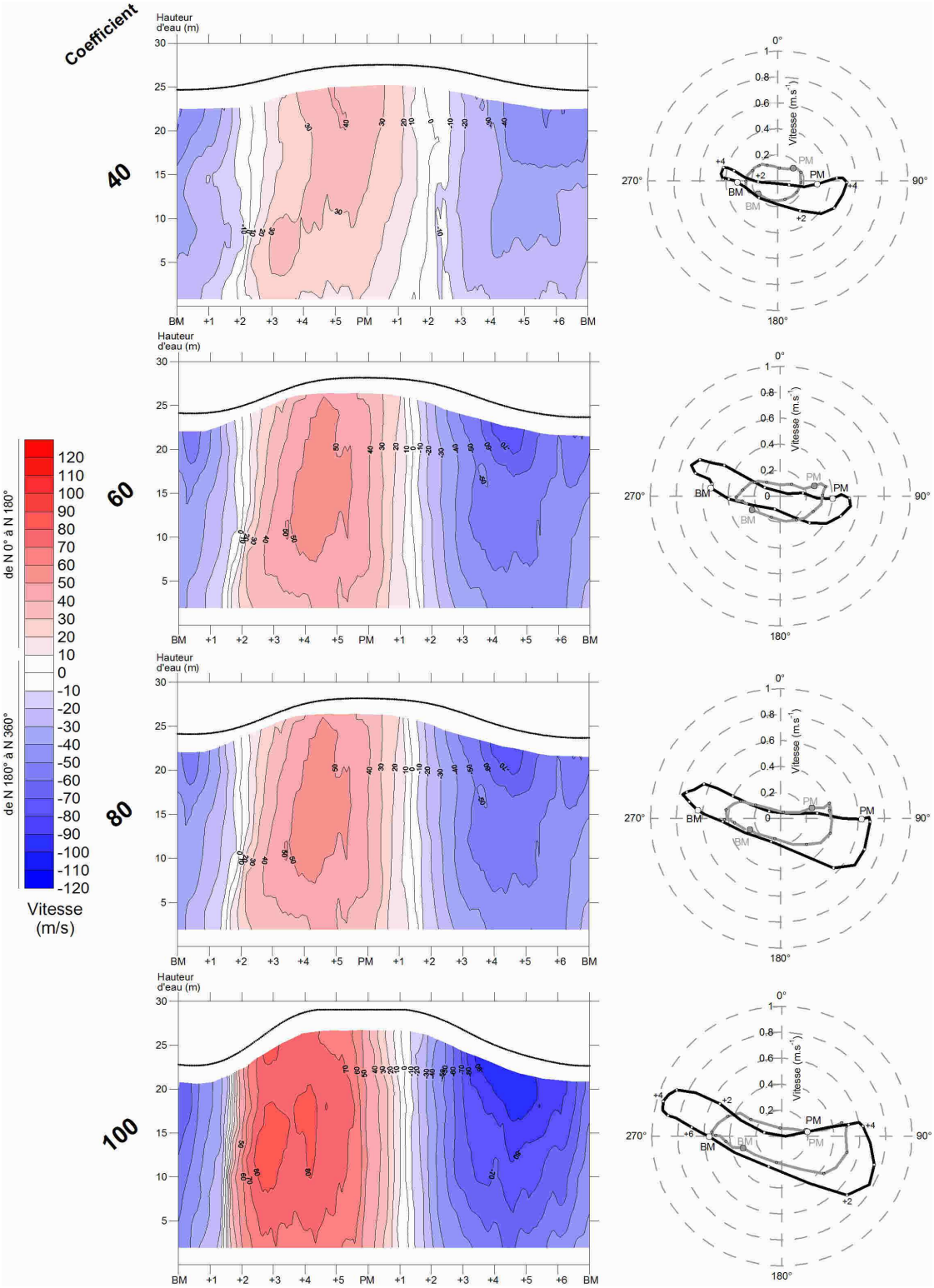


Figure 49 : Profils verticaux des vitesses de courant au cours d'un cycle de marée selon différents coefficients et roses de courants associées (gris : fond, noire : surface mesurés par l'ADCP mouillé lors de la campagne Granimp08b).

Ainsi les courants présentent une variabilité importante sur les cycles semi-diurnes et de ME/VE. Verticalement, une diminution des vitesses de courants est observée à proximité du fond. A l'échelle du site d'extraction, les courants ne présentent pas de variabilité mais évoluent spatialement sur plusieurs kilomètres (Figure 48).

Les simulations numériques à l'échelle de la Baie de Seine et de la Manche (Le Hir *et al.*, 1985; Salomon et Breton, 1991; Cugier, 1999) montrent que les eaux pénètrent par le NO de la baie et en ressortent par le NE. La circulation résiduelle est de plus en plus faible en allant vers la côte (Figure 50). Au niveau du site d'étude, la circulation résiduelle sur le secteur d'étude est orientée vers le NE mais reste relativement faible.

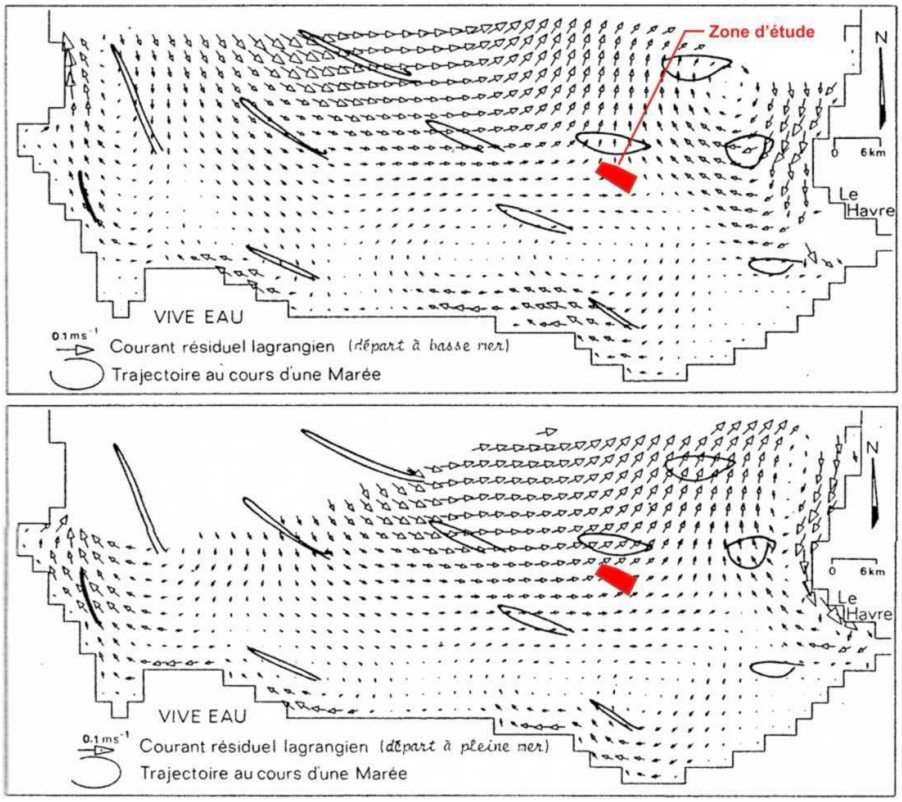


Figure 50 : Simulation bidimensionnelle des courants résiduels lagrangiens intégré sur la colonne d'eau (Le Hir *et al.*, 1985).

2.1.2. La houle

En Baie de Seine, la majeure partie des houles est générée par les vents locaux (mer de vent). Par conséquent l'étude du régime des houles nécessite l'analyse des vents du secteur (CETMEF, 2010).

L'enregistrement des paramètres météorologiques à la station du Cap de la Hève permet d'établir les conditions de vent du secteur. Ils proviennent principalement du N-NE et du SO. Les vents du N-NE présentant une probabilité d'occurrence comprise entre 0,05 et 0,1 sont les vents modérés. Les vents du SO présentant une probabilité d'occurrence comprise entre 0,02 et 0,04 sont les vents de tempêtes (Figure 51).

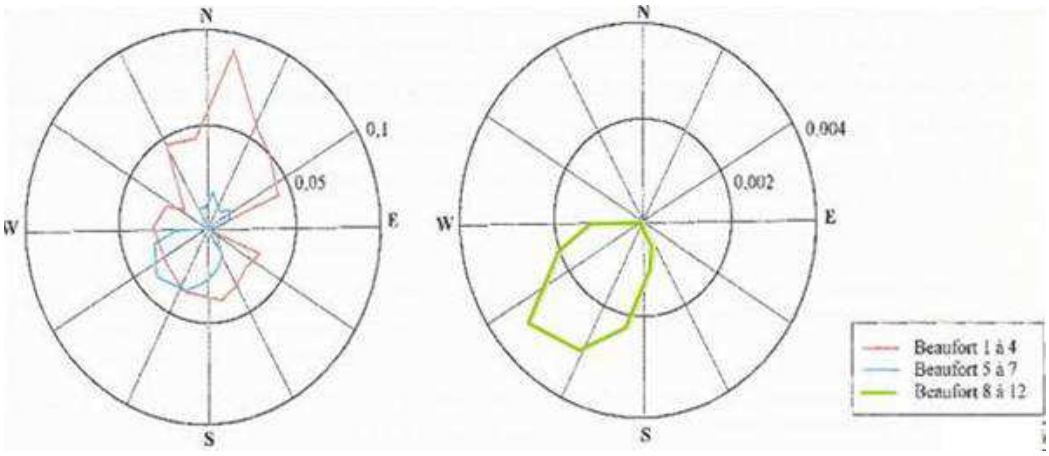


Figure 51 : Roses des vents construites à partir des données relevées au Cap de la Hève (Echelle radiale : probabilité 0 et 1) (Le Hir, 2001).

Ces vents, notamment ceux de tempêtes ont une forte influence sur la houle locale mais aussi sur les courants. Des simulations numériques indiquent que les trajectoires et vitesses de la circulation résiduelle sur l'ensemble de la colonne d'eau peuvent être modifiées par les vents (Le Hir *et al.*, 1985; Salomon et Breton, 1993).

Le CETMEF a réalisé le bilan des caractéristiques de la houle enregistrées par le bouée LHA (Figure 45) au large du Havre entre les années 1997 et 2008 (CETMEF, 2010). Les valeurs de hauteur significative (H_s) sont inférieures ou égales à 1,88m pendant 95 % du temps (Figure 52). Les valeurs de période de H_s sont inférieures ou égales à 7,9 s pendant 95 % du temps mais varient entre 3,5 s et 15,9 s. Les périodes longues sont la signature du résidu des houles du large provenant de l'Atlantique.

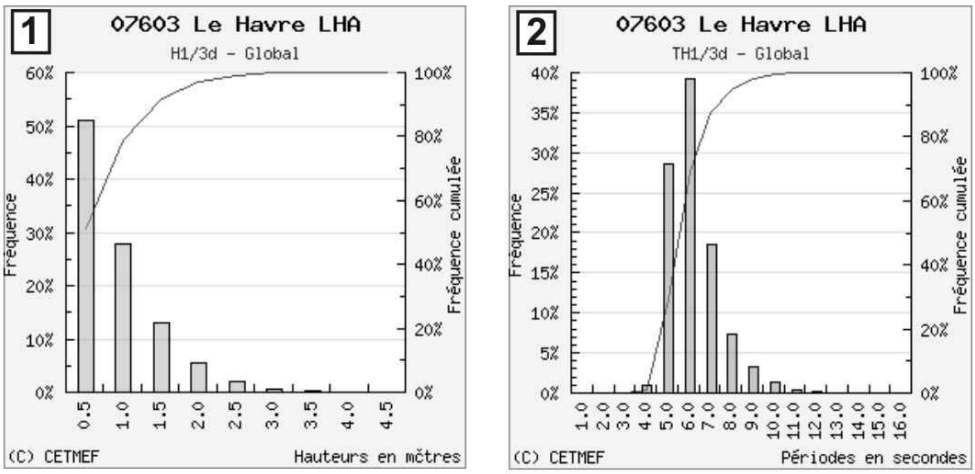


Figure 52 : Fréquence de la hauteur significative (1) et de la période significative (2) de la houle calculées à partir des enregistrements de la bouée LHA entre 1997 et 2008 (CETMEF, 2010).

Une forte tempête est définie par une hauteur H_s, supérieure à un seuil de forte tempête, fixé arbitrairement à 3,4 m (moyenne de l'ordre de 1 évènement de tempête par année de mesures effectives). La plus grande hauteur significative observée a atteint la valeur de 4,34 m. La période significative correspondante est de 8,5 s. Ces fortes tempêtes seront principalement générées par les vents de secteur SW.

2.1.3. Caractéristiques hydrologiques

a. Salinité et température

Plusieurs campagnes d'acquisitions *in situ* entre 1978 et 1994 (eg. Thalia 2, Thalia 3, Intersite 1, Sédiseine 1, Phytoseine 1, Sédiseine 2, Phytoseine 2) ont permis d'établir un bilan sur les variations de température et de salinité en Baie de Seine (Aminot *et al.*, 1997).

La salinité de la Baie de Seine est influencée par les arrivées d'eaux douces de la Seine et dans une moindre mesure de celles de la Vire et la Douve dans la baie des Veys et de l'Orne sur la côte du Calvados. Un gradient O-E décroissant est donc observé. Dans la plus grande partie de la baie, la salinité est homogène sur la verticale avec des différences entre la surface et le fond inférieures à 0,3 hormis au niveau de l'estuaire de la Seine.

La variation de la salinité dans les eaux a permis de définir quatre secteurs différents (COB, 1978). D'après cette zonation, le site d'étude se situe dans la partie de transition centrale où la salinité est comprise entre 32 et 34 (Figure 53).

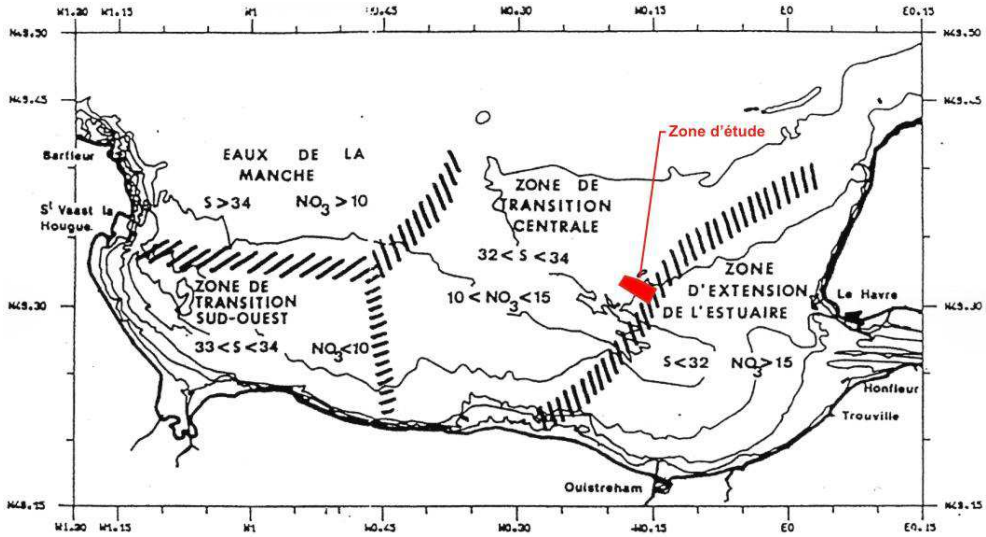


Figure 53 : Zonation de la Baie de Seine d'après la relation salinité-éléments nutritifs (COB, 1978).

La température de la Baie de Seine varie de 6 à 8 °C en hiver (février-mars) à 15 à 18 °C en juillet. Le gradient de température SE-NO s'inverse en avril, l'eau de la Seine étant plus froide que l'eau de mer en hiver et plus chaude en été. Les températures sont relativement homogènes sur la verticale. De l'automne au début du printemps, la différence de température entre la surface et le fond n'excède qu'exceptionnellement 0,5 °C. Le reste de l'année les gradients peuvent atteindre 1 à 3 °C avec les plus fortes différences dans la zone estuarienne.

Au cours de notre étude, la variabilité de ces paramètres à **l'échelle des cycles semi diurnes et ME-VE** est connue à partir de trois points fixes, réalisés les 25/03/10, 07/05/10 et 29/03/10, avec des coefficients de 47-42, 80-83 et 101-106 dans des conditions de mer calme, hors crue de la Seine (Figure 54). La salinité

mesurée, comprise entre 33,1 et 34,5 est plus élevée que celle des campagnes antérieures. Cette salinité présente un léger gradient positif vers le fond tout au long du cycle semi-diurne au cours d'une ME et seulement au BM pour des coefficients plus élevés. Les salinités sont plus basses à la fin du jusant. Ces faibles variations dans le temps et sur la verticale montrent que les eaux estuariennes influencent encore ce secteur de la baie même très légèrement. Les différences fond-surface restent cependant très faibles, inférieures à 0,5, et par conséquent il peut être considéré que les eaux du site ne sont pas stratifiées.

Les mesures de températures montrent qu'elles varient au cours de l'année mais restent globalement homogènes sur un cycle semi-diurne. Toutefois, un très léger gradient négatif (< 0,5 °C) vers le fond peut s'installer (Figure 54).

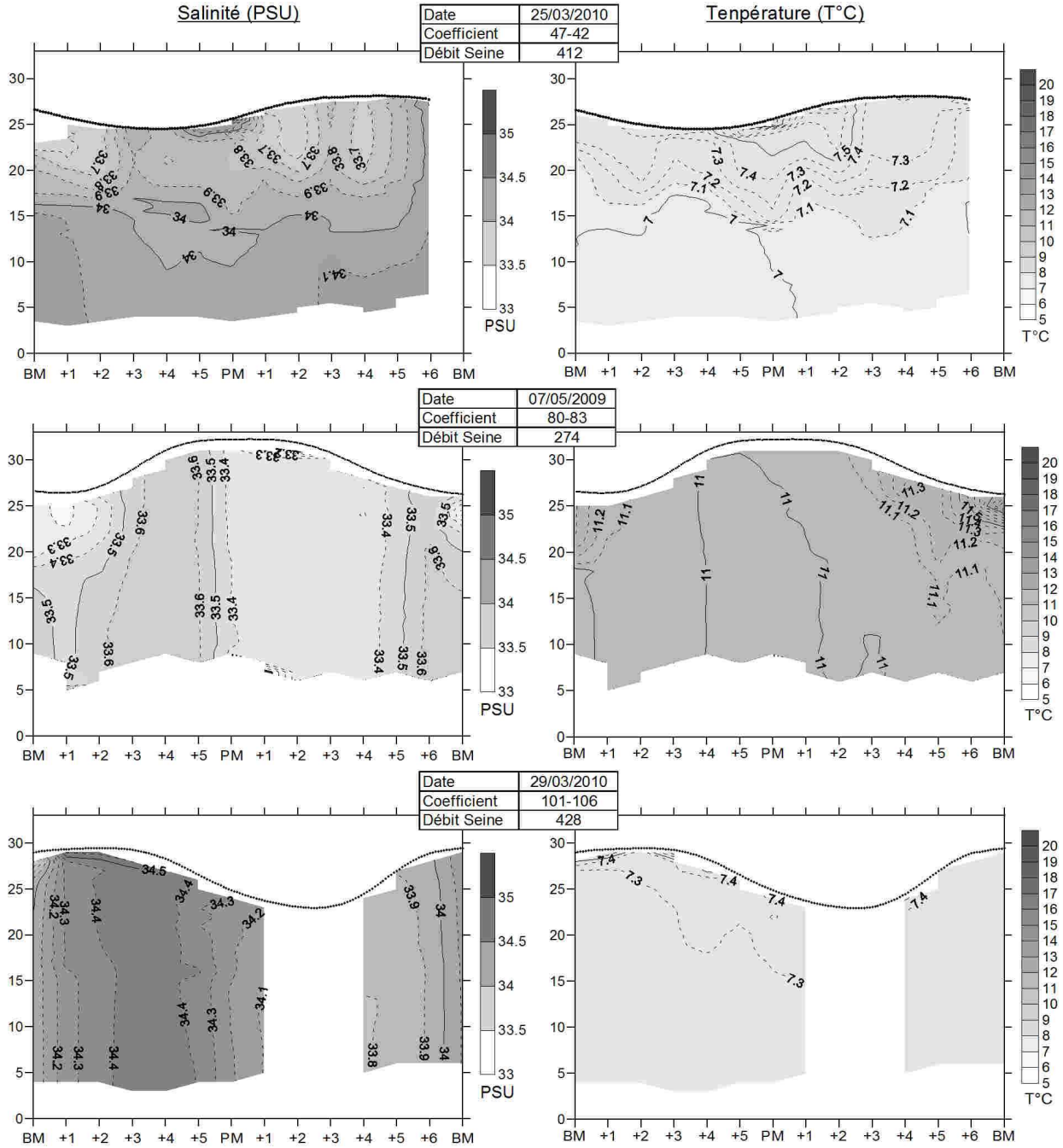


Figure 54 : Salinité et température de la colonne d'eau lors des points fixes de 13 h.

Les variations de la salinité et de la température à l'échelle saisonnière sont déterminées par la comparaison de profils verticaux réalisés à BM en ME à l'automne le 06/10/08 et au printemps le 25/03/10 (Tableau 9). Les salinités plus élevées au cours de l'étiage de la Seine à l'automne montrent une influence du débit de la Seine même légère sur le site d'étude ce qui est confirmé par les campagnes antérieures (Aminot *et al.*, 1997). Le contraste de température mesuré entre l'automne et le printemps indique la forte amplitude thermique saisonnière observée sur l'ensemble de la baie.

Tableau 9 : Comparaison de la salinité et de la température sur le site d'étude à BM en ME à l'automne et au printemps.

	06/10/2008		25/03/2010	
	Débit Seine < 200 m3/s		Débit Seine = 412 m3/s	
	Salinité	Température (°C)	Salinité	Température (°C)
Surface	34,3	15,8	33,8	7,3
Milieu	34,4	15,8	33,9	7
Fond	34,5	15,8	34	7

b. Concentrations des MES

A l'échelle de la Baie de Seine, les minimums de concentration, inférieurs 2 $mg.L^{-1}$ sont observés dans la zone centrale, au nord de la baie (Aminot *et al.*, 1997) tandis que les maximum de turbidité correspondent au bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine, supérieurs à 1 $g.L^{-1}$ (Avoine, 1981; Dupont *et al.*, 2001). Les campagnes antérieures (Thalia1, -2, -3, Sediseine 2 et Phytoseine 2) montrent **l'importance des apports de la Seine** dans la partie sud-est de la baie sur l'ensemble de la colonne d'eau. La Seine forme au large de son estuaire un panache turbide plus ou moins développé en fonction du débit de la Seine (débit moyen[1] : 436 $m^3.s^{-1}$) et des conditions de marée (Avoine, 1981; Avoine et Crevel, 1985; Dupont *et al.*, 1991). Ce panache est schématiquement limité par l'isoplèthe 5 NTU (Aminot *et al.*, 1997). En période de crue, il peut se développer jusqu'à une vingtaine de km du Havre et se prolonge vers le nord, le long de la côte havraise. La charge solide moyenne apportée par le fleuve a été estimée à 675 113 $t.an^{-1}$ (106 140 - 1 760 789) avec des pics supérieurs à 10 000 $t.j^{-1}$ (à Poses) lors des gros épisodes de crue (Dupont *et al.*, 2001). L'expulsion du bouchon vaseux, engendré par une crue après une période d'étiage prolongée, peut remobiliser le matériel fin accumulé qui se redéposera plus loin au large de l'embouchure de la Seine (Garnaud *et al.*, 2002).

Le site d'étude est situé en dehors de la zone du panache de la Seine d'après la synthèse des campagnes antérieures réalisées en Baie de Seine (Aminot *et al.*, 1997). Toutefois en période de crue, le panache de la Seine se rapproche à moins de 10 km du secteur (Figure 55). Les prélèvements des campagnes antérieures, réalisés à proximité du site d'étude, montrent des concentrations faibles en surface, inférieures à 1 $mg.L^{-1}$ en condition calme et atteignant 2 $mg.L^{-1}$ en conditions agitée. Un léger gradient positif vers le fond peut être observé.

[1] Débit moyen annuel de la Seine au barrage de Poses

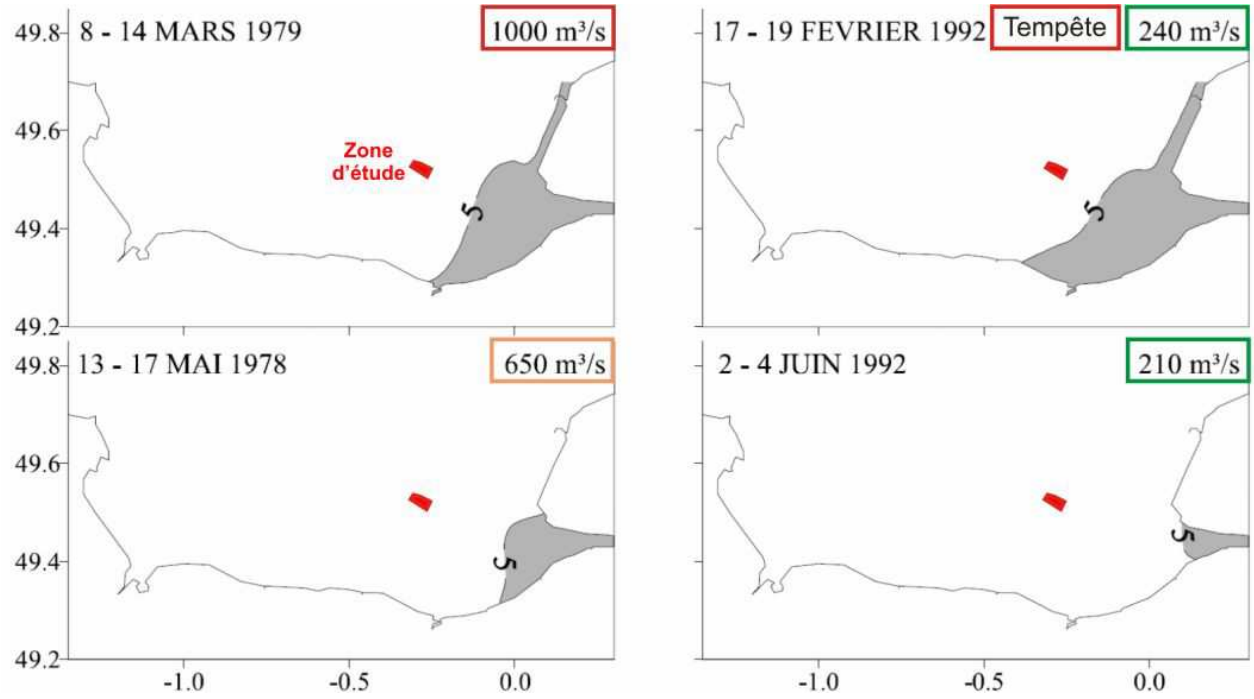


Figure 55 : Localisation de l'isoplèthe 5 NTU en surface en fonction du débit de la Seine et des conditions d'agitation (Aminot *et al.*, 1997) .

La variation des concentrations lors **des cycles semi diurnes et ME-VE** est connue à partir des trois points fixes réalisés aux coefficients de 47-42, 80-83 et 101-106 dans des conditions de mer calme (Figure 56). Cette comparaison montre tout d'abord que les concentrations sont légèrement supérieures à celles décrites par les études antérieures. Elles sont principalement comprises entre 1 et 3 mg.L^{-1} mais peuvent atteindre les 5 mg.L^{-1}. Elles sont relativement homogènes lors des cycles semi diurnes et ME-VE. Une diminution de 1-2 mg.L^{-1}, observée autour de la PM et BM en VE, s'explique par une diminution des vitesses des courants plus marquée aux étales de VE. En ME, cette diminution n'a lieu qu'en étale de PM car celle-ci est plus longue et les contrastes de vitesse sont moins marqués en ME. Une sensible augmentation (de 1 à 1,5 mg.L^{-1}) vers le fond est systématiquement observée lors du flot et du jusant.

L'homogénéité de la turbidité aux échelles du cycle semi-dirune et ME/VE est confirmée par le calcul de l'indice de rétrodiffusion à partir de l'enregistrement du signal rétrodiffusé de l'ADP Sontek, installé au mouillage lors de la campagne Granimp08b (Figure 57). Toutefois, une augmentation sensible du signal lors du flot pour des conditions de VE est observée. Cette augmentation est plus marquée à proximité du fond indiquant une remise en suspension engendrée par les forts courants associés au flot de VE.

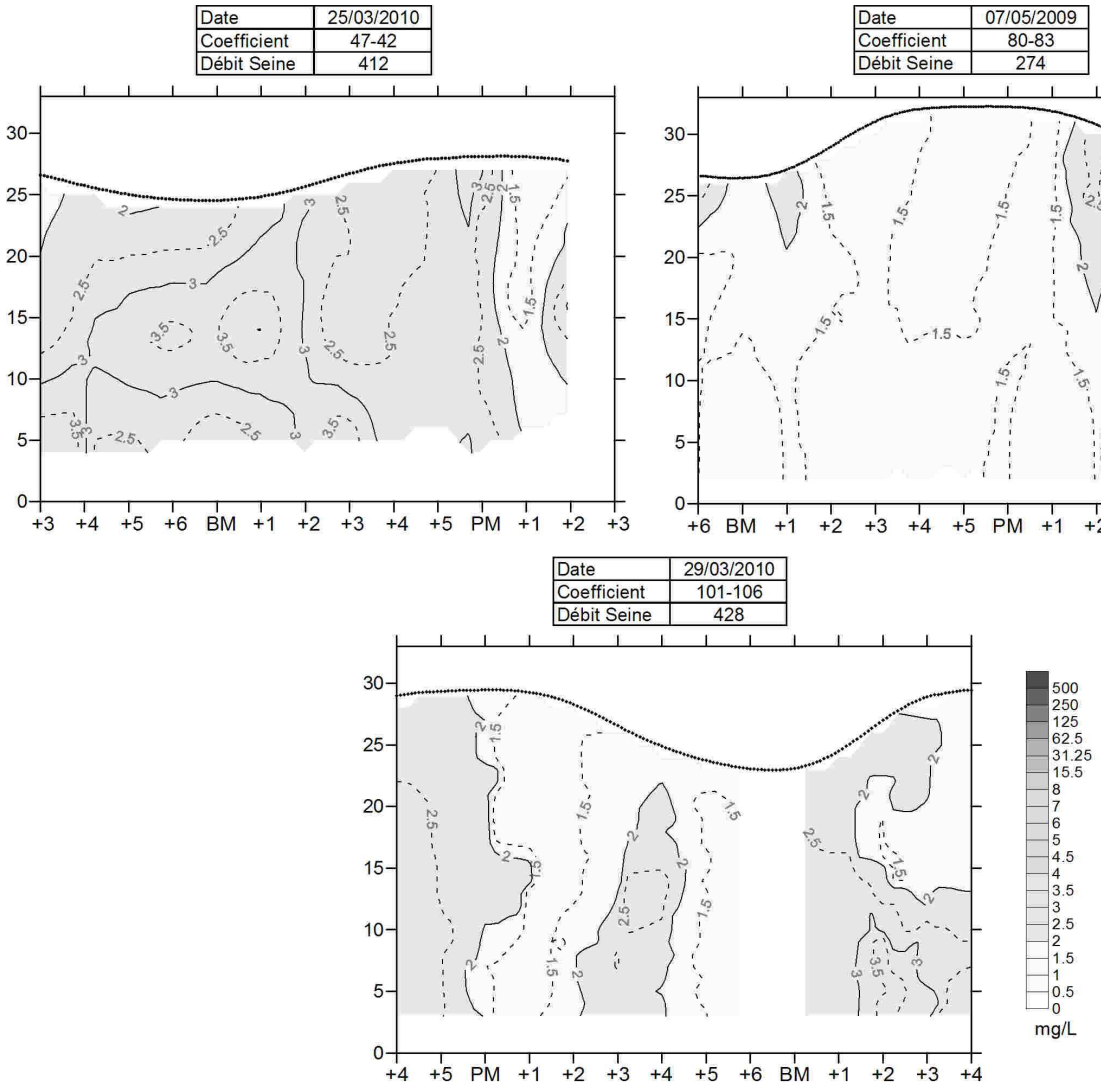


Figure 56 : Concentration en MES dans la colonne d'eau lors des points fixes de 13 h.

Les épisodes de tempêtes augmentent les concentrations en MES de la baie. Celles-ci peuvent être multipliées jusqu'à un facteur 5 pour les zones initialement peu concentrées et peu profondes. Dans ces conditions d'agitation, le panache de la Seine est plus étendu même avec un débit de la Seine faible (Figure 55).

Sur le site d'étude, les épisodes de houle peuvent induire une légère remise en suspension sur la quasi-totalité de la colonne d'eau comme le montre l'indice de rétrodiffusion, calculé à partir de l'enregistrement de l'ADP mouillé lors de la campagne Granimp08b (Figure 57). Pour des coefficients similaires de ME, le signal calculé les 01 et 03/10/08 pour des conditions agitées est plus fort surtout à proximité du fond sur l'ensemble du cycle de marée contrairement au signal calculé pour des coefficients similaires en période calme les 23 et 25/10/08 (Figure 57). Le chalutage du matériel de calibration du signal en concentration de MES lors de la campagne d'acquisition n'a pas permis de quantifier la remise en suspension induite par la houle.

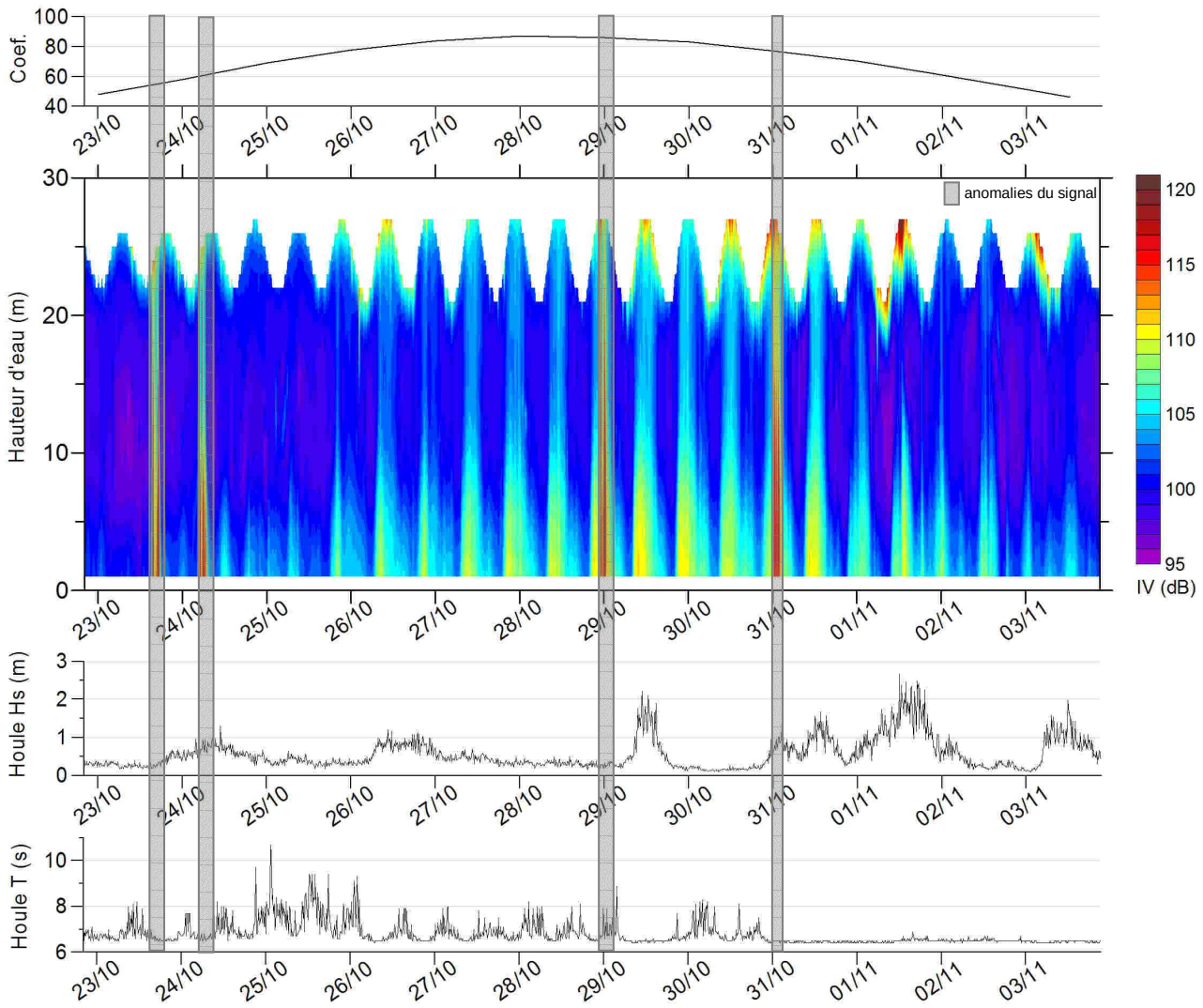


Figure 57 : Evolution au cours d'un cycle ME/VE du signal rétrodiffusé (IV) et des paramètres de la houle enregistrés par l'ADP Sontek installé au mouillage lors de la campagne Granimp08b.

Une forte **activité planctonique** augmente les concentrations en MES. La chlorophylle est un indicateur de l'activité planctonique. La distribution géographique de cette dernière en Baie de Seine montre deux situations typiques : un gradient décroissant sud-est/nord-ouest influencé par les apports de la Seine, et un maximum dans la partie centrale de la baie, au-delà du panache de dilution de la Seine lors du bloom planctonique printanier (Figure 58 ; Aminot *et al.*, 1997).

D'après les campagnes précédentes, les eaux du site d'étude sont affectées par l'activité planctonique printanière et celles-ci sont influencées par les apports de la Seine.

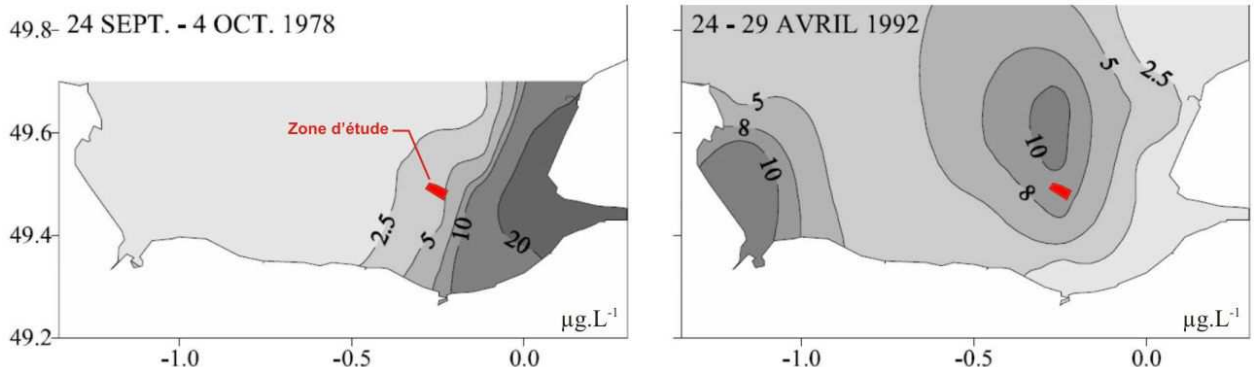


Figure 58 : Distributions géographiques typiques de la chlorophylle a en baie de Seine (Aminot *et al.*, 1997).

c. Granulométrie et nature des MES

Les apports de la Seine et l'activité planctonique ont une forte influence sur la nature et la granulométrie des MES en Baie de Seine.

Lafite *et al.* (1985) montrent que les particules présentes dans les eaux marines au large de l'estuaire de la Seine sont plus grossières que celles des eaux estuariennes pour une gamme de mesures comprises entre 1,5 et 45 µm. Un pic observé à 2 µm et les particules plus grossières prépondérantes correspondent à des pics de populations planctoniques. Les sédiments estuariens sont essentiellement constitués de silts fins minéraux.

Dupont *et al.* (1985) schématisent la limite externe estuarienne en deux fronts. Le front externe est composé essentiellement de plancton et d'agrégats plus concentrés en surface. Le front interne, plus minéral est marqué par des concentrations plus fortes en silts et argiles dans la première moitié de la colonne d'eau. Ces fronts se développent à BM et peuvent être potentiellement perçus sur le site d'étude en fonction du débit de la Seine.

Dupont *et al.* (1985) montrent qu'au large du panache de la Seine, les eaux pourront être constituées de 4 stocks de particules dont les proportions varieront au cours de la marée :

- un premier, des argiles aux silts fins, en faible proportion à BM et PM ;
- un second, lié aux silts très fins et fins minéraux (<5 µm) et aux silts moyens à grossiers constitués essentiellement d'agrégats de 10 à 50 µm, en forte proportion et prépondérante à BM ;
- un troisième, constitué de particules biologiques entre 26 et 41 µm essentiellement de diatomées, dinoflagellés, tintinnoïdes et de larves d'ostracodes bien développées à BM en surface ;
- un quatrième, également biologique mais de taille plus faible avec des diatomées principalement entre 11 et 26 µm et des dinoflagellés, en forte proportion à BM.

Sur le site d'étude, le déploiement du LISST lors du point fixe du 25/03/10 permet de caractériser la granulométrie des particules au cours **d'un cycle semi-diurne** (Figure 59). Elles correspondent à des sables silteux.

La concentration volumique globale des MES, comprise entre 2 et 8,5 µL.L^{-1}, confirme la faible variation de leur concentration massique (1-3 mg.L^{-1}). Elle confirme également la diminution de concentration à l'étale de PM. Les légers gradients positifs de concentration massique en MES (de 1 à 1,5 mg.L^{-1}) vers le fond au cours du flot et du jusant sont moins visibles pour les concentrations volumiques totales mesurées par le LISST (sans distinction de classes granulométriques). L'analyse par classes granulométriques (argile-silt moyen, silts grossiers, sables très fins, sables fins et sables moyens) montre que les fractions grossières sont prépondérantes tout au long du cycle de marée (Figure 59).

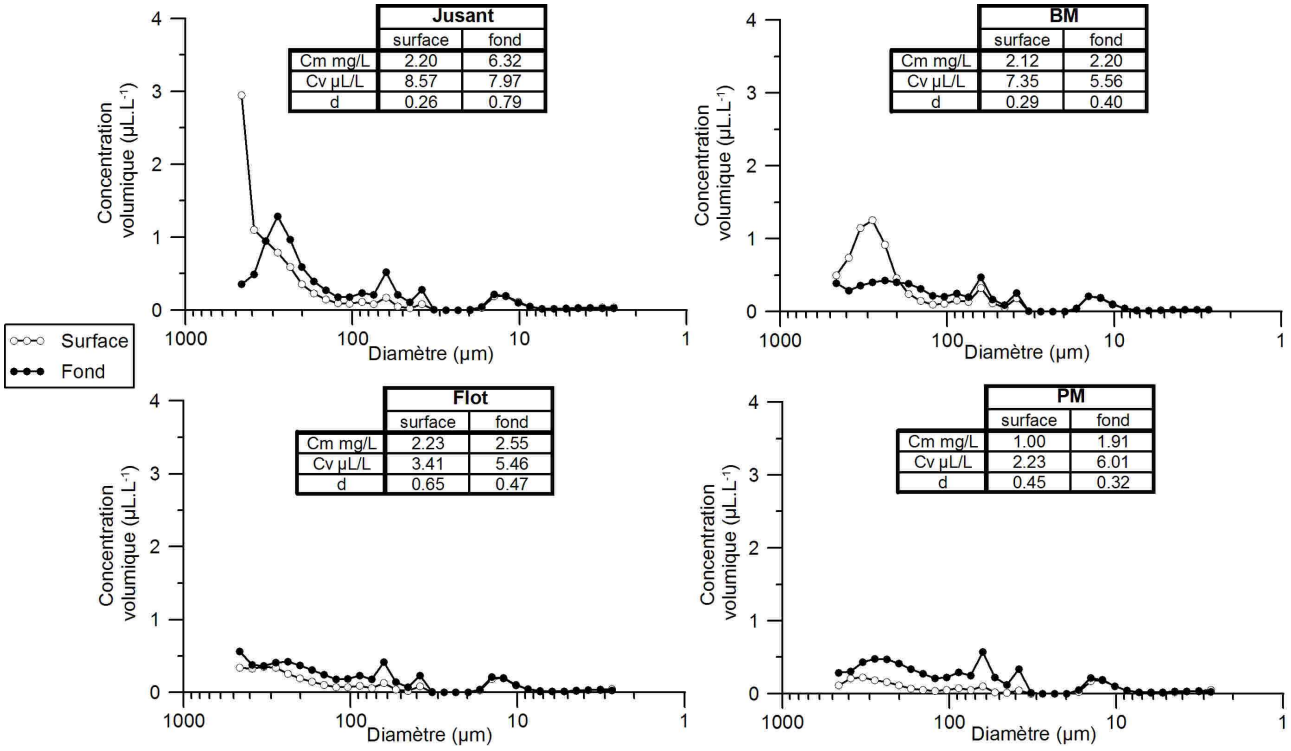


Figure 59 : Répartition granulométrique moyenne des MES en surface et au fond de la colonne d'eau mesurée par le LISST au cours du point fixe du 25/03/10.

Trois comportements de particules sont distingués en fonction de leur granulométrie (Figure 60). La proportion de sables fins et moyens augmente au cours du jusant et se dissipe au début du flot. Ils présentent également un gradient vertical négatif vers le fond hormis au début du jusant. Les silts grossiers et les sables très fins montrent un gradient positif vers le fond et sont plus importants au cours du flot. La proportion d'argiles à silts moyens est homogène sur la colonne d'eau et reste globalement constante au cours du cycle semi-diurne.

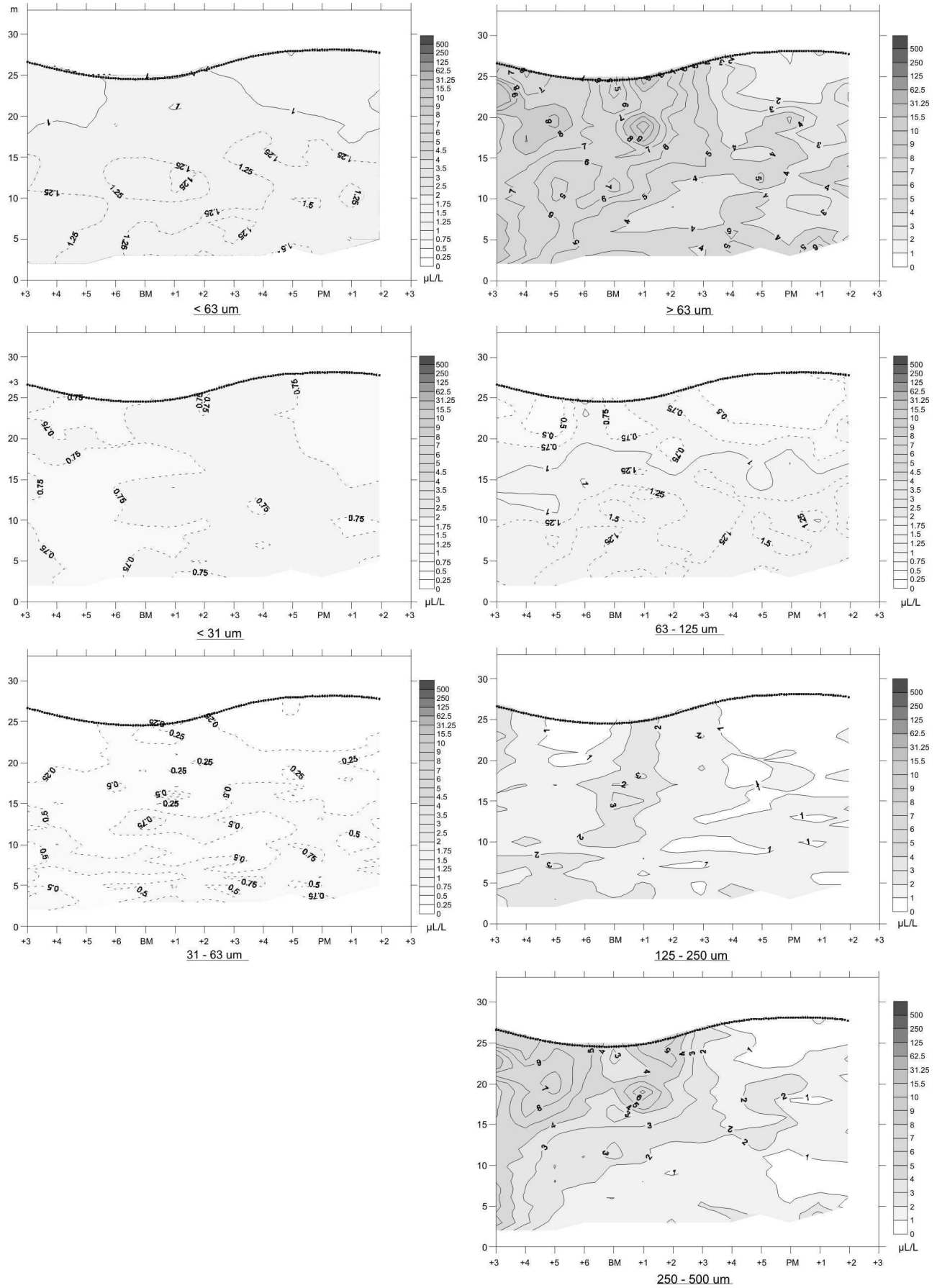


Figure 60 : Evolution des classes granulométriques mesurées par le LISST lors du point fixe du 25/03/10.

L'observation au MEB (Planche 3) et à la loupe binoculaire indique que les sables fins et moyens sont représentés en surface par des éléments essentiellement biologiques : diatomées centriques, foraminifères, voiles alguaires, et pelotes fécales et par quelques agrégats. Au fond les agrégats et particules minérales (débris coquilliers, …) sont présents en plus grande quantité et des larves de bivalves peuvent être observées. Les sables très fins et silts grossiers sont également composés de particules biologiques : diatomées et foraminifères ; de particules minérales isolées et d'agrégats. Sur le fond le nombre de débris de coquilles est important. Les argiles-silts moyens dont le pic se situe autour de 15 µm se composent de petits agrégats et de petites diatomées pennées. Pour cette dernière classe une légère concentration, centrée autour de 5-6 µm, correspond à des particules minérales isolées et à des coccolites. Les analyses aux rayons X montrent que les particules minérales isolées sont siliceuses ou carbonatées.

L'augmentation de particules grossières au jusant est liée à une augmentation d'organismes phyto-planctoniques comme le confirme les mesures de fluorescence réalisées lors de ce point fixe. Cette augmentation peut être provoquée par le déplacement du front planctonique du panache turbide issu de l'estuaire de la Seine au jusant en direction du site d'étude. Le gradient positif (des concentrations volumiques) vers le fond de silts grossiers et sables très fins (non observé pour les concentrations massiques) serait lié à une remise en suspension (de particules de densité plus faible) induite par les courants de marée.

La variabilité de la granulométrie des MES à **l'échelle saisonnière** est connue grâce à la comparaison du point fixe du 25/03/10 avec d'autres mesures ponctuelles *in situ* réalisées à différents instants de la marée et de l'année (Figure 61). En fonction de la saison, les particules en suspension dans la colonne d'eau correspondent soit à des sables soit à des sables silteux. La variabilité globale pour les classes inférieures à 125 µm reste relativement faible. Toutefois, c'est au niveau des pics que l'on observe les plus importantes variabilités : 5-6, 15, 40 et 65 µm. Pour les classes supérieures à 125 µm la variabilité est importante et les concentrations peuvent dépasser les 5 $\mu L.L^{-1}$. La forte proportion de particules autour de 250 µm lors des mesures en mai 2009 peut être corrélée au bloom planctonique printanier du secteur.

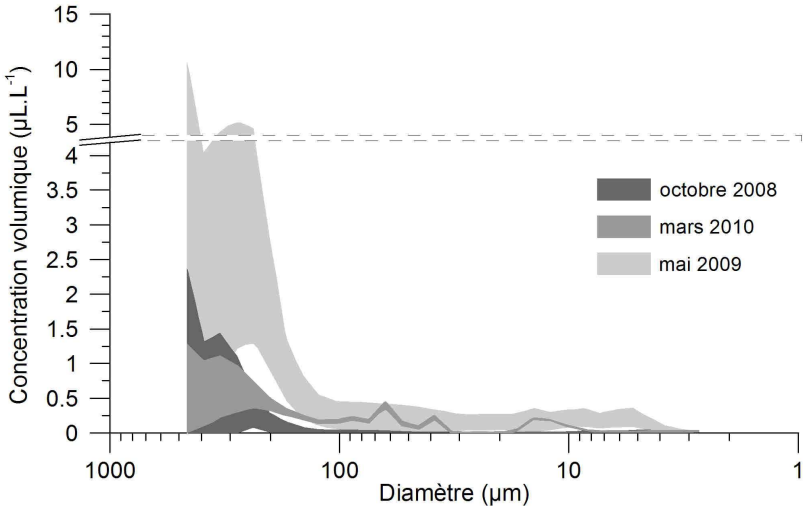


Figure 61 : Enveloppes granulométriques des MES contenues dans la colonne d'eau en fonction de la saison.

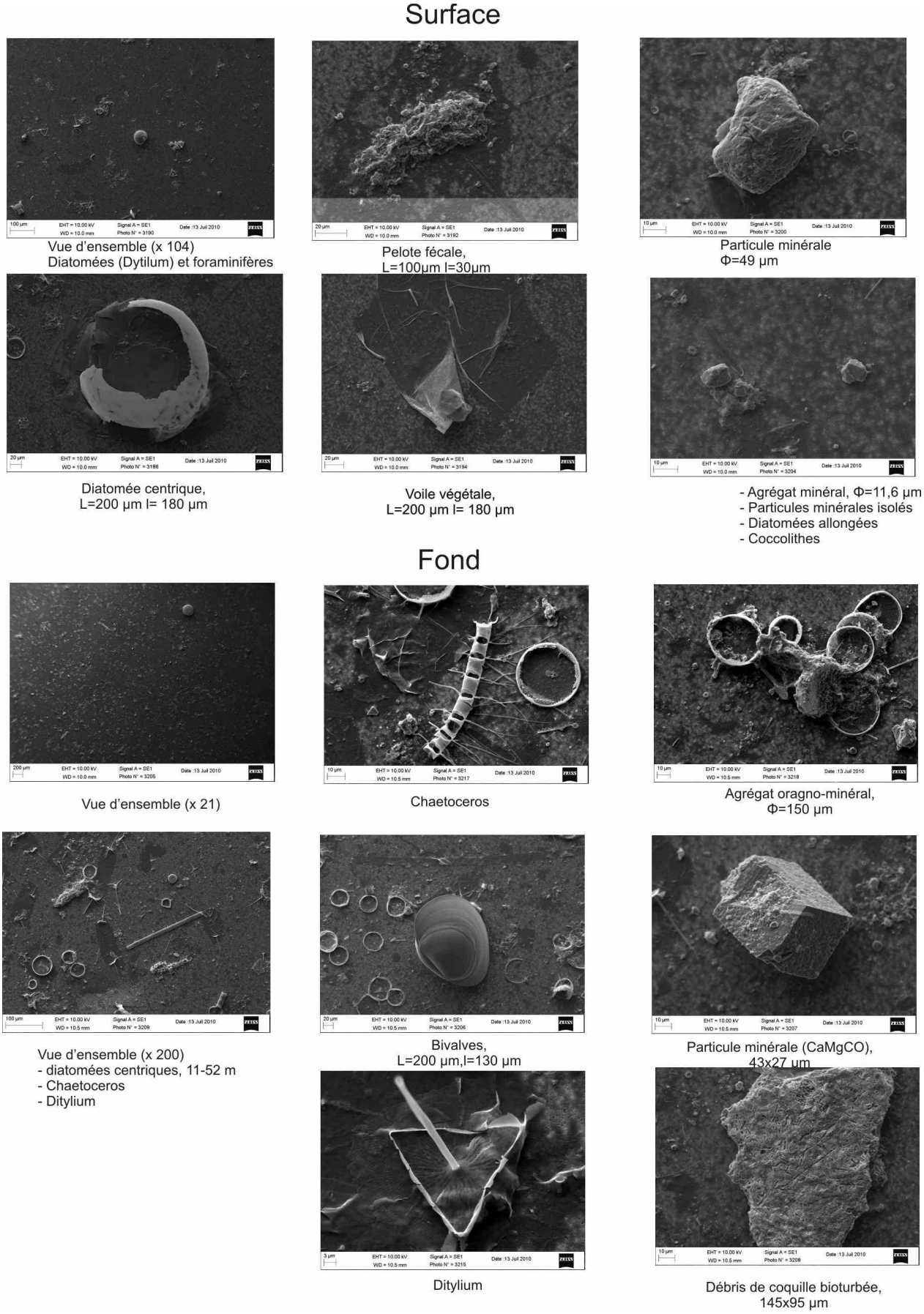


Planche 3 : Extrait d'images réalisées au MEB des échantillons prélevés lors du jusant de ME du point fixe du 25/03/10.

2.2. Le panache turbide

2.2.1. Caractérisation de la source

Les caractéristiques du matériel rejeté par la drague et leurs évolutions potentielles au cours du chargement sont essentielles à déterminer afin de comprendre les processus mis en jeu lors de l'entrée des MES par la surverse dans le milieu marin et de sa disparition progressive dans la colonne d'eau. La comparaison de ces caractéristiques en fonction du protocole d'extraction : type de drague (débit d'aspiration et type de surverse) et orientation de l'extraction par rapport au courant, est primordiale pour évaluer les paramètres-clés agissant sur les caractéristiques de la surverse. Les caractéristiques de la surverse sont le débit, la concentration, la nature et la granulométrie des MES.

Les surverses de deux types de drague ont été étudiées sur le site en Baie de Seine : la Charlemagne (DEME) et la SandHarrier (CEMEX Marine). La Charlemagne est une DAM moderne avec un fort débit d'aspiration. Le débit moyen calculé sur site à partir de données industrielles est de 10 391 $m^3.h^{-1}$. Sa surverse s'effectue par un puits central. Son volume de chargement moyen et sa durée de chargement moyenne sur site, calculés à partir des données industrielles, sont respectivement de 5 304 m^3 et d'environ 2h27min. La SandHarrier est une DAM plus ancienne avec un débit d'aspiration plus faible, en moyenne de 4000 $m^3.h^{-1}$ (communication personnelle de CEMEX). Son mode de surverse est par sabords latéraux en quatre ouvertures à bâbord et à tribord. Son volume de chargement moyen et sa durée de chargement moyenne sur site calculés à partir de données industrielles sont respectivement de 2 608 m^3 et d'environ 3h03min.

La détermination des caractéristiques de chacune des surverses a été réalisée à partir de prélèvements d'eau de surverse directement sur les dragues. Ces prélèvements ont été effectués dans le bassin de chargement pour la Charlemagne le 01/05/08 lors de la campagne Granimp08a (nombre de prélèvements : 23), et au niveau des sabords pour la SandHarrier le 26/10/09 lors de la campagne Granimp09b (nombre de prélèvements : 26).

a. Débits de la surverse (eau-sédiment)

Le calcul du débit de la surverse est essentiel pour pouvoir déterminer : (i) la masse par mètre linéaire rejetée par la drague et (ii) la masse totale des particules remises en suspension lors d'un chargement.

L'objectif est ici d'obtenir des valeurs moyennes de débit de la surverse (mélange eau sédiments) pour les deux types de dragues et d'évaluer les éventuelles variations de ce débit au cours d'un chargement. Ce débit peut être calculé suivant deux approches.

Le débit de la surverse peut être tout d'abord calculé à partir de données d'exploitation fournies par les industriels. En effet, ce débit de surverse est défini par la différence entre les débits d'aspiration et de remplissage du bassin de chargement. Le débit solide de chargement du bassin est le rapport entre le volume solide récolté dans le bassin en fin de chargement et la durée du chargement. Les débits solides de

chargements moyens calculés pour la Charlemagne et la SandHarrier sont respectivement de 2 167 et de 861 $m^3.h^{-1}$. Les débits de surverse (eau-sédiments) moyen calculés pour la Charlemagne et la SandHarrier sont respectivement de 8 825 et de 3 139 $m^3.h^{-1}$ soient des volumes de surverse (eau-sédiments) moyens de 20 134 m^3 et 9 568 m^3 par chargement. La Charlemagne et la SandHarrier rejettent chacune 79 % du volume aspiré (eau-sédiments) par l'élinde et respectivement 3,80 et 3,67 fois le volume chargé dans le bassin de la drague.

Le débit de surverse peut être calculé indépendamment des données industrielles à partir de la mesure de la hauteur d'eau dans le bassin de chargement au dessus des points de rejets. En effet, une surverse fonctionne comme un déversoir. D'après la notice sur les déversoirs (CETMEF, 2005), la surverse par sabords discontinus correspond aux déversoirs rectangulaires à parois minces en écoulement dénoyé avec contraction latérale (Figure 62 A). Des formules de calcul (équations 5 et 6) accompagnées d'abaques permettent le calcul du débit à partir de la hauteur d'eau (Figure 62 B et C).

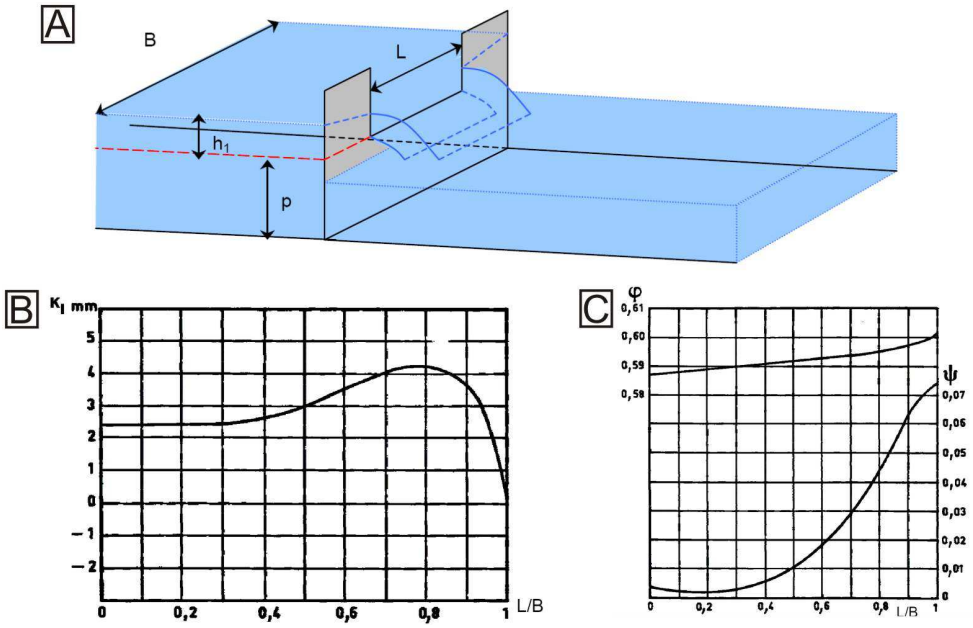


Figure 62 : Calcul du débit d'un déversoir rectangulaire à parois minces en écoulement dénoyé avec contraction latérale. A : schéma d'un déversoir. B : abaque 1. C : abaque 2.

Pour le calcul du débit de surverse, la formule établie par Kindsvater et Carter en 1957 a été choisie conformément aux recommandations de l'Association Française de Normalisation (AFNOR) :

$$Q = \mu C_v L_e (h_e)^{3/2} \sqrt{2g} \tag{5}$$

avec h_e la hauteur d'eau effective (telle que $h_e = h_1 + 0,001$), h_1 la hauteur d'eau mesuré en amont du déversoir, L_e la largeur effective (telle que $L_e = L + K_l$), K_l le coefficient donné par l'abaque 1 (Figure 62 B), μ le coefficient de débit donné par l'équation (6) :

$$\mu = \frac{2}{3}\left(\varphi + \psi \frac{h_1}{p}\right) \tag{6}$$

avec : p la hauteur d'eau entre le fond du bassin et la bas du déversoir, φ et ψ les coefficients définis par *L/B* et l'abaque 2 (Figure 62 C), et B la largeur du canal d'amenée en amont du déversoir.

Précisons que les variations du niveau d'eau du bassin de chargement par rapport à la base des sabords ont été mesurées tout au long du chargement, lors des prélèvements d'eau de surverse sur la SandHarrier.

Pour le suvi réalisé sur la SandHarrier sur le site de Baie de Seine on a : p = 6,55, L=3,84 (somme des largeurs de l'ensemble des sabords d'un côté du navire), B=96, K_l=2,35, φ=0,587, ψ=0,0024 et h_1=0,127 (moyenne mesurée). Le débit moyen mesuré de chaque côté de la drague est de 0,503 $m.s^{-1}$ soit 3 618 $m^3.h^{-1}$ sur l'ensemble des sabords. Au cours du chargement ce débit fluctuera en fonction du niveau d'eau dans le bassin. Le minimum de débit calculé est de 656 $m^3.h^{-1}$ et le maximum de 11 148 $m^3.h^{-1}$. Ce débit mesuré *in situ* confirme le débit calculé à partir des données industrielles.

Pour la drague Charlemagne, ces mesures de niveau d'eau n'ont pas pu être réalisées en raison de l'inaccessibilité du point de surverse au centre du bassin. Toutefois, lors du chargement le capitaine de la Charlemagne ajuste la hauteur du puits au plus près de la surface des sédiments remplissant le bassin. Le débit d'une telle drague est donc ajustable mais sera également variable au cours du cycle de chargement.

b. Concentration des MES

Les prélèvements du mélange eau-sédiments permettent de déterminer les concentrations, natures et granulométries des MES et leur potentielles variations au cours d'un chargement.

Les concentrations de la Charlemagne, en moyenne de 18,8 $g.L^{-1}$ (5 - 31,2) sont plus fortes que celles de la SandHarrier dont la moyenne est de 6,4 $g.L^{-1}$ (3 - 12,7). Pour la Charlemagne et la SandHarrier les concentrations de la surverse sont 6 000 et 2 000 fois supérieures à celles du milieu naturel. Pour les deux types de surverse, les concentrations fluctuent de manière importante tout au long du chargement. Ces fluctuations semblent être indépendantes de l'orientation de la drague par rapport au courant. Contrairement aux observations de Boutmin en 1986, celles-ci n'augmentent pas significativement en fin de chargement.

Les concentrations en MES sont donc élevées mais différentes d'un type de surverse à un autre et présentent de fortes variabilités à l'échelle du chargement.

c. Granulométrie des MES

Le spectre granulométrique des MES de la surverse a été déterminé à partir des mesures granulométriques laser, effectuées après l'échantillonnage. Les mesures ont été réalisées au laboratoire avec le granulomètre laser LS230, le LISST n'étant pas opérationnel. Dès 2009, les mesures granulométriques des MES de la surverse de la SandHarrier ont été réalisées avec le granulomètre de laboratoire LS230 et le LISST avec deux objectifs : la vérification de la correspondance des mesures entre les deux outils et la comparaison des granulométries des surverses de la Charlemagne et de la SandHarrier.

La comparaison entre les deux mesures s'effectuent sur les proportions relatives (pourcentage de contribution) de chacune des classes granulométriques par rapport au volume total de matière solide (Figure 63 A, B). La surverse de la Charlemagne est constituée de sables vaseux avec un mode principal étalé dans les silts très fins à fins centrés, autour de 7 µm et trois secondaires à 30-40 µm, 80-100 m et 200 µm. La surverse de la SandHarrier est constituée de sables silteux avec deux principaux modes. Un premier, étalé dans les silts très fins à fins centrés autour de 9-10 µm et un second, étalé des sables très fins à moyens avec un pic atour de 225 µm et 3 modes secondaires à 30-40 µm, 80-100 µm, 700-800 µm.

Pour les deux types de surverse, les modes des silts très-fins à fins et des sables fins sont retrouvés. Les modes secondaires dans les silts grossiers et dans les sables très fins sont également présents. Les principales différences sont l'absence des sables grossiers et une proportion plus faible de sables fins pour la Charlemagne.

Etant donné le mode de surverse (puits central) de la Charlemagne, la présence d'éléments plus grossiers dans celle-ci était attendue pour l'extraction du même type de sédiment. L'absence de particules grossières dans la surverse de la Charlemagne peut être expliquée par : (i) une nature de sédiment différente, (ii) un mode d'échantillonnage mal adapté pour la Charlemagne. Les carottes réalisées sur les sédiments de la zone d'extraction montrent que les sédiments extraits par la Charlemagne à 1 m de profondeur lors des prélèvements à bord étaient potentiellement plus fins lors du suivi sur la SandHarrier, celle-ci travaillait sur une zone plus approfondie par des extractions antérieures à environ 2,5 m. Le mode de prélèvement dans le bassin de la Charlemagne (au seau et relativement éloigné du puis central) est probablement inadapté pour un échantillonnage précis de chacune des classes rejetées pour une surverse par puits central.

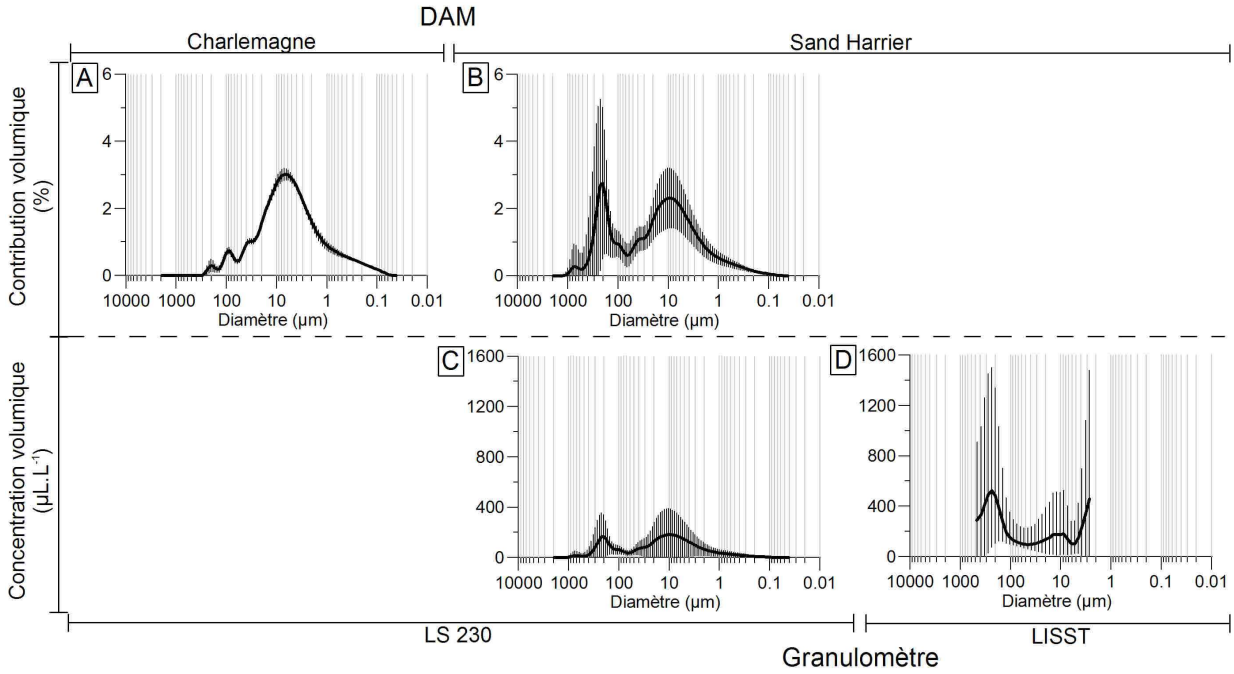


Figure 63 : Comparaison des granulométries de la surverse.
Proportion des classes granulométriques mesurées par le granulomètre LS230 de laboratoire pour la surverse de la Charlemagne (A) et pour la SandHarrier (B). Concentrations volumiques par classes granulométriques de la surverse de la Sand Harrier, mesurées par le granulomètre LS230 (C) et par le LISST (D).

La comparaison des deux types de mesures (LS230 et LISST au laboratoire) sur la surverse de la SandHarrier confirme la bonne corrélation entre les deux granulomètres (Figure 63 C, D). Les deux pics principaux dans les silts très fins à fins et dans les sables fins sont retrouvés mais pas dans les proportions. Les modes secondaires ne sont pas observés au LISST en raison d'une gamme de mesure plus resserrée et moins précise. Dans la limite inférieure de la gamme de mesure du LISST (à partir de 4 µm) un pic apparaît probablement dû à la lecture partielle de particules plus fines.

Les prélèvements acquis tout au long des chargements montrent une importante fluctuation de chacun des pics pour une surverse par sabords contrairement à une surverse par puits. Toutefois dans les deux cas les spectres granulométriques moyens n'évoluent pas à l'échelle du chargement.

d. Nature des MES

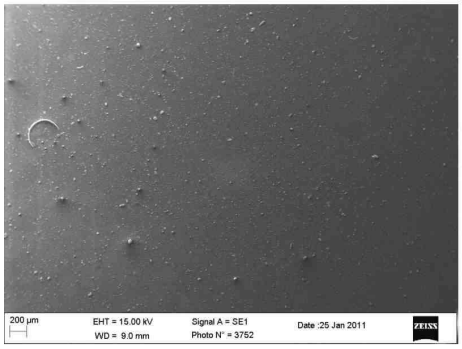
L'analyse au MEB des prélèvements de surverse permet de déterminer la nature des principaux pics granulométriques (Planche 4). Les particules sont essentiellement minérales. Toutefois leur nature est très variable pour chacun des modes granulométriques.

Les deux principaux modes granulométriques sont composés de particules minérales isolées, de débris de bioclastes, des agrégats minéraux et des flocs organo-minéraux. Les particules les plus fines (>5 µm) sont des particules minérales isolées carbonatées, siliceuses ou argileuses.

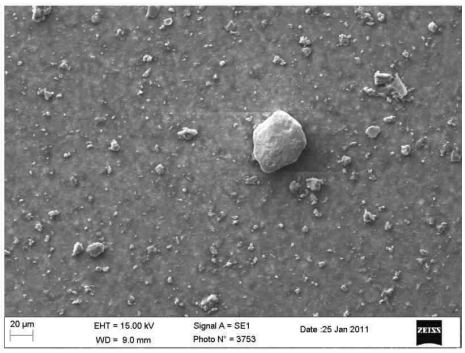
La densité des particules de la surverse est calculée par le rapport des concentrations massiques obtenues par filtration (5 816,24 $mg.L^{-1}$) avec les concentrations volumiques mesurées par le LISST en configuration laboratoire (7 066,83 $\mu L.L^{-1}$). Les mesures LISST ne concernent que la surverse de la SandHarrier. La densité moyenne des particules de la surverse de la SandHarrier est de 1,070 (densité de l'eau se trouve à environ 1,031). Cette valeur implique qu'une partie des MES correspondent à des flocs. Précisons, que cette densité est probablement minimisée car la gamme de mesure du LISST est sous-estimée.

Les particules de la surverse sont donc principalement minérales (siliceuses ou carbonatées) et ont tendance à former des flocs par l'adjonction de matière organique. Elles ne présentent pas d'importante variabilité à l'échelle du chargement et ni en fonction du type de surverse.

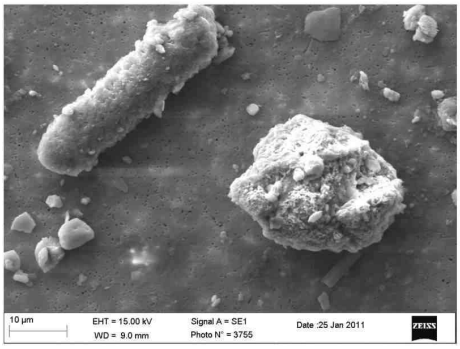
Surverse SandHarrier



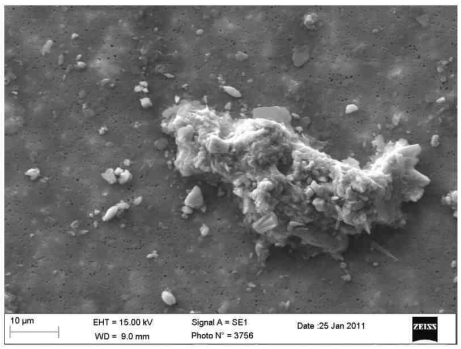
Vue d'ensemble (x 22)
Débris de diatomée centrique (Φ=250 µm)



Vue d'ensemble (x 276)
Particule minérale siliceuse (Φ=80 µm)

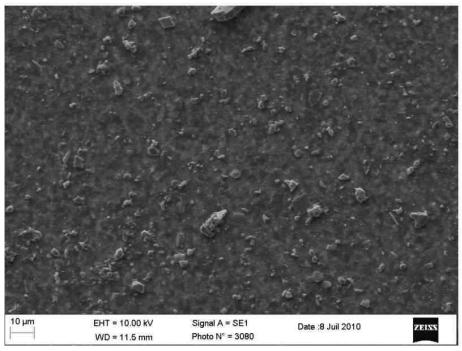


Coprolithe (L=38 µm, l=10 µm)
Particule minérale carbonatée (Φ=29 µm)
Particules minérales diverses (Φ=2-10 µm)

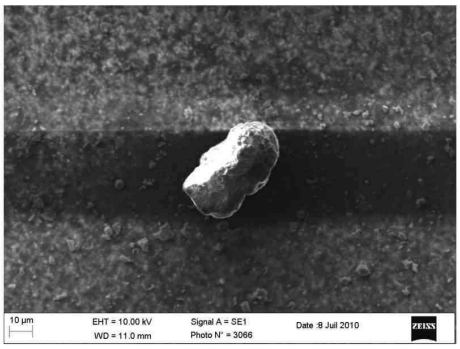


Agrégat minéral (Φ=56 µm)
Particules minérales diverses (Φ=2-10 µm)

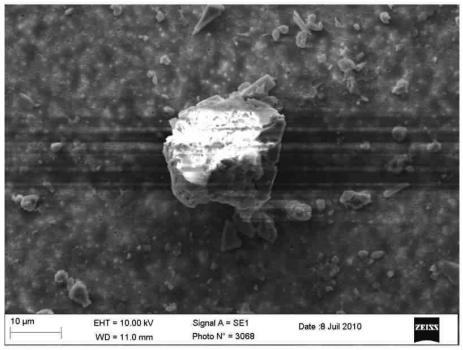
Surverse Charlemagne



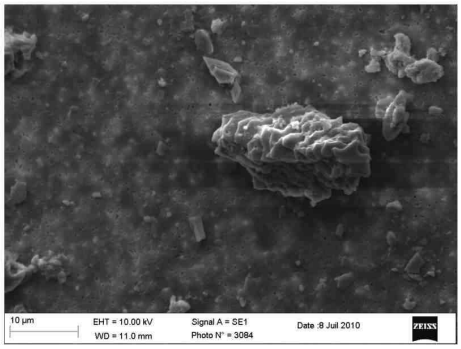
Vue d'ensemble (x 608)
Particules minérales diverses et agrégats minérales



Particule minérale siliceuse (L=50 µm, l=40 µm)



Particule minérale carbonatée (Φ=28 µm)



Débris de coquille (L=28 µm, l=22 µm)
Particules minérales diverses et agrégats minérales (Φ=2-10 µm)

Planche 4 : Images MEB des surverses de la SandHarrier et de la Charlemagne

e. Débit massique et volumique des MES rejetées par surverse

Le débit massique moyen de MES est obtenu par le produit du débit volumique de la surverse (eau-sédiment) avec la concentration massique moyenne obtenue par filtrations. La masse moyenne de MES rejetées par la surverse au cours d'un chargement est le produit du débit massique moyen de MES de la surverse avec la durée moyenne d'un chargement.

Pour la Charlemagne et la SandHarrier, le débit massique moyen de MES est respectivement de 154,4 $t.h^{-1}$ et 19,0 $t.h^{-1}$. Par conséquent, la masse moyenne de MES rejetée par chargement pour chacune des ces dragues est respectivement de 379,9 t de 57,8 t.

Le rapport entre la masse de sédiments rejetés par surverse et celle chargée peut être calculé en convertissant le volume moyen chargé dans le bassin (données industrielles) en masse à partir d'une densité moyenne des matériaux chargés de 1,55 (données industrielles). Les 5 304 m^3 et 2 608 m^3 de volume moyen chargé respectivement par la Charlemagne et la SandHarrier correspondent donc à 8 221,2 et 4 042,4 t. Ainsi les masses de sédiments rejetés par la surverse de la Charlemagne et de la SandHarrier représentent respectivement 4,6 % et 1,4 % de leur chargement.

Le débit volumique moyen de MES est obtenu par le produit du débit volumique de la surverse (eau-sédiment) avec la concentration volumique moyenne mesurée par le LISST. Le volume moyen de MES rejetées par la surverse au cours d'un chargement est le produit du débit volumique moyen de MES de la surverse avec la durée moyenne d'un chargement.

Les mesures LISST ne concernent que la surverse de la SandHarrier, par conséquent ces valeurs ne peuvent être calculées que pour la SandHarrier. Le débit volumique moyen des MES et le volume moyen des MES rejetées par chargement de la SandHarrier sont respectivement de 22,18 $m^3.h^{-1}$ et 67,52 m^3. Le volume de sédiments rejetés par la surverse de la SandHarrier représente 2,6 % du volume de sédiment chargé.

Le débit volumique moyen de MES et le volume moyen de MES rejetés par chargement pour la Charlemagne peuvent être estimés par le rapport des débits massiques et masses moyennes rejetées avec la densité moyenne des particules de la surverse de la SandHarrier (0,85). Le débit volumique moyen des MES et le volume moyen des MES rejetées par chargement de la Charlemagne ainsi estimés sont respectivement de 180,24 $m^3.h^{-1}$ et 441,52 m^3. Le volume de sédiments rejetés correspondant représente ainsi 8,3 % du volume de sédiment chargé.

Pour la SandHarrier les débits volumiques rejetés par classes granulométriques sont calculés par le produit du débit volumique de surverse (eau-sédiments) avec la concentration volumique de chacune des classes mesurées par le LISST. Le débit volumique de surverse étant de 3 139 $m^3.h^{-1}$ et les concentrations volumiques des argiles, des silts très fins à fins, des silts moyens à grossiers et des sables très fins à moyens étant respectivement de 1 041 $\mu L.L^{-1}$, 1 199 $\mu L.L^{-1}$, 919 $\mu L.L^{-1}$, 3 908 $\mu L.L^{-1}$, les débits associés calculés

sont de 3,27 $m^3.h^{-1}$, 3,76 $m^3.h^{-1}$, 2,89 $m^3.h^{-1}$ et 12,27 $m^3.h^{-1}$. Ce qui représente respectivement 9,96 m^3, 11,47 m^3, 8,80 m^3 et 37,39 m^3 par chargement.

2.2.2. Evolution des MES en surface

L'évolution globale des concentrations en MES du panache en sub-surface depuis l'entrée de la surverse dans le milieu jusqu'à la disparition du panache est déterminée à partir des prélèvements réalisés dans la première partie de la colonne d'eau (0-5m). En regroupant l'ensemble des prélèvements pour chaque type de surverse (sabords et puits central) sans distinction de conditions hydrodynamiques (coefficient, flot, jusant ou étale) et de conditions d'extractions (avec et contre-courant), un modèle d'évolution temporelle des concentrations en sub-surface peut être proposé par la construction de courbe de tendance pour chacun des deux types de surverse. Celle construite pour la surverse par sabords regroupe des prélèvements réalisés à l'arrière de la SandHarrier et de la Scelveringhe alors que celle pour une surverse par puits concerne uniquement des prélèvements autour de la Charlemagne. Dans les deux cas, les courbes de tendance suivent une loi de puissance et permettent de généraliser ces modèles de dispersion en surface sur le site d'étude (Figure 64).

Les variabilités des concentrations pour les surverses et pour le milieu naturel suivent des lois normales. Leurs valeurs maximum et minimum théoriques avec un niveau de confiance de 95 % sont obtenues en ajoutant et en enlevant deux écarts-types à la moyenne observée.

Pour la surverse par puits, le nombre de points est assez réduit puisqu'il ne concerne que deux suivis, effectués lors de la campagne Granimp08a. Ces suivis n'ont permis que d'effectuer des prélèvements de panache récent (évoluant depuis peu de temps dans la colonne d'eau). En effet, les conditions d'étale de ces suivis ont entraîné un cumul de panache mélangeant les tronçons de panache formé en début de chargement avec ceux formés en fin de chargement.

Pour une surverse par sabords, une importante dilution d'un facteur 3 à 40 est observée lors de l'entrée de la surverse (S) dans le milieu marin après 10 s (S+10s). Dans les 10 premières minutes qui suivent les concentrations chutent rapidement de plusieurs centaines de $mg.L^{-1}$ à 20 $mg.L^{-1}$. Cette diminution est due à la dispersion des particules dans le milieu marin et à la chute des particules les plus grosses. Après 10 min, les concentrations de sub-surface décroissent lentement et tendent vers celles du milieu marin au-delà de deux heures.

Pour une surverse par puits central, du fait d'un rejet sous la coque du navire, les premiers prélèvements après l'entrée de la surverse dans le milieu marin ne sont possibles qu'à l'arrière de la drague en surface. L'observation du comportement du panache montre que la surverse rejetée sous la coque de la drague à plusieurs mètres de profondeur sera aspirée par l'hélice de la drague et réinjectée dans toute l'emprise du jet de l'hélice, dont la surface. Par conséquent, les prélèvements à l'arrière de la drague en

surface sont représentatifs d'un état de dilution plus avancée du panache que pour les prélèvements à l'entrée du milieu marin d'une surverse par sabords. Il a été estimé à S+60s le temps nécessaire pour que les masses d'eau rejetées sous la coque atteignent l'arrière du navire à l'endroit du prélèvement. Par conséquent la réelle dilution à l'entrée de cette surverse dans le milieu marin est surestimée. Cette dilution à S+60s est d'un facteur 10 à 100.

Pour estimer la dilution de la surverse d'un puits central avec celle du milieu marin, la concentration à S+10s a été calculée à partir de l'équation de la courbe de tendance (Figure 64). Une concentration de 2,2 $g.L^{-1}$ est calculée induisant une dilution d'un facteur compris entre 2 et 13.

Ensuite les concentrations chutent rapidement dans les 10 premières minutes, de plusieurs centaines de $mg.L^{-1}$ à plusieurs dizaines $mg.L^{-1}$. Cette chute est également attribuée à une dispersion des particules dans le milieu marin et une chute rapide des particules les plus grosses. Après 10 minutes, les concentrations de sub-surface décroissent lentement pour atteindre 10 $mg.L^{-1}$ au bout d'une heure. La courbe de tendance pour cette surverse par puits montre que les concentrations en sub-surface atteignent celles du milieu marin dans les mêmes temps que ceux calculés pour une surverse par sabords à savoir au-delà de deux heures.

Dans les deux cas, même si les concentrations tendent vers celles du milieu naturel à S+2h, un panache, faiblement coloré, peut être encore visible à l'œil nu.

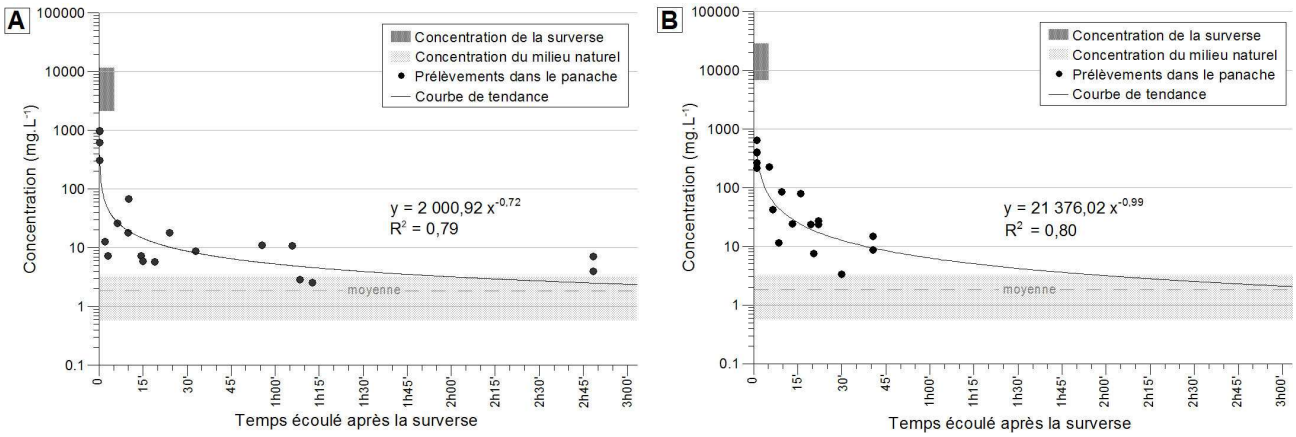


Figure 64 : Evolution temporelle en sub-surface des concentrations de MES du panache turbide. A : cas d'une surverse par sabords. B : cas d'une surverse par puits central.

2.2.3. Géométrie de surface et mobilité

La géométrie, l'extension et la mobilité globale du panache généré par la SandHarrier ont été détaillées pour plusieurs conditions de marée caractéristiques du site, lors des phases de flot, de jusant et d'étale pour des coefficients de marée moyen de 80-85 lors de la campagne Granimp09a.

Il est important de distinguer le panache global, qui représente l'ensemble du panache formé à la suite d'un chargement complet, des différents tronçons qui constituent ce panache global. Un tronçon de panache représente chacune des parties du panache formées lorsque la drague emprunte le même cap. Un nouveau tronçon sera formé à chaque fois que la drague effectuera une giration à 180° et empruntera un cap

à l'opposé du précédent. Le panache global représente donc le cumul de chacun des tronçons du panache, formés au cours d'un chargement. Les changements de cap des dragues, observés sur site, varient de 15 et 30 min en fonction de la distance parcourue, du type de drague, de la vitesse de celle-ci et de l'orientation des courants. Les caps empruntés par les dragues sont parallèles à la plus grande longueur de la zone d'extraction donc ici soit SO-NE soit NE-SO.

La géométrie, l'extension et la mobilité globale sont étudiées à partir du relevé des positions géographiques des extrémités de chaque tronçon du panache à la fin du chargement pour des conditions de marée différente (Figure 65 A). Des photographies aériennes prises par hélicoptère à la fin d'un chargement le 29/10 /09 lors de la campagne Granimp09b permettent de compléter et d'affiner les observations en mer (Figure 65 B). A partir de l'ensemble de ces données, une carte d'extension du panache global à la fin d'un chargement est réalisée (Figure 65 A). Il est important de préciser que cette carte d'extension est réalisable du fait de l'observation visuelle de chacun des tronçons du panache à la fin du chargement. Les tronçons les plus anciens (créés en début de chargement) n'ont été visibles qu'à partir du navire de suivi. En altitude, à bord de l'hélicoptère les tronçons formés au delà S+1h30min ne sont pas observables.

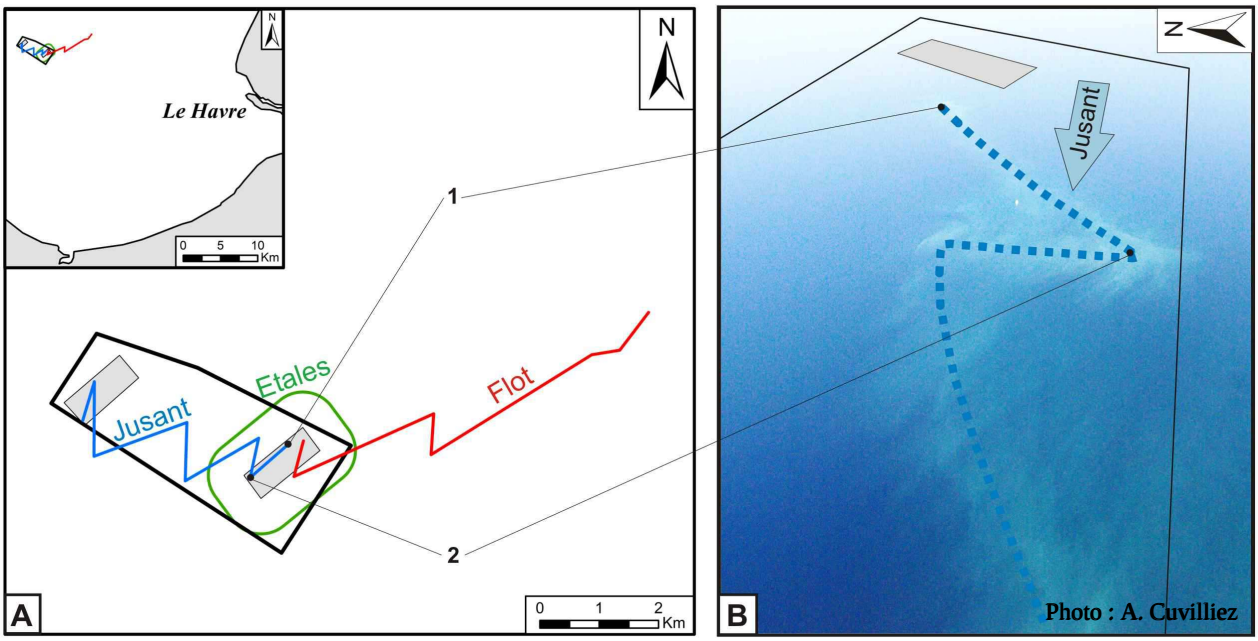
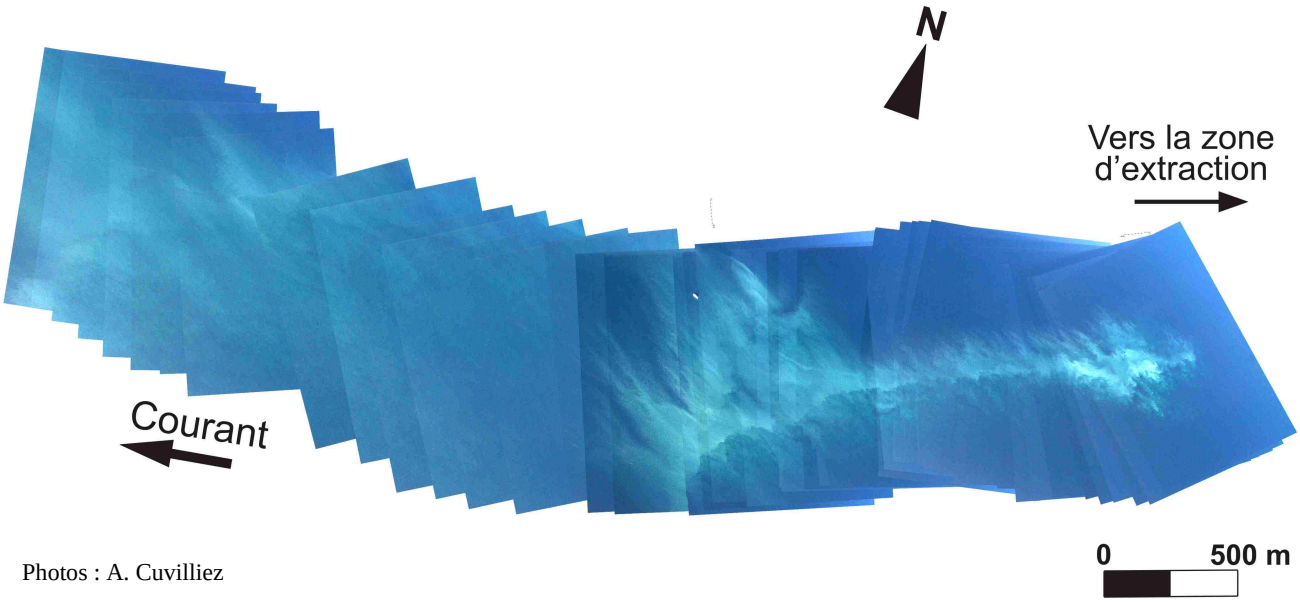


Figure 65 : Extension et morphologie du panache global en fin de chargement pour différentes conditions tidales (A) et photographie aérienne oblique du panache généré au jusant en fin de chargement (B).

Au cours des étales, les tronçons du panache vont se surimposer, formant un panache global qui s'étend jusqu'à 600 m autour du site d'extraction. Mis à part les périodes d'étale, le panache migre par translation dans la direction des courants de marée. Lors du jusant et du flot, le panache global peut s'étendre respectivement sur 6 km en direction de l'Ouest et 8,5 km en direction du Nord-Est pour une durée de chargement de 2h 45min. Les tronçons de panache montrent une rapide expansion latérale de 50 m à 100 m

au cours de la première demi-heure suivant la surverse. Sur les photos aériennes, la limite du panache avec le milieu marin est bien définie pour des tronçons générés il y a moins d'une heure (Figure 66). La limite du panache en opposition à la direction du courant est plus nette et plus linéaire que la limite en aval du courant qui est plus diffuse et qui présente des volutes. Au-delà d'une heure, les deux limites du panache deviennent plus diffuses (Figure 66).



Photos : A. Cuvilliez

Figure 66 : Mosaïque des photographies aériennes des trois derniers tronçons de panache généré par la drague, 20 minutes après la fin des extractions.

Pour une extraction se déroulant lors du flot ou du jusant et en raison de l'obliquité des courants de marée par rapport au cap emprunté par la drague, la formation successive de tronçons de panache va dessiner des chevrons irréguliers. La direction, la longueur et la largeur du panache vont dépendre de la force des courants et de l'orientation des courants par rapport à la drague. Lorsque l'extraction est à contre sens de la composante principale du courant projeté sur l'axe de la drague, le tronçon du panache formé est plus long que celui généré lorsque la composante principale du courant projeté sur l'axe de la drague est dans le même sens que l'extraction. Ces tronçons ont des longueurs de 3 150 m et 650 m respectivement à contre-courant et avec courant, pour une extraction au flot alors que les longueurs seront de 1 650 m et 1 250 m respectivement à contre-courant et avec courant, pour une extraction au jusant (Figure 65). Les tronçons formés à contre-courant ont une largeur de 200 m à S+30 min. Au-delà des 30 minutes, la largeur du panache augmente plus lentement jusqu'à environ 300 m juste avant sa disparition visuelle à S+3 h. La largeur du tronçon formé avec courant atteint les 300 m plus rapidement, au bout de 10 min puis décroît progressivement, probablement à cause de sa chute et de sa dispersion dans la colonne d'eau.

Cette géométrie en chevrons est observée pour tous les coefficients de marée des ME aux VE. Cette morphologie est également similaire pour une surverse par puits.

2.2.4. Coupe transversale caractéristique

Après l'entrée de la surverse dans le milieu marin, le panache turbide va se former en quelques minutes à l'arrière de la drague. Pour étudier l'évolution de ce panache au gré des courants, il est nécessaire de décrire en détail une section transversale de celui-ci le plus rapidement après sa formation.

La présence du sillage de bulles à l'arrière de la drague altère les mesures acoustiques (ADCP) et optiques (LISST). Cette perturbation est confirmée par l'hétérogénéité des mesures LISST et l'altération des mesures ADCP sur le site de Dieppe jusqu'à 12 m de profondeur à l'arrière de la drague en début de chargement lorsque la surverse n'était constituée que d'eau (Figure 67). Ce sillage de bulles à deux origines : (i) l'aspiration par l'hélice de la drague de la surface libre ou de bulles d'air générées par l'étrave , (ii) l'entraînement d'air dans la colonne d'eau par la surverse elle-même.

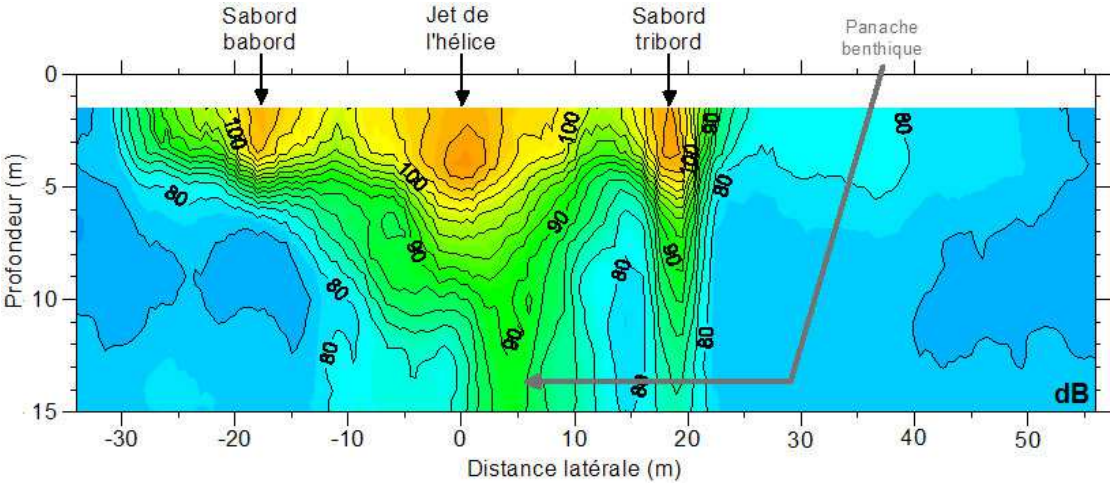


Figure 67 : Section transversale des perturbations du signal acoustique (dB) mesuré par l'ADCP, réalisée à l'arrière de la DAM Scelveringhe sur le site de Dieppe en début de chargement avant que la surverse soit chargée de particules.

Nous recherchons ici la durée pour laquelle l'essentiel du sillage de bulles n'affectent plus la fenêtre de mesure des outils c'est-à-dire en combien de temps celles-ci passeront sous 2 m de profondeur. Les bulles d'air dans l'eau sont globalement comprises entre 20 µm et 1 cm (Stramski *et al.*, 2004).

A partir du bilan des forces agissant sur une bulle d'air, sa vitesse limite de remontée peut être calculée. Le bilan des forces permet d'écrire:

$$m\vec{g} + \vec{F} + \vec{f} = m\frac{d\vec{v}}{dt} \tag{7}$$

avec m la masse, $\vec{g}$ la force de gravité, $\vec{F}$ la poussée d'Archimède, $\vec{f}$ la force de frottement et $\vec{v}$ la vitesse.

La bulle atteignant rapidement une vitesse limite notée $v_{\lim}$, on a :

$$\frac{dv_{\lim}}{dt} = 0 \tag{8}$$

En considérant un mouvement rectiligne uniforme et une masse volumique de l'air négligeable par rapport à celle de l'eau de mer, la vitesse limite de remontée d'une bulle d'air s'écrit :

$$v_{\lim} = \frac{\mu g r^2}{4,5\eta} \tag{9}$$

avec μ la masse volumique de l'eau de mer, r le rayon de la bulle et η la viscosité dynamique de l'eau de mer.

Cette formule montre qu'au bout de 10 min, 98,5 % des bulles de la gamme de taille des bulles atteignent 2 m de profondeur. Au-delà, seules se maintiennent des bulles inférieures à 160 µm. Ce pourcentage de bulles et la taille des bulles restantes sont respectivement sur estimés et sous estimée car cette formule ne tient pas compte de la décompression de la bulle d'air lors de sa remontée et donc de son accélération.

Nous avons montré qu'au-delà de 10 min l'essentiel des bulles a quitté la fenêtre de mesure des outils. Même si certaine bulles sont encore présentes au delà de 10 min leur influence sur la perturbation du signal acoustique sera très faible. En effet les signaux acoustiques sont logarithmiques. L'influence d'un signal de bulle inférieur à celui généré par les concentrations du panache est donc minime. Pour les mesures optiques du LISST, au-delà de dix minutes, les profils verticaux ne montrent pas de glissement d'une certaine taille de particules indiquant la remontée et l'expansion de bulles d'air.

Par conséquent, au-delà de dix minutes, nous considérons comme négligeable l'effet du sillage de bulle sur les mesures acoustiques et optiques.

Notons que les essais de soustraction d'une section transversale du signal acoustique des ADCP du sillage de bulle aux sections transversales du panache inférieures à S+10min n'ont pas été concluants. Ceci est principalement dû aux erreurs d'estimation du temps écoulé entre la mesure et la surverse de section de panache étudiée.

Sur le site Baie de Seine, la section transversale du panache turbide généré par la surverse par sabords de la SandHarrier a été étudié pour différentes conditions d'extraction (contre et avec courant) et différentes conditions de marée. La coupe transversale du panache la plus proche de la surverse (S+11 min) a été acquise lors du jusant à coefficient 43-49, pour une mer calme lorsque la DAM travaillait à contre-courant. Les limites du panache sont définies par la valeur des concentrations moyennes du milieu mesurées avant le début de l'extraction à laquelle deux écarts types a été rajoutées. La limite du panache est définie par la moyenne des concentrations de MES du milieu, mesurées avant extraction à laquelle est ajoutée deux écarts-types afin d'intégrer la variabilité du milieu. Dans la première partie de la colonne d'eau, jusqu'à 10 m de profondeur, **la largeur** du panache diminue, de 120 à 100 m. Puis celle-ci augmente avec la profondeur pour atteindre 150 m à proximité du fond. La limite du panache est irrégulière et dessine des volutes comme observées entre -10 et -15 m. Les **concentrations en MES** sont faibles en comparaison des fortes concentrations de la surverse. Elles sont hétérogènes avec une gamme comprise entre 1,37 et 21,60 mg.L^{-1},

de la limite avec le milieu naturel jusqu'au centre du panache. Deux zones de plus fortes concentrations sont observées. Une première zone à proximité de la surface (autour de -5 m) est légèrement plus concentrée que l'ensemble du panache et une seconde plus nette s'étendant du fond sur plus de 10 m d'épaisseur (Figure 68).

A partir de la superficie de la section transversale du panache et du surplus en concentration de MES par rapport au milieu marin, il est possible de calculer la masse totale de MES en surplus par mètre linéaire (longitudinalement à la section) contenue dans cette section de panache. Pour la section présentée sur la Figure 68 , la masse en surplus est de 29,4 kg.m^{-1}. La concentration moyenne des MES pour cette section est calculée à partir du ratio entre la masse par mètre linéaire et la superficie de cette section. Pour la section considérée cette concentration moyenne en surplus est de 9,7 mg.L^{-1}.

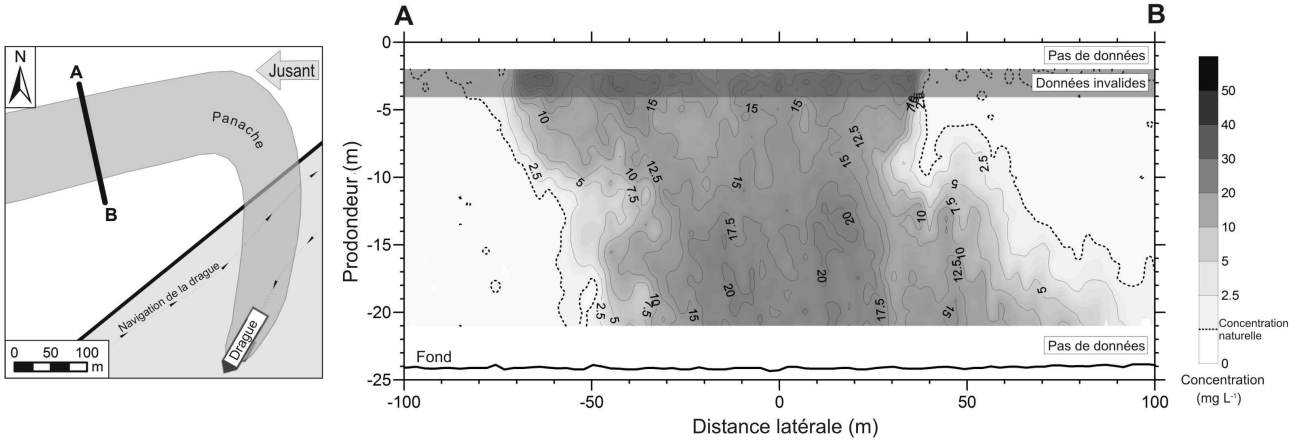


Figure 68 : Section transversale du signal rétrodiffusé calibré du panache à S+11 min

Le spectre granulométrique des particules de cette section transversale de panache a été étudié à partir de mesures *in situ* à l'aide du LISST (Figure 69 A, B). Pour mettre en évidence le spectre granulométrique propre aux particules du panache, celui des particules contenues dans le milieu non impacté adjacent au panache a été soustrait de celui mesuré dans le panache. Ces données confirment les mesures du signal rétrodiffusé de l'ADCP : deux zones présentent des concentrations plus élevées que la moyenne du panache. La première à proximité de la surface (- 5m) et la seconde proche du fond (-17,5 m). Le panache est constitué des mêmes modes granulométriques, observés dans la surverse, à savoir celui des argiles, celui des silts très fins à fins et celui des sables très fins à moyens. La nature des particules, déterminée à l'aide du MEB, est également similaire. Les agrégats semblent être prédominants aux particules minérales isolées (Figure 69 C, D). Même si ces trois modes se retrouvent sur l'ensemble de la colonne d'eau, leur proportion relative est hétérogène.

A proximité de la surface, les trois modes sont présents dans des proportions globalement similaires (Figure 69 A). Les particules sont ici des silts sableux avec en moyenne 40,2 % de sable, 49,8 % de silt et 10,0% d'argile. Notons qu'ici le mode silteux est prédominant contrairement à ce qui avait été observé par le LISST dans la surverse de la SandHarrier. Les pics de chacun de ces modes présentent des concentrations volumiques supérieures à 2 µL.L^{-1}. Pour le mode des argiles, le pic est sous la limite basse de la gamme de

mesure du LISST soit inférieur à 2,72 µm. Pour le mode des silts très fins à fins, deux pics sont observés : un premier à 14,2 et un second à 27,6 µm. Pour le mode des sables très fins à moyens, deux pics sont également observés : un premier à 201 et un second supérieur à la limite haute de la gamme de mesure du LISST soit supérieur à 460 µm.

A proximité du fond, le panache est principalement constitué de sable silteux avec 82,5% de sable, 15,2 % de silt et 2, 3% d'argile (Figure 69 B). A cette profondeur, le mode des sables très fins à moyens est nettement prédominant. Sa concentration est similaire à celle observée en surface mais sept fois supérieure à celles des modes des argiles et silts très fins à fins. De plus, à cette profondeur, le mode de sables est plus grossier avec un premier pic à 331 $\mu L.L^{-1}$ et un second toujours supérieur à la limite haute de la gamme de mesure du LISST soit supérieur à 460 µm. Les modes des argiles et des silts très fins à fins présentent des proportions beaucoup plus faibles qu'en surface et une très faible concentration volumique inférieure à 0,5 $\mu L.L^{-1}$.

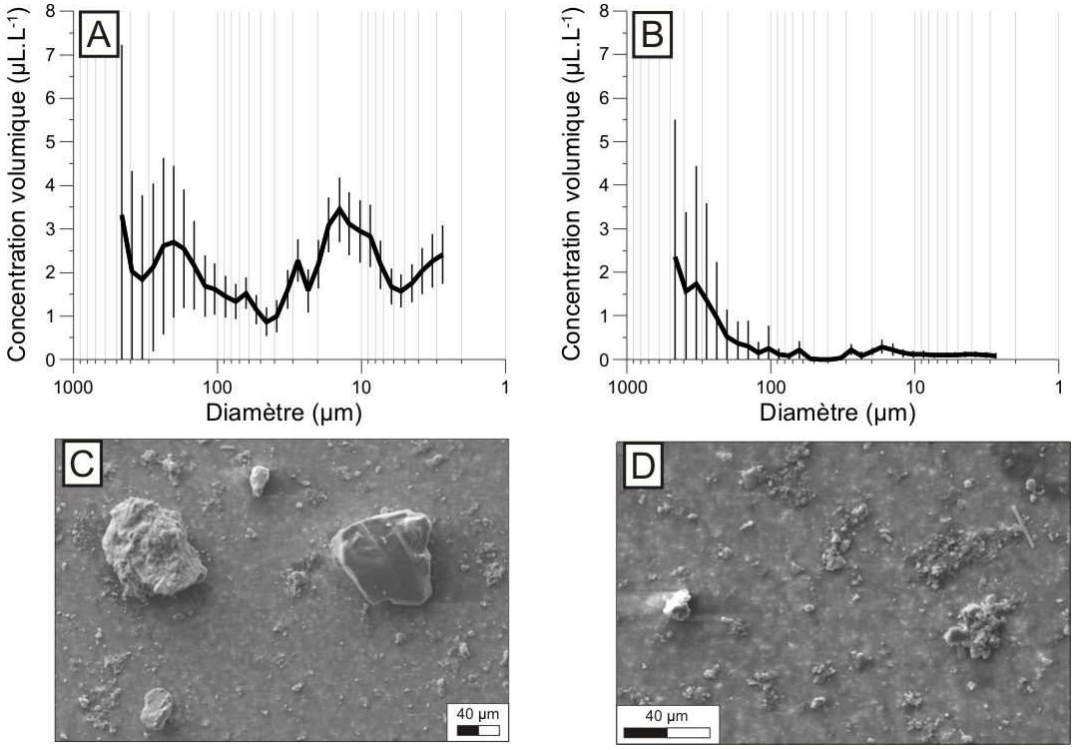


Figure 69 : Granulométrie des particules contenues dans le panache en surface (A) et au fond (B), et images MEB montrant les particules minérales dans le mode de sables très fins à moyens (C), les agrégats du mode de silts très fins à fins et les particules minérales du mode des argiles (D).

Les concentrations massiques globalement similaires en surface et en profondeur, et les concentrations volumiques plus importantes en surface impliquent des densités de particules plus fortes en profondeur, avoisinant 1,3.

Cette remarque couplée à un spectre granulométrique moins hétérogène et plus grossier en profondeur indique une discrimination rapide du panache de la taille et de la densité des particules (dès

S+11min). Cette discrimination peut être engendrée par (i) la chute rapide de particules sableuses minérales, se dissociant des particules minérales plus fines et des particules organo-minérales sableuses moins denses qui se maintiennent plus longtemps dans la colonne d'eau ou (ii) la présence d'un panache benthique formé par la remise en suspension de particules plus grossières et plus denses, à proximité du fond par le passage de la tête d'élinde sur le fond.

Pour une extraction travaillant avec le courant au jusant, les mêmes éléments sont observés avec toutefois une gamme de concentration légèrement plus faible et une largeur du panache plus importante. Les mêmes remarques sont observées pour des sections transversales du panache généré lors du flot avec et à contre-courant.

2.2.5. Evolution temporelle des sections transversales du panache

Pour une compréhension détaillée de l'évolution du panache, il convient d'analyser l'évolution morphologique de la section latérale du panache et celle de ces concentrations en MES. Les sections transversales présentées ici sont celles acquises le 24/10/09 lors d'une phase de flot en conditions de ME avec un panache formé à contre-courant. Une hétérogénéité spatiale des concentrations est systématiquement observée. La morphologie du panache est plus simple à S+15min qu'à S+10min avec des limites verticales mieux définies et une largeur globalement constante de la surface vers le fond. La section transversale à S+15min montre que le panache est plus concentré dans la deuxième moitié de la colonne d'eau ce qui n'était pas observable sur le graphe d'évolution temporelle du panache (Figure 70A).

Les sections transversales montrent une dispersion latérale jusqu'à S+1h42min (Figure 70 B). Entre 15 et 36 min, deux zones plus concentrées sont distinguables : une proche de la surface et une seconde, plus large, à proximité du fond. Entre S+36min et S+1h42min les concentrations restent plus concentrées au centre du panache que sur l'ensemble de la colonne d'eau matérialisant une colonne verticale. Jusqu'à 1h42min le panache s'étend latéralement à proximité du fond. Au-delà de S+2h, la colonne verticale observée préalablement au centre du panache est plus difficilement distinguable, les concentrations sont proches de celles du milieu naturel hormis sur le fond où elles restent sensiblement plus fortes (Figure 70 C), mais ne sont plus perceptibles au-delà de S+2h30min (Figure 70 D). Puis le panache devient de pus en plus difficilement discernable avec des concentrations atteignant progressivement celles du milieu. Sur la dernière section (Figure 70 D), les plus fortes valeurs à proximité de la surface semblent être induites par une turbulence plus importante générée par le navire de suivi.

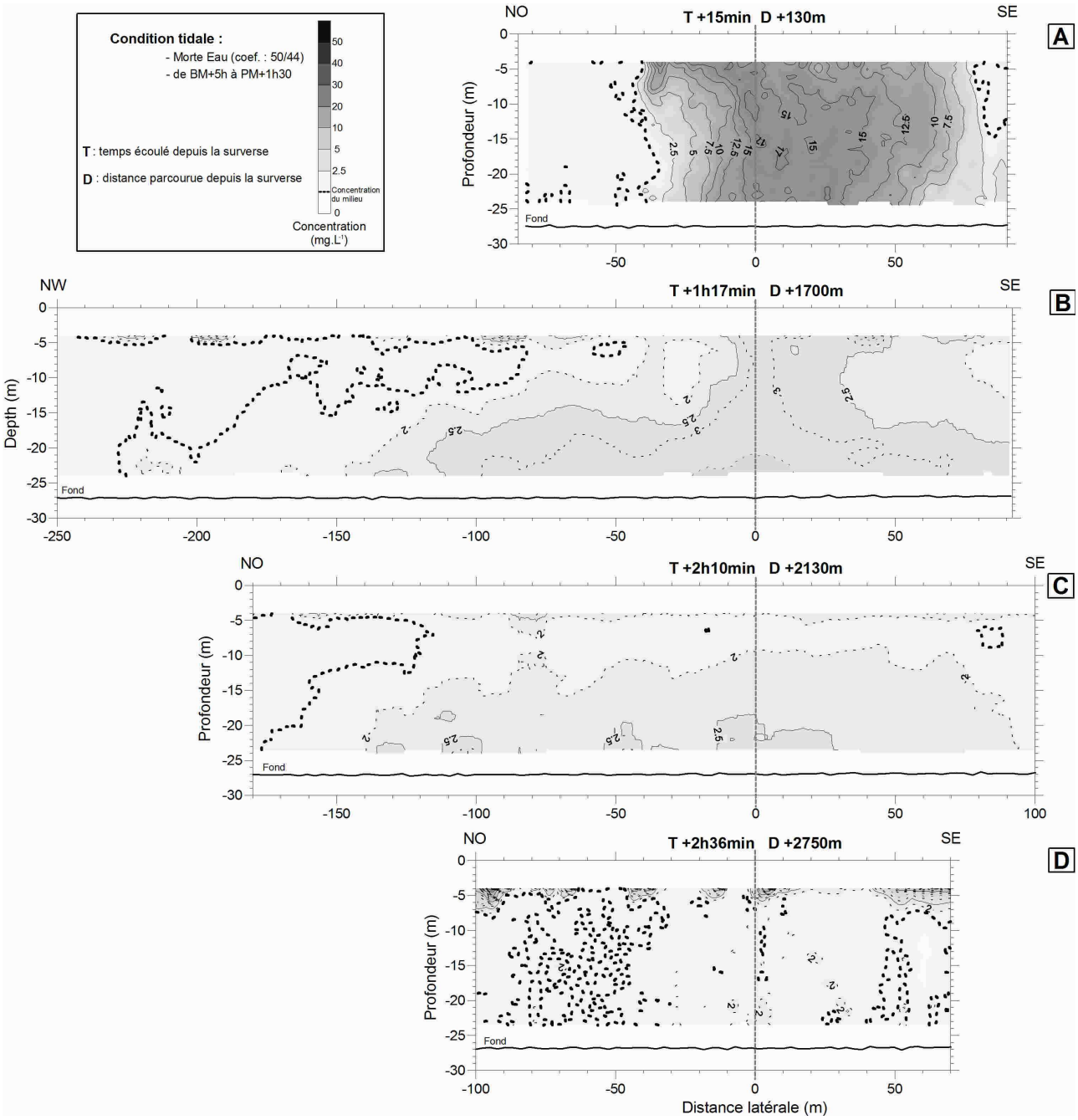


Figure 70 : Evolution temporelle d'une section transversale du panache formé à contre-courant au flot en conditions de ME.

Pour un panache généré avec le courant, les mêmes éléments sont observés. Toutefois les concentrations sont plus faibles dans la première partie de la durée de vie du panache et la largeur de la section transversale est constamment plus importante. Même moins net, du fait des plus faibles concentrations, l'évolution de la géométrie des sections transversales est sensiblement similaire.

2.2.6. Evolution temporelle : dispersion et chute

a. Méthode

L'évolution temporelle du panache, depuis sa formation à l'arrière de la drague jusqu'à sa disparition, est étudiée par la comparaison de plusieurs sections transversales acquises à différents instants après le rejet. Cette évolution temporelle est étudiée pour un **panache généré à contre-courant** lors d'une phase de flot à coefficient de marée de 50-44, dans des conditions d'agitation calme (Figure 71). Pour chaque section transversale, les cellules de mesures ont été moyennées sur une bande de 5 m de large dans les parties les plus concentrées de celui-ci. Chacune de ces valeurs moyennées ont été ensuite interpolées pour produire l'évolution temporelle du centre du panache (Figure 71 B). La concentration moyenne et la superficie transversale de chaque section du panache est calculée et leur évolution temporelle est respectivement représentée (Figure 71 C, D). La masse par mètre linéaire de MES propre au panache de chacune des sections est calculée par le produit de la surface de la section du panache et de la concentration moyenne en surplus (par rapport au milieu) contenu dans le panache. Son évolution temporelle est représentée sur le graphique (Figure 71 E). Le taux d'expansion du panache (ou flux latéral) a été calculé en comparant la variation de concentration en surplus de la section transversale à deux instants successifs (Figure 71 F). Cela correspond au ratio entre le surplus moyen de concentration dans la zone affectée par le panache et le laps de temps écoulé entre l'acquisition des deux sections transversales. Le taux de transfert des particules du panache entre la colonne d'eau et le substratum (ou flux vertical) est calculé à partir du ratio entre la différence des masses par mètre linéaire contenues dans deux sections transversales consécutives du panache et le laps de temps écoulé entre l'acquisition de ces deux sections transversales (Figure 71 F). Si ce taux est négatif, il manifeste une chute de particules, s'il est positif, il révèle une remise en suspension.

Précisons ici, que les couches de surface (zone aveugle et cellules invalidées) et de fond (sans mesures) sont intégrées à ces calculs par extrapolation des caractéristiques du panache (largeur et concentration moyenne) vers la surface et le fond.

b. Evolution temporelle des concentrations de MES du panache

Jusqu'à S+30min les concentrations de l'ensemble de la colonne diminuent jusqu'à 11 $mg.L^{-1}$ en s'homogénéisant hormis en surface où les concentrations sont un peu plus faibles (Figure 71 B). Jusqu'à S+1h, les concentrations continuent progressivement à diminuer et à s'homogénéiser sauf en surface où elles restent plus faibles et à proximité du fond où elles deviennent plus fortes. Au cours de la deuxième heure suivant le rejet, les concentrations diminuent plus lentement. Jusqu'à S+1h30min, les concentrations en surface diminuent plus lentement que celles du milieu de la colonne d'eau. Celles à proximité du fond diminuent mais sont toujours plus importantes que dans le reste de la colonne d'eau. Au-delà de S+2h, les concentrations diminuent pour tendre progressivement vers celles du milieu naturel avec un léger gradient positif vers le fond. Au-delà de S+2h36min, le panache plus distinguable à l'œil nu n'est également plus

distinguable à partir du signal rétrodiffusé de l'ADCP. Dès lors au-delà de S+2h36min, le panache peut être considéré comme disparu.

La dynamique des concentrations du panache peut être caractérisée par le taux de diminution des concentrations. Celui-ci est le rapport entre la différence du surplus de concentration du panache pour deux sections transversales consécutives avec le laps de temps écoulé entre ces deux sections transversales. A S+15 min, le surplus de concentration moyen est de 8,9 $mg.L^{-1}$ (Figure 71 C). Le taux de diminution des concentrations est de 17,15 $mg.h^{-1}$ lors de la première demi-heure et d'environ 4,58 $mg.h^{-1}$ lors de la deuxième demi heure. En effet, ce surplus moyen de concentration décroît de 8,9 $mg.L^{-1}$ après 15min, 2,9 $mg.L^{-1}$ après 36 min jusqu'à 1,2 $mg.L^{-1}$ une heure après la surverse. Au-delà d'une heure, le taux de diminution des concentrations devient inférieur à 1,5 $mg.h^{-1}$ en restant faible et constant. A partir de S+2h, les concentrations du panache restent légèrement supérieures à celle du milieu naturel mais en sont très proches (d'environ 0,5 $mg.L^{-1}$).

c. Dispersion

En considérant que la dispersion longitudinale des particules du panache s'équilibre dans un sens et dans l'autre, celle-ci est considérée comme nulle. La dispersion latérale du panache est observée à partir de l'augmentation de superficie de la section transversale du panache.

La superficie de la section transversale (Figure 71 D) du panache augmente de 3 417 m^2 à 6 877 m^2 entre S+15 min et S+1h42min avec une vitesse d'expansion diminuant de 1,33 à 0,77 $m^2.s^{-1}$. Puis la superficie diminue jusqu'à 2 891 m^2 à S+2h36 min. Cela indique que la dispersion latérale du panache se produit jusqu'à S+1h42min.

Le taux d'expansion latérale est d'environ 2,1 $g.s^{-1}$ entre S+15min et S+36min. Puis il diminue rapidement et reste faible jusqu'à S+1h42min. Au-delà de S+1h42, la dispersion latérale n'est plus observée (Figure 71 F).

d. Chute

D'après la diminution de la masse par mètre linéaire (Figure 71 E), les mécanismes de chute des particules débutent immédiatement après la surverse. La masse de particules diminue de 30 kg à S+15min jusqu'à 0,4 kg par mètre linéaire à S+2h36min. Cette différence implique la chute des particules sur le fond (Figure 71 F). Le taux de chute décroît rapidement de 12,6 $g.s^{-1}$ à 5,9 $g.s^{-1}$ respectivement lors de la première et de la deuxième demi heure après le rejet. Puis, au-delà de S+1h, ce taux reste faible et constant autour de 1,1 $g.s^{-1}$.

La comparaison entre le flux vertical et le flux latéral montre que le processus de chute est prédominant à celui de la dispersion latérale avec des taux 5 à 20 fois supérieurs.

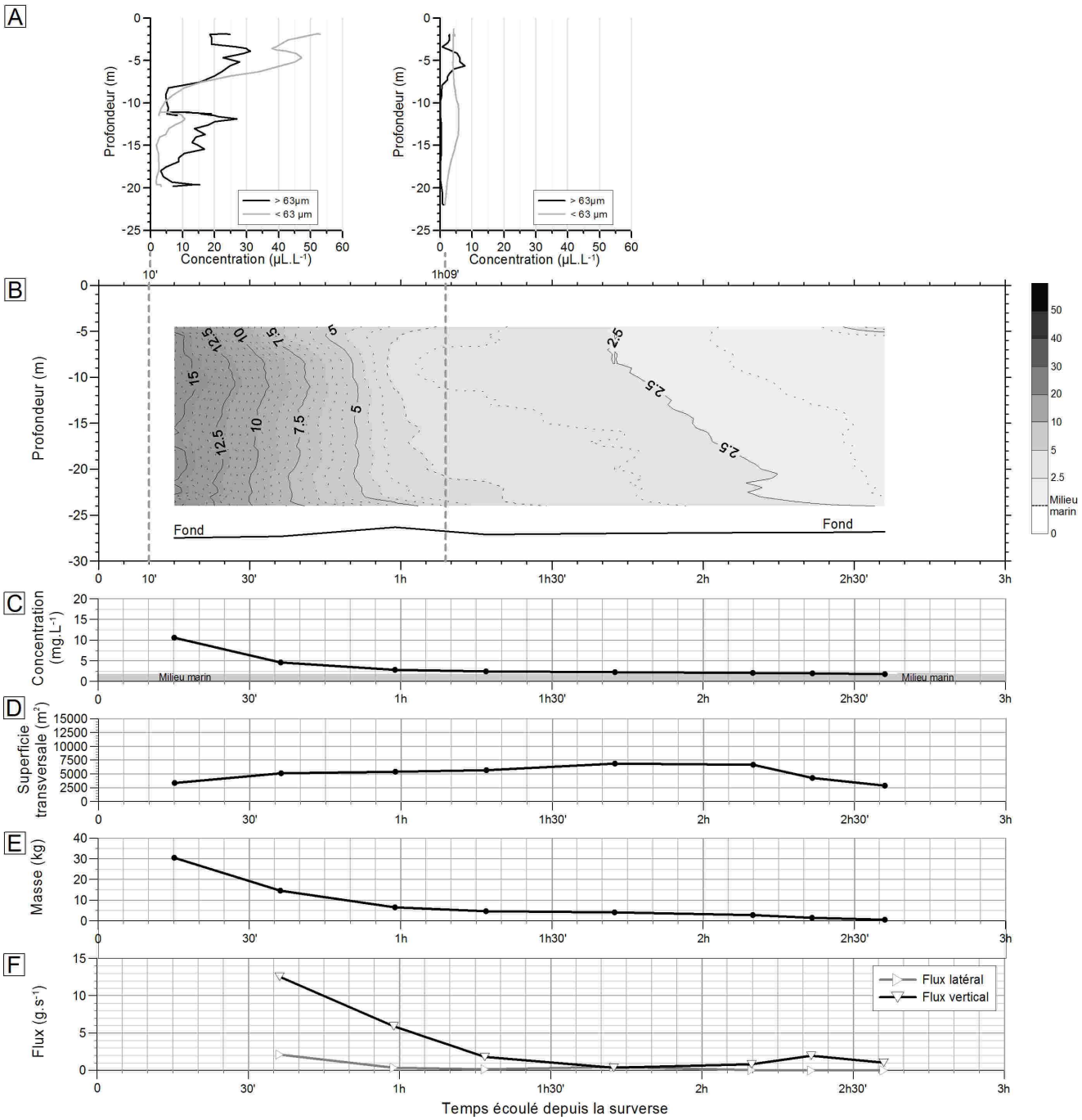


Figure 71 : Evolution temporelle d'un panache formé à contre-courant lors du flot à ME en condition d'agitation calme.
A: profils verticaux granulométriques. B: concentration des MES sur l'ensemble de la colonne d'eau. C: concentration moyenne calculée. D: superficie de la section transversale du panache. E: masse totale des particules contenues dans la section transversale. F: flux latéraux et verticaux.

e. Evolution temporelle de la granulométrie des MES

Des profils granulométriques verticaux de la colonne d'eau, effectués à l'aide du LISST ont été réalisés à différents instants de l'évolution temporelle du panache.

Les mesures LISST au plus proche de la drague à S+10min (cf. §2.2.4) montrent la chute rapide de particules minérales sableuses (>63 µm). Dans la colonne d'eau sont maintenues, les particules fines (<63

µm), constituées d'un mode d'argile et d'un mode de silts très fins à fins mais aussi des particules sableuses organo-minérales moins denses (Figure 71 A).

A S+1h15min (Figure 71 A), la concentration volumique globale mesurée par le LISST confirme le retour progressif de celle-ci vers celle du milieu. Le panache correspond à des sables silteux ou silts sableux de la surface jusqu'à 7,5 m puis à des silts entre 7,5 et 20 m et enfin de nouveau à des sables silteux dans les derniers mètres à proximité du fond. A cet instant, l'ensemble des particules sableuses a chuté sur le fond sauf en surface où une fraction de particules grossières organo-minérales se maintient. Ces dernières sont moins bien classées que celles observées en surface à S+10min avec deux modes plus étalés, un premier entre 63 et 170 µm, et un second supérieur à 330 µm. Les concentrations volumiques des particules fines (<63 µm) se sont homogénéisées sur la verticale avec toutefois des concentrations légèrement plus élevées, au milieu de la colonne d'eau. Celles-ci sont constituées des mêmes modes observés à S+10min à savoir un premier dans les argiles et un second dans les silts très fins à fins. A proximité du fond, les particules sableuses sont de nouveau présentes mais avec, cette fois, un mode centré autour de 201 µm similaire à un des modes observé en surface à S+10min.

Cette évolution granulométrique montre entre S+10min et S+1h15min : (i) la décantation complète des particules sableuses minérales dont la chute avait déjà débuté à S+10min, (ii) la chute des particules de 200µm encore présentes en surface à S+10min, (iii) l'homogénéisation et le maintien dans la colonne d'eau des argiles et des silts très fins à fins et (iv) le maintien en surface de particules organo-minérales grossières.

Pour un **panache formé avec courant**, les concentrations sont deux fois moins élevées pour l'ensemble de la colonne d'eau jusqu'à S+45min (Figure 72 A, B). Le taux de diminution des concentrations est ici plus faible variant de 2,36 $mg.h^{-1}$ lors de la première demi heure à moins de 0,5 $mg.h^{-1}$ au-delà d'une heure. Malgré des concentrations initiales plus faibles à l'arrière de la drague, cette diminution de concentration plus lente engendre un retour vers les concentrations du milieu marin à un temps relativement similaire entre les deux scénarii soit autour de S+2h30min. De plus, malgré des concentrations plus faibles, les surfaces transversales (Figure 72 C) des sections du panache ici plus importantes engendrent de plus fortes masses par mètre linéaire jusqu'à S+1h15min (Figure 72 D). Puis la diminution progressive de la superficie de la section transversale du panache entraîne une masse par mètre linéaire similaire à celle générée à contre-courant dès S+1h30min.

Pour un panache formé à contre-courant, la dispersion latérale entre la surverse et la première section transversale à S+26min sera nettement plus importante comme l'indique la superficie de cette première section trois fois supérieure à celle observée avec courant. La diminution des superficies dès la première section transversale indique que la dispersion latérale est inexistante au-delà de S+26min.

Dès S+26min, la superficie du panache décroît. Par conséquent, les processus de dispersion latérale se sont interrompus entre la surverse et la première section transversale effectuée (S+26min).

D'après la diminution de la masse par mètre linéaire, les processus de chute débutent immédiatement après la surverse. La masse de particules diminue de 27 kg à S+26min jusqu'à 0,8 kg par mètre linéaire à

S+2h47min. Comme pour le scenario à contre-courant, cette différence implique une chute des particules (Figure 72 E). Le taux de chute des particules est globalement équivalent et évolue similairement à celui d'une extraction à contre-courant à savoir rapidement au début de 11,6 $g.s^{-1}$ à 3,2 $g.s^{-1}$ entre la première et la deuxième demi heure après le rejet. Puis, au-delà de S+1h, ce taux reste faible en moyenne inférieure à 2 $g.s^{-1}$.

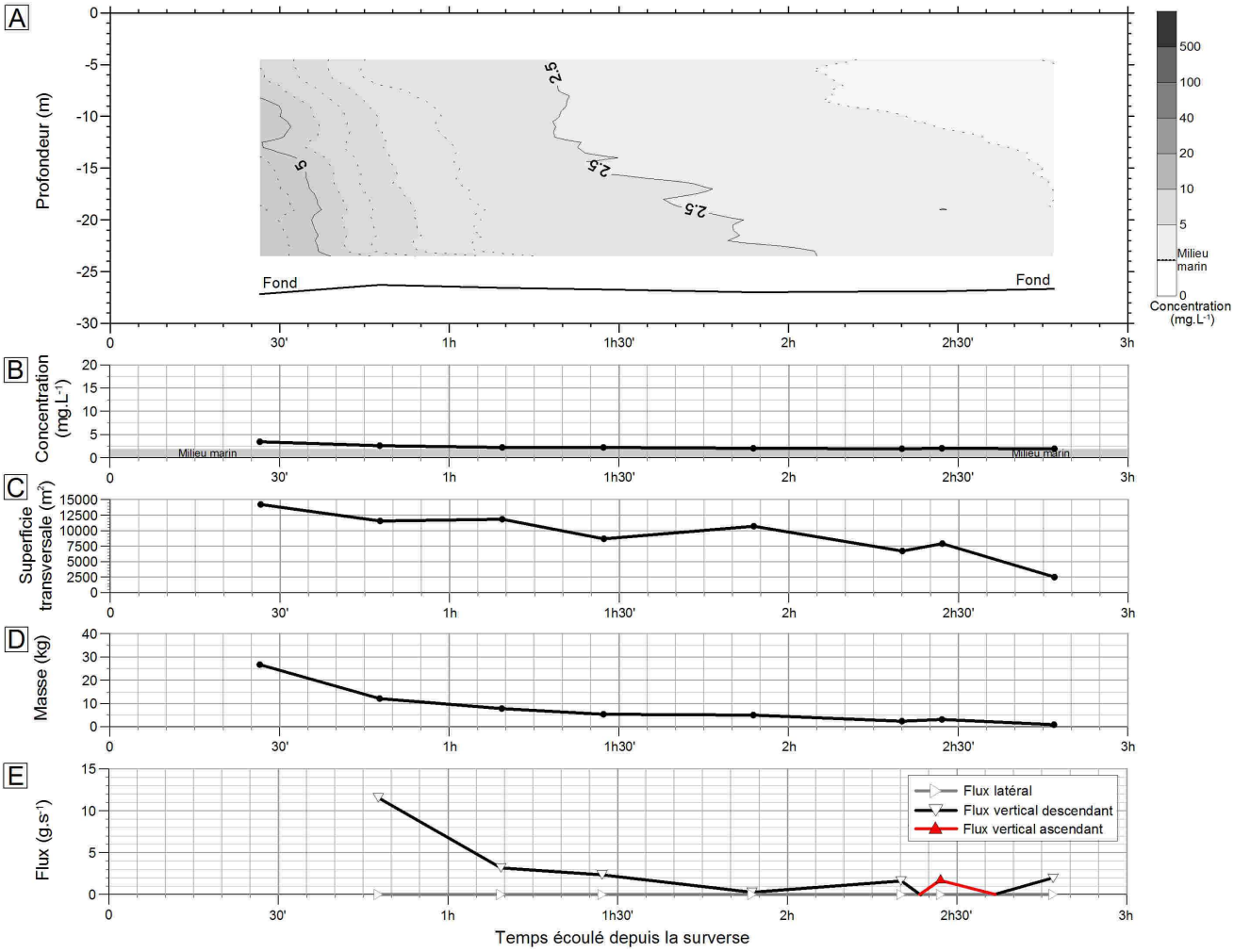


Figure 72 : Evolution temporelle d'un panache formé avec courant lors du flot à ME en condition d'agitation calme.
A: concentration des MES sur l'ensemble de la colonne d'eau. B: concentration moyenne calculée. C: superficie de la section transversale du panache. D: masse totale des particules contenues dans la section transversale. E: flux latéraux et verticaux.

2.2.7. Estimation de l'extension et des volumes des dépôts

L'essentiel des particules constituant le panache (sans distinction de taille) a globalement chuté deux heures après leur surverse. Les distances maximales de dépôts de ces particules sont estimées à partir du vecteur résiduel des courants, calculées sur deux heures tout au long du cycle semi-diurne (par pas de 30 min). Nous considérons donc ici que les particules du panache ne présentent pas d'inertie propre face aux courants. Les résiduels ainsi calculés lors de coefficient de VE permettent d'obtenir les limites maximales du

dépôt du panache. Lors de ces coefficients de VE, l'essentiel des particules du panache se déposent jusqu'à 6,5 km autour de la zone d'extraction lorsque le chargement débute 3 à 4 h après la BM (Figure 73).

La distance de dépôt dépend de la vitesse de chute des particules, donc de leur taille et de leur densité. Les particules qui chuteront jusqu'à 6,5 km seront les plus fines et les moins denses du panache. Cette valeur est légèrement différente des 8,5 km d'extension maximale du panache. Cette différence peut être expliqué par un résiduel de courant calculé par un unique point de mesure fixe, qui n'intègre pas les variations des courant à l'échelle kilométrique.

Le mode prédominant de la surverse à savoir celui de sable fin centré sur 225 µm, chute beaucoup plus rapidement comme l'ont montré les mesures effectuées *in situ* à partir du LISST. En effet, ce mode est quasi inexistant à S+1h09min. Le temps et donc la distance de chute de cette fraction (225 µm) n'ont pas pu être déterminés par les profils verticaux LISST *in situ*. Ce temps est déterminé à l'aide de la vitesse de chute théorique des particules de 225 µm et de la hauteur d'eau.

Une vitesse de chute de 0,028 m.s^{-1} est calculée pour le mode de sable fin centré autour 225 µm à partir de la formule de Zanke (1977) :

$$W_S = \frac{10\upsilon}{D}\left[\left(1+\frac{0.01(s-1)gD^3}{\upsilon^2}\right)^{-1}-1\right] \qquad (10)$$

, avec υ la viscosité cinématique en Pa.s^{-1}, D le diamètre des particules en m, s la densité relative des particules par rapport à celle de l'eau et g le coefficient de gravité en N.kg^{-1}.

En intégrant la variation de la hauteur d'eau induite par la marée, le temps de dépôts de ces sables sur le fond pour des conditions de VE (coef 110) varie entre 12-17 min en fonction de l'instant auquel débute le chargement lors du cycle semi-diurne. La distance de dépôt est calculée à partir du résiduel de courant pour ces temps de chute tout au long du cycle semi-diurne. La distance maximum des dépôts des sables de 225 µm est de 800 m pour un chargement débuté au flot, 3-4 h après la BM (Figure 73).

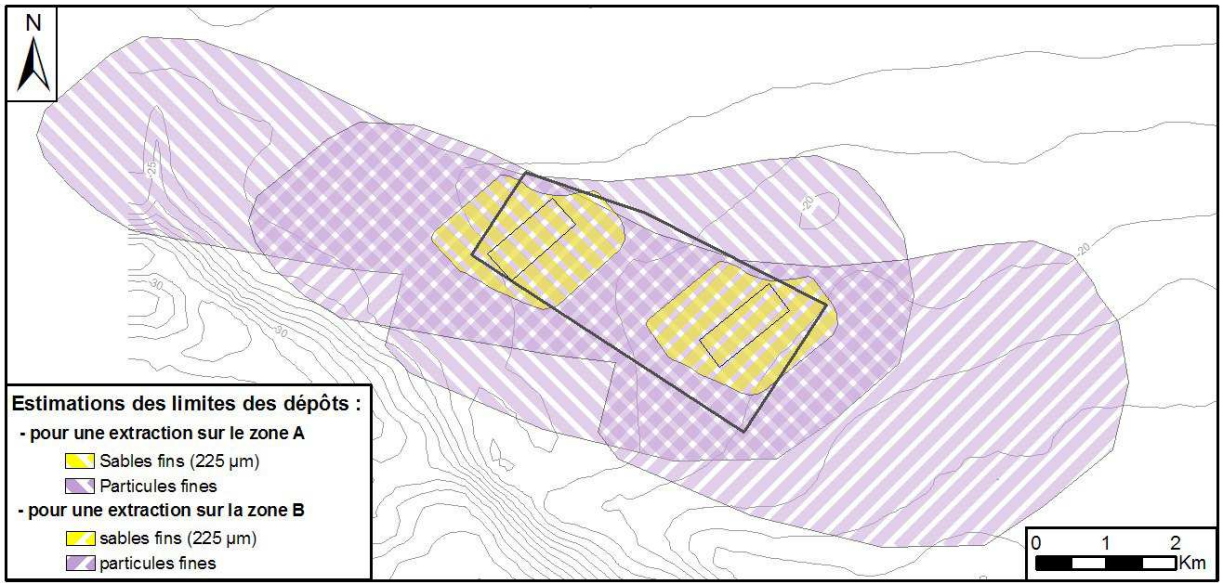


Figure 73 : Zones de dépôts des sables et particules fines du panache de surverse (bathymétrie SHOM).

En considérant la chute de l'ensemble des particules du panache, le volume de dépôt correspond au volume de surverse (Tableau 10).

Le volume annuel des particules rejetées par surverse est calculé en distinguant les volumes dragués par type de surverse et en les multipliant par le pourcentage volumique des particules rejetées par rapport à celui chargé soient 2,6 % pour une surverse par sabords et par 8,3 % pour une surverse par puits.

A partir des concentrations volumiques de chacune des classes granulométriques mesurées par le LISST pour la surverse de la SandHarrier, les volumes annuels des particules supérieures ou égales à 225 µm et inférieure à 225 µm sont calculés (Tableau 10). Le rapport de ces volumes par les superficies des zones potentielles de dépôts de particules fines et de sables 225 µm permet d'estimer les épaisseurs de ces dépôts. L'épaisseur estimée des dépôts varie d'une année à l'autre en raison des variations des volumes annuels dragués et des variations du rapport d'intervention de dragues travaillant avec une surverse par puits de celle travaillant avec une surverse par sabords. Les épaisseurs de dépôts dans le secteur de chute des sables de 225 µm et des particules fines ne dépassent pas respectivement le mm et 0,15 mm, hormis l'année 2009-10 sur la zone B ou ces dépôts atteignent 1,60 et 0,29 mm.

Ces valeurs ne représentent qu'un ordre de grandeur. En effet, d'un part le volume rejeté par surverse et donc ceux des dépôts par classe granulométrique sont calculés à l'aide du spectre granulométrique de la surverse de la SandHarrier et non de l'ensemble des dragues intervenant sur site. Ensuite ces valeurs représentent des moyennes à l'échelle des zones de dépôts. Le mode de calcul de ces dépôts considère que les extractions sont réparties uniformément au cours du cycle de marée et donc que les dépôts concernent uniformément les surfaces estimées. De plus cette épaisseur moyenne ne rend pas compte de l'affinement probable des dépôts en s'éloignant de la zone d'extraction.

Tableau 10 : Bilan annuel des volumes particulaires dragués et rejetés par surverse, et des épaisseurs de dépôts correspondants.

Années	Zone A				Zone B			
	Volume dragué (m3)	Volume surverse (m3)	Epaisseur des dépôts (mm)		Volume dragué (m3)	Volume surverse (m3)	Epaisseur des dépôts (mm)	
			Sable (dont fine)	Fine			Sable (dont fine)	Fine
2007-08	99607	6432	0.64 (0.12)	0.12				
2008-09	93341	2999	0.30 (0.06)	0.06	158818	6960	0.70 (0.13)	0.13
2009-10					279129	15210	1.60 (0.29)	0.29
2010-11					322925	10129	0.77 (0.14)	0.14

3. Site de Dieppe

L'étude du panache turbide sur le secteur d'extraction de Dieppe a été réalisée en appliquant les protocoles définis en Baie de Seine. La caractérisation du milieu naturel s'appuie sur des données observées (campagne Granimp10b) et des travaux antérieurs.

3.1. Variabilité naturelle

3.1.1. Hydrodynamisme

Le marnage est de l'ordre de 8 à 9 m à Dieppe pour une marée de VE moyenne, avec un cycle semi-diurne de 12h25 min. Entre la Baie de Seine et la Baie de Somme, les courants sont alternatifs et évoluent dans le sens anti-horaire. Au large de Dieppe, les courants sont parallèles à la côte avec le flot orienté vers le NE et le jusant vers le SO. Les vitesses sont dissymétriques, au flot 20 à 30% supérieures au flot par rapport au jusant (Bellessort et Migniot, 1986). Les courants de marée mesurés par l'UMR CNRS 6143, en installant au mouillage un ADP du 27/04/06 au 02/05/06, confirment cette dissymétrie (Figure 74). Les étales de BM et PM sont courtes et durent respectivement 15 et 45 min. Pour un coefficient de marée de 80, les vitesses des courants lors de ces étales sont inférieures à 0,15 m.s^{-1}. Le flot orienté vers le NE s'installe pendant environ 5 h avec des vitesses maximales en surface pouvant atteindre les 1,10 m.s^{-1} à BM+ 3h. Le jusant orienté vers le SO dure plus de 6 h avec des vitesses maximales en surface atteignant les 0,85 m.s^{-1} à PM+4,5 h. Un gradient de vitesse décroissant vers le fond est observé au flot et au jusant. Ce gradient engendre des différences de vitesses de l'ordre de 0,20 m.s^{-1} entre le fond et la surface.

L'hydrodynamisme du secteur présentera donc une variabilité importante selon les cycles semi-diurnes et de ME/VE.

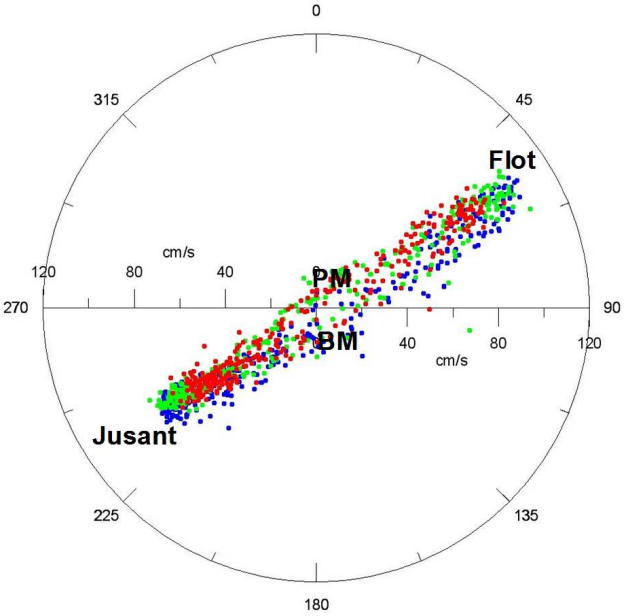


Figure 74 : Rose des courants à différentes profondeurs pour un coefficient de 80 (rouge: fond; vert : milieu; bleu : surface)

Le courant résiduel est globalement orienté vers l'E. A partir de plusieurs courantomètres installés à proximité du site, Ferret (2011) montre que la morphologie du fond, marquée dans le secteur, et les vents influencent fortement l'hydrodynamisme local et donc les courants résiduels (Figure 75).

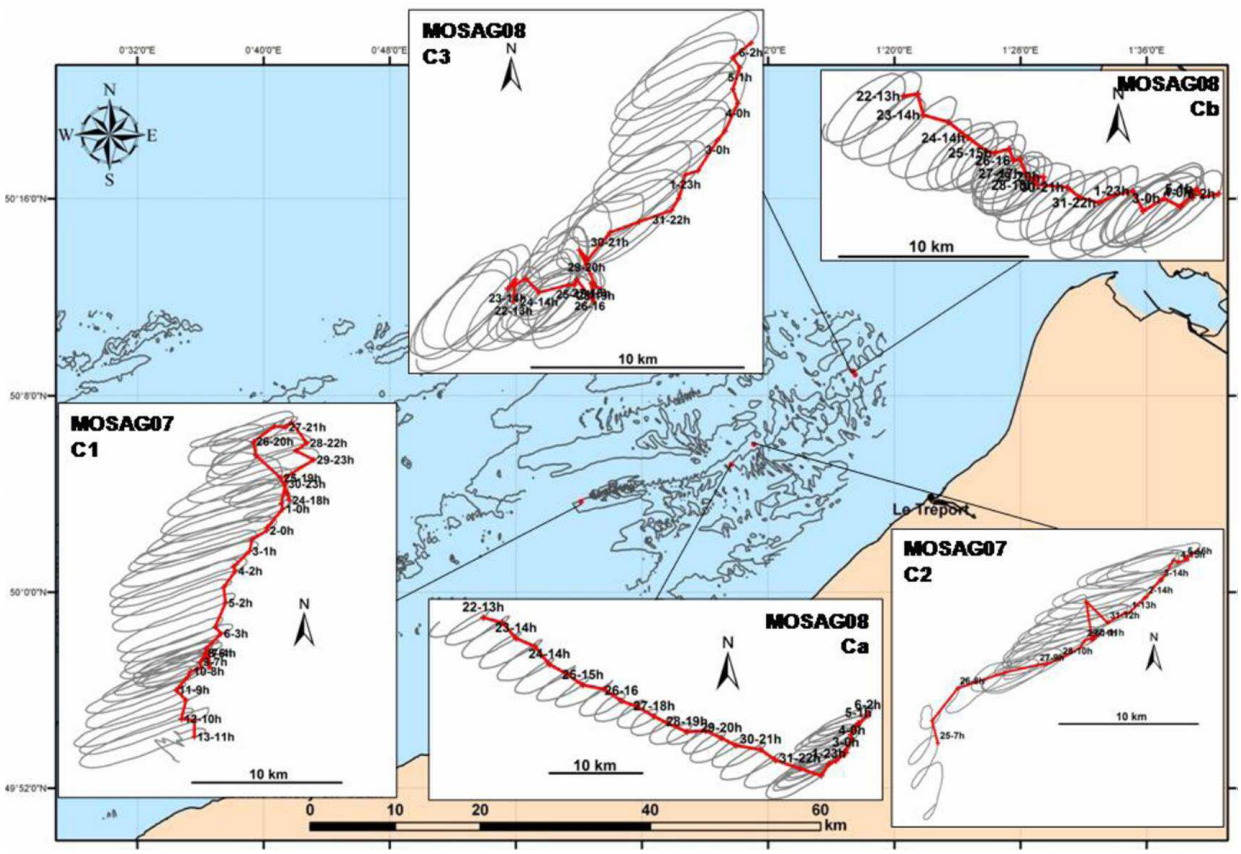


Figure 75 : Résiduel de courant entre Dieppe et le Tréport (Ferret, 2011).

3.1.2. Vent et houle

A Dieppe, la majorité des houles est générée par les vents locaux (mer de vent). Par conséquent l'étude du régime des houles nécessite l'analyse des vents du secteur.

La rose des vents, mesurée au niveau du sémaphore de Dieppe entre 1978 et 2006, montre que 35 % des vents proviennent des secteurs S à SO et NO. Les vents les plus forts, généralement observés en périodes hivernales, supérieurs ou égaux à 8 $m.s^{-1}$, sont principalement de secteur O, mais peuvent également provenir du N-NE.

La hauteur significative de la houle est inférieure à 1,60 m et à 0,5 m pendant respectivement 95 et 55% du temps et est supérieure à 3 m pendant environ 1 % du temps (Figure 76). La période moyenne de la houle est majoritairement comprise entre 3 et 6 secondes. Environ 50 % des houles proviennent du secteur ouest sous l'impulsion des vents dominants d'Ouest. Le fetch, ou distance sur laquelle le vent exerce une action sans rencontrer d'obstacle, est relativement réduit au niveau de la zone d'étude: 60 % des vents s'établissent sur moins de 100 km (Ferret, 2011).

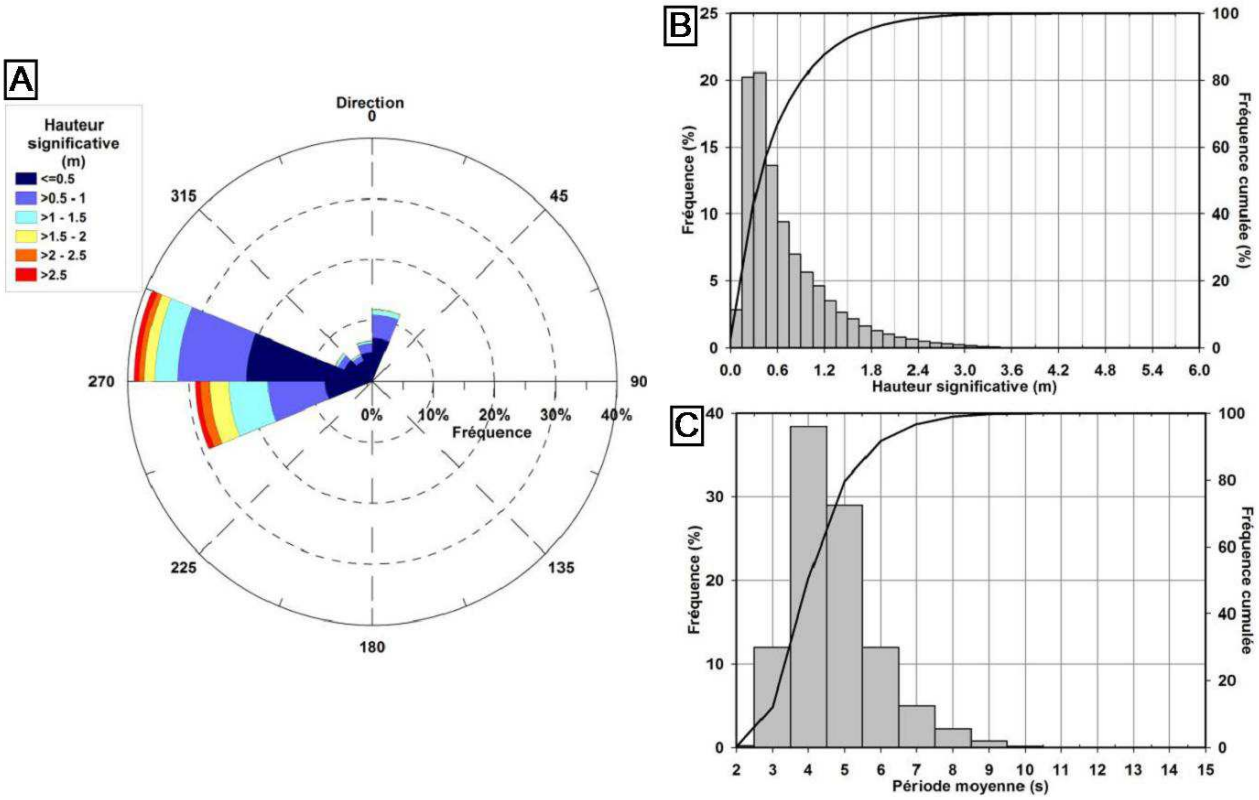


Figure 76 : Caractéristiques de la houle au large de Dieppe sur la période de 1979 à 2002. A: direction; B: hauteur significative ; C: période (données ANEMOC, point Coast-3506 d'après Ferret, 2011).

3.1.3. Caractéristiques hydrologiques

a. Salinité et température

En étant relativement proche de la côte, les études antérieures ont montré que le secteur du site se trouve dans la zone d'influence du fleuve côtier (Brylinski *et al.*, 1991). Les paramètres hydrologiques (température et salinité) peuvent varier en fonction de l'étendue du fleuve côtier. Les dimensions de ce dernier sont fonction des conditions de marée et du débit des cours d'eau des côtes françaises. Son extension perpendiculairement à la côte est forte en ME et faible en VE avec des isohalines très redressées. Le site présentera en permanence des salinités inférieures à 33. A BM de VE celles ci pourront chuter à moins de 31,5.

D'après ces travaux, la température et la salinité présentent une **variabilité temporelle importante à l'échelle du cycle ME/VE mais aussi une variabilité spatiale importante à l'échelle kilométrique** perpendiculairement à la côte.

Toutefois lors de la campagne Granimp10b, des profils verticaux réalisés à l'aide d'une sonde CTD n'ont pas montré de **variabilité verticale** de la colonne d'eau ni de **variabilité au cours du cycle de marée**. Les gammes de salinité et de température étaient comprises entre respectivement 34,2 et 34,5, et 16,6 °C et 16,9 °C.

b. Concentration des MES

Le littoral de la côte d'opale est formé de falaise de craie. Le démantèlement des éboulis crayeux fournit un abondant matériel en suspension, formé de coccolithes (Simon et Dupont, 1983). Ce démantèlement va être à l'origine d'un panache turbide côtier. Les MES sont concentrées sur une frange littorale d'environ 1 km de large avec des concentrations supérieures à 20 $mg.L^{-1}$. Dans ce panache turbide, le matériel en suspension présente deux modes. Les particules comprises entre 4 et 6 µm sont prédominantes et correspondent aux coccolithes et nannofossiles présents dans la craie. Un second mode plus grossier (entre 9 et 12 µm), induit par le plancton est présent (Dupont *et al.*, 1985). Le contact entre les eaux du large et ce panache est brutal, les concentrations chuteront sous la barre des 10 $mg.L^{-1}$ en quelques dizaines de mètres. Les particules du large, au-delà de ce panache sont très différentes et essentiellement planctoniques (Dupont *et al.*, 1985).

Deux profils, où le signal rétrodiffusé d'un ADCP a été analysé, ont été réalisés du large vers la côte lors de la campagne Granimp10b (Figure 77 A). La calibration du signal rétrodiffusé de ces profils à la côte en concentration de MES est incertaine et moyennement fiable (Figure 77 B). En effet cette calibration n'a pas été effectuée à partir de prélèvement d'eau le long de ces profils à la côte mais à partir de l'équation de la calibration du signal rétrodiffusé en concentration des MES mesuré au sein du panache turbide de la drague et non (cf. Chapitre 1, §3.1.4.b, p58). Le signal rétrodiffusé montre une augmentation des concentrations en direction de la côte. A environ 4,5 km de la côte, le signal augmente de 4 à 6 dB essentiellement en profondeur. Cette augmentation se situe au droit d'un sursaut bathymétrique et peut exprimer une remise en suspension localisée. En allant vers la côte, le signal diminue légèrement et reste très hétérogène en surface et au fond. A environ 1,5 km de la côte, le signal augmente de plus de 10 dB sur environ 500 m. Cette augmentation est l'expression acoustique du panache turbide de la craie.

Les travaux antérieurs et ces mesures acoustiques montrent que les concentrations, granulométries et natures des MES varient **verticalement et latéralement.** Ces variations latérales **à l'échelle décamétrique sont** relativement importantes en fonction de la morphologie des fonds et sont également importantes **à l'échelle kilométrique** perpendiculairement à la côte.

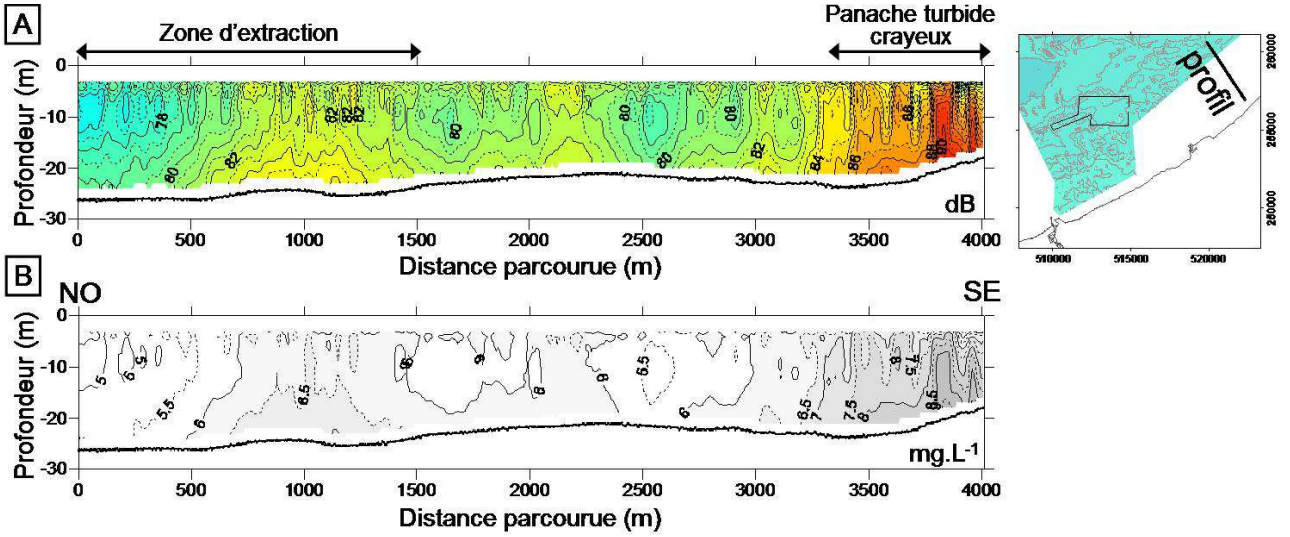


Figure 77 : Réponse acoustique d'un ADCP du large vers la côte (A) et calibration en concentration de MES (B).

Les prélèvements d'eau réalisés lors de la campagne Granimp10b pour des coefficients de VE entre 104 et 111, confirment des gammes de concentrations en MES relativement faibles. Celles-ci sont comprises entre 3 et 12 mg.L^{-1}. Pendant le **cycle semi-diurne,** les concentrations ne montrent pas de variations importantes hormis à proximité du fond lors du flot et du jusant ou une remise en suspension est induite par les courants.

La granulométrie des MES correspond à des silts sableux avec deux principaux modes, un premier grossier centré autour 315 µm et un second autour de 14 µm (Figure 78). Ces particules correspondent aux communautés planctoniques. Un troisième mode autour de 4 et 6 µm, minoritaire, représente les coccolithes provenant du démantèlement des falaises de craie.

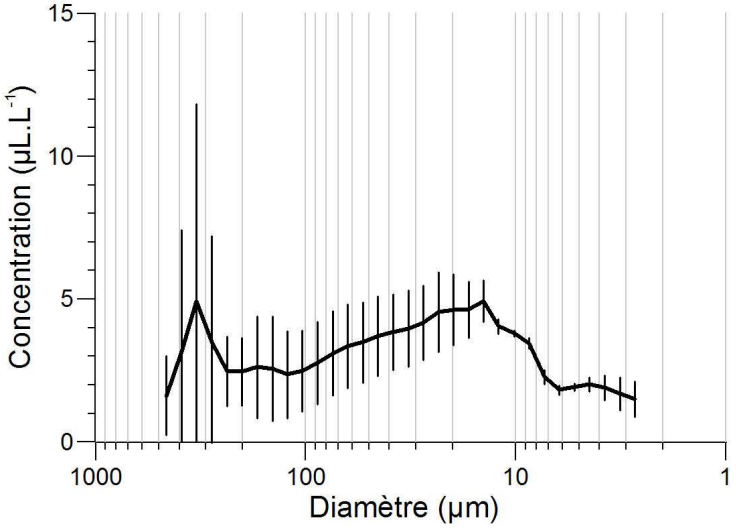


Figure 78 : Granulométrie des particules en suspension dans le milieu naturel hors panache (mesures LISST *in situ*).

3.2. Le panache turbide

Sur le site de Dieppe, la surverse et le panache turbide généré par la DAM Scelveringhe ont été étudiés. Les suivis *in situ* se sont déroulés les 08/10/10 et 09/10/10 lors de la campagne Granimp10a avec une méthodologie d'analyse des résultats, identique à celle optée pour la Baie de Seine.

3.2.1. Caractérisation de la source

La Scelveringhe est une DAM moderne avec un fort débit d'aspiration, équivalent à celui de la Charlemagne soit 10 000 $m^3.s^{-1}$ (communication personnelle Eurovia) et un mode de surverse latéral par l'intermédiaire de longs sabords continus à bâbord et tribord. D'après les données industrielles, son volume de chargement est en moyenne de 4 056 m^3 et présentera une durée de chargement d'environ 2h51min sur site.

a. Débits de la surverse

Le débit de surverse est calculé à partir de données industrielles. Le débit de chargement moyen calculé pour la Scelveringhe sur site est de 1 424 $m^3.h^{-1}$. Le débit de surverse moyen calculé est de 8 574 $m^3.h^{-1}$ soit une moyenne de 24 388 m^3 par chargement. Par conséquent, le volume de la surverse de la Scelveringhe représente 86 % du volume aspiré et 6 fois le volume chargé.

b. Concentrations des MES

Les prélèvements du mélange eau-sédiments de la surverse ont été réalisés lors de la campagne Granimp10a (nombre : 17). Ils ont permis d'étudier les concentrations, nature et granulométrie des MES au cours d'un chargement.

Les concentrations sont élevées en moyenne de 3,83 $g.L^{-1}$ (2,17-8,08), 380 fois supérieures à celles du milieu naturel. Ces fluctuations semblent être indépendantes de l'orientation de la drague par rapport au courant. Contrairement aux observations de Boutmin en 1986, celles-ci n'augmentent pas significativement en fin de chargement. Les concentrations en MES sont donc élevées et présentent de fortes variabilités à l'échelle du chargement.

c. Granulométrie des MES

Le spectre granulométrique des MES de la surverse a été déterminée à partir de mesures granulométriques laser, effectuées rapidement après l'échantillonnage, à l'aide du LISST dans sa configuration laboratoire.

La surverse de la Scelveringhe est constituée de silts sableux (Figure 79). Deux modes principaux sont observés : un premier étalé dans les silts très fins à fins centrés autour de 8-14 µm et un second dans les argiles à partir de 4 µm. Deux modes secondaires correspondent aux sables dont un premier dans les sables

fins à moyens centrés autour de 225 µm, et un second supérieur à 400 µm dont l'essentiel est en dehors de la gamme de mesure du LISST mais observé sur les filtres MES.

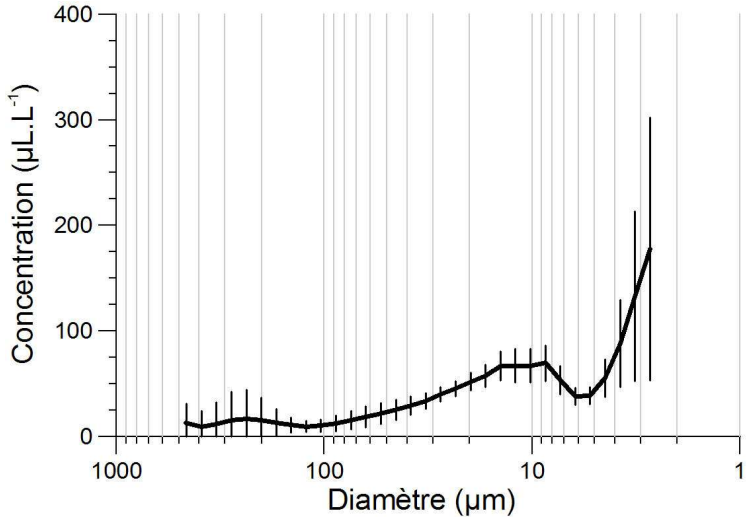


Figure 79 : Granulométrie des particules en suspension dans la surverse (mesures LISST laboratoire).

d. Nature des MES

Le rapport entre les concentrations massiques obtenues (2976,88 mg.L^{-1}) par filtration et les concentrations volumiques (1329,30 µL.L^{-1}) mesurées pour les prélèvements analysés au LISST permet de calculer la densité moyenne des particules de la surverse. Une densité calculée de 2,39 indique que le matériel remis en suspension est principalement minéral. Cette densité est légèrement surestimée en raison de la gamme de mesure du LISST n'intégrant pas les particules supérieures à 500 µm.

e. Débit massique et volumique des MES rejetés par surverse

Comme pour la Charlemagne et la SandHarrier sur le site de Baie de Seine, la masse moyenne de MES rejetées par la surverse au cours d'un chargement est calculée par l'intermédiaire du calcul du débit massique moyen de MES. Pour la Scelveringhe, le débit massique moyen de MES et la masse moyenne de MES rejetées sont de 32,8 t.h^{-1} et de 93,3 t.

Le rapport entre la masse rejetée par surverse et celle chargée dans le bassin de la DAM peut être calculé en convertissant le volume moyen chargé dans le bassin en masse à partir d'une densité moyenne des matériaux chargés de 1,7. Les 4 056 m^3 chargés par la Scelveringhe correspondent donc à 6 895 t. Les masses rejetées par la surverse représentent alors 1,4 % de leur chargement.

Le débit volumique moyen des MES et le volume moyen des MES rejetées par chargement de la Scelveringhe sont respectivement de 11,39 m^3.h^{-1} et 32,42 m^3. Le volume de sédiments rejetés par la surverse de la Scelveringhe représente 0,8 % du volume de sédiments chargés.

Le débit volumique des argiles, silts très fins à fins, les silts moyens aux sables très fins et les sables fins à moyens sont respectivement de 3,42 $m^3.h^{-1}$, 3,91 $m^3.h^{-1}$, 3,17 $m^3.h^{-1}$ et 0,90 $m^3.h^{-1}$. Ce qui représente respectivement 9,73 m^3, 11,11 m^3, 9,02 m^3 et 4,17 m^3 par chargement.

3.2.2. Evolution des MES en surface

L'évolution globale des concentrations en MES du panache en sub-surface depuis le rejet de l'entrée de la surverse dans le milieu jusqu'à la disparition du panache est déterminée avec la même méthode employée pour le site de Baie de Seine. Toutefois, à l'inverse de la Baie de Seine, un seul type de surverse a été étudié. Cette évolution concerne celle de la surverse par sabord latéral continu de la Scelveringhe.

Les variabilités des concentrations pour la surverse et pour le milieu naturel suivent des lois normales. Leurs valeurs maximum et minimum théoriques avec un niveau de confiance de 95 % sont obtenues en ajoutant et en enlevant deux écarts-types à la moyenne observée.

La courbe de tendance qui propose une évolution de concentrations généralisables au site d'étude pour différentes conditions suit une loi à la puissance (Figure 80).

Une importante dilution d'un facteur 3 à 40 est observée lors de l'entrée de la surverse dans le milieu marin. A S+10s, la concentration moyenne est de 404 $mg.L^{-1}$. Les concentrations chutent ensuite rapidement dans les 5 premières minutes de plusieurs centaines de $mg.L^{-1}$ à quelques dizaines de $mg.L^{-1}$. Ceci est dû à la dispersion des particules dans le milieu marin et à la chute des particules les plus grosses ou plus denses. Après 5 min, les concentrations de sub-surface continuent de décroître relativement rapidement et tendent vers celles du milieu seulement 10 min après leur rejet. Toutefois, le panache présente des concentrations légèrement supérieures à la moyenne de celles du milieu naturel, plus d'une heure après la surverse et peut encore être perceptible à l'œil nu.

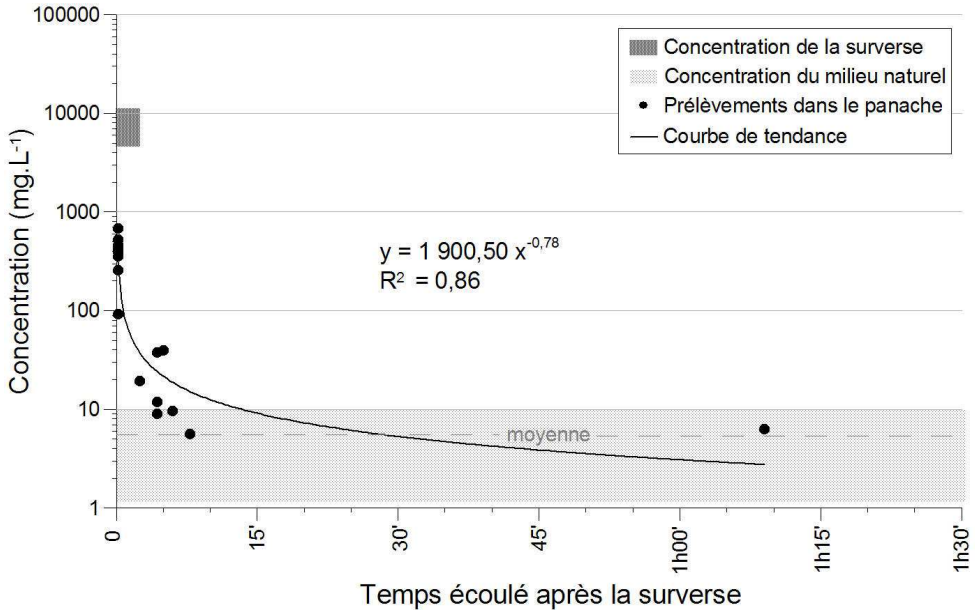


Figure 80 : Evolution temporelle en sub-surface des concentrations de MES du panache turbide.

3.2.3. Géométrie de surface et mobilité

Le protocole d'extraction sur le site de Dieppe lors des suivis est relativement proche de ceux du site en Baie de Seine hormis ici une extraction essentiellement au flot. Les profils d'extraction sont orientés N-S et courts (1 km), d'une durée variant entre 15 et 45 min en fonction de la vitesse relative du courant par rapport à la drague. Ces courts profils induisent des girations fréquentes de la drague. Enfin les profils d'extraction sont obliques aux courants tidaux. Par conséquent, lors des extractions au cours du flot et en fin de jusant, le panache global regroupera plusieurs tronçons sous la forme de chevrons.

La disparition visuelle rapide du panache (1h-1h30) ne permet pas d'observer à la fin du chargement l'ensemble des tronçons et notamment les plus anciens. Leur observation sera rendue plus compliquée pour une extraction débutant à la fin du jusant. En effet, les étales étant très courtes, un chargement débutant à la fin du jusant se terminera pendant le flot. Les tronçons de panaches formés en début d'extraction à la fin du jusant sont évacués de la zone d'extraction en direction du SO puis sont rapidement repris par le flot après la renverse des courants. Par conséquent, les tronçons de panache formés après la renverse se surimposeront aux tronçons formés antérieurement.

Le nombre réduit de suivis (08 et 09/10/10), la disparition visuelle rapide du panache et la surimposition des tronçons de panaches lorsque l'extraction se produit de part et d'autre d'une renverse, ne permettent pas de construire une carte des extensions du panache global en fin de chargement, en fonction des conditions de marée aussi complètes que celles du site de Baie de Seine. Toutefois, une carte de l'extension des tronçons visibles en fin de chargement peut être construite grâce aux informations acquises lors de ces suivis (Figure 81). Le tracé supposé des tronçons les plus anciens, plus suffisamment turbides pour être observés à l'œil nu, a été ajouté à ces cartes grâce au calcul de leur position à partir des courants résiduels pour le début et la fin de chacun de ces tronçons.

Comme expliqué pour le site en Baie de Seine, lorsque l'extraction est à contre sens de la composante principale du courant projeté sur l'axe de la drague, le tronçon du panache ainsi formé est plus long que celui généré lorsque la drague extrait avec le courant. Ces tronçons ont des longueurs atteignant 2 300 m et de 1 000 m à contre et avec courant pour une extraction au flot. Etant donné les directions opposées du jusant et du flot, et des durées de profil à contre et avec courant similaire lors de la fin du jusant, les longueurs des tronçons pour une extraction en fin de jusant peuvent être considérées comme similaires à celles générées lors du flot. La largeur des tronçons de panache formés à contre et avec courant augmente rapidement dans les premières minutes. Pour une extraction avec courant, la largeur sera d'environ 100 m, une minute après la surverse et peut dépasser les 200 m au bout de 30 min. Pour une extraction contre-courant, la largeur atteindra 60 m au bout de quelques minutes et ne dépassera pas les 130 m au bout de 30 min. La largeur des panaches augmente donc rapidement dans les premières minutes puis plus lentement jusqu'à leur disparition visuelle.

Le suivi du 08/10/10 réalisé en coefficient de VE au flot, lorsque les courants sont les plus forts, montre que l'extension du panache global supposé en fin de chargement ne dépasse pas 8 km dans le sens des courants et que sa partie visible constituée des tronçons générés en fin de chargement ne s'étend pas au delà de 3,5 km dans le sens des courants.

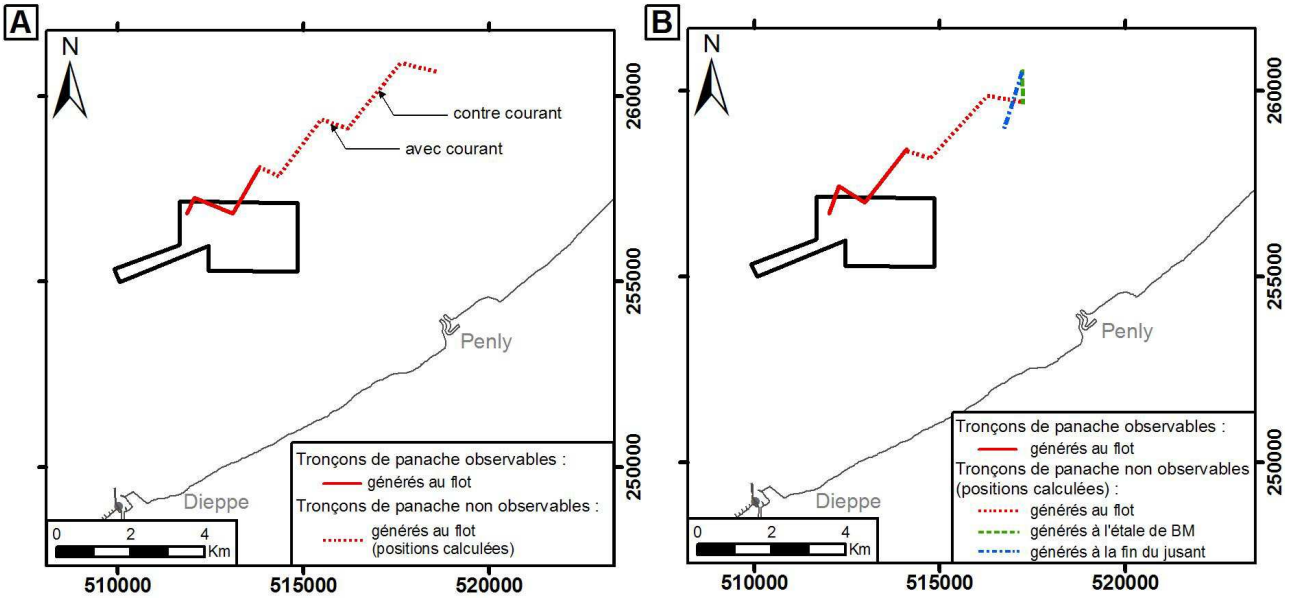


Figure 81 : Extension des panaches à la fin du chargement de la drague lors des suivis du 08/10/10 (A) et du 09/10/10 (B).

3.2.4. Section transversale caractéristique

Tout comme le site en Baie de Seine, après l'entrée de la surverse dans le milieu marin, le panache turbide va se former en quelques minutes à l'arrière de la drague.

Sur le site de Dieppe les sections transversales du panache de la Scelveringhe ont été étudiées pour différentes conditions d'extractions (contre et avec courant) et différentes conditions de marée.

Pour faciliter la comparaison avec le site de Baie de Seine, une section transversale formée au début du chargement à contre-courant en fin de jusant lors du suivi du 09/10/10 est décrite. Toutefois, la section décrite ici est générée pour des coefficients plus élevés de VE. La section de panache présentée correspond à un panache plus évolué dont la surverse s'est produite 14 min au préalable.

Les concentrations du milieu, lors de ce suivi, présentaient un gradient décroissant vers le fond. Les limites du panache dans la première partie et la seconde partie de la colonne d'eau sont définies respectivement par des concentrations de 5,86 et 5,45 mg.L^{-1}.

La limite face au courant est bien marquée alors que la limite en aval du courant est beaucoup plus diffuse.

La largeur du panache augmente de 140 m en surface jusqu'à 150 m en profondeur.

Les concentrations en MES sont hétérogènes et faibles en comparaison des fortes concentrations de la surverse. La gamme de concentration est comprise entre 5,45 et 13,66 mg.L^{-1} des limites avec le milieu naturel jusqu'au centre du panache.

Une hétérogénéité des concentrations est observée verticalement comme pour le site en Baie de Seine, mais une importante hétérogénéité latérale est aussi mise en évidence. En effet une zone très peu turbide dont les concentrations sont proches du milieu marin va séparer le panache en deux ensembles de part et d'autre de cette zone peu concentrée. Chacun de ces deux ensembles présente une hétérogénéité sur la verticale. En surface (autour de -4 m) des zones très localisées ont des concentrations supérieures à la moyenne (9-11 mg.L^{-1}). Pour chacun de ces deux ensembles des zones beaucoup plus étendues de plus fortes concentrations (11-13 mg L^{-1}) s'élargissent en profondeur de -8m jusqu'au fond.

Ces deux ensembles sont caractéristiques d'une surverse par sabords. Ici, les deux masses turbides rejetées à bâbord et à tribord de la drague ne se sont pas encore mélangées mais ont en grande partie atteint la deuxième partie de la colonne d'eau, voir le fond. La faible épaisseur d'eau sur ce site en comparaison à celle du site en Baie de Seine contribue à une chute plus rapide des particules sur le fond.

Pour la section présentée sur Figure 82, la masse en surplus n'est que de 4,67 kg.m^{-1}. Pour la section considérée cette concentration moyenne en surplus n'est que de 2,78 mg.L^{-1}.

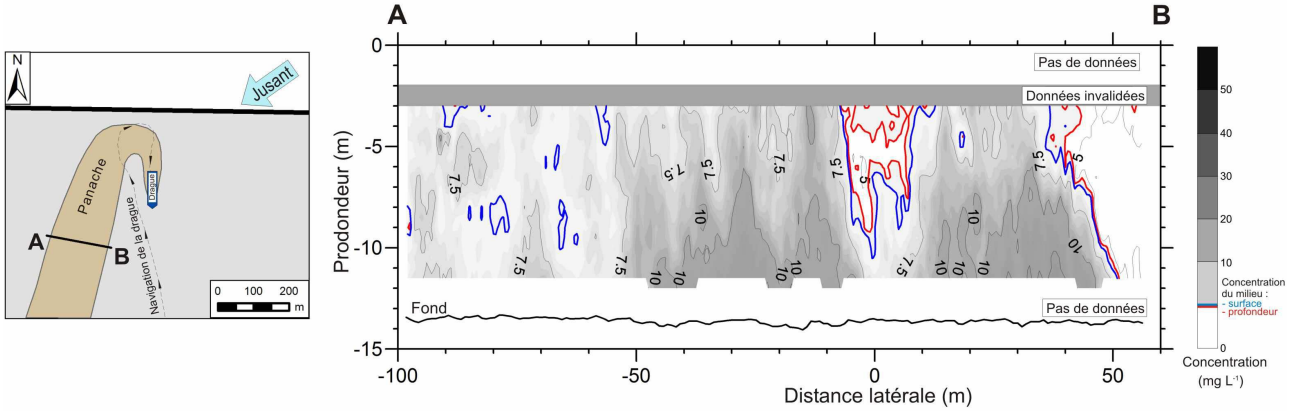


Figure 82 : Section transversale du signal rétrodiffusé calibré du panache à S+14min.

Un problème technique sur le LISST étant survenu antérieurement à la campagne Granimp10b, des mesures *in situ* directement au sein du panache n'ont pas pu être réalisées. Toutefois, des prélèvements d'eau réalisés à l'arrière de la drague ont pu être analysés avec le LISST en configuration laboratoire les jours suivants.

Les granulométries obtenues ne sont pas exploitables en raison d'une potentielle évolution de ces échantillons post prélèvement. Toutefois les concentrations volumiques globales sans distinction de classe sont considérées comme valides.

Les faibles concentrations volumiques mesurées par le LISST confirment la forte diminution de celles-ci par rapport à celle de la surverse comme le montre les concentrations massiques obtenues à partir de l'ADCP.

Les concentrations massiques plus fortes en profondeur et les concentrations volumiques globalement similaires sur l'ensemble de la colonne d'eau impliquent des densités de particule plus fortes en profondeur (de 1,9 en surface à 3,4 en profondeur).

Cette remarque couplée à une modification du spectre granulométrique sur la profondeur indique une discrimination rapide de la granulométrie et de la densité des particules du panache (dès S+14min). Cette discrimination peut être engendrée par la chute rapide de particules silteuses minérales de la surverse se dissociant des particules minérales plus fines (argiles) et des particules organo-minérales sableuses moins denses se maintenant plus longtemps dans la colonne d'eau.

Pour une extraction travaillant avec le courant en fin de jusant, une section transversale du panache, 13 min après la surverse, présente une géométrie globalement similaire avec, toutefois, un mélange des surverses bâbord et tribord déjà opéré. Les gammes de concentrations du panache sont légèrement supérieures pouvant atteindre 15,4 $mg.L^{-1}$ et une concentration moyenne en surplus de 4,56 $mg.L^{-1}$ induisant une masse en surplus de 5,65 $kg.m^{-1}$.

Aucun profil d'ADCP n'a pu être réalisé suffisamment proche de la drague lors du flot. Toutefois, étant donné une vitesse d'extraction à contre et avec courant identique en fin de jusant et au flot, et le caractère alternatif des courants, les remarques obtenues sur la morphologie de la section de panache formé à l'arrière de la drague en fin de jusant peuvent être applicables pour un panache formé lors du flot.

3.2.5. Evolution temporelle de la section transversale

Les sections transversales présentées ici sont celles acquises le 09/10/10 en début du chargement en fin de jusant en condition de VE et à contre-courant. Une hétérogénéité spatiale des concentrations est systématiquement observée. La morphologie du panache est plus simple à S+20min qu'à S+14min (Figure 83 A et B) avec des limites verticales et une largeur globalement constante de la surface vers le fond. La section transversale à S+20min montre que les deux masses turbides induites par la surverse à bâbord et à tribord de la drague sont en train de se rassembler. Sur cette même section, la diminution des concentrations transforme la limite diffuse du panache en aval du courant. Les concentrations passent sous le niveau maximal des concentrations du milieu et la limite du panache apparaît plus nette. Cette modification de morphologie est également renforcée par la renverse des courants. Cette section montre que les concentrations dessinent toujours deux ensembles bâbord et tribord plus fortement concentrés. Pour chacun de ces ensembles l'homogénéisation des concentrations sur la verticale tend à dessiner une colonne plus concentrée. A S+56min, la largeur du panache diminue en surface mais s'étale sur fond (Figure 83 C). Des petites zones concentrées sur plus de 5 m d'épaisseur avec un gradient croissant en direction du fond. A S+1h04min, les concentrations du panache sont revenues sous la limite maximale de celle du milieu, même si celui-ci peut être encore perceptible à l'œil nu (Figure 83 D).

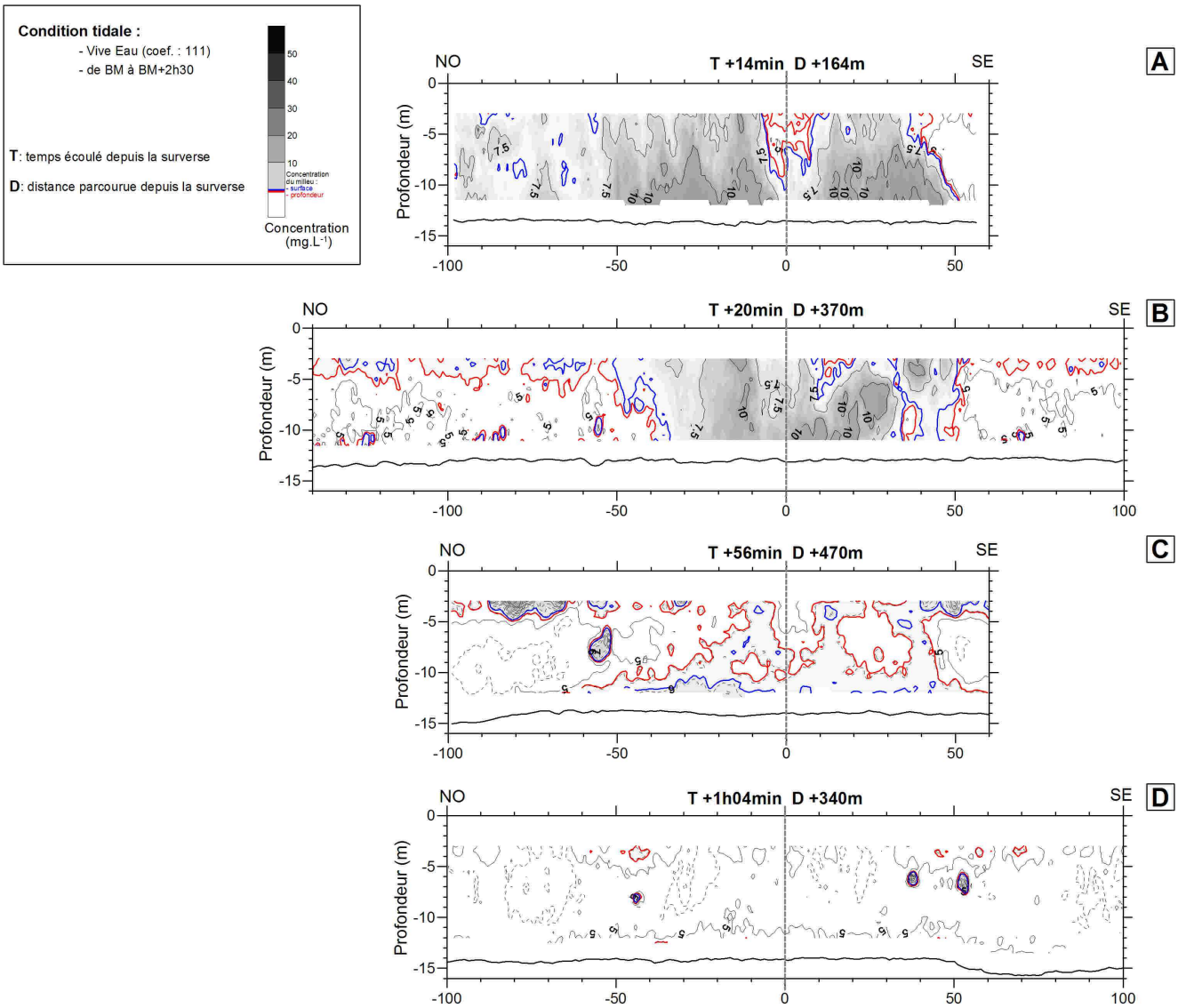


Figure 83 : Evolution temporelle d'une section transversale du panache formé à contre-courant en fin de jusant en conditions de VE.

Pour un panache généré avec le courant, mis à part des concentrations globalement plus fortes dans la première partie de la durée de vie du panache, son évolution est sensiblement similaire avec deux ensembles turbides bâbord et tribord moins distincts et tendant à se rejoindre avec le temps.

Les sections de ce panache contemporain du flot avec de forts courants vont évoluer avec un important élargissement du panache sur le fond sur plus de 5 m d'épaisseur. Cet élargissement est dissymétrique. Celui-ci est fortement marqué en amont du courant. Ces masses turbides sur le fond peuvent être induites par des particules dont la vitesse de chute est plus élevée pour par la remise en suspension de particules déposées sur le fond.

3.2.6. Evolution temporelle : dispersion et chute

L'évolution temporelle du panache depuis sa formation à l'arrière de la drague jusqu'à sa disparition est étudiée par la comparaison des sections transversales acquises à différents instants après le rejet. Les conditions de formation de cette section de panache sont : à contre-courant, lors de la fin du jusant, pour une coefficient de marée de 111 et sans agitation.

a. Evolution temporelle des concentrations de MES du panache

Lors des 20 premières minutes le panache est hétérogène avec des concentrations plus élevées en surface et en profondeur (Figure 84 A, B). Globalement les concentrations autour de 10 $mg.L^{-1}$ diminuent peu durant ces 20 premières minutes mis à part les masses d'eau à proximité du fond dont le gradient de diminution est plus marqué. Au-delà de S+20min, les concentrations sur la verticale s'homogénéisent et diminuent plus rapidement pour atteindre 7 $mg.L^{-1}$ à S+23min. L'absence de section d'ADCP entre S+23min et S+52min ne permet pas d'interpoler de façon fiable l'évolution des concentrations dans ce laps de temps. Toutefois, la section acquise à S+52min montre que les concentrations sont de 6,5 $mg.L^{-1}$ et que la diminution des concentrations redevient de nouveau faible au cours de ce laps de temps. A cet instant, le panache est redevenu hétérogène avec de nouveau des zones légèrement plus concentrées en surface et au fond. Les concentrations du panache vont atteindre en surface et en profondeur simultanément, environ à S+1h, les concentrations du milieu marin.

La dynamique des concentrations du panache est caractérisée par un taux de diminution des concentrations relativement faible de 2,8 $mg.h^{-1}$ entre S+15min et S+20min. Ce taux augmente brusquement en dépassant les 30 $mg.h^{-1}$ vers S+23min. Cette augmentation semble être liée à une augmentation de la profondeur permettant une dilution du panache avec un volume d'eaux marines plus important. Ce taux redevient faible, inférieur à 1 $mg.h^{-1}$, vers S+52min, puis réaugmente vers S+56min pour toutefois se maintenir sous les 3 $mg.h^{-1}$.

b. Dispersion

La superficie de la section transversale (Figure 84 C) du panache diminue de 1 677 m^2 à 1 163 m^2 entre S+15min et S+20min. A S+23min, la superficie de la section transversale augmente brusquement à 1 664 m^2 du fait d'un approfondissement bathymétrique et non pas par une augmentation de la largeur. Par la suite, la superficie décroît de nouveau, signe de la disparition progressive du panache. La superficie importante du panache à S+15min implique une forte largeur du panache induite par une importante dispersion latérale entre la surverse et cette première section transversale. La diminution de la largeur du panache dès cette première section indique que la dispersion latérale n'est plus effective au-delà de S+15min.

c. Chute

D'après la diminution de la masse par mètre linéaire (Figure 84 D), les processus de chute débutent immédiatement après la surverse. La masse de particules diminue de 4,67 kg à S+15min jusqu'à 0,02 kg par mètre linéaire à S+1h10min. Cette différence implique la chute des particules sur le fond (Figure 84 E). Le taux de chute décroît rapidement de 4,9 $g.s^{-1}$ à moins de 0,1 $g.s^{-1}$ de S+20min à S+1h10 avec toutefois des sursauts à S+23min et S+56 min. Cette première augmentation du taux de chute peut être induite par la diminution des courants de marée de l'étale de BM favorisant la chute des particules et l'arrêt d'une remise en suspension naturelle. La deuxième augmentation peut être associée à la réduction locale de la hauteur d'eau favorisant le piégeage des particules sur le fond.

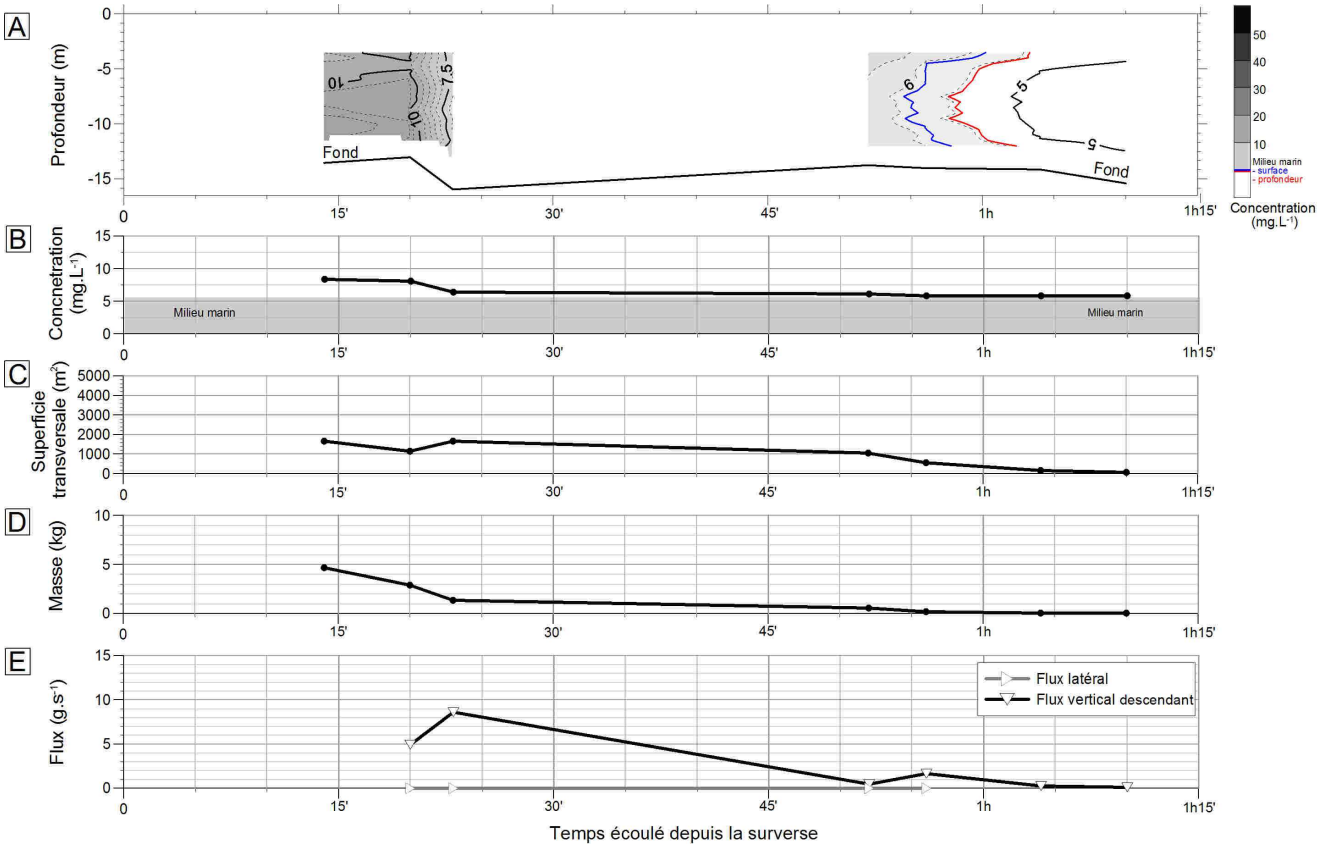


Figure 84 : Evolution temporelle d'un panache formé à contre-courant en fin de jusant en VE sans agitation. A : concentration des MES sur l'ensemble de la colonne d'eau. B : concentration moyenne calculée. C : superficie de la section transversale du panache. D : masse totale des particules contenues dans la section transversale. E: flux latéraux et verticaux.

Pour une extraction réalisée avec courant en fin de jusant, lors de la première demi-heure les concentrations du panache turbide sont plus élevées de quelques $mg.L^{-1}$ (Figure 85 A, B) que celles observées pour un panache formé à contre-courant. Au-delà de 30min les concentrations deviennent proches de celles d'un panache formé à contre-courant. A S+47min, les concentrations sont toujours supérieures à celle du milieu mais en sont proches. A l'arrière de la drague, le panache est également hétérogène avec des concentrations légèrement plus fortes en surface et en profondeur. Cette hétérogénéité va évoluer dans le

temps. Jusqu'à S+ 37min, les concentrations en profondeur restent plus élevées que la moyenne du panache alors qu'en surface ces concentrations deviendront progressivement plus faibles. Au-delà, le panache sera plus homogène sur la verticale avec toutefois des concentrations sensiblement plus fortes en surface et en profondeur.

Le taux de diminution des concentrations de 13,3 $mg.L^{-1}$ est relativement fort entre S+13min et S+24 min. Puis ce taux devient faible, inférieure à 2 $mg.L^{-1}$, hormis entre S+28min et S+38min, où ce dernier de 6,6 $mg.L^{-1}$ est légèrement plus élevé.

La superficie transversale à l'arrière de la drague à S+13min de 1 239 m^2 est élevée et proche de celle observée pour un panache formé à contre-courant (Figure 85 C). Une importante dispersion latérale se produit donc entre la surverse et S+13min (Figure 85 E). Jusqu'à S+24min, la superficie augmente légèrement jusqu'à 1 371 m^2 induite par une dispersion latérale de l'ensemble du panache. A contrario, après S+24min, la superficie diminue sensiblement. Cette diminution est le résultat du rétrécissement du panache en surface. Toutefois son élargissement à proximité du fond induit une expansion latérale en profondeur non visible par la lecture du seul paramètre de superficie latérale. A S+38min, cette expansion dépasse les 2,5 $g.s^{-1}$ et concerne le panache sur l'ensemble de la colonne d'eau. Cette expansion globalisée sur la verticale se manifeste par une section transversale dont la superficie dépasse les 3 000 m^2. Cette expansion peut être engendrée par une remise en suspension des sédiments du milieu ou de particules du panache déjà décantée. A S+47min, marquée par une diminution de la superficie du panache la dispersion latérale n'est plus observée. Cette diminution de la superficie de la section transversale est induite par une diminution de la largeur du panache sur l'ensemble de la colonne d'eau. La décantation est donc à cet instant plus forte que la remise en suspension.

D'après la diminution de la masse par mètre linéaire (Figure 85 D), les processus de chute débutent immédiatement après la surverse avec un taux de 4,18 $g.s^{-1}$ à S+13min (Figure 85 E). A S+38min, l'augmentation de masse par mètre linéaire induit un flux vertical ascendant de 0,39 $g.s^{-1}$ entre le fond et la colonne d'eau et confirme la remise en suspension déjà mentionnée par l'observation de l'augmentation de la superficie de la section transversale. Par la suite la nouvelle diminution de masse par mètre linéaire observée à S+47min confirme la remarque apportée par l'observation de la superficie de la section transversale à savoir un retour à des processus de décantation plus importants que ceux de remise en suspension.

Même si une remise en suspension semble avoir réalimentée localement et temporairement cette section de panache turbide, la chute des particules du panache engendre des concentrations proches du milieu marin dès S+47min.

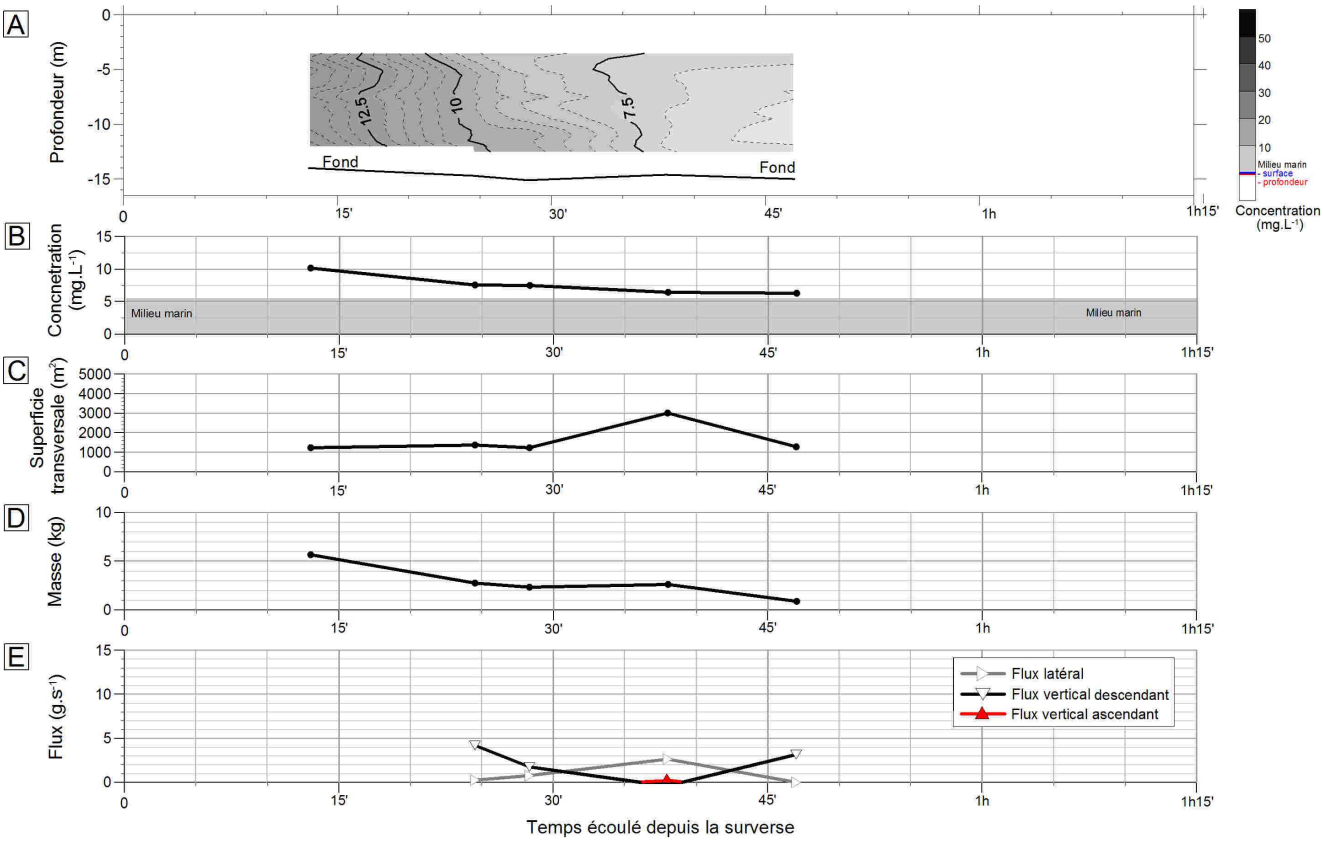


Figure 85 : Evolution temporelle d'un panache formé avec courant lors en fin de jusant en VE sans agitation. A : concentration des MES sur l'ensemble de la colonne d'eau. B : concentration moyenne calculée. C : superficie de la section transversale du panache. D : masse totale des particules contenues dans la section transversale. E: flux latéraux et verticaux

3.2.7. Estimation de l'extension et des volumes des dépôts

L'essentiel des particules constituant le panache (sans distinction de taille) a globalement chuté 55 minutes après leur surverse. Avec la même méthodologie que le site de Baie de Seine, les distances maximales de dépôts de ces particules sur 55 min sont estimées à partir du vecteur résiduel des courants tout au long du cycle semi-diurne (par pas de 30 min). Mais contrairement au site de Baie de Seine, le calcul n'a pas ici été effectué sur l'ensemble du cycle de marée. Etant donné une extraction sur le site de Dieppe essentiellement en fin de jusant et flot, ce calcul a été effectué entre BM-1h et PM-1h. Lors de ces coefficients de VE, les particules du panache peuvent se déposer jusqu'à 3,2 km en direction du NE lorsque le chargement débute 2 à 3 h après la BM (Figure 86). De plus, en l'absence de données de courants sur l'ensemble d'un cycle ME/VE, ce calcul est réalisé pour des courants observés pour un coefficient de 80.

Les particules qui chuteront jusqu'à 3,2 km seront les plus fines et les moins denses du panache. Le mode des sables fins centré sur 225 µm présent dans la surverse, chute beaucoup plus rapidement. Comme pour le site de Baie de Seine, le temps de chute des sables de 225 µm est déterminé à l'aide de leur vitesse de chute théorique calculé à partir de la formule de Zanke (1977).

En intégrant la variation de la hauteur d'eau induite par la marée, le temps de dépôt de ces sables sur le fond pour des coefficients de 80 varie entre 6-12 min en fonction de l'instant auquel débute le chargement

lors du cycle semi-diurne. La distance de dépôt est calculée à partir du résiduel de courant pour ces temps de chute tout au long du cycle semi-diurne. La distance maximum des dépôts des sables de 225 µm est de 550 m en direction du NE pour un chargement débuté au flot, 3 h après la BM (Figure 86).

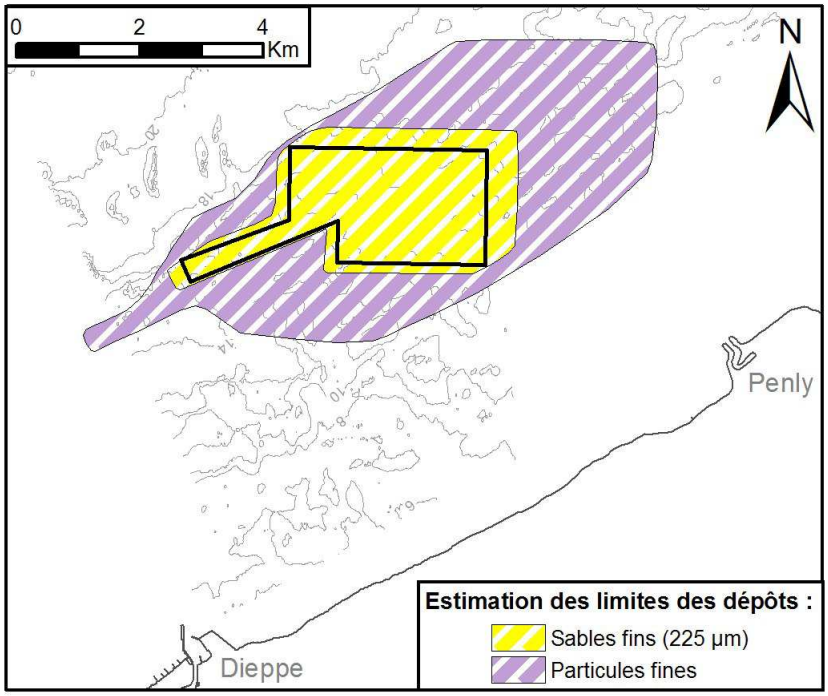


Figure 86 : Zones de dépôt potentielles des sables et particules fines du panache de surverse pour des extractions entre BM-1h et PM-1h (bathymétrie SHOM).

A l'inverse du site de Baie de Seine, les volumes annuels de surverse et les épaisseurs des dépôts de particules fines et ceux de sables correspondant n'ont pas pu être déterminés ici. En effet, ces calculs ne peuvent pas être envisagés en raison : (i) de l'absence de connaissance précise des volumes extraits par type de surverse et (ii) du manque de mesures sur DAM, surverse par puit, permettant de déterminer les volumes de sédiments rejetés pour ce type de surverse.

4. Synthèse/Discussion

4.1. Formation du panache turbide

4.1.1. Caractéristiques du milieu non impacté

Les conditions hydrodynamiques des deux sites d'études, Baie de Seine et Dieppe, sont sensiblement différentes et sont représentatives des caractéristiques de la Bassin oriental de la Manche. Leurs hauteurs d'eau sont différentes, de 20 à 22 m pour la Baie de Seine et de 10 à 15 m pour Dieppe, mais suffisamment faibles pour que leurs fonds soient sensibles à l'action de la houle. Le fort marnage des deux sites génère une importante variation de la hauteur d'eau et de celles des courants au cours des cycles semi-diurnes et des cycles ME/VE. Les courants sont semi-alternatifs pour le site de Baie de Seine et alternatifs pour celui de Dieppe. Ils sont relativement forts et atteignent 1 $m.s^{-1}$ lors des pics de flot et de jusant. La composante verticale des courants est négligeable. Les eaux de Dieppe sont marines alors que celles de la Baie de Seine peuvent être influencées par l'estuaire de la Seine. Pour les deux sites, les concentrations en MES sont faibles de 1 à 3 $mg.L^{-1}$ pour la Baie de Seine et de 3 à 12 $mg.L^{-1}$ pour Dieppe. La nature des MES est organo-minérale. Elles sont sensiblement plus grossières pour le site de Baie de Seine (sables à sables silteux) que pour le site de Dieppe (silts sableux). Les forts courants et/ou les fortes houles peuvent engendrer une remise en suspension multipliant par 5 les concentrations de MES, et modifier la nature et la granulométrie des MES. Pour le site de Baie de Seine, les variations des caractéristiques des MES aux échelles temporelles (horaire, cycle semi-diurne, cycle ME/VE et annuel) et aux échelles spatiales (métrique et du site d'extraction) sont globalement faibles. Ces variations sont plus importantes lors d'épisodes événementiels de coups de vent, plus fréquents en hiver mais aussi à l'échelle pluri-kilométrique du fait de l'évolution morpho-sédimentaire des fonds et de l'influence de l'estuaire de la Seine. Pour le site de Dieppe, les variations sont également faibles mais plus marquées aux cours des cycles semi-diurnes, ME/VE, des saisons mais aussi aux échelles spatiales du site d'extraction et pluri-kilométriques en direction de la côte. Ces plus fortes variations sur le site de Dieppe sont liées à la conjonction de courants légèrement plus forts, à une hauteur d'eau plus faible, une morphologie plus accidentée et à la proximité des apports du panache des côtes crayeuses et des estuaires normano-picards.

4.1.2. Origines du panache

Le panache turbide formé à l'arrière de la drague à deux origines. La première, la plus évidente est liée à la surverse du trop plein chargé en MES, responsable d'un panache de surface. La seconde est induite par le passage de l'élinde sur le fond engendrant la formation d'un panache benthique. Ces deux panaches vont se confondre rapidement à l'arrière de la drague pour former un seul un même panache turbide global.

Dans le cas d'une surverse par sabords de part et d'autres de la drague, deux panaches de surface se forment à bâbord et tribord. Ils se mélangent rapidement, environ 10 min (Baie de Seine) et 20 min (Dieppe) après la surverse. Pour une surverse par puits, un seul panache de surface est formé sous la coque de la DAM. Les panaches de surface se forment par dilution de la surverse lorsqu'elle rentre en contact avec le milieu marin. Pour une surverse par sabords, le facteur de dilution est de 3 à 40 pour les sites de Baie de Seine et de Dieppe et de 10 à 100 pour une surverse par puits sur le site de Baie de Seine. Les seules données disponibles sur les caractéristiques du panache benthique sont celles de Hitchcock et al. (1999) : prélèvements d'eau et images vidéo au niveau de l'élinde. Celles-ci ont démontrées que le panache benthique était de faible concentration (31-37 $mg.L^{-1}$), avec une faible superficie transversale.

Plusieurs éléments de notre étude confirment la formation d'un panache benthique par le passage de l'élinde sur le fond. Sur le site de Dieppe, à l'arrière de la DAM Scelveringhe, en début de chargement lorsque la surverse n'est pas encore turbide, le signal rétrodiffusé de l'ADCP sur le fond identifie l'existence d'un panache benthique de faible extension latérale (Figure 67). De plus les masses par mètre linéaire des sections transversales de panache à l'arrière de la DAM sont plus faibles que celles rejetées par la surverse de la DAM (18,7 et 22,7 $kg.m^{-1}$ à contre et avec courant). Cette différence, observée sur Dieppe, implique une remise en suspension sur le fond relativement faible et confirme un panache benthique moins important que celui de surface. Sur le site de Baie de Seine, le contraire est observé. Les masses par mètre linéaire des sections transversales de panache à l'arrière de la DAM SandHarrier sont 5 fois plus élevées que celles rejetées par la surverse (6,22 et 4,93 $kg.m^{-1}$ à contre et avec courant) ce qui implique un panache benthique pouvant être plus important que celui de surface. Le panache benthique généré par la SandHarrier sur le site en Baie de Seine serait donc plus important que ceux observés sur Dieppe et par Hitchcock et al. (1999). Ces différences, relatives aux observations du panache benthique sur les deux sites d'étude, semblent être principalement liées à : (i) la puissance des pompes d'aspiration des dragues et (ii) aux types de sédiments dragués. En effet, plus une pompe à un débit élevé, plus l'élinde est capable d'aspirer les sédiments remis en suspension autour d'elle par son propre passage sur le fond. En effet, Hitchcock et al. (Hitchcock *et al.*, 1999) montrent que le panache benthique est plus important sans aspiration. La nature des sédiments sera également déterminante, plus la fraction fine du sédiment extrait est importante, plus la remise en suspension sur le fond sera élevée et contribuera ainsi à la formation d'un panache benthique.

La masse de sédiment remise en suspension par l'extraction (seulement en surface par la surverse) est comparée à celle remise en suspension naturellement par les courants et la houle lors d'un cycle semi-diurne. Nous considérons qu'un seul chargement n'a lieu au cours du cycle semi-diurne. Pour la DAM Charlemagne au débit d'aspiration puissant, au volume de chargement important et dont la surverse se fait par puits, la masse rejetée est d'environ 380 t (154,4 $t.h^{-1}$). L'expression de ce tonnage par km^2 de $10,2.10^3$ $t.km^2$ est obtenue par son rapport avec la superficie impactée par la Charlemagne pour un chargement, elle-même calculée par le produit d'une largeur de sillon choisie de 4 m avec la distance parcourue lors du chargement. Pour la DAM SandHarrier au débit d'aspiration moins puissant, à la capacité de chargement moins importante et avec une surverse par sabords cette masse est de 58 t (19,0 $t.h^{-1}$) soit

$2{,}3.10^3$ t.km^2. La remise en suspension naturelle est évaluée selon plusieurs conditions, en ME et VE sans houle et avec une houle significative (H_s=1,88 m). Nous avons estimé le tonnage remis en suspension pour ces différentes conditions à partir de la proportion de matériel mis en mouvement sur le fond par contrainte hydrodynamique (Tableau 11). Une particule est maintenue en suspension lorsque la vitesse turbulente verticale est supérieure à la vitesse de chute du grain w_s (Bagnold, 1966). Van Rijn (1993) affirme que cette vitesse turbulente est comparable à la vitesse de frottement u_*. Ainsi les grains sont entraînés en suspension quand :

$$w_s < m \times u_* \tag{11}$$

avec m un coefficient variant selon les auteurs (m=1 pour Bagnold, 1966), u_* la vitesse de frottement équivalent au rapport de la contrainte global exercée sur le fond (Soulsby, 1997) avec la masse volumique de l'eau.

Les vitesses de chute de chaque classe granulométrique sont calculées d'après la loi de Stokes (Stokes, 1851) de celle de Zanke (1977) pour les particules respectivement inférieures ou égales et supérieures à 63 µm. Les flux remobilisés sont calculés pour chaque classe granulométrique à partir de la formule de Wu *et al.* (Wu *et al.*, 2000) plus adapté en Bassin oriental de la Manche (Blanpain, 2009). Ainsi les flux totaux remis en suspension sont obtenus par la somme des flux par classe lorsque la vitesse de chute est inférieure à la vitesse de frottement. Le tonnage global remis en suspension par km^2 est calculé à partir d'une densité de 2,55, caractéristique du matériel sur zone (communication personnelle GIE GMN).

Le rapport de la remise en suspension induite par l'extraction avec celle du milieu naturel, indique que celle générée par l'extraction est du même ordre de grandeur ou supérieur à celle naturelle lorsque les contraintes sur le fond sont élevés (en VE et en ME avec houle). Avec de faibles contraintes (ME sans houle) l'extraction entraîne une remise en suspension supérieure de 5 à 6 ordres de grandeur (Tableau 11).

Tableau 11 : Estimation de masses de sédiments remis en suspension par les courants et la houle sur une zone d'extraction et comparaison avec les tonnages remis en suspension par la surverse.

		ME		VE	
Hs (m)	0	0,1		5263	
		114 676	25 752	1,94	0,44
	1,88	2038		19168	
		5,01	1,13	0,53	0,12

Remise en suspension du milieu non impacté (t.km^{-2})	
Rapport : remise en supension DAM Charlemagne / milieu non impacté	Rapport : remise en supension DAM SandHarrier / milieu non impacté

Les travaux antérieurs qui comparent les forçages naturels (courant et houle) avec des activités anthropiques sur la remise en suspension sont peu nombreux. Dans le Golfe du Lion en Méditerranée, environnement microtidal, la remise en suspension induite par l'activité de chalutage est inférieure de quatre ordres de grandeur de celle induite par la houle et les courants (Durrieu de Madron *et al.*, 2005; Ferré *et al.*, 2005; Ferré *et al.*, 2008). Par leur intégration à l'échelle du Golfe du Lion, ces données ne sont toutefois pas directement comparables avec nos résultats.

4.1.3. Caractéristiques du milieu par le panache

Malgré deux sources de remise en suspension (en surface et au fond) dont les proportions sont plus ou moins différentes en fonction du substrat et de la pompe d'aspiration, le résultat à l'arrière de la drague est la formation d'un panache turbide global affectant l'ensemble de la colonne d'eau. Les panaches de surface et benthique ne sont plus distinguables séparément 10 min après le passage de la DAM. Le panache global résultant, formé à l'arrière de la drague, est hétérogène et présente deux zones légèrement plus concentrées: (i) une à proximité de la surface avec des concentrations supérieures à 15 $mg.L^{-1}$ pour la Baie de Seine et de 9 à 11 $mg.L^{-1}$ pour Dieppe avec une prédominance de silts, expliquée par une population de particules provenant du panache de surface, et (ii) une seconde à proximité du fond (proche de 20 $mg.L^{-1}$ pour la Baie de Seine et autour de 11 à 13 $mg.L^{-1}$ pour Dieppe) aux particules plus grossières et plus denses, induites par la décantation d'une partie des particules sableuses du panache de surface et/ou par la contribution d'un panache benthique.

Les résultats des suivis sur le site de Baie de Seine et sur celui de Dieppe permettent de généraliser les modifications des variations spatio-temporelles des paramètres hydrologiques du milieu, induit par l'extraction de granulats marins.

La hauteur d'eau et les paramètres hydrologiques (salinité et température) ne sont pas modifiés par la remise en suspension générée par la drague. Pour les courants, seule une légère augmentation de la composante verticale de la vitesse vers le fond (de 0,01 à 0,04 $m.s^{-1}$) est observée dans les premiers instants de vie du panache. Celle-ci est induite par le principe de la mesure ADCP qui lie à l'arrière de la drague la chute verticale des particules les plus grosses ou plus denses.

Les modifications induites par le panache concernent principalement les MES. L'impact sur celles-ci est observé dès l'apparition d'une surverse turbide, quelques minutes après le début de l'extraction, jusqu'à la disparition de la dernière masse turbide du panache. La durée de cet impact est donc la somme de la durée du chargement (2 à 3h) et de la durée de vie d'une section de panache (2h à 2h30 en Baie de Seine et environ 1h00 sur Dieppe). Elle est donc de 4h à 5h30 pour le site de Baie de Seine et de 3h à 4h sur Dieppe.

La remise en suspension, induite par l'extraction, engendre des gammes de concentration et de granulométrie des MES plus étendues à l'échelle horaire. A l'échelle du cycle semi-diurne, ces gammes sont également plus importantes que celles du milieu mais plus estompées qu'à l'échelle horaire. Une extraction, qui se déroule dans des conditions agitées, entraîne sur le fond une modification de gamme de concentration moins marquée puisque la houle engendre déjà une remise en suspension des sédiments.

L'hétérogénéité verticale et latérale des MES d'une section transversale du panache, sont marquées par des augmentations : (i) relativement fortes des concentrations et de la granulométrie sur la verticale, (ii) relativement fortes des concentrations et plus modérées de la granulométrie des MES, latéralement. Pour la nature des MES, les modifications sont considérées comme modérées étant donné la présence de particules de même nature dans le milieu non impacté. A l'échelle pluri-kilométrique, cette modification des

paramètres intrinsèques au MES est faible en raison de la diminution progressive de concentration au cours du temps et d'une migration du panache limitée à quelques km.

4.2. Dynamique du panache : comportement et processus

A partir de l'analyse des acquisitions *in situ*, une synthèse de la dynamique du panache depuis la surverse jusqu'à la disparition dans le milieu marin est proposée. Celle-ci est principalement basée sur les résultats plus complets du site en Baie de Seine autour de la DAM SandHarrier qui rejette sa surverse par sabords.

4.2.1. Dynamique verticale du panache : phase dynamique vs phase passive

Pour le site en Baie de Seine, l'analyse fine des concentrations met en évidence une colonne verticale étroite légèrement plus concentrée, visible sur les sections transversales du panache au-delà de S+11min et jusqu'à S+1h42min. Associée à celle-ci, une large zone plus concentrée s'étale sur le fond sur une épaisseur de 12,5 m jusqu'à S+2h21min. Sur le site de Dieppe, la morphologie des sections transversales du panache peu de temps après la surverse, est proche de celle observée sur le site de Baie de Seine. Même moins prononcé, le contraste des concentrations montre une colonne verticale et un étalement sur le fond.

Ces géométries s'apparentent à une phase dynamique et au courant de densité s'étalant sur le fond, communément observés lors des activités de clapages en mer (Truitt, 1988). Dès lors, nous cherchons à déterminer si les panaches turbides générés par les extractions en Bassin oriental de la Manche présentent une phase dynamique.

Pour les panaches induits par les extractions de granulats, Dankers (2002) distingue : (i) un comportement dynamique, défini par une vitesse de chute de l'ensemble des particules supérieure à celle des particules isolées, auquel est associé un courant de densité sur le fond, et (ii) un comportement passif qui, à contrario, présente une vitesse de chute de l'ensemble des particules inférieure à celle des particules isolées. Des travaux antérieurs suggèrent également l'existence d'une phase dynamique dans le cas d'une extraction de granulats en point fixe sans criblage (Hitchcock et Bell, 2004), dans un intervalle de temps de 5 à 10 min pour une surverse par puits (Whiteside *et al.*, 1995) et de 10 à 15 min pour une surverse par puits avec criblage (Hitchcock *et al.*, 1999). L'étalement sur le fond d'une partie des suspensions sous la forme d'un courant de densité appelé panache de fond a été défini (Whiteside *et al.*, 1995; Hitchcock *et al.*, 1999; Hitchcock et Bell, 2004; Spearman *et al.*, 2007). Ce panache de fond s'étend jusqu'à 800 m dans le sens des courants et sur 3 à 4 m d'épaisseur pour une surverse par puits (Hitchcock *et al.*, 2002) et peut s'étendre sur 8 km pour une extraction avec criblage (Dickson et Rees, 1998 in Newell *et al.*, 2004).

Sur le site de Baie de Seine, les mesures ADCP montrent une anomalie significative des vitesses verticales des particules de 0,01 à 0,04 m.s^{-1} vers le bas, observée en début de vie du panache à S+11min dans sa partie inférieure. Ces vitesses sont plus faibles que celles des vitesses de chute des particules isolées qui constituent la partie inférieure du panache à cet instant (de 201 µm à 460 µm). Sur Dieppe, les sections transversales les plus proches de la drague au-delà du sillage de bulle (S+15min) ne montrent que très rarement des vitesses verticales orientées vers le bas.

Par conséquent, les zones plus concentrées du panache, qui montrent une colonne verticale étroite et un étalement sur le fond, observées en Baie de Seine et sur Dieppe (S+15min) ne sont pas associées à une phase dynamique, ni à un courant de densité sur le fond.

Dès lors nous cherchons à déterminer, si une phase dynamique peut se produire entre la surverse et les premières mesures ADCP réalisées au-delà de la durée du sillage de bulle de la DAM (S+10min).

D'après le diagramme de classification des comportements des panaches de surface (Winterwerp, 2002), la section de panache décrite précédemment pour la SandHarrier présente un comportement mixte (Figure 87) pour des valeurs du nombre de Richardson Ri de 0,087 (Equation 1, p 25) et du ratio de vitesse ζ de 1,065 (équation 2, p 25). Par conséquent le panache de la SandHarrier sur le site de Baie de Seine ne semble pas concerné par une phase dynamique mais seulement par une phase passive hormis pour les valeurs maximales de Ri et minimales de ζ. Ces valeurs maximales correspondent à des conditions peu fréquentes : les concentrations maximales de la surverse et la plus faible vitesse de courant relatif à la drague.

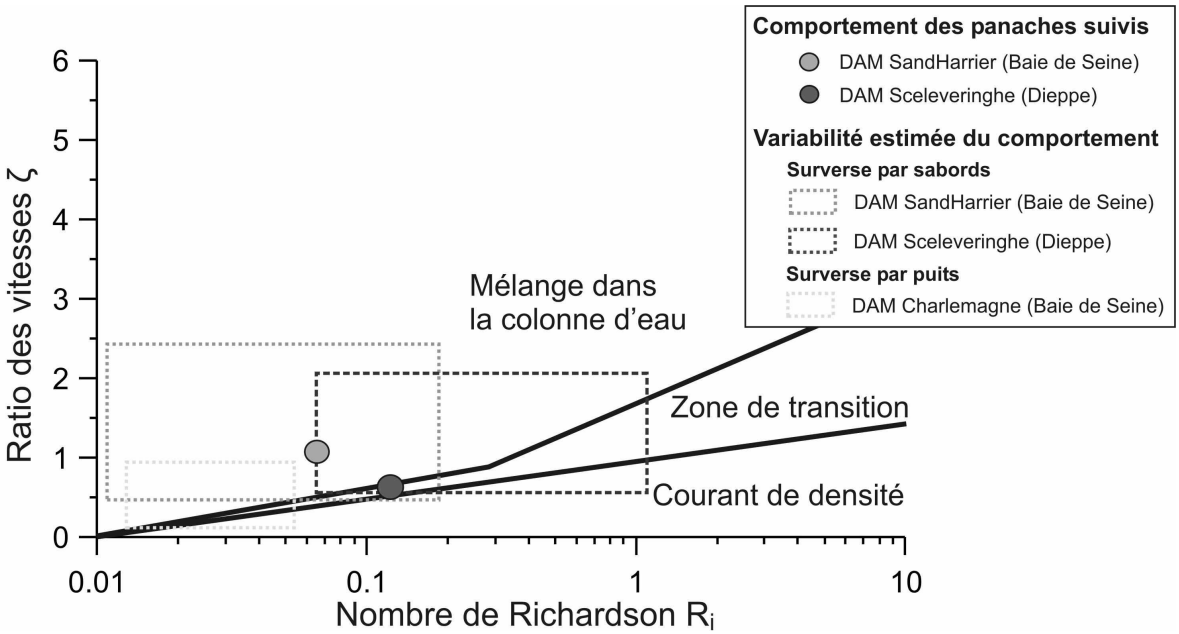


Figure 87 : Comparaison du comportement des panaches sur les sites de Dieppe et de Baie de Seine d'après la classification de Winterwerp (Winterwerp, 2002).

Sur Dieppe, malgré des concentrations plus faibles, la surface de contact de la surverse avec le milieu marin, plus large, induite par un débit d'aspiration plus important, engendre un nombre de Richardson plus élevé (0,113). Le ratio de vitesse est plus faible (0,534) du fait d'une vitesse relative du courant par rapport à la DAM moins forte. D'après ces valeurs et la classification de Winterwerp, le panache de surface de Dieppe est à la limite du comportement passif et transitoire. Par conséquent, une phase dynamique peut s'établir dans les premiers instants de vie du panache, associée à une phase passive qui elle perdure jusqu'à la disparition complète du panache (Figure 87). Comme pour le site de Baie de Seine, les valeurs maximales de Ri et ζ calculées d'après les données *in situ* montrent que le comportement du panache peut présenter temporairement une unique phase dynamique à laquelle un courant de densité est associé (Figure 87).

Cette différence de comportement entre les deux sites est induite par : (i) une vitesse relative du courant par rapport à la drague plus faible, et (ii) un débit de surverse plus élevé pour la Scelveringhe sur Dieppe. Ce débit plus élevé lié à un débit d'aspiration plus fort peut être propre à cette DAM ou bien être influencé par la nature du substratum.

En dehors des valeurs maximales de Ri et minimales de ζ, le panache de surverse est majoritairement constitué d'une unique phase passive. La zone plus concentrée du panache montrant une colonne verticale étroite, observée au-delà de S+10min, peut être associée à la chute de particules plus denses et/ou plus grosses, moins sensibles à la dispersion latérale et qui se dissocieraient du reste du panache en chutant plus rapidement sur le fond que le reste des particules du panache. La zone plus concentrée, observée sur le fond, pourrait être associée à : (i) un maintien en suspension des particules les plus fines dû à la turbulence sur le fond, (ii) la contribution des particules d'un panache benthique induit par l'élinde, et/ou (iii) une remise en suspension de particules de panaches antérieurs, déposés lorsque la contrainte de cisaillement était plus faible (courants plus faibles et/ou agitation plus faible). Cette réalimentation par des MES déposées au préalable est notamment observée lors des suivis effectués sur le site de Dieppe.

4.2.2. Dynamique de la phase passive du panache

Nous avons montré que le panache était essentiellement constitué d'une phase passive même dans les premiers instants suivant sa formation. Cette phase passive est soumise à une dispersion latérale, une décantation et une advection.

La dispersion latérale du panache se manifeste par l'élargissement de la section transversale du panache en surface. Celle-ci est surtout effective lors des premières minutes qui suivent la surverse. Cette dispersion est fonction de la turbulence du milieu, de l'orientation de l'extraction par rapport au courant et des caractéristiques des MES (concentration, granulométrie et nature). Sur le site de Baie de Seine, la dispersion latérale est plus rapide pour une extraction avec courant, matérialisée par une largeur maximale de la section transversale de 300 m atteinte en seulement 10 min. Pour le site de Dieppe, les largeurs maximales du panache d'environ 200 m, sont atteintes plus tardivement à S+30min. Les différences sont essentiellement

dues aux caractéristiques des MES du panache de Dieppe, au rapport dispersion latérale/décantation plus faible à Dieppe et à une orientation des courants légèrement différente d'un site à l'autre.

L'ensemble du panache, tronçons formés à contre et avec courants, subit une translation. Celle-ci se manifeste par la migration de l'ensemble du panache au gré des courants. La distance de migration est fonction de la vitesse des courants, du temps de décantation des particules donc de la hauteur d'eau, et des caractéristiques des MES (taille et densité). Pour les deux sites, les distances maximales observées sont atteintes lors du flot, et sont de 8,5 km pour le site de Baie de Seine et de 3,5 km pour Dieppe.

La décantation de la phase passive est observée par la diminution progressive de la masse par mètre linéaire des sections transversales du panache. Le taux de décantation est fonction des caractéristiques des MES (concentration, granulométrie et nature), de la hauteur d'eau et de la contrainte de cisaillement agissant sur le fond à l'origine d'une réalimentation de la phase passive par une remise en suspension de particules déposées par des tronçons de panache antérieurs. Les taux de chute sont plus faibles sur Dieppe, d'environ 4 $g.s^{-1}$ lors de la première demi heure, contre 12 $g.s^{-1}$ sur le site de Baie de Seine. Malgré une décantation plus rapide du panache, ces différences sont essentiellement engendrées par des concentrations de panache plus faibles induites par un matériel dragué plus pauvre en particules fines sur le site de Dieppe.

Les processus de dispersion et de décantation agissant sur la dynamique à long terme du panache sont donc liés à la nature du substratum dragué alors que les processus à court terme sont davantage contrôlés par le protocole d'extraction.

A partir de l'interprétation des données acquises sur le panache généré par la SandHarrier sur la Baie de Seine et celui généré par la Scelveringhe sur Dieppe, un modèle conceptuel peut être construit pour synthétiser la dynamique du panache (Figure 88).

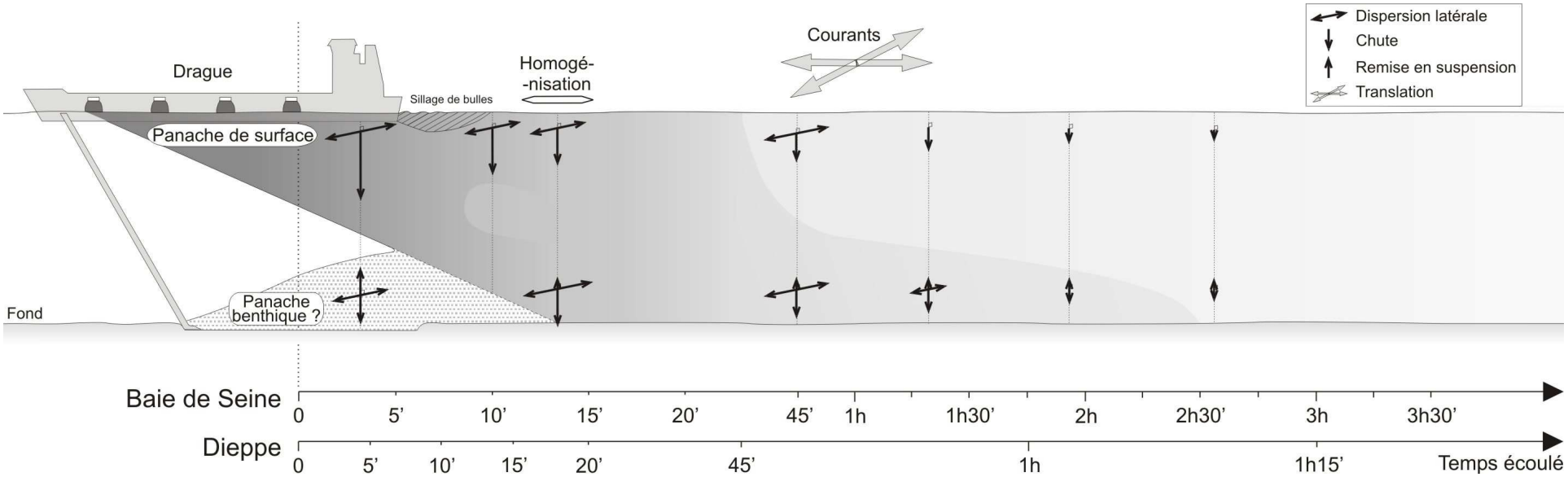


Figure 88 : Synthèse de la dynamique du panache généré sur le site en Baie de Seine et sur le site de Dieppe à contre-courant pour une surverse par sabords.

4.2.3. Influence de l'orientation du courant par rapport à la DAM

L'obliquité des courants par rapport au cap de la DAM engendre une composante parallèle et une composante perpendiculaire des courants par rapport à l'axe de la drague. La composante perpendiculaire est à l'origine de la création d'un nouveau tronçon de panache à chaque changement de cap de la drague. La composante parallèle engendre des tronçons de panache plus longs lorsque le cap de la drague est à contre-courant et plus courts pour une extraction avec courant. Cette succession de tronçons formés à contre et avec courant génèrent un panache d'ensemble sous forme de chevrons irréguliers.

Un tassement du panache à l'arrière de la drague et donc une concentration plus élevée était attendu pour une extraction avec courant. Ceci est le cas pour le suivi de la DAM Scelveringhe sur le site de Dieppe mais non pour le suivi de la DAM SandHarrier sur le site de Baie de Seine. Cette différence peut être expliquée par la vitesse de la SandHarrier plus élevée avec courant ce qui induit une densité du matériel excavé moins importante donc des concentrations de la surverse plus faibles.

Les différences morphologiques des tronçons à contre et avec courants, impliquent une plus faible superficie de dépôts pour les sections de panaches générés avec courant.

La direction du courant par rapport au cap de la drague (avec ou contre-courant) semble donc être un facteur majeur contrôlant les concentrations initiales, la géométrie, et la dynamique (principalement la dispersion) du panache mais pas son temps de disparition et son extension au-delà de la zone d'extraction.

4.2.4. Estimation de l'extension et des épaisseurs de dépôts

Deux types de dépôts sont distingués : ceux des sables fins centrés sur 225 µm, constituant majeur de la phase sableuse de la surverse sur les deux sites, et ceux des particules fines (< 63 µm) qui constituent le panache jusqu'à sa disparition complète. Le calcul des extensions de dépôts a nécessité la détermination des temps de chute des particules pour atteindre le fond. Pour les sables de 225 µm, les temps de dépôts sont connus à partir de la vitesse de chute théorique des particules sphériques de 225 µm et de la hauteur d'eau. Pour les particules fines, cette durée est considérée comme celle nécessaire à un retour aux concentrations du milieu. Les distances de dépôts sont ensuite déterminées à partir du résiduel de courant obtenu pour la durée des dépôts. La distance des dépôts est fonction : (i) de la hauteur d'eau, donc du moment pour lequel à lieu la surverse sur le cycle de marée, (ii) des courants et (iii) de la vitesse de chute des particules.

Pour un coefficient maximal de VE, sur le site de Baie de Seine, la distance maximum des dépôts des sables de 225 µm et des fines sont respectivement de 800 m et de 6,5 km pour un chargement débuté au flot, 3-4 h après la BM (Figure 73, p Figure 73117). Pour des coefficients de 80, à Dieppe, la distance maximum des dépôts des sables de 225 µm et des fines sont respectivement de 550 m et de 3,2 km pour un chargement débuté au flot, 2-3 h après la BM (Figure 86, p 136).

Le protocole d'extraction (intensité des extractions, débit d'aspiration et type de surverse) influencera l'épaisseur des dépôts. La connaissance détaillée de ce protocole sur la Baie de Seine montre que

les dépôts de sables et de particules fines sont respectivement de 0,24 à 1,31 mm.an^{-1} et de 0,06 à 0,29 mm.an^{-1}.

4.3. Mise en place d'indicateurs opérationnels

4.3.1. Recherches d'indicateurs

Pour comparer, les impacts d'un panache turbide généré pour des protocoles d'extraction différents (courants par rapport à la drague, type de surverse, débit de la pompe et capacité de chargement) et pour des conditions environnementales différentes, des indicateurs sont nécessaires. Dans notre cas, de tels outils d'évaluation ont été définis. Ils sont basés sur la concentration en MES, paramètre hydrologique principal de l'impact du panache turbide sur le milieu. Ils permettent de déterminer la pérennité du panache (indice de disparition), l'impact explicite du panache sur les concentrations du milieu localement et d'intégrer ces impacts spatialement et temporellement.

Un **indice I/R**, confrontant le rendement de l'extraction avec le matériel rejeté par surverse, propre à chaque DAM est proposé. Celui-ci est le rapport du volume de matériel rejeté par la drague par rapport à celui de son chargement (Tableau 12). Ce rapport avait déjà été proposé par Hitchcok *et al.* (1999).

Tableau 12 : Rapport I/R entre le tonnage rejeté par surverse et celui chargé pour différentes DAM.

DAM	nc (A type)	nc (S type)	nc (T type)	nc (A type)	ARCO Axe	Sand Harrier	Charlemagne	Sceleveringhe
Type surverse	nc	nc	nc	nc	sabords	sabords	puits	sabords
Site	nc	nc	nc	Owers bank	473 Est	Baie de Seine	Baie de Seine	Dieppe
Criblage sans	0.2-1	0.5-1.5	0.5-1	0.075	0.076	0.014	0.046	0.014
Criblage grossier	2-3	2-4	2-3	0.724	/	/	/	/
Criblage fin	3-5	3-4	3-4	1.905	0.399	/	/	/
Références	Davies et Hitchcock, 1992			Hitchcock et al., 1992	HR Wallingford, 2011			

nc : non communiqué
/ : non déterminé

Un **indice de disparition** du panache est d'abord défini pour évaluer la durée de vie du panache. Dans notre étude, mais aussi pour un grand nombre de travaux antérieurs, les concentrations du panache diminuent pour tendre vers celles du milieu marin mais restent souvent légèrement supérieures aux concentrations initiales du milieu. Dès lors, pour que cet indice soit applicable au plus grand nombre de suivis antérieurs, nous proposons de déterminer le $T_{1,25[naturel]}$ qui est la durée nécessaire pour que la concentration du panache revienne à 1,25 fois celle du milieu non impacté (Tableau 13). Cette valeur seuil choisie est la valeur minimale pour que l'indice soit calculé pour des études antérieures. Le nombre de mesures est généralement moins important que notre étude et ne permet pas de calculer un indice à un seuil inférieur plus proche de la réelle disparition du panache.

Pour notre étude, la valeur de concentration du milieu est la moyenne des concentrations à laquelle est ajoutée deux écarts-types. Pour les études antérieures sans indications de la variation du milieu, la concentration du milieu choisie pour le calcul de l'indice est la valeur maximale et à défaut la moyenne des concentrations.

Tableau 13 : Indice $T_{1,25[naturel]}$ en fonction du site d'extraction et des conditions d'extraction.

Site	Baie de Seine		Dieppe		Owers bank	473 Est	
DAM	Sand Harrier		Scelveringhe		ARCO Severn	ARCO Axe	
Type de surverse	sabords		sabords		sabords	sabords	
Criblage	non		non		non	non	oui
Cap vs courant	contre	avec	contre	avec	nd	nd	nd
$T_{1,25[naturel]}$	**2h13'**	**2h08'**	**0h22'**	**0h33'**	**0h56'**	**0h39'**	**0h14'**
$[MES]_{naturel}$ mg.L-1	1,63	1,63	5,59	5,59	10	10	6
$[MES]_{surverse}$ mg.L-1	6 048,28	6 048,28	3 827,55	3 827,55	6178	13 542	12 029,57

Un **outil d'évaluation spatial et temporel de l'impact global** est proposé afin de comparer, d'un site à un autre et d'une condition donnée à une autre, la persistance de l'impact du panache sur les concentrations à différentes distances de la zone d'extraction (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cet outil est un tableau à double entrée avec les distances d'impact exprimées par différentes colonnes et la persistance dans le temps de l'impact matérialisé par différentes lignes.

Le degré d'impact pour chaque combinaison distance-temps est déterminé à partir de trois seuils de concentrations de MES logarithmiques :

- faible, dès que la concentration du panache est supérieure à celle du milieu naturel,
- modéré, pour une concentration supérieure à 5 fois celle du milieu : ce qui correspond, dans le cas de notre étude, aux concentrations que peut atteindre le milieu en condition de forte agitation.
- élevé, pour une concentration supérieure à 50 fois celle du milieu, ce qui permet d'intégrer les concentrations rencontrées à l'arrière de la DAM SandHarrier et Charlemagne sur le site de Baie de Seine.

Trois échelles de distance logarithmique par rapport au point de contact de la surverse avec le milieu marin ont été retenues :

- faible : de l'arrière de la DAM jusqu'à 1 km ; ce qui permet de différencier les dépôts de sables qui ne dépassent pas le kilomètre,
- modérée : de 1 km à 10 km ; ce qui permet de différencier les dépôts de particules fines communément observés tout comme dans le cas de notre étude,
- forte : supérieure à 10 km ; ce qui englobe les dépôts de particules fines, éloignés, observés dans certaines études antérieures.

Trois échelles temporelles logarithmiques sont choisies à partir de l'instant où le contact de la surverse avec le milieu marin s'établit :

- faible : de l'instant où la masse turbide dépasse l'arrière de la DAM jusqu'à 10 min après le rejet ; ce qui permet de différencier certains panaches turbides chutant rapidement, mentionnés dans les travaux antérieurs,
- modérée : de 10 min à 100 min ; ce qui permet de différencier des phases passives du panache relativement courtes comme observées sur le site de Dieppe,
- forte : supérieure à 100 min qui permet de différencier certains panaches disparaissant plus lentement comme observés sur le site de Baie de Seine.

Certaines gammes de distances et de persistances temporelles présentent une importante variation de la concentration du panache. Par conséquent, ces gammes présentent plusieurs degrés d'impact.

Les concentrations, relativement élevées, observées entre l'entrée de la surverse dans le milieu marin et le moment où celle-ci dépasse l'arrière de la DAM, ne sont pas intégrées dans ce tableau. En effet, l'objectif de cet outil est de caractériser l'impact du panache turbide après le passage de la DAM qui par sa propre présence, sans rejet, impacte déjà le milieu.

L'indice **I/R** déjà proposé dans d'anciennes études n'est pas suffisant pour l'étude de l'impact de la remise en suspension, induit par l'extraction car il n'intègre pas les apports issus du panache benthique et la dynamique du panache turbide formé à l'arrière de la DAM. L**'indice $T_{1,25[naturel]}$**, donnant un temps de disparition, permet de comparer de façon simple la pérennité des panaches. Enfin le **tableau spatio-temporel** permet de synthétiser la pérennité du panache et son extension spatiale.

L**'indice $T_{1,25[naturel]}$**, l'**indice I/R** et le **tableau spatio-temporel** proposés ci-dessus sont applicables aux études antérieures suffisamment complètes (Tableau 12, Tableau 13 et Figure 89). Les résultats de nos travaux sont comparés avec deux autres études réalisées en Bassin oriental de la Manche. Ils concernent le suivi de la surverse par sabords sans criblage de la DAM ARCO Severn sur l'Owers bank (Hitchcock *et al.*, 1999) et celui par sabords de la DAM ARCO Axe sur le site 473 Est à 30 Km au large de Eastbourne (HR Wallingford, 2011). Le suivi de la DAM ARCO Axe a été réalisé d'abord avec criblage puis sans.

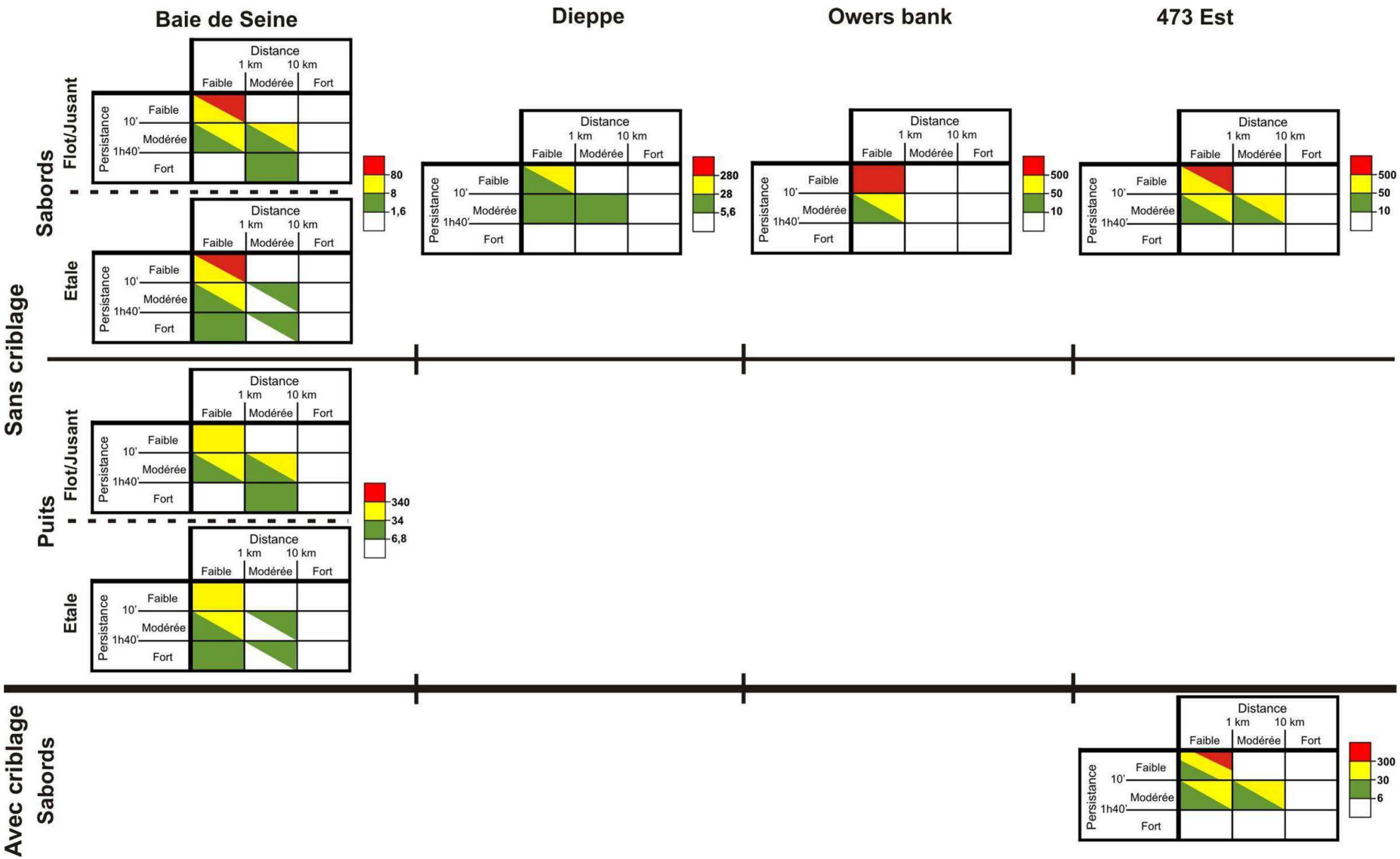


Figure 89 : Evaluation de l'impact spatio-temporel du panache turbide sur les concentrations en MES du milieu.

4.3.2. Application pour l'évaluation de l'influence des protocoles d'extraction

L'influence des protocoles d'extraction (courants relatifs à la DAM et le type de rejet) sur le panache turbide est ici évaluée. La comparaison des différentes conditions d'extraction est facilitée grâce aux différents indices décrits préalablement.

a. Orientations et vitesses des courants par rapport à la drague

Il a été observé que la morphologie du panache (limites, longueurs et largeurs) dépend de la direction et de la vitesse relative des courants par rapport à la drague. Les concentrations en MES et la dynamique du panache sont également affectées. Toutefois, les temps de disparition sont sensiblement identiques pour les deux conditions comme le confirment les valeurs de $T_{1,25[naturel]}$. Pour une extraction à contre-courant et avec courant, les valeurs de cet indice pour le panache de la SandHarrier sur le site en Baie de Seine sont respectivement de 2h13min et 2h08min et celles du panache formé par la Scelveringhe sur Dieppe sont respectivement de 22 min et 33 min. Pour ces deux conditions, les tableaux des impacts spatio-temporels sont similaires.

Lorsque l'extraction se produit au cours d'une étale, notamment longue comme celle de la PM en Baie de Seine, les extensions globales du panache et des dépôts associés sont plus limitées, ce qui se matérialise par des degrés d'impacts plus faibles à distance modérée dans les tableaux des impacts spatio-temporels (Figure 89).

b. Types de rejets

Cette étude traite principalement la dynamique du panache formé par la SandHarrier sur le site de Baie de Seine et de la Scelveringhe sur le site de Dieppe. La SandHarrier présente un débit de pompe modéré induisant un débit de surverse modéré par rapport aux autres DAM travaillant sur les côtes françaises comme notamment la Scelveringhe. Ces deux dragues présentent le même système de surverse, à savoir par sabords latéraux. Cependant, plusieurs scenarii, en fonction du type de drague (au mouillage ou DAM), de la capacité de chargement de la drague, du débit d'aspiration, d'un criblage et du type de surverse (par puits ou par sabords latéraux) doivent être considérés. Ces différents scenarii vont agir sur le débit de surverse, les concentrations rejetées, la masse totale de sédiments rejetés et donc sur la dynamique du panache.

Le cas de la Charlemagne travaillant également sur le site de Baie de Seine est un bon exemple de ces différences et permet une comparaison des dragues sur un même site. Cette DAM possède une capacité de chargement plus importante, un meilleur débit d'aspiration, et un **mode de surverse par puits**. Les concentrations de la surverse de cette drague sont d'environ 15 $g.L^{-1}$ soient plus du double des 6 $g.L^{-1}$ mesurées pour la surverse de la SandHarrier. Avec ces concentrations et des débits de surverse plus élevés, le débit massique de sédiments de 145 $t.h^{-1}$ rejetés par la surverse de la Charlemagne est nettement supérieur au 19 $t.h^{-1}$ rejetés par la SandHarrier.

L'indice I/R calculé pour la Charlemagne de 0,046 est trois fois plus élevé que celui calculé pour la SandHarrier malgré un rendement de chargement (ou débit de chargement) plus élevé pour la Charlemagne (Tableau 12, p 147).

A partir du diagramme de Winterwerp (2002) et des caractéristiques de la surverse de la Charlemagne, le comportement du panache de cette drague est déterminé. Pour le même site de la Baie de Seine, le comportement du panache de surverse de la Charlemagne est différent de celui de la SandHarrier (Figure 87, p 142). Une phase dynamique est ici d'avantage possible. Si cette phase s'avère confirmée sur le terrain, une partie importante du panache chuterait rapidement et s'étalerait sur le fond à proximité de la zone de surverse.

Les temps de dispersion du panache généré par la Charlemagne n'ont pas pu être déterminés avec précision et par conséquent les indices $T_{1,25[naturel]}$ correspondant ne sont pas calculés. Les tableaux des impacts spatio-temporels induits par le panache de la Charlemagne montrent un degré d'impact plus faible pour une distance et une persistance faibles en raison des concentrations du milieu plus élevées que celles observées pour le suivi de la SandHarrier (Figure 89).

Le **criblage**, non autorisé en France augmente la valeur de l'indice I/R. Toutefois, pour une même DAM, la quantité de matériel rejetée par surverse peut être plus faible dans le cas du criblage des particules fines (Tableau 12, p 147 ; HR Wallingford, 2011). Les apports plus faibles en MES dans la surverse et une troisième source de remise en suspension massive induite par le criblage, change le comportement du panache par l'augmentation : des concentrations surtout à proximité de la DAM, de la taille du matériel rejeté et du temps de chargement (Hitchcock *et al.*, 1999, 2002; HR Wallingford, 2011). Par conséquent, le débit et la masse totale des sédiments rejetés vont être fortement augmentés. Dans ce contexte de forte concentration et fort débit, la dynamique du matériel rejeté par criblage résultant suit préférentiellement un comportement dynamique, alors que le matériel rejeté par surverse présente essentiellement une évolution passive. Les suivis menés par HR Wallingford (2011) indiquent que la disparition du panache est plus rapide pour une extraction avec criblage comme le confirme les valeurs $T_{1,25[naturel]}$ (Tableau 13, p 8). La comparaison des tableaux d'impacts spatiaux temporels globaux montre que pour une extraction avec criblage la différence est essentiellement à courte distance et dans les premiers instants suivant le rejet (Figure 89).

4.3.3. Application pour l'évaluation de l'influence de l'environnement

L'influence de l'environnement (nature du matériel extrait, concentration du milieu et hauteur d'eau) sur le panache turbide est ici évaluée. Les comparaisons d'un site à l'autre sont facilitées grâces aux différents indices décrits préalablement.

Sur Dieppe, les concentrations et masses par mètre linéaire des MES du panache sont plus faibles qu'en Baie de Seine. Cette différence est induite par : (i) des concentrations de la surverse plus faibles et (ii) une proportion du panache benthique se mélangeant avec le panache de surverse plus faible.

Deux éléments peuvent expliquer les concentrations plus faibles de la surverse. Le premier est le stock disponible du sédiment dragué en particules fines qui ne décante pas dans le bassin de la drague et se trouve évacué par la surverse. Le deuxième serait une fraction granulométrique plus grossière des sédiments dragués et donc plus difficile à excaver. Ceci entraînerait une augmentation de volume d'eau aspirée par l'élinde et par conséquent une concentration du matériel dragué plus faible arrivant dans le bassin de la drague. La surverse résultante serait alors moins concentrée. Toutefois, cet argument est réfuté en comparant les temps de chargement de la Scelveringhe sur le site de Baie de Seine. En effet, la durée du chargement de la Scelveringhe sur le site de Baie de Seine, où les sédiments sont moins grossiers, est similaire à celle de Dieppe.

Un panache moins concentré associé à des valeurs de concentration du milieu naturel plus élevées sur Dieppe engendre une disparition du panache plus rapide. Les valeurs de l'indice $T_{1,25[naturel]}$ et le tableau des impact spatio-temporels reflètent ces différences (Tableau 13, p 8 et Figure 89).

Les temps de disparition du panache seront donc influencés par les concentrations de la surverse, donc par le mode de surverse et par la nature du matériel extrait. La hauteur d'eau plus faible sur Dieppe influencera également les temps de disparition du panache.

Même si les DAM étudiés par Hitchcock (1999) et HR Wallingford (2011) sur d'autres sites en Bassin oriental de la Manche ne sont pas complètement identiques à celles suivies dans notre étude (débits d'aspirations, volume chargés, etc), certains protocoles d'extraction sont relativement proches (surverse par sabords et sans criblage). Le calcul de l'indice $T_{1,25[naturel]}$ correspondant est sensiblement différent de ceux de Dieppe et nettement inférieur à celui de la Baie de Seine (Tableau 13). Les tableaux des impacts spatio-temporels sont également différents d'un site à un autre (Figure 89). Ces différences matérialisent l'importance du milieu (concentration de MES, nature du matériel extrait et hauteur d'eau) sur la dynamique et les temps de disparition du panache turbide.

Sur Dieppe, l'étalement du panache sur le fond est plus marqué en amont du sens de migration du panache qu'il ne fut observé Baie de Seine. La morphologie de cet étalement semble indiquer une remise en suspension de particules de panache déposées au préalable. Cette remise en suspension plus marquée sur Dieppe est essentiellement liée à la houle et à la profondeur d'eau puisque sur Dieppe les courants sont relativement proches de ceux de Baie de Seine et que les modes granulométriques sont globalement identiques. Par contre pour le taux de remise en suspension (non calculé dans notre étude), la granulométrie de la surverse sera également un paramètre important. La remise en suspension des particules de panache déjà déposées est donc directement liée au milieu.

5. Conclusions partielles

(1) La dynamique des panaches turbides générés lors de l'extraction de granulats marins peut être analysée grâce à l'étude des caractéristiques de la surverse (concentration, granulométrie et nature des MES) et à un suivi lagrangien hydro-sédimentaire (ADCP et LISST) du panache. Toutefois la présence d'un sillage de bulles à l'arrière de la drague qui affecte la colonne d'eau pendant les 10 premières minutes après la surverse ne permet pas d'observer la dynamique du panache dans cet intervalle de temps par les méthodes optiques et acoustiques employées.

(2) Le panache global observé à l'arrière de la drague est formé par le mélange du panache de surface, résultant de la surverse, avec le panache benthique, résultant du passage de l'élinde sur le fond. Les proportions du panache benthique sont gouvernées par la nature du matériel extrait et par le débit d'aspiration de la drague. Ce panache benthique nécessiterait un protocole adapté pour être quantifié.

En Baie de Seine, la surverse est constituée de sables silteux. Les concentrations sont en moyenne plus fortes pour une surverse par puits (18,8 $g.L^{-1}$) que par sabords (6 $g.L^{-1}$). A l'entrée de la surverse dans le milieu marin, les SSC diminuent brusquement par dilution d'un facteur 10 à 100. Dans le panache, les SSC diminueront rapidement dans les 10 premières minutes (20 $mg.L^{-1}$) puis progressivement (10 et 5 $mg.L^{-1}$ à S+30min et S+1h). Les sables chuteront rapidement entre 12 et 17 min et, au-delà, le panache sera principalement constitué de silts.

Les concentrations et la nature des particules de la surverse sont donc fonction des caractéristiques de l'extraction (débit d'aspiration de la DAM et mode de surverse) et de la nature du matériel extrait.

Pour un chargement effectué sur un cycle semi-diurne, le matériel rejeté par surverse n'est supérieur à celui remis en suspension par les courants et la houle seulement lors des ME sans houle. Pour des conditions agitées et lors des VE, cette remise en suspension induite par la surverse est comprise entre 1 et 30 % de celle générée par la houle et les courants. Lors des ME sans agitation cette remise en suspension anthropique est plus forte de quatre ordres de grandeur.

(3) Dans le cas d'une surverse par sabords, le comportement du panache est essentiellement passif même si l'évolution des sections transversales peut montrer des géométries ressemblant à un comportement dynamique. Lors de cette phase passive, les concentrations diminuent par l'intermédiaire de processus de dispersion latérale et de décantation. Sur un même site, une surverse par puits peut engendrer un comportement dynamique du panache. Le comportement dynamique ou passif dépend du type de surverse (puits central ou sabords), de la pratique ou non d'un criblage et de la vitesse relative de la DAM par rapport au courant.

(4) Dans ce contexte macrotidal, les conditions d'extraction (alternance avec ou contre-courant, débit de l'aspiration, capacité de chargement, type de surverse et pratique du criblage) contrôlent les concentrations initiales, la géométrie (ici en chevrons) et la dynamique du panache mais pas son temps de dispersion.

(5) Le matériel dragué (granulométrie et nature) et les courants tidaux conditionnent la mobilité du panache et donc l'extension des dépôts associés. En Baie de Seine, le panache se développera jusqu'à 8,5 km au-delà du point de surverse lors du flot. L'épaisseur des dépôts est influencée par les mêmes paramètres auxquels s'ajoute l'intensité de l'extraction.

(6) En Bassin oriental de la Manche, l'influence du milieu sur les concentrations, la granulométrie et la nature initiale des MES sont surtout gouvernées par la nature du substratum. La hauteur d'eau et le régime de houle se rajouteront à ce paramètre influant pour ce qui concerne le temps de disparition du panache et la remise en suspension des particules des panaches antérieures déjà décantées.

(7) Plusieurs indicateurs sont proposés. Ils sont construits autour de la concentration en MES qui est le principal paramètre hydrologique impacté. L'indice I/R permet de confronter le rendement et l'impact d'une DAM à une autre. L'indice $T_{1,25[naturel]}$ permet de comparer les temps de disparition du panache en fonction des conditions d'extractions et de celles du milieu. Enfin un tableau à double entrée permet d'évaluer et de comparer les degrés d'impacts à différentes échelles spatio-temporelles..

Chapitre III

Impacts et évolutions morpho-sédimentaires

1. Introduction

La caractérisation des impacts morpho-sédimentaires sur le fond, induits par l'extraction de granulats marins, a été réalisée dans le cadre de cette thèse pour le site en Baie de Seine. Elle sera comparée à celle du site de Dieppe réalisée, depuis 2004, par l'UMR CNRS 6143 « M2C » au sein du GIS « SIEGMA ».

Cette partie présente les résultats détaillés acquis sur la Baie de Seine. La comparaison avec le site de Dieppe interviendra dans la synthèse de cette partie. Cette comparaison permettra d'analyser les caractéristiques communes et spécifiques aux deux sites qui présentent des caractéristiques hydro-sédimentaires différentes.

Les principaux impacts morpho-sédimentaires sur le fond sont liés aux dépôts des particules du panache turbide et à l'excavation générée par le passage de l'élinde (cf. Figure 6, p 19).

Pour pouvoir qualifier et quantifier le réel impact sur le fond, il est nécessaire : (i) de définir les caractéristiques du milieu naturel et leurs variabilités spatio-temporelles, (ii) d'étudier les impacts directs et indirects engendrés par l'excavation, et (iii) d'analyser la restauration du milieu suite à ces impacts.

La synthèse proposée en fin de chapitre concerne : (i) les résultats acquis sur la Baie de Seine, et (ii) une comparaison avec ceux observés sur le site de Dieppe et d'autres encore. Elle permet de discuter les paramètres influents, de définir les processus de restauration des impacts et de proposer des indices permettant de comparer les impacts sur différents sites d'extraction.

2. Caractéristiques morpho-sédimentaires du milieu

Dans ce chapitre, notre objectif est de déterminer les caractéristiques morpho-sédimentaires du milieu avant le début d'extraction mais aussi, de déterminer leurs variations spatiales et temporelles en l'absence d'impact selon les différentes échelles de l'étude.

2.1. Bathymétrie

La **bathymétrie à l'échelle plurikilométrique** est connue à l'aide d'un MNT calculé à partir de la couverture SMF de la campagne Granimp09b (Figure 90). Ce MNT a été construit au pas de 10 m à partir de la méthode des moyennes mobiles avec un rayon de recherche de 10 m. Précisons que lors de cette campagne, les zones d'extraction sont impactées puisque les extractions ont débuté en 2007 sur la zone A et en 2008 sur la zone B. Par conséquent, ces zones d'extraction sont exclues pour les calculs des paramètres morphologiques du milieu non impacté, présentés ci-dessous.

La profondeur varie de 15 m au SE du secteur jusqu'à 23 m au SO. Le secteur est globalement peu accidenté avec des pentes faibles, inférieures à 0,25°. Au Nord et à l'Est, les pentes sont dirigées vers le NO. Au Sud et à l'Ouest, elles s'orientent vers le SO. Dans le quart ESE de la couverture bathymétrique, les crêtes des dunes de sables, orientées NO-SE, dessinent des sursauts morphologiques, avec des pentes dépassant les 3°. A **l'échelle du site expérimental,** la bathymétrie est comprise entre 19,5 et 22,5 m. Les pentes sont faibles, inférieures à 0,5°.

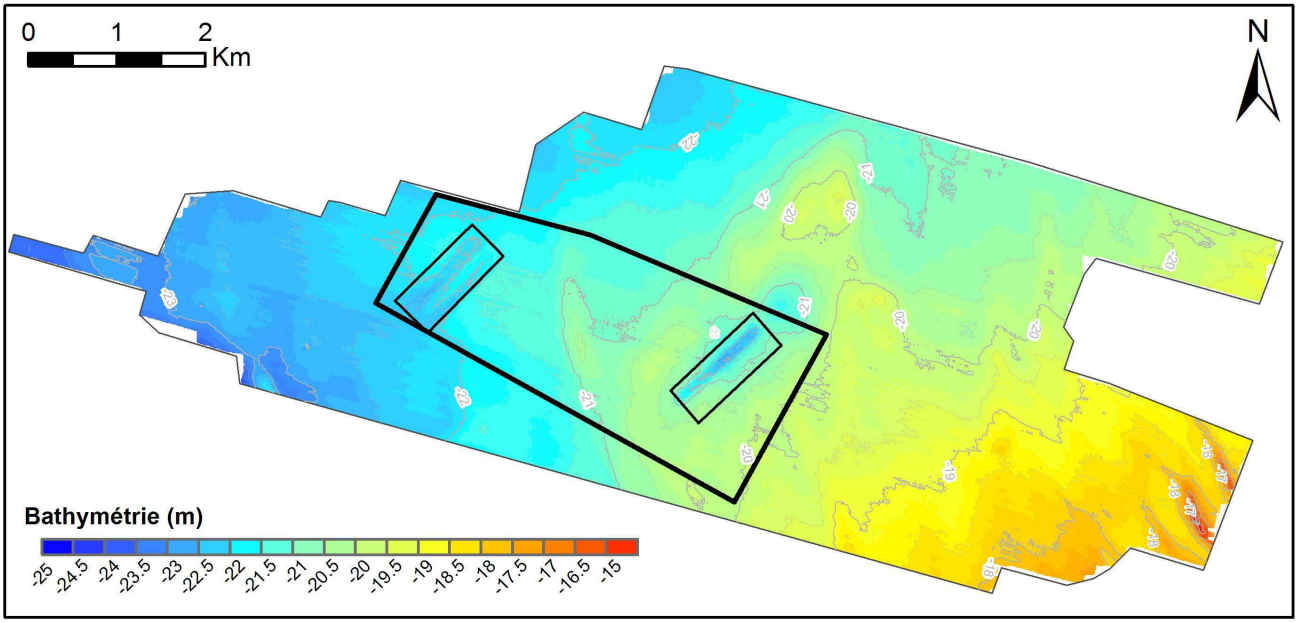


Figure 90 : Carte bathymétrique issue de la couverture SMF acquise lors de la campagne Granimp09b (maillage 10 m).

La **bathymétrie à l'échelle des zones d'extraction** est analysée à partir de MNT calculés à l'aide des levés SMF de la campagne Granimp07, réalisée avant le début des extractions (Figure 91). Ces MNT ont été construits au pas de 1 m à partir de la méthode des moyennes mobiles avec un rayon de recherche de 0,5 m. Sur la zone A, elle varie de 21,5 m à 22,5 m. Les pentes sont faibles, inférieures à 1° et orientées vers le SO hormis au Nord de la zone où celles-ci se réorientent vers le NO. Sur la zone B, la bathymétrie varie de 20 m à 22 m. Une légère dépression au Nord de la zone induit des directions de pentes convergeant vers son centre. Les pentes sont faibles, inférieures à 1°.

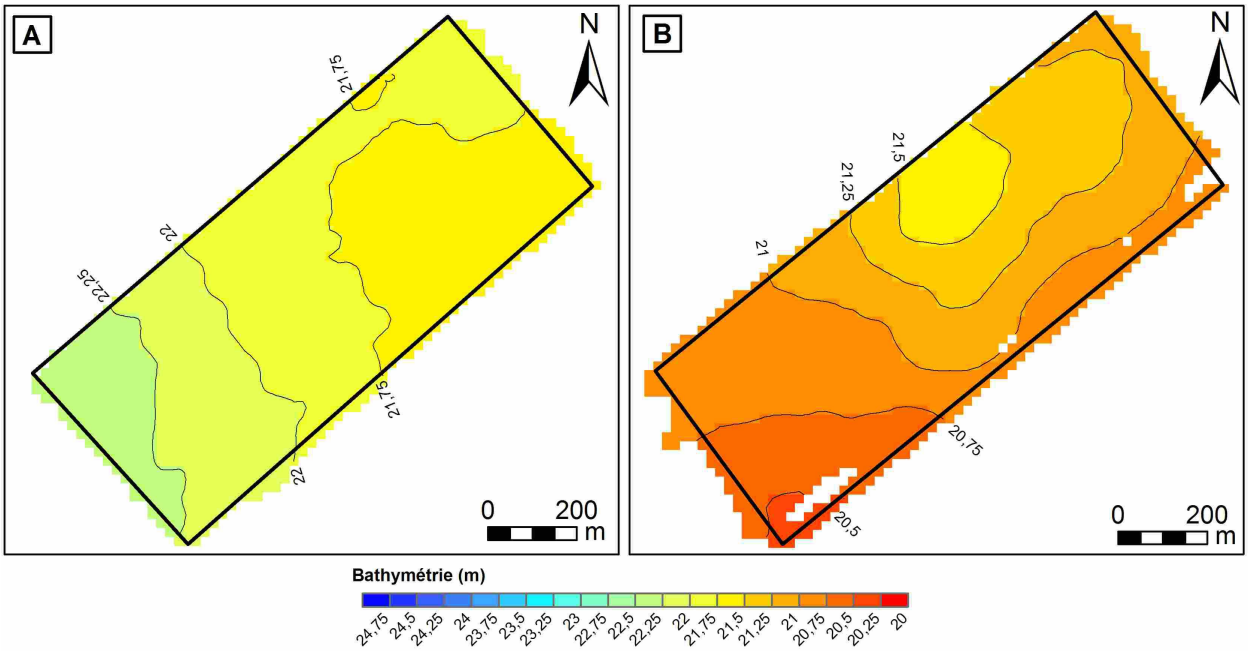


Figure 91 : Cartes bathymétriques des zones d'extraction A (à gauche) et B (à droite) avant le début de l'extraction, réalisées à partir des couvertures SMF de la campagne Granimp07 (maillage 10 m).

La variation à l'**échelle décamétrique** est connue à partir du levé bathymétrique de la campagne Granimp07 sur les zones A et B. Sur 10 m, les variations de bathymétrie et de pente ne dépassent pas respectivement les 15 cm et les 2°.

La variation à l'**échelle décennale** est étudiée à partir des différentiels bathymétriques des couvertures du SHOM de 1968 et de 1978 et de celle de la campagne Gr07 (2007). De 1968 à 1978, la profondeur globale du site décroît (Figure 92 A). Cette hétérogénéité dessine des ensembles rectilignes de 500m à 1km de large avec successivement des taux de sédimentation relativement forts, supérieurs à 0,5m (soit > 0,05 m.an^{-1}), et plus faibles, inférieurs à 0,5 m (soit < 0,05 m.an^{-1}). De 1978 à 2007, la tendance au comblement s'inverse (Figure 92 B). Une légère érosion, globalement inférieure à 0,5 m (soit < 0,02 m.an^{-1}), est observée sur les sites A et B.

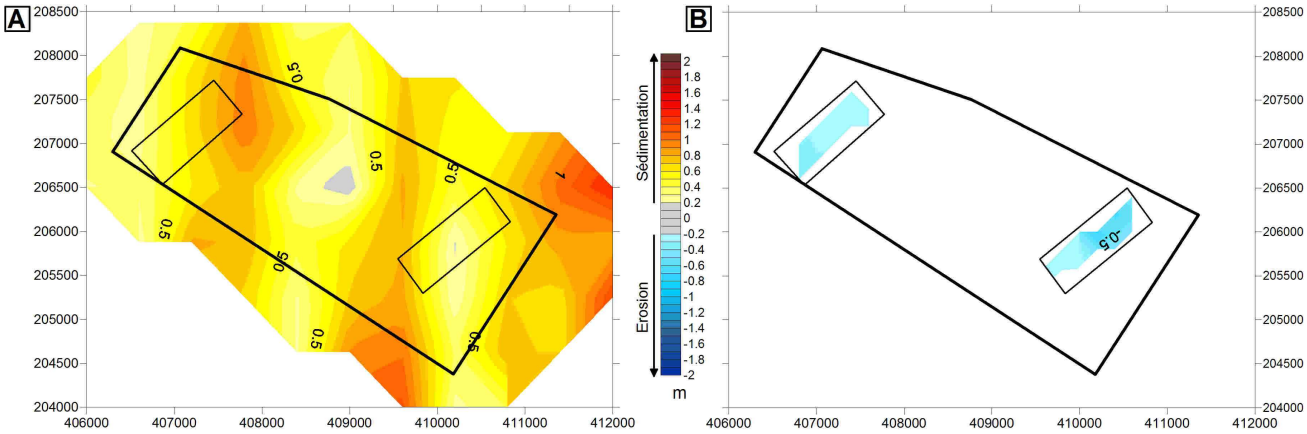


Figure 92 : Différentiels bathymétriques entre 1968 et 1978 (A) et entre 1978 et 2007 (B).

La variation à **l'échelle annuelle** est connue par le différentiel bathymétrique de la zone B entre les levés bathymétriques des campagnes Granimp07 et Granimp08a (juin 08) réalisées avant que les extractions ne débutent sur cette zone (octobre 2008). Etant donné une précision verticale de 10 cm pour chacune de ces bathymétries, les différentiels ici calculés inférieurs à 20 cm sont dans la gamme d'incertitude. Par conséquent, une éventuelle variation annuelle faible ne peut pas être mise en évidence.

2.2. Sédimentologie

Les travaux de Larsonneur (1979) et d'Auffret et d'Ozouville (1985a) indiquent que le site d'étude est sur le flanc nord du banc de Seine. Il est constitué d'une couverture sableuse grossière et est à proximité de figures de transit sableux caractéristiques du sommet du banc de Seine (cf. Chapitre 1, § 2.2.3, p 42).

2.2.1. Faciès sédimentaire

Les faciès sédimentaires du milieu non impacté sont étudiés à partir de la calibration des faciès acoustiques observés sur : (i) les mosaïques sonar des zones A et B de la campagne Granimp07 (juin 2007) avant le début de l'exploitation et (ii) la mosaïque sonar étendue sur plusieurs kilomètres au-delà du site expérimental acquise lors de la campagne Granimp09b (oct. 2009) sans tenir compte des zones A et B en cours d'exploitation.

Deux faciès acoustiques sont observés. Ces derniers sont calibrés par les prélèvements sédimentaires à la benne shipeck, les photographies et les vidéos sous-marines.

a. Couverture gravelo-sableuse

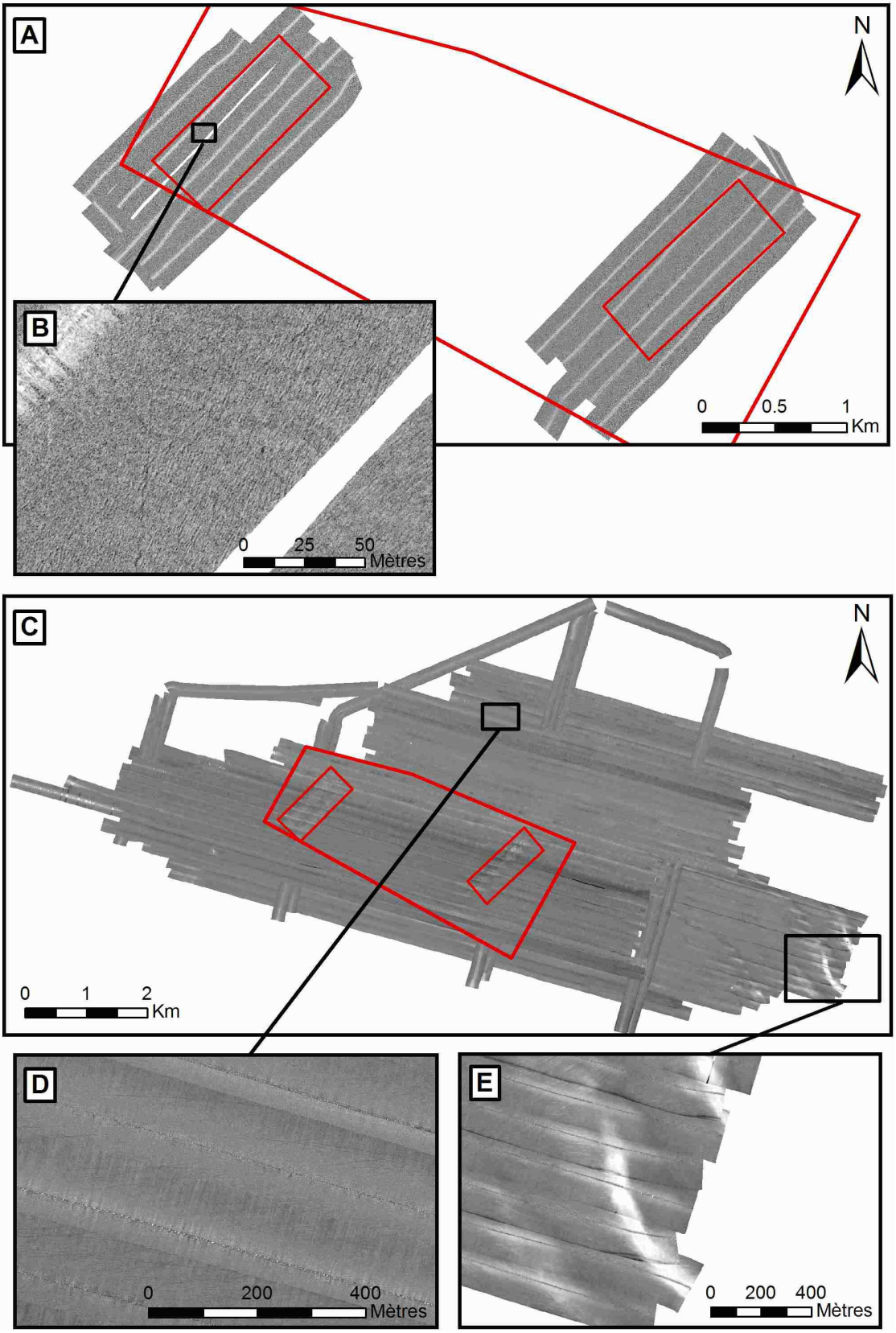


Figure 93 : Mosaïque sonar. Campagnes Granimp07 (A : vue d'ensemble ; B : zoom sur des traces de chaluts et les petites dunes de courants). Campagnes Granimp09b (C : vue d'ensemble ; D : zoom sur des traces de chaluts ; E : zoom sur les grandes dunes sableuses).

Le premier faciès acoustique couvre l'intégralité des deux zones d'extraction et du secteur de l'expérimentation (Figure 93 A, B et C). Il constitue également la majeure partie de la couverture sédimentaire, autour du secteur d'expérimentation sur plusieurs kilomètres comme le montre la mosaïque de la campagne Granimp09b (Figure 93 C). Ce faciès est globalement homogène et moyennement rétrodiffusant (Figure 93 A). Toutefois, il présente localement et temporairement deux types de structures linéaires. Les premières, observées sur la zone A lors de la campagne Granimp07, sont régulières et parallèles. Elles sont ici orientées N20° ce qui correspond à une direction orthogonale à celle du pic de flot orienté vers le ESE (Figure 93 B). Elles correspondent à des petites dunes de courant de faible amplitude (< 0,10 m) et de faible longueur d'onde (< 1 m). Le second type de structure linéaire est observé sur ce faciès pour les mosaïques des zones A et B de 2007, avant extraction, et pour la mosaïque étendue de 2009. Ces structures linéaires d'une largeur de 1,5 m, sont associées deux à deux parallèlement et espacées d'une dizaine de mètres jusqu'à 350 m. Elles peuvent être suivies sur plus de 1,5 km. Hormis quelques exceptions, elles sont préférentiellement orientées dans les directions du flot et du jusant (de NE-SO à SE-NO). Ces structures disparaissent en convergeant, perdant ainsi leur parallélisme. La fréquence de ces structures est plus importante au Nord et à l'Est du secteur expérimental. Ce deuxième type de structure est caractéristique de l'empreinte laissée par des panneaux de chaluts sur le fond (Figure 93 B). La granulométrie des prélèvements qui caractérise ce faciès acoustique indique un gravier sableux bimodal mal trié, avec une médiane à 2,25 mm et un coefficient de classement supérieur à 2. Les deux principaux modes granulométriques sont : un premier grossier étalé, des sables très grossiers jusqu'aux cailloux, compris entre 1 et 10 mm et un second dans les sables fins et moyens, autour de 0,1 et 0,315 mm, avec un pic à 225 µm (Figure 94 A).

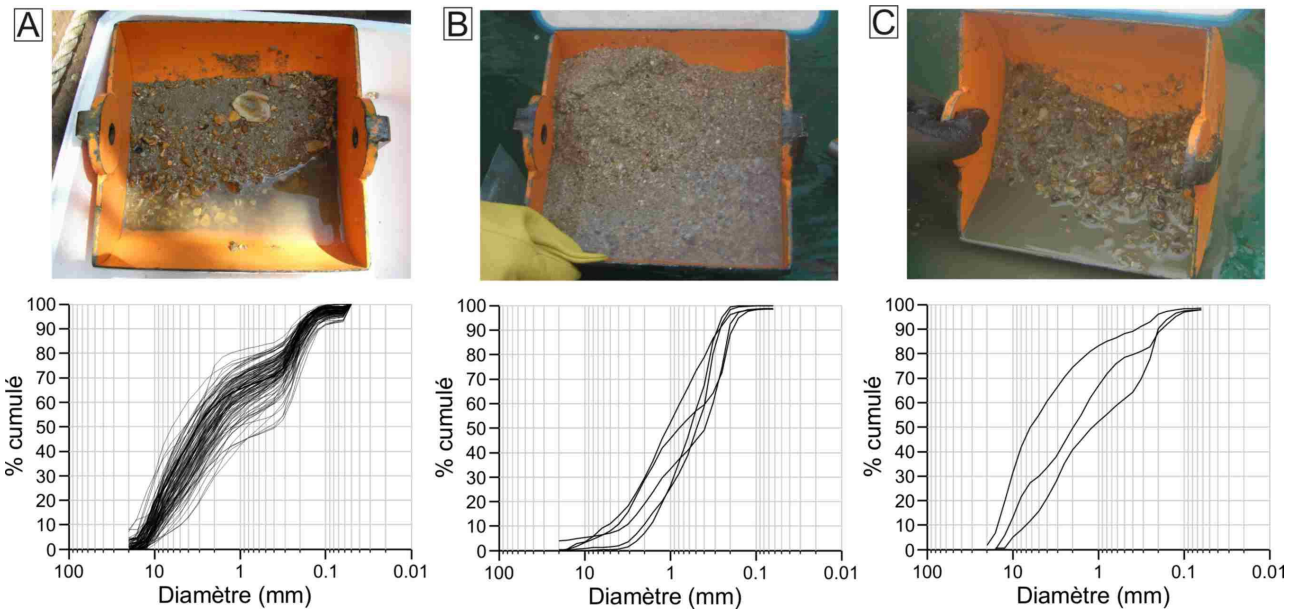


Figure 94 : Exemple de photographie de benne type et ensemble des courbes granulométriques cumulées. A : Faciès de graviers sableux. B : Faciès de sables graveleux. C : Faciès de graviers sableux autour des sables graveleux.

Ces graviers sableux sont en moyenne constitués de 65 % de lithoclastes et 35 % de carbonates, essentiellement des débris coquilliers (Figure 95). La courbe de fréquence granulométrique des proportions de chacune de ces deux natures montre que les lithoclastes sont majoritaires au droit des deux principaux modes granulométriques (2 à 3 fois plus) et minoritaires dans l'intervalle 1 mm-300 µm (2 fois moins). Les carbonates sont présents en égale abondance pour l'ensemble des fractions granulométriques.

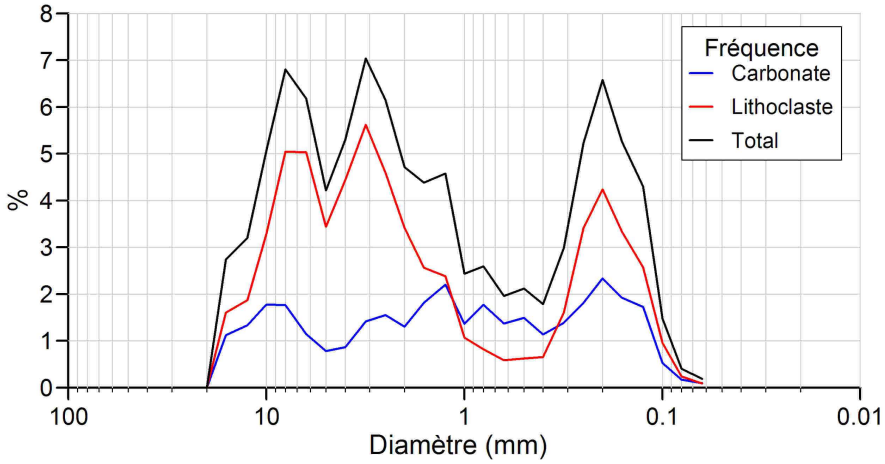


Figure 95 : Contribution des lithoclastes et carbonates sur la courbe granulométrique de fréquence d'un prélèvement sédimentaire type du milieu non impacté.

b. Dunes sablo-graveleuses

Un second faciès acoustique est observé uniquement sur la couverture étendue de 2009. Il n'est pas cartographié sur le secteur expérimental. Il est essentiellement observé en direction du banc de Seine, au Sud et au SE du secteur expérimental. Ce faciès est fréquent à l'E-SE, à environ 2 km du secteur expérimental et est présent plus localement au S, au SO et au NE. Ce faciès est hétérogène. Il est cartographié sous forme de grands ensembles linéaires plus ou moins courbes de plusieurs km de long et de plusieurs centaines de m de large. Chaque ensemble dessine, de façon plus ou moins contrastée, deux larges bandes au pouvoir rétrodiffusant opposé : une forte et une plus faible. L'orientation de ces ensembles varie progressivement de N 170° au SO du secteur à N 120° au NE du secteur. Ce second faciès peut également présenter les deux types de structures linéaires déjà observés dans le faciès des sables-graveleux. Des structures linéaires associées à des petites dunes de courant peuvent être observées sur les parties les plus rétrodiffusantes de ce faciès. Observées moins fréquemment que pour le premier faciès, des structures linéaires associées à une activité de chalutage sont également présentes localement.

Malgré un faciès acoustique hétérogène, les prélèvements sédimentaires caractéristiques de ce faciès indiquent un sable graveleux relativement homogène. Il est modérément bien classé (coefficient de classement < 0,7) avec une asymétrie vers les sables et présente un pic centré sur les sables moyens.

2.2.2. Cartographie morpho-sédimentaire

L'étude de la bathymétrie, des mosaïques sonars, des prélèvements sédimentaires et des images sous-marines permet de construire une carte moprho-sédimentaire du secteur étendu, correspondant à la campagne Granimp09b. Des faciès morpho-sédimentaires sont déterminés par la corrélation des informations morphologiques, obtenues de la bathymétrie, avec les faciès sédimentaires décrits précédemment.

Le premier faciès sédimentaire, des graviers sableux, correspond à un fond relativement plat qui ne présente que très rarement des lignes de crête. Le faciès morpho-sédimentaire correspondant est une couverture de graviers sableux plane (Figure 96).

Le second faciès sédimentaire, des sables graveleux, correspond aux dunes de grande longueur d'onde et d'amplitude variable (de 0,25 à 7 m) dont la crête est orientée NO-SE. L'asymétrie de ces dunes, avec un flanc court en direction du SW (direction du flot), indique que celles-ci sont formées par les courants. Le faciès morpho-sédimentaire correspond donc à des dunes de courant sablo-graveleuses (Figure 96). Le retour à une couverture de graviers sableux entre ces dunes montre que ces dernières se développent sur une semelle de graviers sableux, similaire à la couverture de graviers sableux plane.

La cartographie morpho-sédimentaire proposée ici, indique également deux épaves respectivement au SO et SE du secteur. Enfin, cette cartographie met en évidence les secteurs où du matériel sédimentaire a été excavé par l'extraction de granulats.

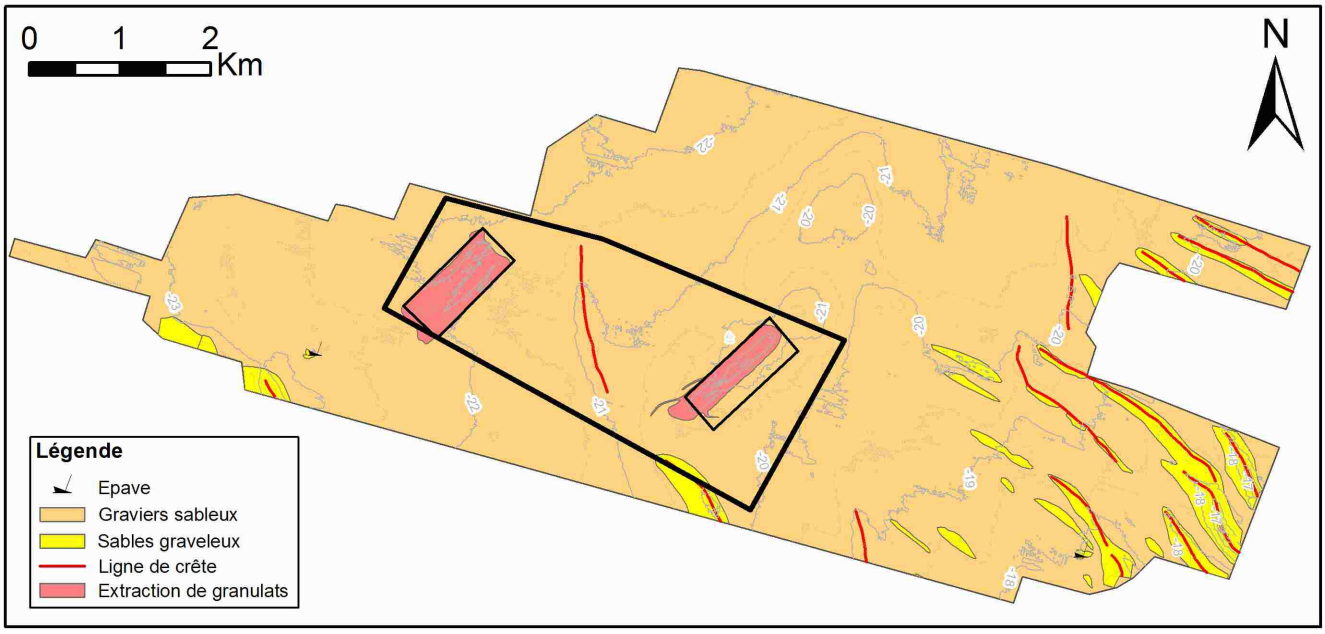


Figure 96 : Carte morpho-sédimentaire construite à partir des couvertures sonar et SMF réalisées lors de la campagne Granimp09b.

2.2.3. Variations spatio-temporelles

La carte morpho-sédimentaire, construite à partir des acquisitions de la campagne Granimp09b, indique que la couverture sédimentaire présente deux faciès à l'**échelle pluri-kilométrique,** donc à l'échelle des dépôts du panache turbide.

A l'**échelle du site expérimental,** seul le faciès des graviers sableux a été cartographié. Pour étudier d'éventuelles variations spatiales de cette couverture, non décelables par le sonar, une grille de prélèvement sédimentaire régulière a été réalisée lors de la campagne Granimp08a sur l'ensemble du site expérimental. Lors de cette campagne, les extractions avaient déjà débuté sur la zone A. Même si cette extraction était de très faible intensité, pour ne pas intégrer d'éventuels impacts, les stations de la zone A et de son pourtour (jusqu'à 500m) n'ont pas été prises en compte. Cette grille montre que la granulométrie de ces graviers sableux n'est pas complètement homogène mais ne présente pas de gradient directionnel, comme le montre les variations spatiales de la médiane (Figure 97).

Figure 97 : Carte de la médiane issue de la grille de prélèvement sédimentaire réalisée lors de la campagne Granimp08a. Rectangle gris : surface potentiellement impactée par les premières extractions sur la zone A.

Les réplicats effectués sur certaines stations avant le début des extractions montrent que même si la couverture **est homogène à l'échelle du site,** une variabilité à **l'échelle de la dizaine de mètres** est observée. Les proportions de graviers, sables et vases varient respectivement de plus ou moins 11,5 %, 11 % et 0,5 % (Figure 98). Ces variations sont plus marquées pour les deux modes principaux, celui des sables grossiers aux cailloux et celui des sables fins à moyens.

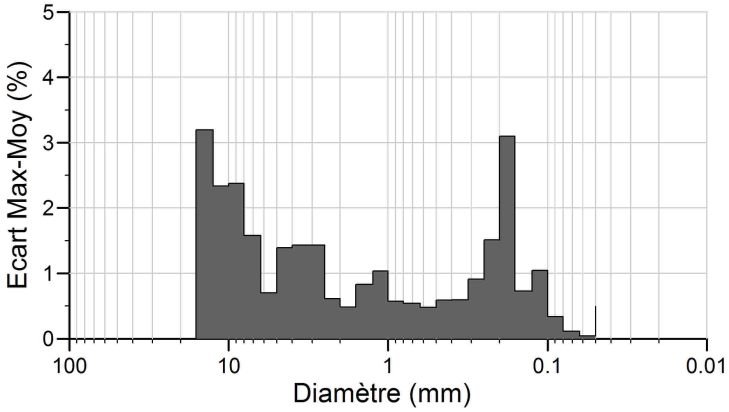


Figure 98 : Ecart du pourcentage par classe granulométrique entre les valeurs maximales et les moyennes pour les différents réplicats étudiés.

Les photographies sous-marines et les images vidéo confirment un paysage sous-marin peu accidenté, constitué de graviers sableux (Figure 99 A) avec des variations granulométriques à l'échelle décamétrique. En effet, ces images indiquent des passages plus ou moins graveleux au profit des sables (Figure 99, A et B). Cette variabilité décamétrique est confirmée par les travaux de Auffret et d'Ozouville (Auffret et d'Ozouville, 1985a) qui cartographient une couverture sédimentaire sableuse discontinue.

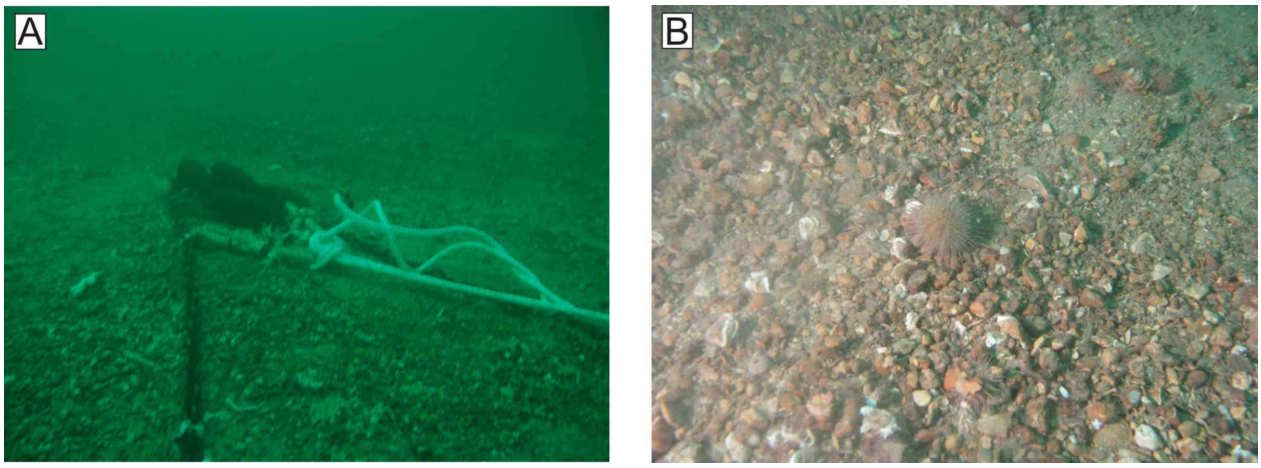


Figure 99 : Photographies sous-marines prises lors de plongée sur le milieu non impacté. A : Succession de passages plus graveleux et plus sableux autour de la ligne de mouillage d'un courantomètre; B : Macrophotographie du faciès de graviers sableux.

Les variations temporelles liées à la marée (cycle semi-diurne, ME-VE) n'ont pas eu d'influence sur la granulométrie.

La variabilité à **l'échelle annuelle** est connue à l'aide du suivi en 2008, 2009 et 2010 de stations sédimentaires en dehors des zones impactées. La comparaison des courbes granulométriques de ces stations montre une légère variabilité annuelle, plus ou moins importante d'une station à l'autre.

Dès lors, il est important d'associer cette variabilité saisonnière avec la variabilité à l'échelle spatiale du secteur d'expérimentation. Nous cherchons ici à déterminer l'enveloppe granulométrique du site intégrant

les variabilités spatiales du site expérimental et les variations annuelles. Celle-ci a été construite à partir (i) des prélèvements réalisés avant extraction (Granimp07), (ii) de la grille de prélèvement sédimentaire réalisée lors de la campagne Granimp08a, sans tenir compte des échantillons de la zone A et de son pourtour, et (iii) des échantillons non impactés, en dehors des zones de dépôt du panache pour les campagnes suivantes.

Elle est construite à partir du maximum et du minimum de chacune des classes granulométriques observées pour l'ensemble des échantillons. Même si cette enveloppe est relativement large, elle reste néanmoins caractéristique d'une couverture homogène constituée de graviers sableux bimodaux mal triés. Les vases et silts (<63 µm) sont peu abondants mais certains échantillons montrent des proportions atteignant 7%. Les stations qui présentent les proportions de sables fins à moyens et de fines (< 63 µm) les plus élevées font glisser la classification des sédiments des graviers sableux en graviers sableux légèrement vaseux.

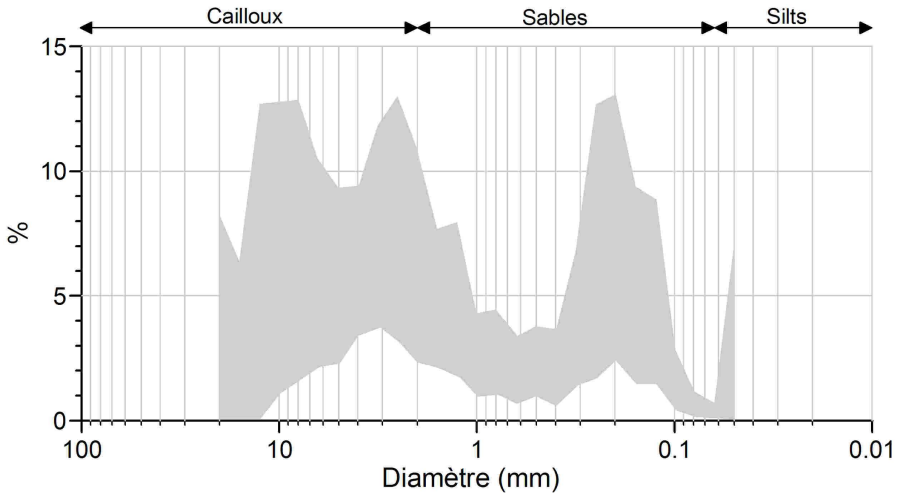


Figure 100 : Variabilité spatio-temporelle de la granulométrie de la couverture sédimentaire naturelle du secteur d'expérimentation.

L'évolution de la granulométrie **à l'échelle décennale** est étudiée à partir de prélèvements réalisés en 1990, 1993, 1998 et 2007 par l'UMR CNRS 6143 « M2C » à l'aide d'une benne Hamon. La benne Hamon échantillonne la couverture sédimentaire sur une épaisseur plus importante que la benne Shipeck. Par conséquent, pour une même station, des différences peuvent être observées du fait d'une variation verticale de la granulométrie. Toutefois, ces prélèvements indiquent que la couverture reste sablo-graveleuse avec deux modes principaux : un grossier étalé et un second plus fin autour des sables fins et moyens (Figure 101). L'ensemble de ces stations montre une augmentation de la fraction grossière et une diminution de la fraction de sable entre 1990 et 1993, puis une stabilisation entre 1993 et 1998 et enfin une diminution de la fraction grossière accompagnée d'une augmentation de la fraction de sable entre 1998 et 2007. En 2007, les proportions de ces deux modes sont proches de ceux de 1993, avec toutefois, un pic sableux plus grossier exclusivement centré autour des sables moyens.

La comparaison de ce pic sableux avec celui observé sur des prélèvements effectués par une benne Shipeck en 2007 laisse supposer une fraction sableuse plus grossière en profondeur.

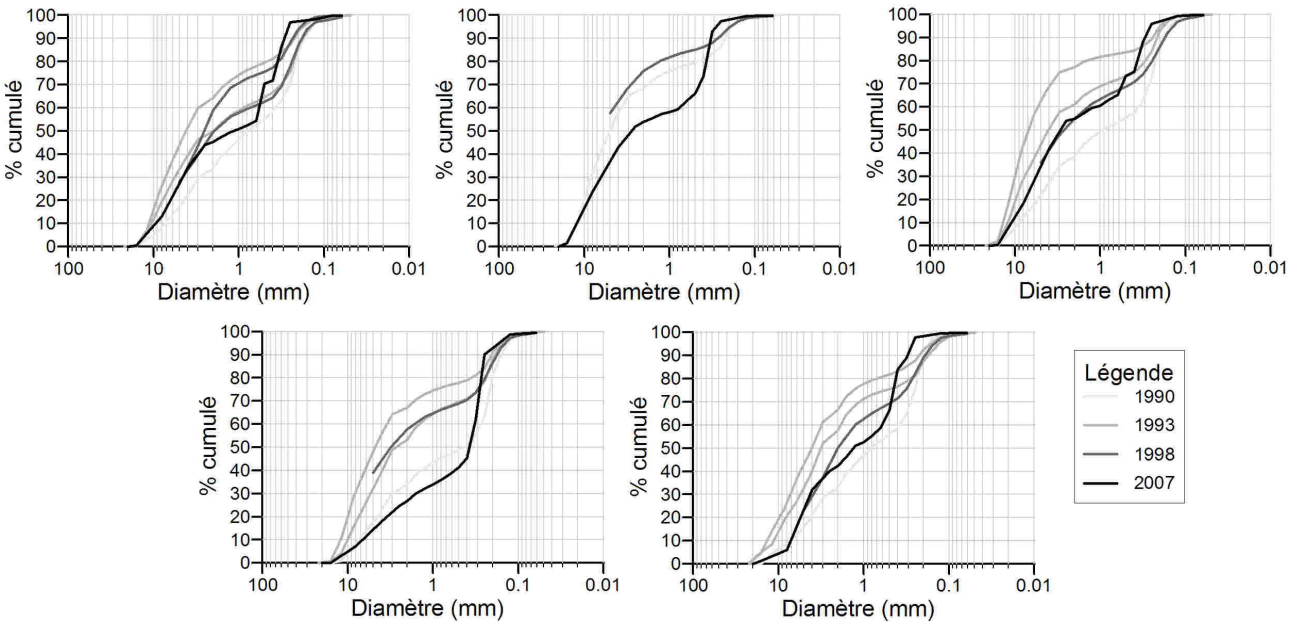


Figure 101 : Comparaison des courbes granulométriques des stations suivies entre 1990 et 2007 (source UMR CNRS 6143 « M2C »).

La comparaison de la cartographie d'Auffret et d'Ozouville (1985), réalisée à partir de deux couvertures sonar effectuées en 1982 et 1983, avec la cartographie morpho-sédimentaire de 2009 permet d'apporter quelques éléments sur l'évolution morpho-sédimentaire à **l'échelle pluri décennale**. Cette comparaison montre qu'un engraissement sableux est observé à l'Est du site expérimental. Toutefois, l'indisponibilité des profils sonar ayant permis d'établir la carte morpho-sédimentaire ne permet pas une comparaison directe des faciès acoustiques et donc d'affirmer avec conviction cet engraissement.

Une prospection sismique réalisée par l'UMR M2C (Caen) en 2005 et les carottes réalisées en 1972 par Beicip et en 1976 par le BRGM permettent d'étudier la **variabilité verticale** des dépôts sédimentaires. Les nappes alluviales holocènes sont recouvertes par une couche de sédiments plus fins (appelés « découverte » par les carriers) dont l'épaisseur comprise entre 0,2 et 1m est irrégulière. La partie la plus superficielle de cette couche représente la couche mobile, capable d'être mise en mouvement par les courants tidaux et la houle. Les carottes indiquent une hétérogénéité verticale avec une augmentation des éléments grossiers en profondeur, associés à un appauvrissement en silt (Figure 102, A et C) : sables légèrement graveleux (de 0 à 30 cm), graviers sableux (entre 70 cm et 1,40 m) et graviers (>1,40 m). Les sables légèrement graveleux représentent donc la découverte et la couverture sédimentaire superficielle du secteur. Dans les graviers, des lentilles plus sableuses peuvent s'intercaler (Figure 102, B). La comparaison des analyses granulométriques d'une carotte à l'autre, pour une même profondeur, ne montre pas de variabilité latérale importante de la stratigraphie à l'échelle du secteur expérimental.

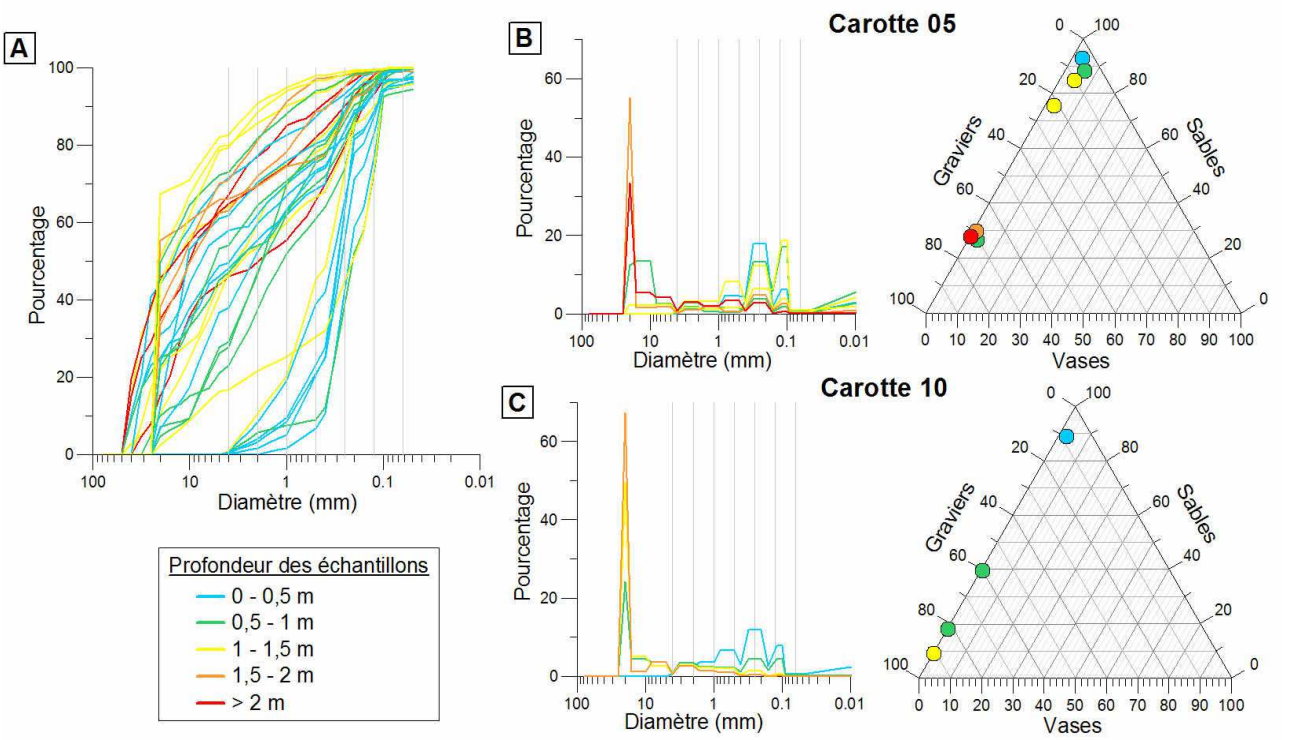


Figure 102 : Analyses granulométriques des carottes de 1972 et 1976.
A : Courbes cumulées de l'ensemble des analyses. B : Fréquence et diagramme ternaire d'une carotte montrant l'intercalation de lentilles sableuses au sein des graviers de la nappe alluviale. C : Fréquence et diagramme ternaire d'une carotte montrant le gradient positif vers les graviers en profondeur.

2.3. Courantologie à proximité du fond et transport sédimentaire

Le mouillage d'un ADP sur deux cycles de marée lunaire et celui d'un Aquadopp sur plusieurs cycles diurnes (Granimp08b, oct. 2008) permettent d'obtenir une bonne information de la variation des courants au gré des marées. A partir de ces mesures de courants et des proportions granulométriques de chacune des classes du sédiment, les flux instantanés charriés sont calculés sur l'ensemble d'un cycle ME/VE. Par intégration de ces flux instantanés, le transport résiduel est calculé et comparé aux figures de transport sédimentaire observé *in situ*.

2.3.1. Courantologie

L'analyse des courants sur l'ensemble de la colonne d'eau, primordiale pour l'étude du panache turbide, est détaillée dans le chapitre 2 (§ 2.1.1, p 79).

A proximité du fond, les courants sont plus faibles et dépassent les 0,60 $m.s^{-1}$ seulement lors des pics de flot et de jusant lors des VE. Lors des étales, leurs vitesses sont très faibles, environ 0,10 $m.s^{-1}$. Le flot est donc d'abord orienté vers le ESE puis vers le ENE alors que le jusant est essentiellement orienté vers l'Ouest. Toutefois, leurs directions sont légèrement déviées par rapport à celles des courants mesurés dans le reste de la colonne d'eau avec un azimut constamment plus faible de 10-15° (cf. Figure 49, p 81).

2.3.2. Flux sédimentaires instantanés

Les flux instantanés charriés sont calculés à partir de la formule de Van Rijn (1984), couramment employée en sédimentologie, et à partir de la formule de Wu *et al.* (2000) qui, en intégrant l'effet d'entrave, est plus adaptée aux sédiments hétérogènes qui caractérisent la Bassin oriental de la Manche (Blanpain, 2009).

La formule de Van Rijn (1984) est établie pour une granulométrie uniforme avec une médiane comprise entre 200 µm et 2 mm. Kleinhans et Van Rijn (2002) réadaptent cette formule afin d'intégrer les interactions entre les grains.

$$Q_{char,i} = \beta_i . D_i^{1,5} . \sqrt{(s-1)g} . \begin{cases} 0,053 . Tr_i^{2,1} . D_{50}^{*\,-0,3} & pour\ Tr < 3 \\ 0,1 . Tr_i^{1,5} . D_{50}^{*\,-0,3} & pour\ Tr < 3 \end{cases} \tag{12}$$

avec l'excès de contrainte de frottement normalisé :

$$Tr_i = \frac{\theta_i - \xi_i \theta_{cr,50}}{\theta_{cr,i}} \tag{13}$$

le diamètre du grain adimensionnel,

$$D_{50}^* = D_{50} \sqrt[3]{\frac{(s-1)g}{\nu^2}} \tag{14}$$

le coefficient de masquage-exposition ξ_i et la viscosité cinématique du fluide ν en m^2.s^{-1}.

Le coefficient de masquage-exposition est dans notre étude de 1 afin de ne pas prendre en compte ce phénomène dans le calcul.

Le paramètre de mobilité critique est estimé d'après la paramétrisation de la courbe définie par Shields (Van Rijn, 1984) :

$$\theta_{cr} = \begin{cases} 0,24 . D^{*\,-1} & pour\ D^* \leq 4 \\ 0,14 . D^{*\,-0,64} & pour\ 4 < D^* \leq 10 \\ 0,04 . D^{*\,-0,1} & pour\ 10 < D^* \leq 20 \\ 0,013 . D^{*\,0,29} & pour\ 20 < D^* \leq 150 \\ 0,055 & pour\ D^* > 150 \end{cases}$$

Le domaine de validité de la formule de Wu *et al.* (2000) est étendu, que ce soit en terme de granulométrie (médiane comprise entre 200 µm et 50 mm) ou d'intensité de forçage (paramètre de mobilité de Shields médian compris entre 0,009 et 4,076). La particularité de cette formule est la prise en compte d'un coefficient de masquage-exposition exprimé de manière probabiliste : le coefficient est le rapport des probabilités d'exposition et de masquage de chaque grain, en considérant que la surface d'exposition d'un grain a une distribution normale. La formule a été adaptée pour être exprimée directement en fonction de la contrainte de frottement de peau :

$$Q_{char,i} = CE \cdot \beta_i \cdot 0,0053 \cdot \left[\frac{\tau}{\tau_{cr,i}} - 1 \right]^{2,2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1 \right) \cdot g \cdot D_i^3} \quad (15)$$

Avec :

$Q_{char,i}$	le débit solide de la classe *i* en $m^3.m^{-1}.s^{-1}$;
CE	le coefficient d'entrave ;
τ	la contrainte de frottement de peau en $N.m^{-2}$;
$\tau_{cr,i} = (\rho_s - \rho_e) \cdot g \cdot D_i \cdot \theta_{cr} \cdot \xi_i$	la contrainte de frottement critique en $N.m^{-2}$;
$\xi_i = \left(\frac{p_{e,i}}{p_{m,i}} \right)^{-0,6}$	le coefficient de masquage-exposition ;
$p_{e,i} = \sum_{j=1}^{N} \beta_j \frac{D_i}{D_i + D_j}$	la probabilité d'exposition ;
$p_{m,i} = \sum_{j=1}^{N} \beta_j \frac{D_j}{D_i + D_j}$	la probabilité de masquage ;
$\theta_{cr} = 0,03$	le paramètre de mobilité critique ;
g	l'accélération de la pesanteur en $m.s^{-2}$;
ρ_s	la masse volumique des grains en $kg.m^{-3}$;
ρ_e	la masse volumique de l'eau en $kg.m^{-3}$;
β_i ; β_j	la proportion de la classe *i* (ou *j*) dans la couche de surface ;
D_i ; D_j	la taille moyenne des grains de la fraction *i* (ou *j*).

Les flux sédimentaires varient en fonction du disponible sédimentaire, de la force des courants sur le fond, de la houle, et de l'hétérogénéité granulométriques des particules.

Les variations des flux instantanés, charriés au cours des cycles semi-diurnes et d'un cycle ME/VE, sont calculées à partir des proportions granulométriques moyennes du site et des courants mesurés à proximité du fond grâce au mouillage d'un ADP (Granimp09b). L'influence de la houle est évaluée par le calcul des flux sans agitation, avec une agitation significative (H_s=1,88 m) et avec une agitation de tempête (H_s=4,24 m). Les flux instantanés sont maximaux lors des pics de flot et de jusant en VE avec ou sans agitation, avec des valeurs de l'ordre de 10^{-6} $m^3.m^{-1}.s^{-1}$(Figure 103). Ils sont minimaux lors des étales de PM et BM de ME avec des valeurs pouvant être inférieures à 10^{-17} $m^3.m^{-1}.s^{-1}$. L'agitation générée par la houle a tendance à réduire le contraste de valeur des flux entre les étales et les pics de courants avec une gamme principalement comprise entre 10^{-8} et 10^{-6} $m^3.m^{-1}.s^{-1}$. Avec agitation, les flux sont les plus faibles pour l'étale de PM où le maximum de hauteur d'eau engendre un effet plus faible de la houle sur le fond. Ces intensités de flux sont cohérentes avec les résultats de la modélisation des flux sédimentaires basés sur le modèle MARS (Cugier et Blanpain, 2011).

Sans agitation, lors des ME, se sont essentiellement les silts qui sont charriés (Figure 103). Plus le coefficient de marée augmente, plus les classes granulométriques remobilisées sont grossières. En VE, le flux de matériel est principalement constitué des sables fins puis des sables moyens avec temporairement,

une remobilisation affectant les particules jusqu'aux sables très grossiers. Avec une agitation significative, les particules jusqu'aux sables grossiers sont mobilisées, même lors des étales en ME. Les granules seront charriées lors des pics de flot et de jusant en VE. Lors des agitations exceptionnelles, l'ensemble du sédiment est charrié. La contribution de chacune des classes au flux global est conforme à leur représentation dans le sédiment. Ainsi cailloux, granules, sables moyens et fins sont donc les classes les plus représentées des flux en période de tempête.

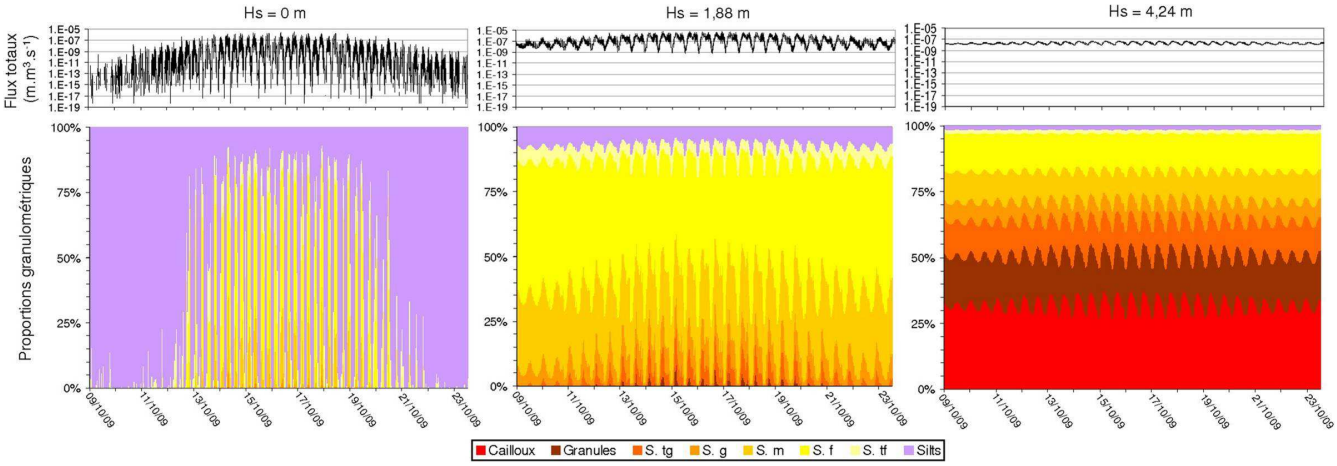


Figure 103 : Flux sédimentaires et contribution par classe granulométrique en fonction de l'agitation par la houle. Calcul effectué à partir de la formule de Wu et al. (Wu *et al.*, 2000).

2.3.3. Transport résiduel

L'orientation des dunes et l'exposition du flanc court de celle-ci renseignent sur les variations de la direction de la dynamique. A l'échelle de la couverture sonar-SMF, la direction de cette dynamique évolue selon un axe O-SO/E-NE. Au niveau du secteur expérimental, les secteurs sud et est présentent des directions de dunes de N 170° puis en allant vers le NE l'orientation des dunes évolue progressivement vers des directions de N 120°. La dynamique sédimentaire, qui est perpendiculaire aux lignes de crêtes des dunes, est donc orientée N 80° sur le site expérimental et son pourtour puis évolue progressivement vers N 30° au NE. Le site expérimental se situe donc à quelques kilomètres du changement de direction de la dynamique sédimentaire, associé à la proximité et à la morphologie du trait de côte. Ces directions sont également cohérentes avec les résultats de la modélisation des flux sédimentaires basés sur le modèle MARS (Cugier et Blanpain, 2011).

A l'échelle d'un cycle ME/VE, le courant résiduel à proximité du fond (1,25 m) est faible d'environ 0,013 m.s^{-1} orienté vers le SE à N 160° d'après les mesures au mouillage de l'ADP. Les vents forts agissent sur les courants du fond et modifient donc sensiblement la direction et la vitesse des résiduels des cycles semi-diurnes. Ce résiduel faible est orienté perpendiculairement aux petites dunes temporaires observées sur les zones d'extraction. Ceci confirme que ces structures sédimentaires sont éphémères et doivent être générées au cours des pics de flot et de jusant. Le résiduel calculé est également perpendiculaire aux dunes

de sables observées au SE du site d'étude. Cette différence d'orientation peut être induite par (i) une variation de la direction du résiduel à l'échelle pluri-kilométrique engendrée par la morphologie des fonds et la morphologie de la côte plus proche en allant vers le SE du site et/ou (ii) par un des courants dont la direction présente un azimut plus faible que celui observé à 1,25 m au dessus du fond.

Le calcul du résiduel des flux charriés est calculé en considérant que le flux est positif lorsqu'il est dirigé selon le résiduel du courant soit 160° (± 90°) et qu'à l'inverse, il est négatif 340° (± 90°). Le flux résiduel à l'échelle d'un cycle ME/VE, sans ajout d'une contrainte supplémentaire induite par la houle, est de 0,211 $m^3.m^{-1}$ d'après la formule de Kleinhans et VanRijn, (2002) et seulement de 0,019 $m^3.m^{-1}$ d'après la formule de Wu *et al.* (2000). Avec une houle, ces flux sont dans le même ordre de grandeur mais deviennent négatifs.

3. Dépôts de surverse

Pour vérifier les estimations de dépôts liés à la décantation du panache turbide (cf. Chapitre 2 § 2.2.7, p 116), les modifications de la couverture sédimentaire entre 2007 et 2010 sont étudiées autour des zones d'extraction. La modification de la morphologie est étudiée à partir : (i) de relevés SMF fréquents ciblés sur la zone d'extraction et son pourtour proche de manière à englober la zone potentielle des dépôts de sable, et (ii) d'un relevé SMF étendu réalisé lors de la campagne Granimp09b de manière à englober la zone potentielle des particules fines du panache. La modification des sédiments est étudiée à partir : (i) de couvertures sonar de la zone d'extraction et de son pourtour et d'une couverture sonar étendue acquise lors de la campagne Granimp09b et (ii) du suivi de stations sédimentaires réparties à des distances variables des zones d'extraction, dans le sens des courants, dans les zones de dépôts potentiels des sables et des particules fines du panache.

Ce paragraphe présente les modifications acoustiques et sédimentaires de la couverture liées à ces dépôts. Les impacts sur la bathymétrie sont inexistants pour les conditions de l'extraction de l'étude.

3.1. Faciès acoustique

Les mosaïques sonar réalisées au cours des extractions, sur les zones extraites et leurs périphéries, ne montrent pas de variation du faciès acoustique comparativement aux mosaïques sonar réalisées avant extraction. Ceci vaut sur la zone A où 193 278 m^3 de matériel ont été extraits, et sur la zone B où le cumul des extractions est plus important (438 209 m^3).

La mosaïque sonar étendue de la campagne Granimp09b a été acquise pour obtenir une image de l'ensemble des zones potentielles de dépôt et au-delà. Elle permet d'avoir une meilleure visualisation des éventuelles modifications acoustiques des fonds induits par des dépôts de surverse. Toutefois, cette mosaïque ne montre pas de modification de la couverture sédimentaire autour des zones d'extraction et notamment autour de la zone B en cours d'extraction lors de l'acquisition (223 145 m^3 cumulés). Aucune modification n'est également observée dans les zones plus éloignées au niveau des zones potentielles de dépôts des particules. Là aussi, les spectres acoustiques sont comparés pour mettre en évidence une éventuelle modification du mode acoustique (Figure 104). Des spectres propres au milieu naturel (en dehors des zones de dépôts) sont comparés aux spectres de la couverture à 500 m, 1 km et 2 km de la zone B dans le sens du jusant et du flot. L'objectif de cette comparaison est de mettre en évidence un éventuel gradient décroissant du signal acoustique lié à un tri granulométrique vers les fines des dépôts en s'éloignant de la zone extraite. Là aussi, les spectres sont décalés de ceux de la mosaïque anté-extraction, liés à l'utilisation d'un troisième type de sonar à balayage latéral. Les spectres des potentielles zones de dépôt sont similaires malgré leur éloignement de la zone d'extraction. Par contre, ce spectre, malgré une forme similaire, présente un pic supérieur de 5 unités par rapport au milieu non impacté. Cette différence est probablement induite par des

caractéristiques d'acquisition différentes entre ces deux secteurs (longueur filée, hauteur du poisson, ...). En effet, s'il y avait dépôt, le signal acoustique devrait être moins fort car absorbé par des particules sableuses plus fines que celles de la couverture gravelo-sableuse. Par conséquent, cette analyse de spectre ne met pas en évidence la présence de dépôts.

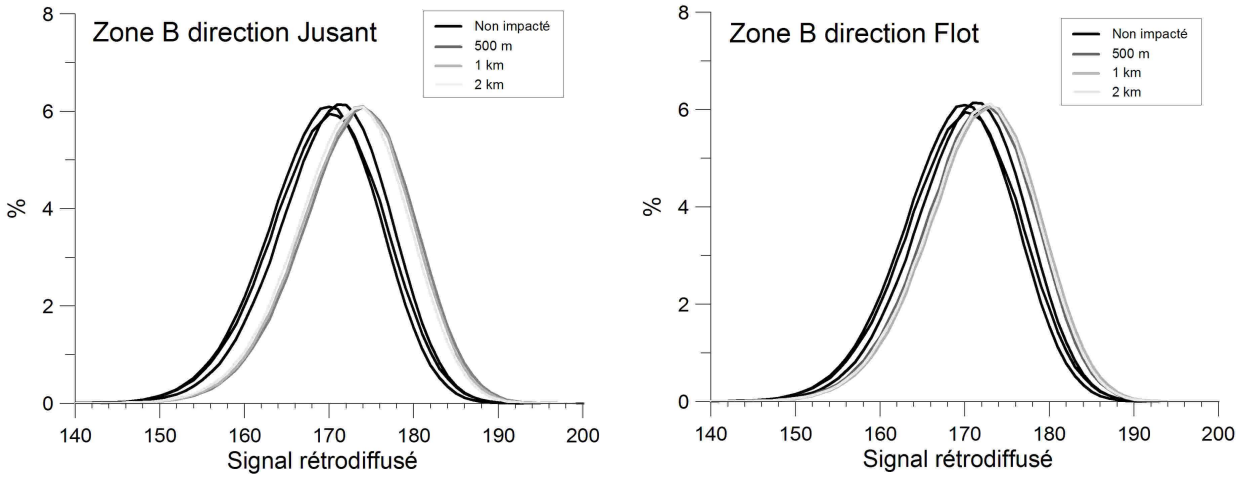


Figure 104 : Comparaison des courbes de fréquences du signal acoustique de secteur non impacté et impacté.

3.2. Sédiments

Pour tenter de mettre en évidence d'éventuels dépôts de sables et de particules fines en provenance de la surverse, non détectés par le sonar, une analyse granulométrique en deux approches a été adoptée. La première est une comparaison graphique des courbes granulométriques de ces stations avec l'enveloppe granulométrique spatio-temporelle des graviers-sableux non impactés. La seconde est une approche statistique. Un test de Kruskal-Wallis est effectué entre les échantillons ayant permis de construire l'enveloppe spatio-temporelle du milieu non impacté avec deux groupes de stations potentiellement impactés par les dépôts : un premier constitué des stations à proximité des zones d'extraction et un second formé de stations plus éloignées.

A la fin des extractions sur la zone A (193 278 m^3 extraits) **et pour la dernière campagne de prélèvement sur la zone B** (293 635 m^3), la quasi-totalité des courbes granulométriques des stations se maintiennent dans l'enveloppe du milieu non impacté. Les zones potentielles de dépôt sont toujours constituées de graviers sableux bimodaux avec un premier mode étalé des sables très grossiers aux granules et un second mode plus resserré des sables fins aux sables moyens. La valeur du coefficient de classement reste faible et constante. Seuls quatre échantillons (81, 85, 41 et 25) montrent des proportions de sables et de silts sensiblement supérieures à celles du milieu naturel. Ces prélèvements sont tous situés autour de la zone B, à des distances inférieures à 1 km, et correspondent au volume extrait cumulé le plus élevé, à savoir 304 878 m^3 (en 17 mois). Le mode des sables moyens à fins est dans des proportions similaires au milieu naturel. Toutefois, certains prélèvements montrent des proportions de certaines coupures granulométriques dans ces sables supérieures à l'enveloppe. Une augmentation de 1 % dans les sables moyens est observée

pour l'échantillon 81, de 1 % et 2,5 % dans les sables fins et silts pour l'échantillon 85 et de 2,5 % dans les sables fins pour l'échantillon 41 (Figure 105).

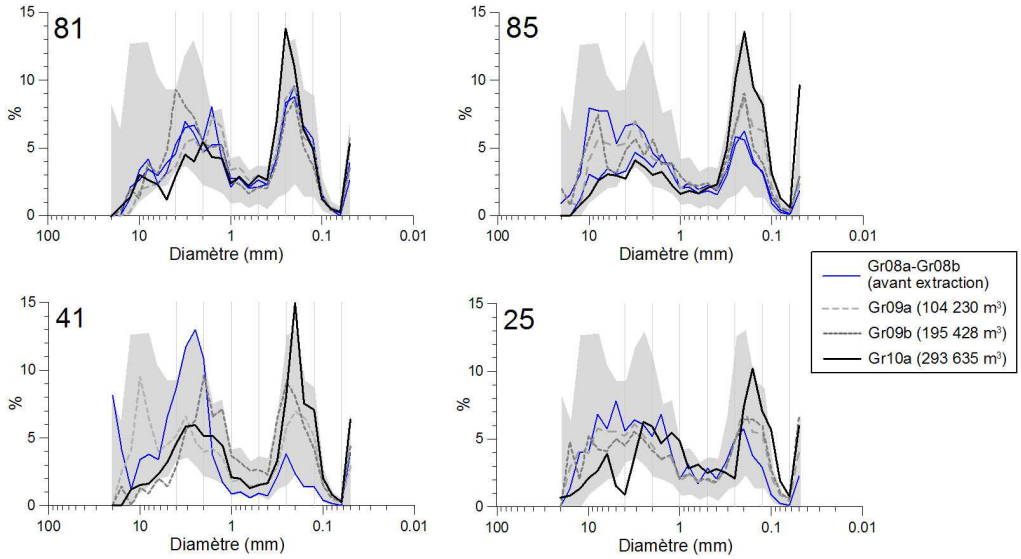


Figure 105 : Spectre granulométrique des stations sédimentaires autour des zones d'extraction sortant de l'enveloppe granulométrique naturelle.

Au cours de l'extraction, **l'évolution des spectres granulométriques** montre trois types de réponse. Un premier type d'échantillon ne montre pas d'évolution particulière des proportions de sables et de silts en fonction de l'augmentation des volumes extraits. Ces stations sont situées à proximité des zones d'extraction au Nord (< 250 m). Un second type de station montre une augmentation progressive des sables et silts (Figure 106, échantillons 7, 111 et 139). Ces stations sont généralement à proximité de la zone d'extraction (< 250 m) à l'O, au S et à l'E. Enfin, un troisième type présente une augmentation puis une stabilisation des sables et silts (Figure 106, échantillons 63, 61 et 38). Les stations montrant le plus nettement ce gradient sont situées à proximité des zones d'extraction (< 250 m). Sur la zone B, les stations à proximité de la zone d'extraction montrent une augmentation préférentielle des sables par rapport aux silts.

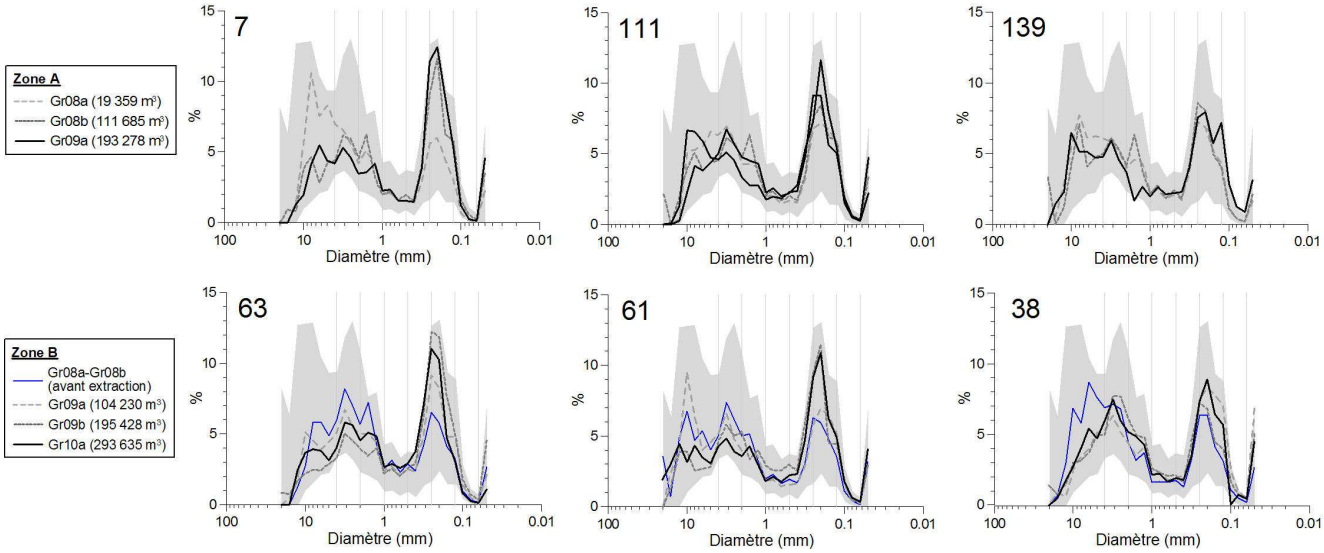


Figure 106 : Spectre granulométrique des stations sédimentaires montrant une augmentation des sables et silts au cours de l'extraction sans sortir de l'enveloppe naturelle.

Plusieurs stations autour des zones d'extraction montrent une évolution progressive de leur granulométrie vers des teneurs en sables et vases plus importantes. Toutefois, les stations non impactées, en dehors des zones potentielles de dépôts, présentent également la même évolution granulométrique. La construction de fuseaux d'évolution des graviers, sables et vases permet de distinguer l'évolution respective des stations situées à l'intérieur et en dehors des zones potentielles de dépôts (Figure 107). Le point d'origine de ces fuseaux est un échantillon type du milieu naturel construit à partir de la moyenne des proportions de chacune des trois classes granulométriques principales (graviers, sables, vases).

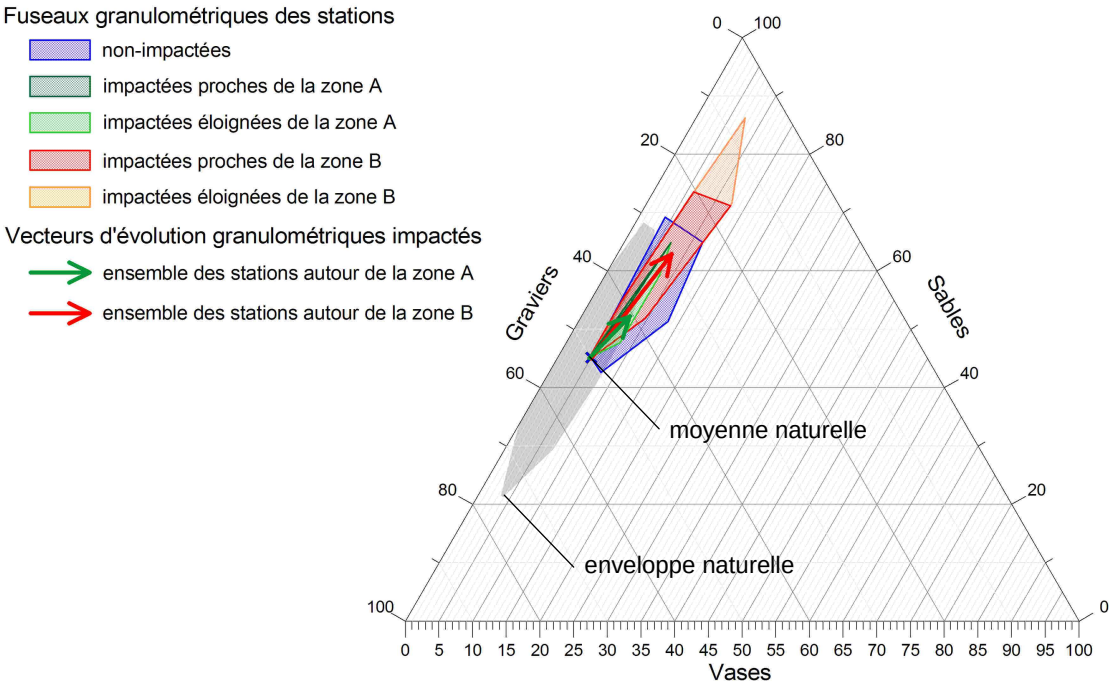


Figure 107 : Représentation de l'évolution granulométrique des stations sédimentaires sous forme de fuseau rapporté aux proportions granulométriques moyennes de l'enveloppe naturelle sur un diagramme ternaire (gravier, sable et vase).

Le fuseau des stations non impactées indique une évolution relativement hétérogène essentiellement en direction des sables et dans une moindre mesure vers les vases. Les fuseaux des zones impactés montrent dans l'ensemble une évolution plus homogène quasi exclusivement orientée vers les sables. Les fuseaux impactés de la zone A et de la zone B sont maintenus à l'intérieur du fuseau naturel mais sont plus resserrés en direction des sables. Le fuseau des stations impactées proche de la zone A est encore plus resserré vers les sables que celui des stations plus éloignées. Ce dernier indique une possible augmentation des vases en fonction de la distance du dépôt. Les fuseaux des stations impactées de la zone B sont plus larges que ceux de la zone A. Le fuseau des stations éloignées de la zone B est plus allongé vers les sables que celui des stations à proximité de la zone B. Cet allongement est provoqué par une seule station (41) située au sud à proximité d'une dune de sable. Il est donc difficile de distinguer la part d'influence des dépôts de surverse de celle liée à l'évolution de la couverture mobile dunaire au droit de cette station. Sans cette station, le fuseau des stations éloignées de la zone B est moins allongé que celui des stations proches. Par conséquent, sur la

zone B où les extractions sont plus intenses, il semble que (i) l'évolution vers les sables et vases est plus marquée pour les secteurs proches de la zone d'extraction que pour ceux de la zone A et que (ii) l'évolution de stations plus éloignées est plus hétérogène avec une augmentation de vase couplée aux sables.

Les tests statistiques de Kruskal-Wallis entre les groupes des stations des périphéries proches et éloignées de la zone A et de la zone B permettent de mettre en évidence des différences significatives en fonction du cumul des extractions (Annexe 3).

Pour la zone A, les stations à proximité de la zone d'extraction (< 250 m) montrent une augmentation significative des sables fins à moyens dès la campagne Gr08b (111 685 m^3). Lors de la campagne Gr09a, la proportion de sables très fins devient également anormalement élevée. Pour les stations en périphérie éloignée (800 m), l'augmentation des sables très fins à moyens n'est significative seulement à partir de la campagne Gr09a (193 278 m^3). Toutefois, les extractions ayant déjà débuté sur la zone B (104 230 m^3) pour la campagne Gr09a, cette augmentation de sables peut être également renforcée par les dépôts des panaches issus de l'extraction sur la zone B.

Pour la zone B, une augmentation des proportions des sables très fins et moyens est observée avant le début des extractions. Ceci peut être dû au dépôt ou à la reprise des dépôts de la zone A par la dynamique sédimentaire. Après le début des extractions, les proportions de sables très fins à moyens sont en excès dès Gr09a (104 230 m^3) et ceux des sables moyens le deviennent à partir de Gr10a (293 635 m^3). Les stations éloignées sont rapidement impactées des silts aux sables fins avec des proportions de sables fins plus fortes pour Gr10a.

Par conséquent :

- les stations proches sont impactées par une augmentation de la proportion des sables très fins à moyens dès 100 000 m^3 sur 7 mois et par une augmentation de sables moyens dès une extraction de 300 000 m^3 sur 17 mois.
- les stations éloignées sont impactées par une augmentation des silts aux sables fins dès 100 000 m^3 en 7 mois mais ne sont pas visibles si l'extraction est moins fréquente, comme vu sur la zone A où l'extraction est étalée sur 12 mois.
- Des zones plus éloignées (3 km) peuvent être également impactées par une augmentation de la proportion des silts aux sables fins due aux dépôts ou à leur reprise par la dynamique sédimentaire.

4. L'excavation

Le premier objectif de cette partie est de déterminer les caractéristiques de l'impact direct induit par l'excavation de sédiments au droit de la zone d'extraction à savoir la modification de la morphologie du fond.

Trois échelles spatiales sont distinguées : (i) le sillon, (ii) la dépression et (iii) la zone d'extraction. Pour ces différentes échelles, les conséquences sur la nature des fonds et la courantométrie sont étudiées quand les données le permettent. Enfin, l'influence des pratiques d'extraction sur ces impacts est étudiée.

4.1. Le sillon

Un sillon est l'empreinte sur le fond de l'excavation de sédiments par aspiration lors d'un unique passage de la tête d'élinde.

Le tracé d'un sillon reflète directement la navigation de la DAM. Ils sont globalement rectilignes hormis en bout de profil (au bout de la zone d'extraction), où la giration de la drague dessine une trace en arc de cercle. En effet, lors de la giration, la plupart des dragues maintiennent l'élinde sur le fond et l'aspiration de matériel sédimentaire. Nous considérons qu'un nouveau sillon est créé à chaque giration de la DAM.

4.1.1. Morphologie

La morphologie des sillons est étudiée à partir des MNT précis construits au pas de 1 m grâce aux relevés SMF.

Précisons que les relevés SMF sont réalisés plusieurs jours, voire plusieurs mois, après l'extraction de la zone sondée et que, par conséquent, une restauration morphologique et sédimentaire peut déjà avoir eu lieu. De ce fait, l'étude de la morphologie des sillons est basée sur une sélection de sillons générés au plus proche des dates d'acquisition des couvertures bathymétriques (de quelques semaines à plusieurs mois).

Pour étudier la morphologie des sillons en fonction du protocole d'extraction, à savoir le type d'élinde (california ou monobloque) et le débit de la pompe d'aspiration, des sillons générés par des dragues différentes ont été sélectionnés. L'étude morphologique des sillons en fonction de l'orientation de l'extraction par rapport aux courants tidaux a été effectuée en distinguant deux orientations de sillons respectivement parallèles (N40° à N60°) et perpendiculaires (N130° à N150°) à la plus grande longueur de la zone d'extraction.

La morphologie des sillons est ici décrite par leur largeur, leur longueur, leur profondeur (ou approfondissement) et leurs pentes.

Pour chaque sillon étudié, les largeurs, profondeurs et pentes ont été moyennées sur plusieurs dizaines de mètres afin d'intégrer les variations longitudinales de ces paramètres.

Leurs limites sont marquées par la modification de la topographie des fonds visible sur les MNT au pas de 1 m (Figure 108). Dans notre cas, où la topographie en pente douce (< 1°) et relativement uniforme, l'augmentation des pentes est un bon marqueur permettant de définir les limites morphologiques d'un sillon.

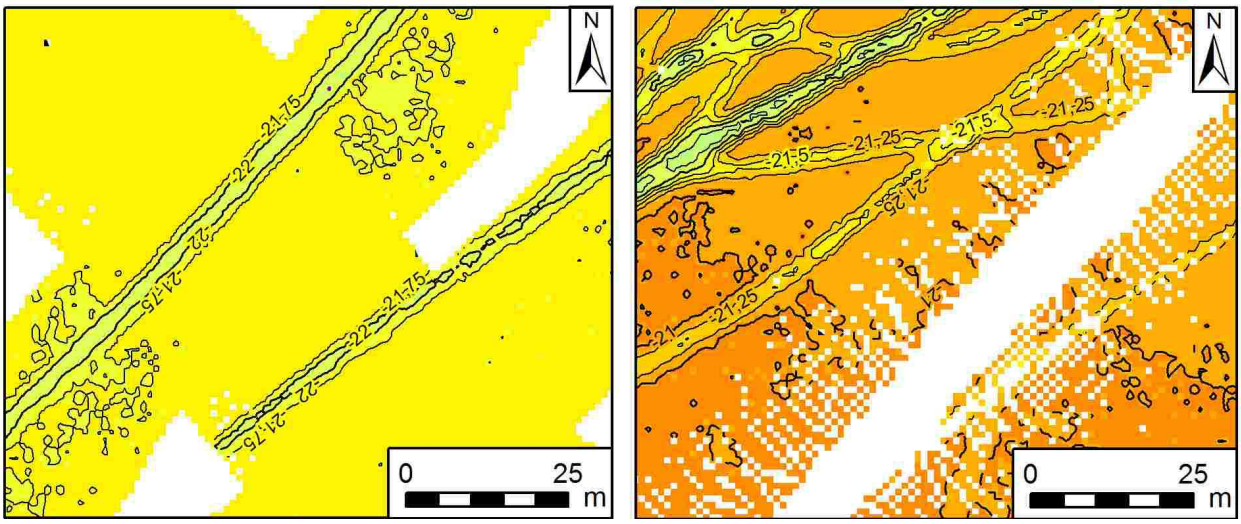


Figure 108 : Exemple de sillons isolés : à gauche, générés par la DAM Charlemagne, (couverture bathymétrique de Granimp08a), et à droite, générés par la DAM Scelveringhe (couverture bathymétrique de Granimp08b).

a. Morphologie d'ensemble

- Longueur

L'extraction a généralement lieu dans le sens de la plus grande longueur de la zone d'extraction. La longueur d'un sillon dépend des dimensions de la zone d'extraction (Zone A : 0,520×1,230 km ; Zone B : 0,480×1,280 km) et donc du cap emprunté par la DAM. Les têtes d'élinde dépassent rarement le périmètre autorisé, par conséquent la longueur d'un sillon est généralement inférieure à celle de la zone d'extraction. Pour les sillons parallèles (N40° à N60°) et perpendiculaires (N130° à N150°) à la plus grande longueur de la zone d'extraction, leur longueur est respectivement inférieure à 1 200 m et inférieure à 450 m.

- Morphologie de la section transversale d'un sillon

La largeur, l'approfondissement et les pentes caractérisent la morphologie de la section transversale d'un sillon.

La section transversale d'un sillon montre : (i) qu'ils sont formés de deux flancs dont les pentes sont plus fortes que celles du milieu non impacté et (ii) que les directions des lignes de plus grande pente de ces flancs sont opposées à 180°. Entre ces deux flancs, le centre de la section transversale du sillon est formé d'une zone plus plate dont les pentes sont plus proches de celles du milieu. Cette section transversale est globalement symétrique.

Une section transversale type d'un sillon a été construite à partir de la moyenne des sections transversales de sillons, tous types de DAM confondus (Figure 109).

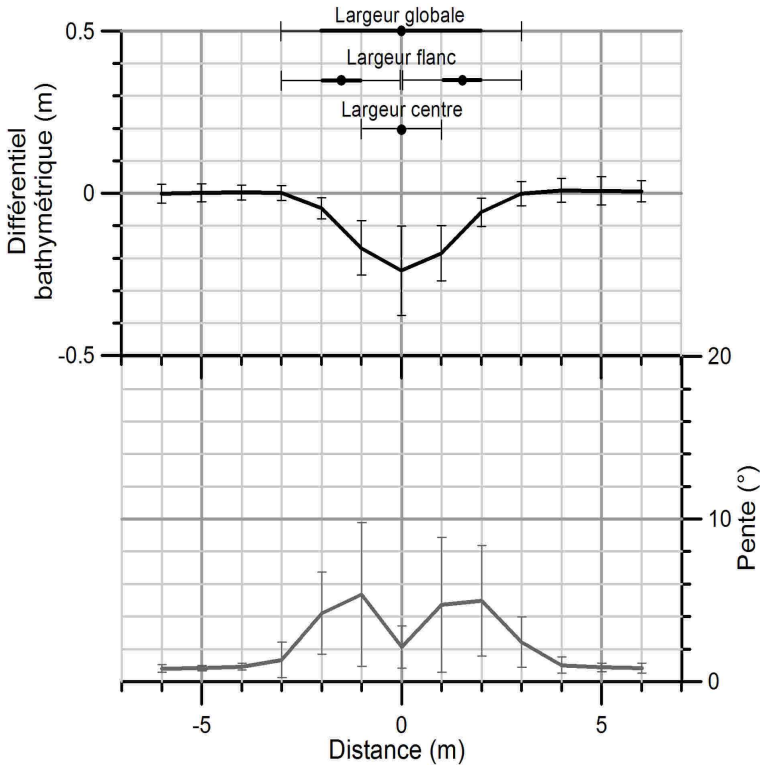


Figure 109 : Section transversale type d'un sillon (approfondissement et pentes).

La largeur globale de cette section est définie par la distance séparant le début des deux flancs et le début de l'augmentation des pentes. La largeur est comprise entre 4 et 8 m avec une moyenne de 5 m (± 1m).

La largeur de chacun des deux flancs est de 2 m (± 1 m). Leurs pentes sont comprises entre 2 et 10° avec une moyenne de 3,5° (± 10°). Ces valeurs sont maximales au milieu du flanc et diminuent progressivement en allant vers le centre et vers l'extérieur du sillon.

L'approfondissement global est défini par la différence de profondeur entre l'état initial (avant extraction) et la profondeur du centre du sillon (systématiquement le point le plus bas). L'approfondissement est compris entre 0,08 et 0,44 m avec une moyenne de 0,24 m (± 0,10 m).

La largeur moyenne du centre du sillon est de 1 m (± 1 m). La pente est comprise entre 1,5 et 4° avec une moyenne de 2°.

Le volume de sédiments excavés moyen sur la largeur du sillon est de 0,7 $m^3.m^{-1}$ linéaire.

Ces valeurs sont des moyennes et les gammes représentent les valeurs maximales et minimales sans distinction de type de DAM. D'une drague à une autre, ces valeurs peuvent donc varier.

De plus, rappelons que ces valeurs sont moyennées sur des tronçons de sillon de plusieurs dizaines de mètres de long. Par conséquent, elles peuvent varier selon l'axe longitudinal du sillon.

b. Influences des pratiques d'extraction

- Type de drague

L'analyse des paramètres morphologiques des sections transversales moyennes de trois types de dragues (SandHarrier, Scelveringhe et Charlemagne) permet de mettre en évidence des facteurs de contrôle de la morphologie des sillons propres aux outils d'extraction, comme le type d'élinde et le débit d'aspiration.

Il y a une nette différence entre les paramètres morphologiques d'une drague au faible débit d'aspiration (SandHarrier) et ceux d'une drague au fort débit d'aspiration (Scelveringhe et Charlemagne). Pour une drague au faible débit, la largeur, l'approfondissement, les pentes sont plus faibles. Les volumes de sédiments excavés moyens seront également plus faibles, de 0,26 $m^3.m^{-1}$ pour la SandHarrier, et respectivement de 0,88 et 0,95 $m^3.m^{-1}$ pour la Scelveringhe et la Charlemagne (Figure 110).

Le test statistique de Kruskal-Wallis (seuil de signification de 0 ,05) montre qu'il existe une différence significative entre les pentes des flancs du sillon généré par la Scelveringhe et celui généré par la Charlemagne. Les plus faibles valeurs de pente de la Scelveringhe, par rapport à celles de la Charlemagne, peuvent être expliquées par des sillons générés plus récemment pour la Scelveringhe. En effet, les sections transversales pour la Charlemagne ont été observées 2 mois après l'extraction alors que celles de la Scelveringhe ont été observées 7 mois après. Une restauration plus importante a pu avoir lieu sur les sillons générés par la Scelveringhe.

		Drague		
		SandHarrier	Scelveringhe	Charlemagne
	Elinde (type)	Californian	Mono-bloque	Mono-bloque
	Puissance d'aspiration (m3/h)	4 000		10 391
Largeur m	**Moyenne**	**4.33**	**6.00**	**6.50**
	Ecart Type	0.58	0.00	1.29
	Maximum	5.00	6.00	8.00
	Minimum	4.00	6.00	5.00
Approfondissement m	**Moyenne**	**0.11**	**0.30**	**0.31**
	Ecart Type	0.04	0.07	0.10
	Maximum	0.14	0.36	0.44
	Minimum	0.08	0.22	0.22
Pente (centre) °	**Moyenne**	**1.72**	**1.85**	**2.80**
	Ecart Type	0.42	0.55	0.98
	Maximum	2.20	2.94	4.15
	Minimum	1.40	1.85	1.96
Pente (flanc) °	**Moyenne**	**3.43**	**4.55**	**8.28**
	Ecart Type	1.51	1.75	3.25
	Maximum	5.06	7.88	12.99
	Minimum	2.08	4.55	5.89

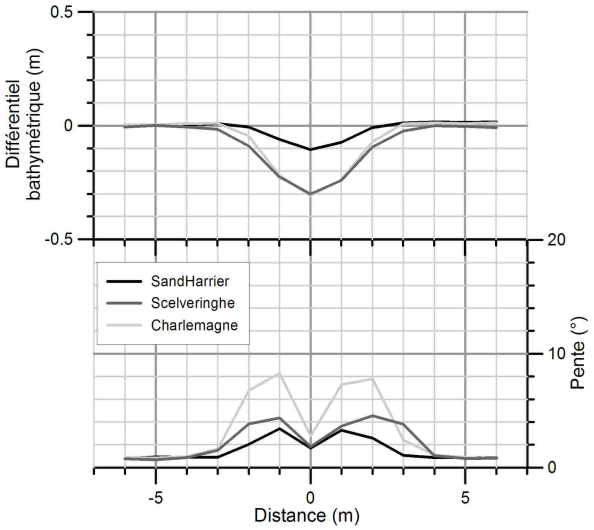


Figure 110 : Paramètres morphologiques de la section transversale moyenne d'un sillon selon le type de drague.

- Orientation du sillon par rapport au courant dominant

L'effet de l'orientation de l'extraction sur la morphologie de la section transversale d'un sillon a été étudié à partir de la comparaison de sections transversales types de sillons générés par la Charlemagne, parallèlement, puis perpendiculairement à la plus grande longueur de la zone d'extraction.

La morphologie de la section transversale est sensiblement modifiée selon l'orientation des sillons par rapport aux courants. Formée perpendiculairement au courant, la section est plus large (6,5 m en moyenne contre 4,5 m) et les pentes sont légèrement plus faibles (Figure 111). L'approfondissement est globalement similaire. Le test statistique de Kruskal-Wallis (seuil de signification de 0,05) sur ces différentes variables montre que les différences de pente (flanc et centre) sont significatives contrairement à l'approfondissement. Ces différences peuvent être expliquées par le début d'une restauration plus importante pour des sillons perpendiculaires au courant dominant. La section transversale du sillon est symétrique. En effet, le test de Kruskal-Wallis (seuil de signification de 0,05) entre les pentes du flanc bâbord et du flanc tribord montre que les différences de valeurs ne sont pas significatives.

Par contre, pour un sillon formé parallèlement au courant dominant, la section transversale du sillon est dissymétrique. En effet, le test de Kruskal-Wallis (seuil de signification de 0,05) entre les pentes du flanc bâbord et de celle du flanc tribord montre que les différences de valeurs sont significatives. Le flanc bâbord est moins abrupt. Cette dissymétrie peut être induite par une forte composante orthogonale des courants contemporains à la création des sillons étudiés. Ceci aurait pour conséquence d'incliner l'élinde aspiratrice et de générer un sillon dissymétrique.

Le volume moyen de sédiments excavés par la Charlemagne pour un sillon formé perpendiculairement et parallèlement au courant est respectivement de 0,88 et 0,85 $m^3.m^{-1}$.

		Drague	
		Charlemagne	Charlemagne
	Elinde (type)	Mono-bloque	Mono-bloque
	Puissance d'aspiration (m3/h)	10 391	10 391
	Orientation par rapport au courant	Perpendiculaire	Parallèle
Largeur m	**Moyenne**	**6.50**	**4.50**
	Ecart Type	1.29	0.71
	Maximum	8.00	5.00
	Minimum	5.00	4.00
Approfondissement m	**Moyenne**	**0.31**	**0.34**
	Ecart Type	0.10	0.00
	Maximum	0.44	0.34
	Minimum	0.22	0.33
Pente (centre) °	**Moyenne**	**2.80**	**5.89**
	Ecart Type	0.98	0.17
	Maximum	4.15	6.01
	Minimum	1.96	5.77
Pente (flanc) °	**Moyenne**	**8.28**	**10.79**
	Ecart Type	3.25	1.06
	Maximum	12.99	11.54
	Minimum	5.89	10.04

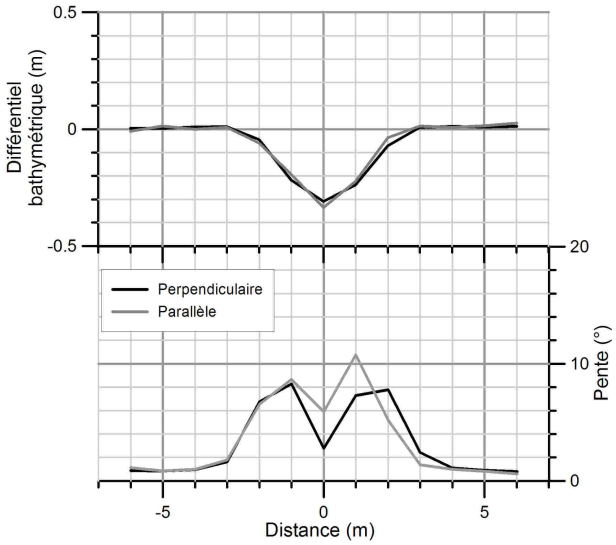


Figure 111 : Paramètres morphologiques des sections transversales moyennes d'un sillon creusé par la Charlemagne, perpendiculairement et parallèlement au courant dominant (approfondissement et pentes).

- Sens de l'extraction par rapport au courant

L'influence du sens de l'extraction sur la morphologie de la section transversale d'un sillon a été étudiée à partir de la comparaison de sections transversales de sillons types générés par la Charlemagne, avec et à contre-courant (cas de sillons creusés parallèlement à la plus grande longueur de la zone d'extraction).

Le sens de l'extraction semble modifier sensiblement la morphologie de la section transversale (Figure 112). Pour une extraction contraire au courant, l'approfondissement et les pentes des flancs sont légèrement supérieurs. Le test statistique de Kruskal-Wallis (seuil de signification de 0,05) montre que les différences de pentes des flancs et d'approfondissement sont significatives contrairement aux pentes du centre du sillon.

Le volume de sédiments excavés moyens par la Charlemagne pour un sillon contre - et avec courant est respectivement de 0,80 et 0,65 $m^3.m^{-1}$. Ces différences peuvent être expliquées par un meilleur rendement de l'aspiration à contre-courant.

		Drague	
		Charlemagne	Charlemagne
	Elinde (type)	Mono-bloque	Mono-bloque
	Puissance d'aspiration (m3/h)	10 391	10 391
	Sens de l'extraction	Contre courant	Avec courant
Largeur m	**Moyenne**	**6.06**	**5.90**
	Ecart Type	1.39	1.83
	Maximum	9.00	10.00
	Minimum	3.00	4.00
Approfondissement m	**Moyenne**	**0.26**	**0.22**
	Ecart Type	0.04	0.03
	Maximum	0.35	0.28
	Minimum	0.20	0.17
Pente (centre) °	**Moyenne**	**1.96**	**2.20**
	Ecart Type	1.01	1.04
	Maximum	4.93	4.58
	Minimum	0.57	0.61
Pente (flanc) °	**Moyenne**	**6.71**	**5.89**
	Ecart Type	2.35	1.75
	Maximum	11.43	7.98
	Minimum	2.82	2.80

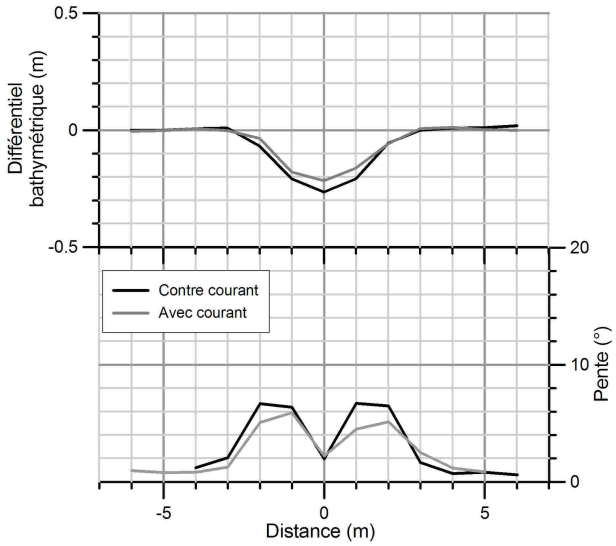


Figure 112 : Paramètres morphologiques des sections transversales moyennes d'un sillon creusé par la Charlemagne à contre-courant et avec courant. Cas de sillons perpendiculaires au courant dominant.

c. Comparaison volume excavé et volume extrait

A partir des informations d'exploitation fournies par les carriers (navigation de la DAM et volume chargé), le volume extrait retenu dans le bassin de chargement par mètre linéaire parcouru par la DAM est calculé.

Ce volume est comparé au volume moyen de l'excavation pour les sillons isolés les plus « frais » (de moins de 2 mois). En moyenne, le volume extrait retenu dans le bassin de chargement est de 0,69 $m^3.m^{-1}$ linéaire contre un volume d'excavation moyen de 0,87 $m^3.m^{-1}$ linéaire. On peut supposer que cette différence de 0,18 $m^3.m^{-1}$ est induite par l'existence d'un volume de sédiments remis en suspension, par l'élinde sur le fond et par la surverse. Le volume de sédiments chargés dans le bassin représente seulement 80 % du volume excavé soit un différentiel volumique de 20 %. Dans le chapitre 2, nous avions montré que 8,4 % du volume du chargement était rejeté par surverse, ce qui représente 6,72 % du volume excavé. Par conséquent, le différentiel volumique est de 13,28 % par rapport au volume excavé.

La comparaison des volumes excavés avec les volumes chargés pour des sillons formés avec et contre-courant montre l'influence du sens d'extraction. Pour les sillons étudiés dans ce cas présent, le

différentiel volumique sur le fond est de 16 % pour une extraction à contre-courant et est nul pour une extraction avec courant.

Ce différentiel peut correspondre à la remise en suspension générée par le passage de la tête d'élinde sur le fond et/ou à un tassement du fond induit par la tête d'élinde.

4.1.2. Réponse acoustique

Les mosaïques sonars, réalisées pendant ou après les extractions, distinguent nettement les sillons isolés. Leur réponse est principalement marquée par un contraste acoustique fort entre le flanc éclairé (Figure 113, en noir) et le flanc situé « à l'ombre » du signal (Figure 113, en blanc). Cette réponse acoustique est donc principalement induite par la morphologie des sillons. Certains sillons, notamment ceux générés par la Charlemagne, présentent des bandes secondaires aux contrastes acoustiques moins marqués, en plus des deux principales bandes noires et blanches (Figure 113, A). Du fait de la résolution des mosaïques sonar (10 cm), ces contrastes peuvent être induits (i) par une morphologie plus complexe non observable sur les MNT réalisés au pas de 1 m, (ii) par une discrimination sédimentaire entre les bordures, les flancs et le centre du sillon, et/ou (iii) par des artéfacts du signal rétrodiffusé.

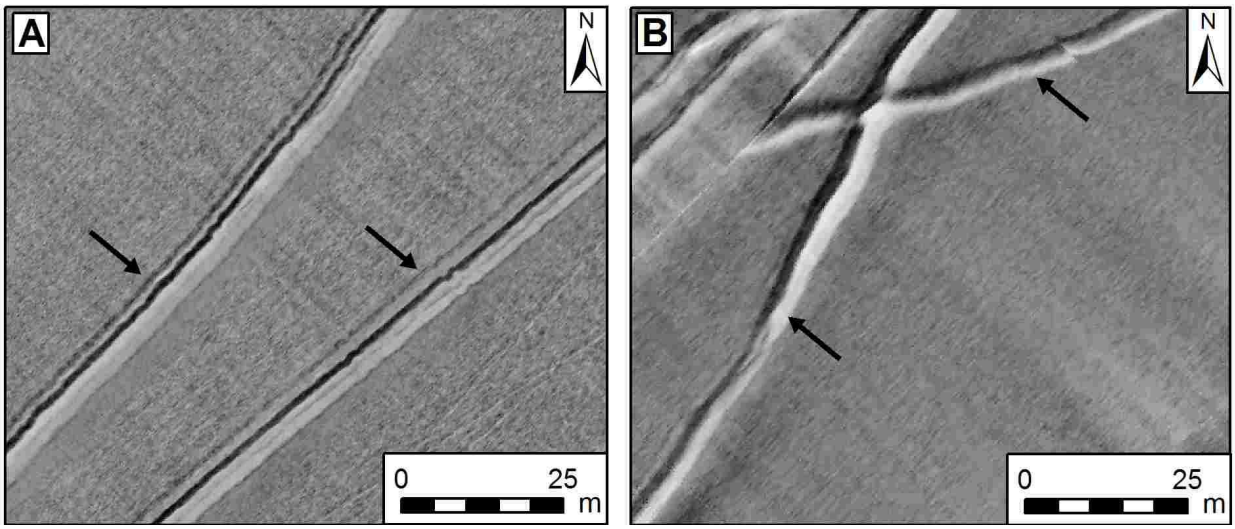


Figure 113 : Exemples de sillons isolés observés sur une mosaïque sonar. A : sillons creusés par la Charlemagne, (mosaïque de Granimp08a). B : sillons creusés par la Scelveringhe (mosaïque de Granimp08b).

Aucun prélèvement sédimentaire n'a pu être effectué par les plongeurs. En effet, les conditions de visibilité au fond, la morphologie peu marquée d'un sillon et la précision de leur localisation sur le fond ne leur permettent pas de distinguer clairement et avec précision un sillon isolé.

4.2. Dépression

Le passage répété de l'élinde en un même endroit aura pour conséquence une surimposition de sillons sous forme d'une dépression.

4.2.1. Morphologie

La morphologie d'une dépression est plus complexe que celle d'un sillon isolé puisqu'elle intègre de nouveaux facteurs à savoir l'intensité de l'extraction (nombre de passages et volume cumulé excavé) et la localisation des passages répétés de l'élinde.

Plus l'extraction est importante dans une même zone, plus le nombre de sillons isolés diminue au profit d'un plus grand nombre de dépressions (Figure 114).

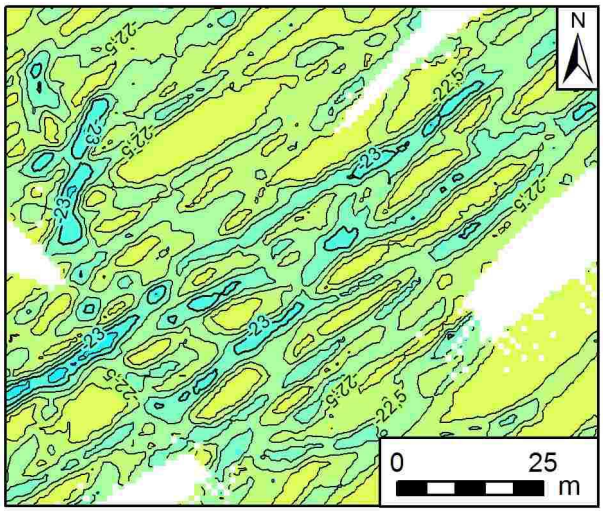


Figure 114 : Exemples de dépressions (MNT bathymétrique au pas de 1 m).

La morphologie d'une dépression est ici étudiée en fonction du nombre de passages de têtes d'élinde. L'influence du cumul de ces passages est d'abord étudiée sur la base de cas simple : deux passages puis trois passages d'élinde, ceci pour une même drague, à savoir la Charlemagne. Ensuite, les relations existant entre les paramètres morphologiques et l'intensité de l'extraction sont étudiées pour une gamme d'intensité d'extraction (volumes excavés) plus importante et caractéristique de l'état de la zone A en fin d'extraction, afin de globaliser cette relation.

a. Sections transversales types dans le cas d'1, 2 et 3 passages

La comparaison de la section transversale d'un sillon isolé avec une dépression issue de 2 passages montre que l'approfondissement du sillon est doublé (de 0,31 à 0,67 m). L'élargissement des flancs accroît la largeur globale de la section transversale d'environ 1 m et atteint 7,5 m (Figure 115). La pente maximale des flancs est également doublée et atteint 16,56°. Le centre de la dépression est plus accidenté comme indiqué par les pentes plus fortes (5,84°).

La section transversale formée par 3 passages indique que l'augmentation des paramètres morphologiques n'est pas proportionnelle au nombre de passages de la tête d'élinde (Figure 115). L'augmentation de l'approfondissement n'est ici que de 180 % (de 0,31 à 0,57 m) et celle des pentes maximales des flancs n'est que de 150 % (de 8,28 à 12,74°). Ceci peut être dû à des passages qui ne se produisent pas exactement au même endroit et qui auraient pour conséquence d'élargir la dépression sans toutefois augmenter proportionnellement l'approfondissement. Cette hypothèse est confirmée par l'élargissement global du sillon de 140 % (de 6,5 à 9 m). La section transversale de cette dépression est également dissymétrique ce qui peut confirmer des passages légèrement décalés. Toutefois, cette dissymétrie

peut être expliquée par deux autres hypothèses : (i) l'inclinaison de l'élinde induite soit par une composante du courant orthogonale à l'axe de la drague forte, soit par une morphologie du fond déjà accidentée inclinant la tête d'élinde et/ou (ii) par un comblement déjà amorcé.

		Drague		
		Charlemagne	Charlemagne	Charlemagne
	Elinde (type)	Mono-bloque	Mono-bloque	Mono-bloque
	Puissance d'aspiration (m3/h)	10 391	10391	10 391
	Nombre de passage	1	2	3
Largeur m	**Moyenne**	**6.50**	**7.50**	**9.00**
	Ecart Type	1.29	0.71	0.00
	Maximum	8.00	8.00	9.00
	Minimum	5.00	7.00	9.00
Approfondissement m	**Moyenne**	**0.31**	**0.67**	**0.57**
	Ecart Type	0.10	0.17	0.00
	Maximum	0.44	0.79	0.57
	Minimum	0.22	0.55	0.56
Pente (centre) °	**Moyenne**	**2.80**	**5.84**	**4.78**
	Ecart Type	0.98	1.51	0.21
	Maximum	4.15	6.90	4.93
	Minimum	1.96	4.77	4.63
Pente (flanc) °	**Moyenne**	**8.28**	**16.58**	**12.74**
	Ecart Type	3.25	3.17	0.07
	Maximum	12.99	18.83	12.79
	Minimum	5.89	14.34	12.69

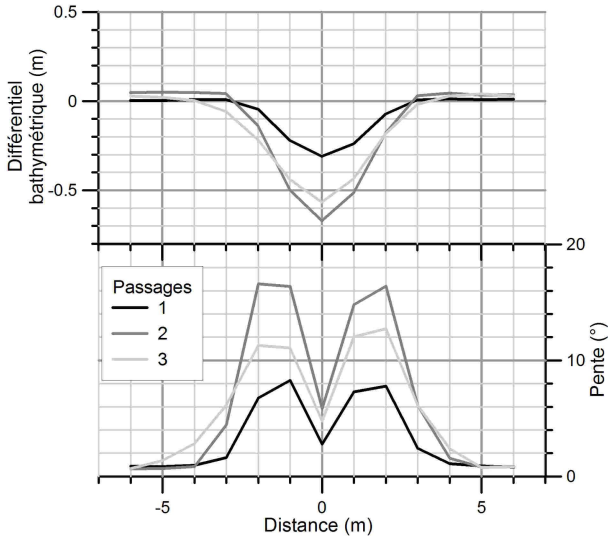


Figure 115 : Paramètres morphologiques des sections transversales moyennes de sillons générés par plusieurs passages de la tête d'élinde.

b. Relation entre morphologie et intensité d'extraction

L'objectif est ici d'établir une relation entre les modifications de la morphologie et l'intensité d'extraction.

Cette étude a été réalisée à partir de la bathymétrie acquise en juin 2008 (Granimp08a), au cœur de la période d'extraction sur la zone A, et des données de navigation des dragues intervenues sur cette zone. Cette étude est principalement basée sur une manipulation des données sous SIG. Dans un premier temps, les données de navigation ont été exploitées pour construire un maillage régulier du volume extrait cumulé par maille de 10 m. Cette étape a d'abord nécessité l'attribution des volumes exploités par chargement et par type de drague puis le calcul des volumes cumulés pour chacune des mailles. En parallèle, deux MNT ont été

construits. Un premier dit d'approfondissement correspond au différentiel bathymétrique entre la période anté-extraction et juin 2008. Un second MNT, de pente est construit à partir du MNT bathymétrique de juin 2008. Ensuite, les valeurs maximales de chacun de ces deux MNT (approfondissement et pente) au droit de chacune des mailles de 10 m sont sélectionnées. Ainsi, à un volume cumulé extrait correspond un approfondissement maximal et une pente maximale (Figure 116).

Nous avions indiqué précédemment que la navigation des dragues fournies par les carriers ne correspondait pas toujours à la trace observée sur la bathymétrie, celle-ci pouvant être décalée jusqu'à 150 m. En effectuant une moyenne des approfondissements et des pentes par classe de volume extrait, les erreurs liées à l'écart de navigation avec l'empreinte de l'élinde laissée sur le fond se compensent.

Dans le chapitre précédent nous avons montré l'importance du débit d'aspiration de la drague sur la morphologie de la section transversale d'un sillon. Cette influence se confirme pour la section transversale d'une dépression.

La Figure 116 confirme l'augmentation de l'approfondissement et des valeurs de pentes en fonction du volume extrait. Les nuages de points situés à proximité des valeurs d'approfondissement ou de pente nulles, alors que le volume extrait ne l'est pas, sont liées aux écarts de localisation entre navigation des DAM et dépressions observées sur la bathymétrie. Toutefois, le reste du nuage de point dessine clairement une relation entre ces paramètres.

A partir des moyennes d'approfondissement et des pentes par classe d'intensité, des courbes de tendances logarithmiques ont été calculées.

Pour l'approfondissement, cette loi est de la forme :

$$y = -0,23 \times \ln(x) + 0,08 \tag{16}$$

avec y l'approfondissement en m et x le volume extrait en $m^3.are^{-1}$.

Pour l'augmentation des pentes cette loi est de la forme :

$$y = 3,82 \times \ln(x) + 3,77 \tag{17}$$

avec y l'augmentation des pentes en ° et x le volume extrait en $m^3.are^{-1}$.

L'augmentation de l'approfondissement et celui des pentes est rapide pour des volumes extraits cumulés jusqu'à 20 $m^3.a^{-1}$ ce qui correspond à 3-5 passages de tête d'élinde (fonction de la puissance d'aspiration de la DAM). Au-delà de ce volume extrait cumulé, l'approfondissement et l'augmentation des pentes sont plus faibles.

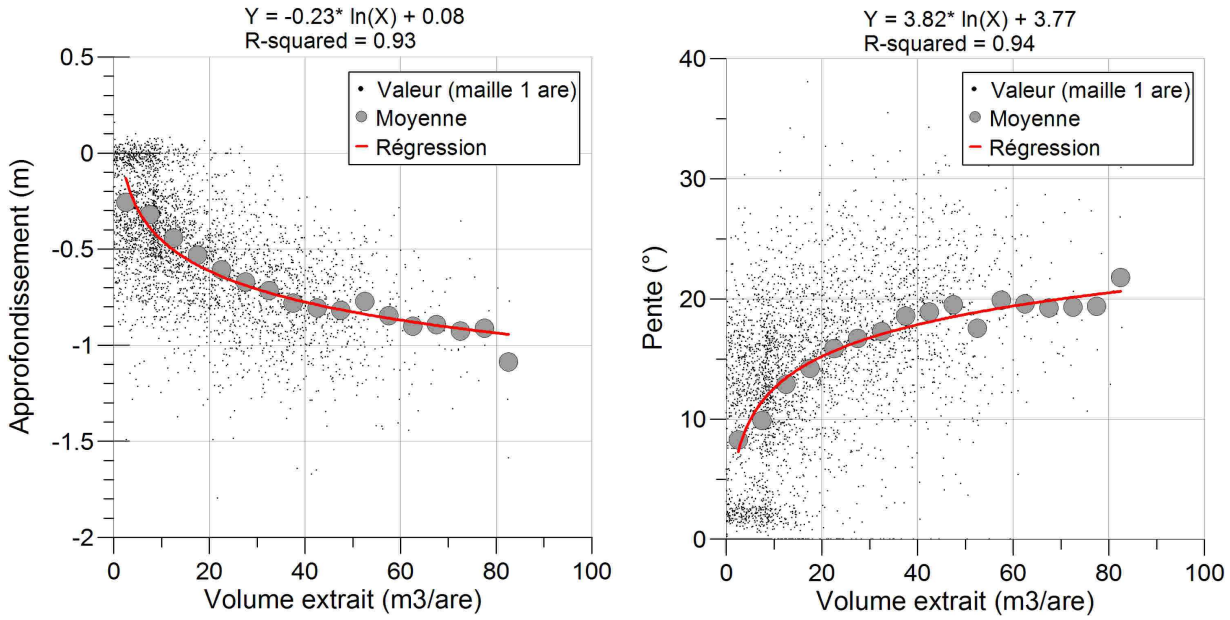


Figure 116 : Approfondissement et pentes en fonction du volume extrait.

Ces relations logarithmiques peuvent être expliquées par plusieurs aspects : (i) des passages répétés dans un même secteur mais non exactement au même endroit, (ii) par le début d'une restauration entre chaque passage grâce à un comblement (diminution de l'approfondissement) et/ou un effondrement des pentes (diminution des pentes), (iii) par une accélération de la restauration induite par d'autres passages d'élinde à proximité de la dépression en question et (iv) par une baisse de performance de l'aspiration sur des zones déjà extraites donc plus accidentées.

Sur la zone B, où les extractions ont été les plus intenses (90 m.a^{-1} en moyenne), lors du dernier suivi (Gr10a) l'approfondissement et les pentes sont respectivement en moyenne de 0,81 m et 8,4 ° et peuvent atteindre localement 3 m et 40°. Du fait des conditions d'exploitation testées (zone rectangulaire 1 600*500 m imposant une exploitation NE-SW formant une boucle ou un « huit ») et dans le cas d'une intensification de l'exploitation, une unique dépression profonde peut être observée.

4.2.2. Sédimentologie

a. Signal acoustique

La signature acoustique des dépressions, observées au sonar à balayage latéral, reste marquée par un important contraste acoustique entre le flanc « éclairé » et le flanc « dans l'ombre » du signal (Figure 117). Toutefois, leurs images sont moins régulières que dans le cas des sillons isolés : elles sont moins linéaires et moins

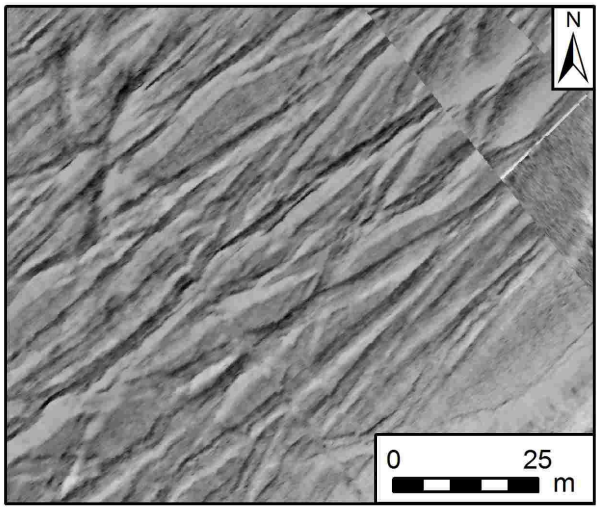


Figure 117 : Exemple de dépressions sur mosaïque sonar.

homogènes du fait de l'enchevêtrement de plusieurs sillons responsables de la formation de la dépression. La diversité de la réponse acoustique des dépressions reste ici encore principalement induite par la morphologie des sillons.

b. Granulométrie

Les prélèvements effectués par des plongeurs au droit d'une dépression et les images vidéos permettent d'étudier l'organisation sédimentaire de ces dépressions.

Trois prélèvements ont été réalisés à différents endroits (sommet, flanc et centre) d'une dépression formée par une dizaine de passages de tête d'élinde. Ils montrent que le fond reste un gravier sableux comme le milieu non impacté. Les deux modes granulométriques observés pour le milieu non impacté sont présents mais dans des proportions moindres au profit d'un troisième mode, plus ou moins marqué, dans les fractions supérieures à 16 mm (Figure 118). La granulométrie n'est pas homogène le long de la section transversale. Dans notre cas, les flancs présentent une fraction supérieure à 16 mm moins marquée au profit du mode de sables fins à moyens.

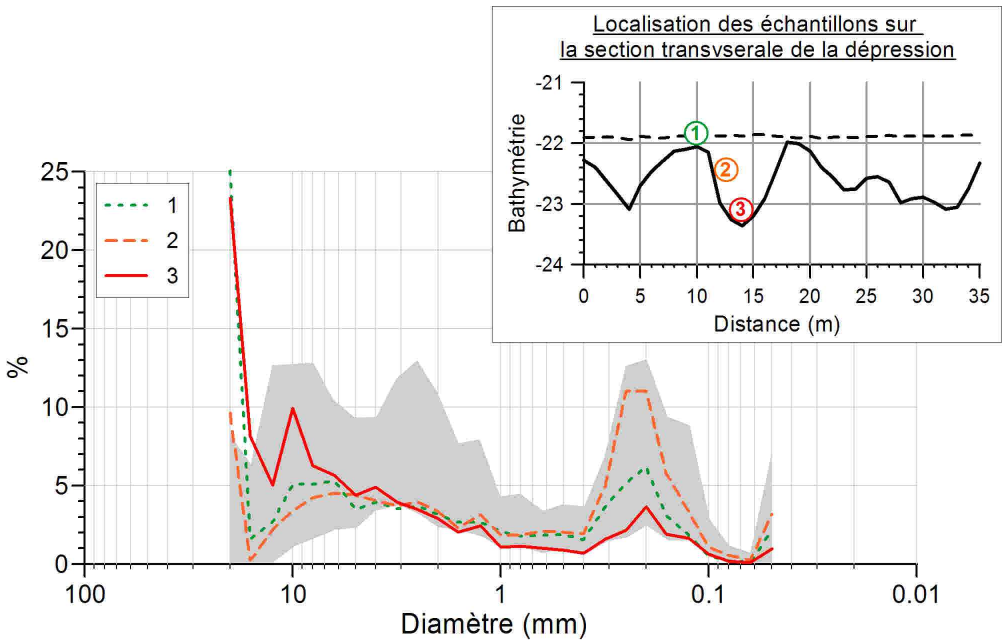


Figure 118 : Courbes granulométriques des échantillons prélevés dans une dépression. Echantillonnage effectué par des plongeurs le long d'une section transversale d'une dépression.

Le test statistique de Kruskal-Wallis (seuil de signification de 0,05), réalisé entre les différentes fractions granulométriques des prélèvements de la dépression et de ceux du milieu non impacté, confirme qu'ils sont bien significativement différents (Annexe 3). Dans la dépression, la proportion massique des fractions supérieures à 16 mm est significativement plus élevée alors que celles des fractions comprises entre 1 et 0,4 mm d'une part et inférieures à 63 µm d'autre part sont significativement plus faibles.

Le fond plus grossier observé au niveau des dépressions semble correspondre à l'excavation du sédiment naturellement plus grossier en profondeur comme le montre l'étude des carottes (cf. Figure 102, p 171).

c. Images vidéo

Les images vidéo obtenues par le ROV dans des zones creusées de multiples dépressions montrent que la nature et la granulométrie du fond peuvent fortement varier d'une dépression à l'autre ou d'un secteur à un autre. En effet, sur la zone A, les images vidéo indiquent une importante variabilité de la nature du fond pour des dépressions similaires à celles étudiées par les plongeurs : même approfondissement et temps de restauration globalement similaires. Certaines d'entre elles sont tapissées de coquilles d'organismes morts peu abîmées par les courants (Figure 119 A et B). D'autres sont constituées d'une importante proportion de gravier lithoclastique et de débris de coquilles (Figure 119 C). Enfin, certaines sont tapissées de sables parfois modelés de petites rides irrégulières (Figure 119 D).

Ces images sur la zone A ne permettent pas clairement d'identifier une ségrégation type des sédiments à l'échelle d'une dépression. Par contre sur la zone B, les images du ROV sur plusieurs dépressions analogues à celles de la zone A, indiquent une ségrégation plus nette. Le sommet des dépressions ou les parties les plus externes des flancs sont constitués de sables avec localement la présence de rides parallèles obliques à l'axe principal de la dépression (Figure 119 E et F). Le bas des flancs montre régulièrement des graviers (Figure 119 F et H). Le centre de la dépression est souvent tapissé de sables (Figure 119 G).

La confrontation des prélèvements effectués dans une dépression et des informations issues des images vidéo montre que les sédiments formant les dépressions sont hétérogènes sous l'effet de la variabilité du substratum. Des placages sableux sont régulièrement observés sur les flancs et au centre des sillons. Leur origine peut être multiple : (i) présence préalable (lentille sableuse fossile) (ii) transport par charriage du sable de la couverture sédimentaire superficielle vers les dépressions, et/ou (iii) dépôts issus de la remise en suspension de sables par le passage de l'élinde sur le fond ou par la surverse.

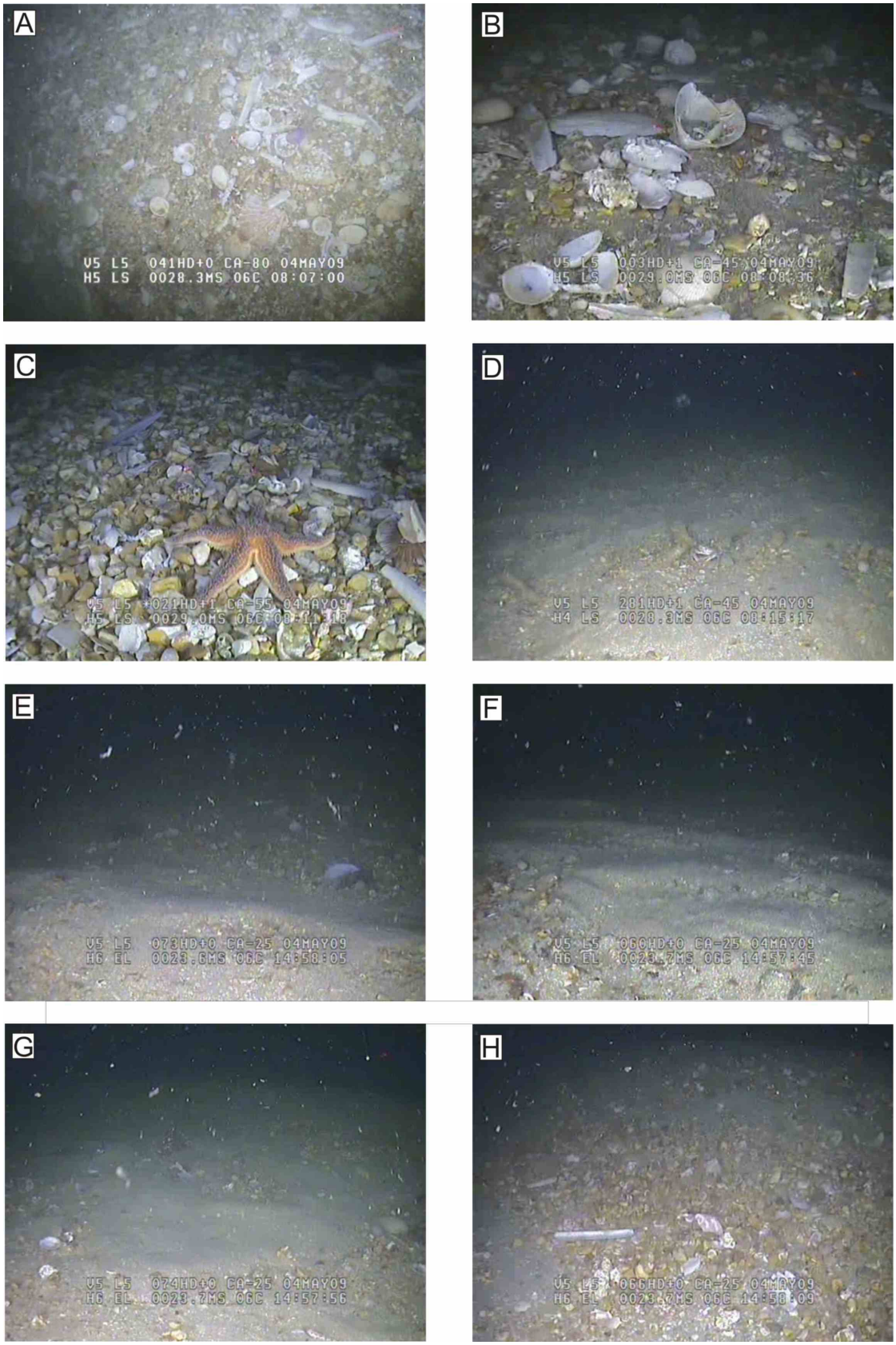


Figure 119 : Images vidéo des dépressions de la zone A et de la zone B. Captures d'écran à partir des images vidéo du ROV. Zone A : (A) dépression tapissé de coquille, (B) macro des dépôts coquilliers, (C) dépression avec fond graveleux, (D) dépression avec fond sableux ridés ; Zone B : (E) observation d'une dépression peu profonde depuis une crête, (F) flanc sableux ridés d'une dépression, (G) cœur sableux d'une dépression, (H) base de flanc graveleux dans une dépression.

4.2.3. Courantologie

Deux courantomètres ponctuels, mouillés respectivement au centre (Figure 120 C1) et sur l'une des crêtes d'une dépression (Figure 120 C2), ont permis d'acquérir des mesures courantométriques de manière à pouvoir étudier l'éventuelle influence d'une dépression sur les courants à proximité du fond (0,70 m). Ces mesures, obtenues lors de la campagne Gr09a, sont comparées à celles obtenues hors sillon, acquises lors de la campagne Gr10a pour des coefficients de marée identiques (Figure 120 C0).

La vitesse horizontale est globalement similaire sur l'ensemble du cycle de marée hormis au début du pic de flot entre (entre BM+2h30 et BM+3h00) où les vitesses sont plus élevées au centre du sillon. Cette accélération correspond au début de l'établissement du flot lorsqu'il s'oriente progressivement N 135° à N 90°. Cette accélération correspond à une augmentation de la composante parallèle au sillon pour une diminution de la composante perpendiculaire. Il semble donc que les courants soient légèrement déviés et accélérés au début du flot lorsque celui si est perpendiculaire au sillon. Une légère accélération est également observée à la fin du flot (BM+6)

Les plus grosses différences sont observées sur la composante verticale du courant. Dans le milieu naturel cette composante est faible (< 0,1 $m.s^{-1}$) et globalement dirigée vers le haut lors du flot et vers le bas lors du jusant. Au centre du sillon et sur la crête, cette vitesse est fortement accélérée. Au centre du sillon, le courant vertical suit les oscillations du milieu naturel hormis au flot. Au début du flot, au lieu d'être ascendant, le courant est fortement accéléré vers le bas. Le courantomètre enregistre ici un courant plongeant, entrant dans le sillon. Ce courant plongeant est concomitant de la légère réorientation du courant, parallèlement au sillon en direction du NE. A la fin du flot, alors que le courant est parallèle à l'axe de la dépression, le courantomètre enregistre subitement une accélération forte vers le haut. Ce courant ascendant est associé à la légère accélération de la composante perpendiculaire à la dépression. Le courantomètre enregistre donc ici un courant ascendant sortant de la dépression. Ce brusque changement est probablement dû au « fetch » du courant dans cette dépression, plus court au début du flot qu'à la fin.

Sur la crête, la composante verticale suit les oscillations du milieu non impacté en restant toutefois ascendante même au jusant. Le maintien de cette vitesse ascendante au jusant est potentiellement induit par une dépression située à l'est du courantomètre. Ce courantomètre subit donc les courants ascendants de sortie du sillon d'une dépression située en son O lors du flot et le même courant de sortie d'une autre dépression situé en son E.

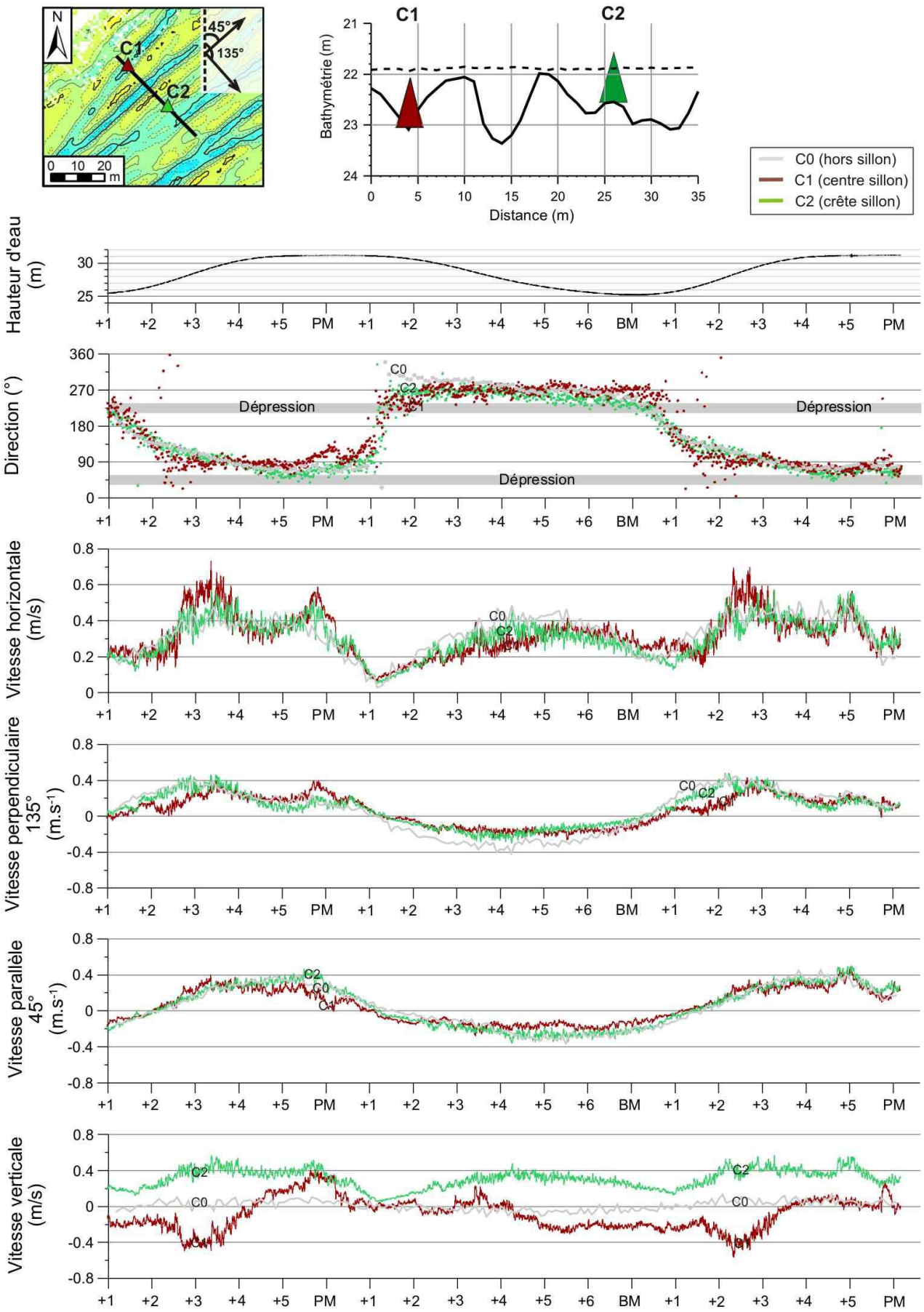


Figure 120 : Courantométrie au centre d'une dépression et sur une crête.

4.3. Zone d'extraction

L'objectif de ce paragraphe est d'analyser les impacts morpho-sédimentaires des excavations à l'échelle de la zone d'extraction et d'étudier l'évolution morphologique des excavations en fonction de l'intensité des extractions.

En raison d'un planning d'extraction différent entre les sous-zones A Nord, A Sud, B Nord et B Sud, leurs évolutions sont distinguées les unes des autres.

4.3.1. Morphologie

Après l'arrêt des extractions sur la zone A, la bathymétrie des sous-zones A Nord et A Sud, montre une morphologie accidentée, formée par un ensemble de sillons isolés et de dépressions plus ou moins recoupées (Figure 121 A). La dernière bathymétrie réalisée au cours des extractions sur la zone B montre une morphologie globalement similaire (Figure 121 B). Toutefois, au niveau de la sous-zone B Nord, où les extractions ont été les plus importantes, l'accumulation des extractions tend à dessiner une seule et même grande dépression d'environ 200 m de large et dont la profondeur peut dépasser localement les 3 m. Celle-ci peut s'apparenter à une souille avec un fond très accidenté, sans flancs bien distincts mais avec un approfondissement progressivement croissant vers son centre.

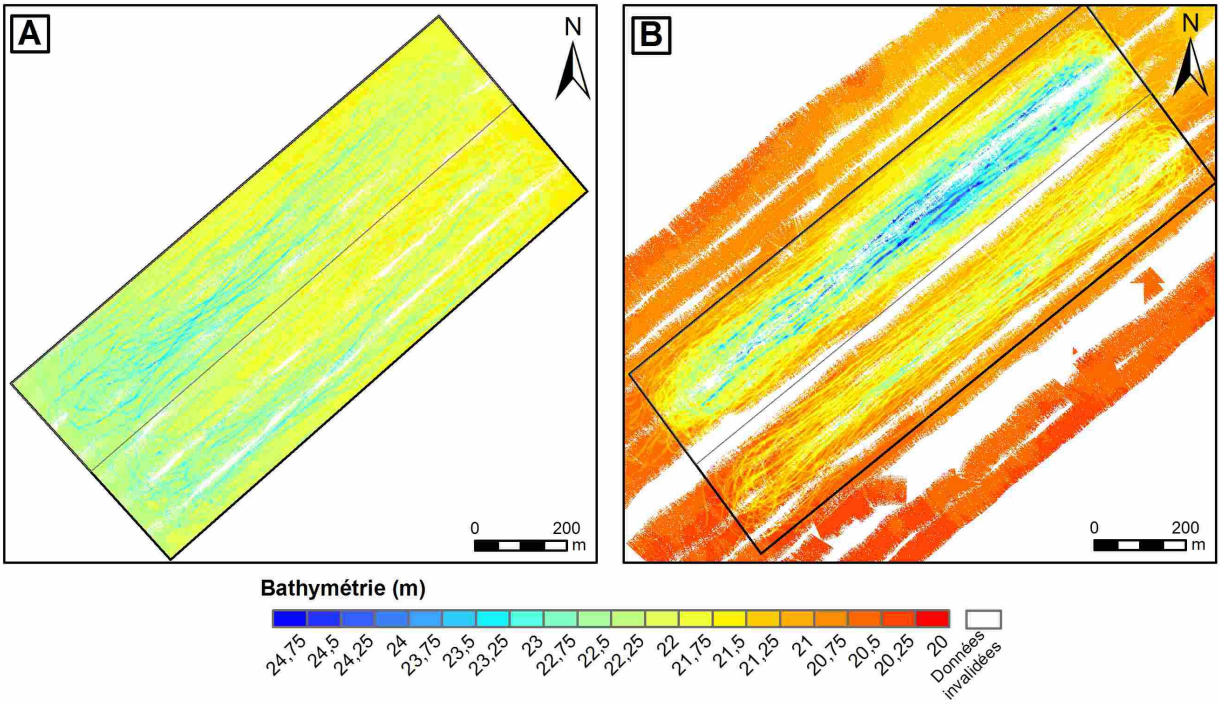


Figure 121 : Bathymétrie de la zone A après l'arrêt des extractions (193 278 m^3 sur 12 mois) et de la zone B en cours d'extraction (293 635 m^3 sur 20 mois).

Après la fin des extractions sur la zone A, les approfondissements moyens des sous-zones N et S sont globalement similaires à savoir 0,30 m, avec un approfondissement maximal localisé de 2 m. Toutefois les pentes sont plus élevées sur la sous-zone A Nord témoignant d'un fond plus accidenté. Pour ces sous-

zones A N et A S, les moyennes des pentes sont respectivement de 6,4° (soit une augmentation de 5,6°) et de 4,6° (soit une augmentation de 3,8°) avec des pentes maximales de 48° et 26°. Cette similitude dans l'approfondissement et ces différences de pente semble être induite par une surface d'extraction légèrement supérieure pour la sous-zone A N (valeur) alors que le volume extrait est relativement proche pour les 2 sous-zones (valeur). Les valeurs de pentes plus faibles sur la sous-zone A S peuvent aussi être induites par un temps plus important de restauration qui se matérialiserait par l'effondrement des pentes sans comblement marqué.

Après 2 ans d'extraction, sur la zone B, ces indices sont différents pour la partie N et S en raison d'une extraction plus importante au N. L'approfondissement moyen est de 0,90 m au N et de 0,40 m au S avec un approfondissement maximal localisé de 3,90 m au N et de 2,70 au S. Pour ces sous-zones B N et B S, les moyennes des pentes sont respectivement de 7,5° (soit une augmentation de 6,6°) et de 6,8° (soit une augmentation de 5,7°) avec des pentes maximales de 40° et 34°. Ces valeurs plus élevées pour la partie N sont dues à un volume extrait plus important sur une surface sensiblement identique.

Pour étudier l'influence du protocole d'extraction (cumul du volume extrait et surface exploitée), l'évolution temporelle de ces indices en fonction du planning des extractions est représentée graphiquement (Figure 122).

La comparaison de ces paramètres morphologiques pour chacune des sous-zones permet d'évaluer l'influence du protocole d'extraction. La bathymétrie augmente proportionnellement au volume extrait avec un taux moyen d'approfondissement de 0,3 m pour 100 000 m^3 extrait (Figure 122, zones A N et A S). La répétition des extractions entraîne une augmentation rapide de la pente jusqu'à un volume cumulé extrait de 150 000 m^3. Au-delà de ce volume extrait, la sous-zone B Nord montre que l'augmentation des pentes est moins rapide avec un rapport de 0,8° pour 100 000 m^3 extraits. Ce ralentissement de l'augmentation des pentes est directement lié à la répétition des phases d'exploitation sur des surfaces déjà fortement exploitées. En effet, ce ralentissement de l'augmentation des pentes apparaît lorsque de nouvelles extractions surviennent sur une sous-zone où déjà 40 % de la surface étaient extraites (Figure 122, zone B N). Ceci se traduit aussi par le début de la formation d'une unique dépression (début de formation d'une souille) et donc par un nivellement partiel des pentes des crêtes des sillons isolés et des dépressions générées au préalable à l'origine de cette souille (Figure 121, B).

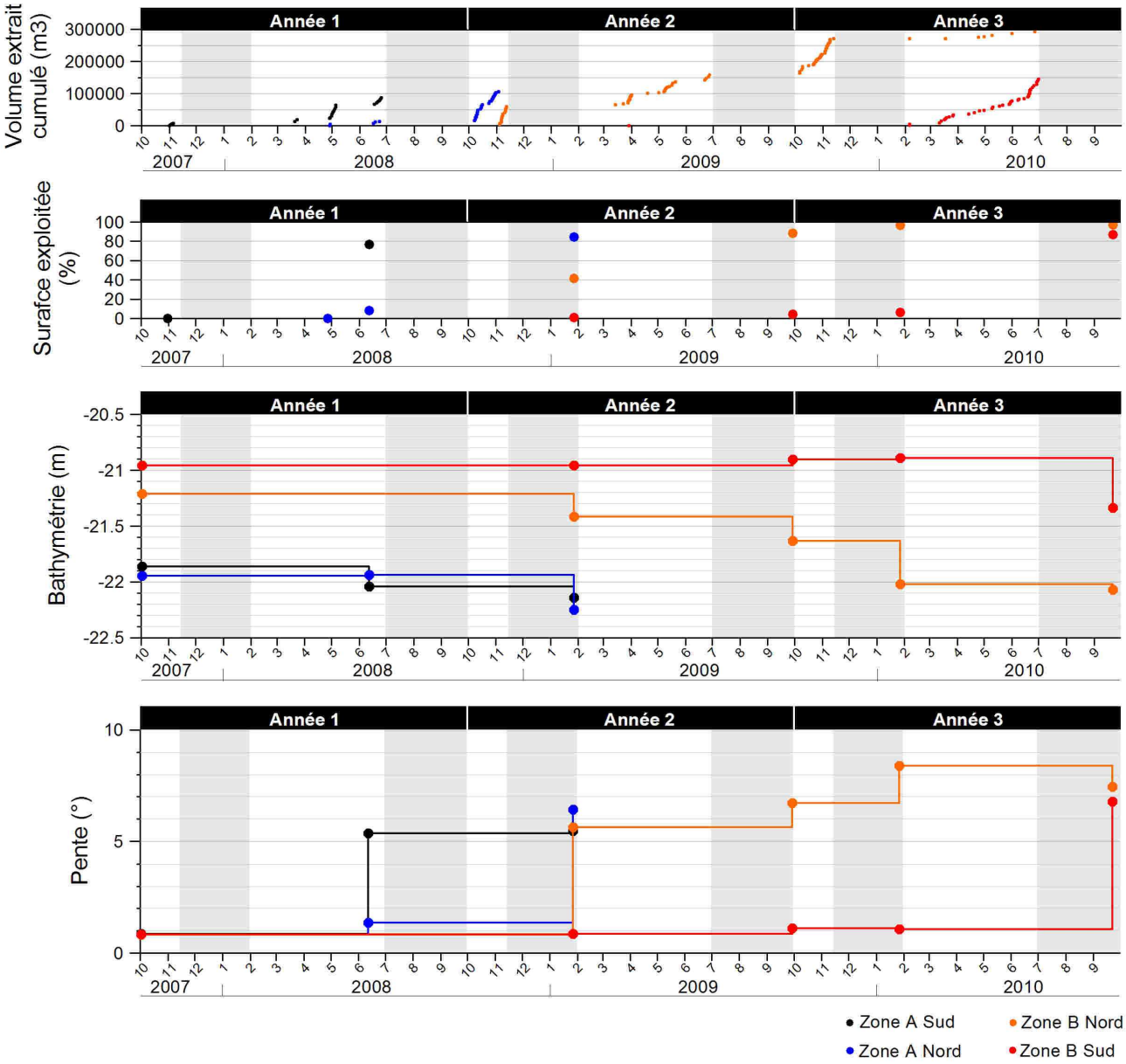


Figure 122 : Evolution des paramètres morphologiques des sous-zones des sites A et B en fonction du volume extrait cumulé.

4.3.2. Sédimentologie

a. Signal acoustique

La mosaïque sonar réalisée à la fin des extractions sur la zone A et celle réalisée au plus tard des extractions sur la zone B montrent que les fonds présentent un faciès très hétérogène induit par la morphologie accidentée, générée par l'extraction (Figure 123 A et B). La réflectivité varie de moyenne à faible selon une structure striée, orientée NE-SO.

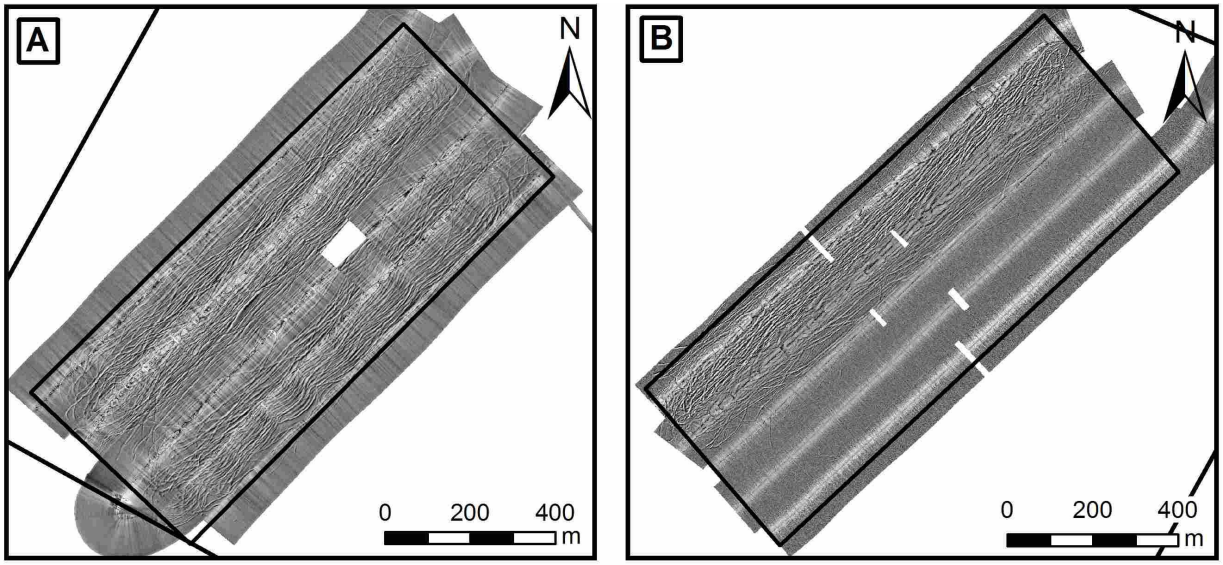


Figure 123 : Mosaïque sonar de la zone A après la fin des extractions (193 278 m^3 sur 12 mois) et de la zone B en cours d'extraction (293 635 m^3 sur 20 mois).

b. Granulométrie

La lecture graphique de la granulométrie des prélèvements sédimentaires, effectués dans ces différentes sous-zones, confirment les prélèvements des plongeurs à l'échelle d'une dépression et les images vidéo. La granulométrie de ces zones est globalement plus hétérogène que celle du milieu non-impacté (Figure 124).

La zone A, dont l'approfondissement dépasse rarement le mètre, montre toujours un gravier sableux bimodal. Cependant, la difficulté de fermeture de la benne Shipeck, notamment le refus complet de la station 124 lors de la campagne Granimp09a (volume extrait de 106 171 m^3), et les courbes granulométriques de la station 122 indiquent que le matériel peut être localement plus grossier sortant ainsi de l'enveloppe naturelle pour les fractions supérieures à 16 mm. Toutefois d'autres stations 129, 131 et 124 indiquent que cette même fraction peut être inexistante.

Les stations de la zone B confirment cette hétérogénéité. Certaines stations peuvent présenter des proportions de sables au-delà de la courbe enveloppe du milieu. D'autres montrent un sédiment exclusivement grossier devenant unimodal et se classant comme des graviers.

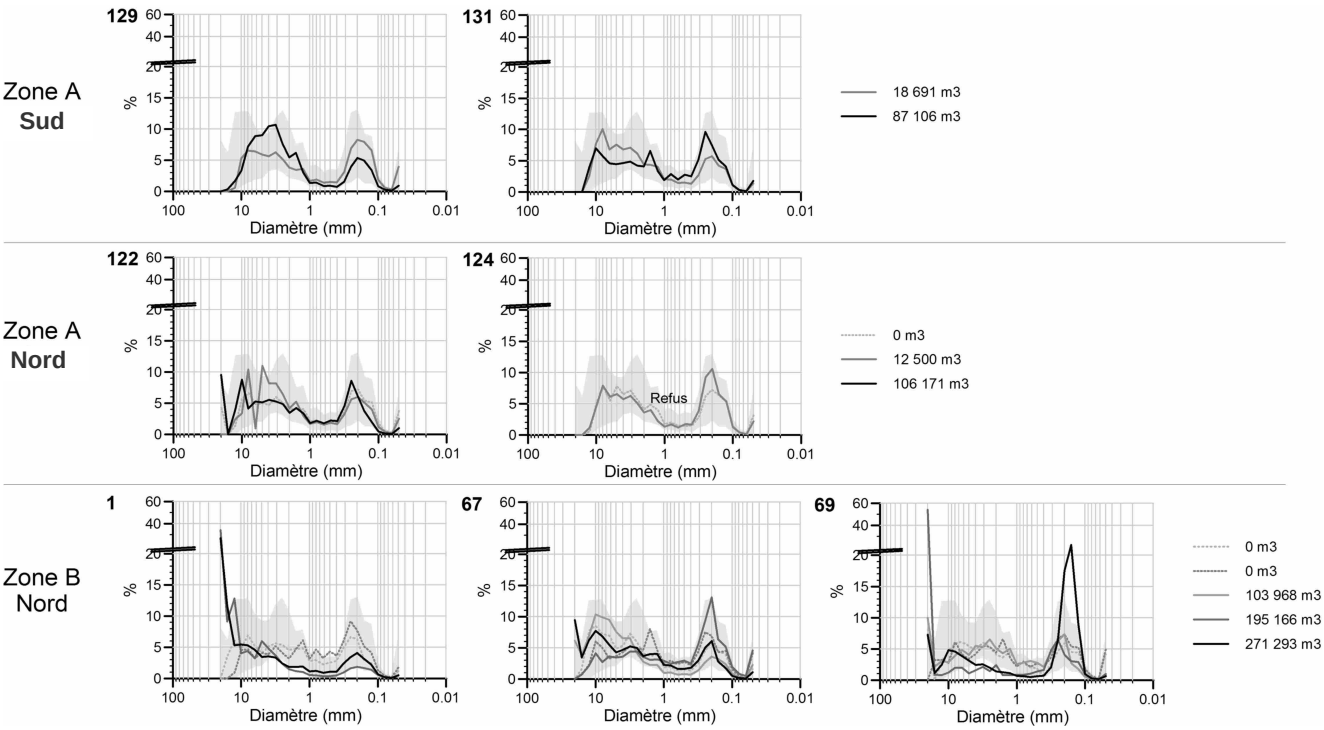


Figure 124 : Evolution des courbes granulométriques des stations prélevées dans les zone d'extraction en fonction du volume extrait.

Par la lecture graphique des courbes granulométriques et en raison de l'hétérogénéité des sédiments au niveau de dépression, il est difficile de mettre en évidence une évolution du sédiment en fonction du cumul des extractions.

Les tests statistiques de Kruskal-Wallis, entre les groupes de stations de la zone A et de la sous-zone B Nord permettent de mettre en évidence des différences significatives en fonction du cumul des extractions (Annexe 3).

Pour la zone A, ils montrent que les sables compris entre 200 et 500 µm sont dans des proportions plus élevées que dans le milieu non impacté, tandis que les silts et le matériel grossier supérieur à 630 µm sont moins bien représentés après l'arrêt des extractions. Pour chacune des deux sous-zones Nord et Sud, ce test n'a pas pu être effectué puisque le nombre de stations est inférieur à 3 dans chacune d'elles.

Pour la sous-zone B Nord, le test de Kruskal-Wallis montre que, dès 100 000 m^3 extraits, la proportion des graviers de tailles supérieures à 12,5 mm est plus élevée que celle du milieu non impacté. A contrario, les silts et la fraction comprise entre 500 µm et 12,5 mm sont moins bien représentés.

Par conséquent :

- pour les zones A et B, la diminution des silts, même pour des extractions faibles, correspond aux sédiments sous-jacents excavés moins riches en silts,

- l'augmentation des sables fins à moyens, associée à une diminution des sables grossiers, très grossiers et des graviers pour une extraction faible (zone A), s'explique par des sédiments excavés pouvant

être plus sableux jusqu'à 1m50, par le début du piégeage de la fraction sableuse mobile au sein des excavations et un éventuel dépôt des particules du panache turbide. En effet, ce piégeage a pu débuter puisque les prélèvements ont été effectués 4 mois après l'arrêt des extractions sur cette zone.

- sur la zone B, l'absence d'augmentation de sables fins à moyens peut s'expliquer par la répétition des extractions qui empêche le piégeage de la fraction mobile sableuse dans les dépressions et l'accumulation de dépôts des particules du panache. L'augmentation des graviers supérieurs à 12,5 mm peut être expliqué par l'excavation de sédiments plus grossiers au-delà de 1m50 de profondeur, conformément aux informations données par les carottes. En effet, des extractions avaient eu lieu récemment avant les derniers prélèvements.

c. Nature

Dans la zone extraite, la nature du sédiment, toute classe confondue, reste identique à celle des sédiments du milieu non impacté avec 65 % de lithoclastes et 35 % de carbonates. Toutefois, plusieurs différences avec le milieu non impacté apparaissent. Les lithoclastes sont mieux représentés des silts jusqu'aux cailloux de 16 mm, avec un rapport lithoclaste /carbonate compris entre 4 et 12 (Figure 125). Les lithoclastes deviennent donc prédominants pour les sables grossiers contrairement au milieu non impacté. La forte proportion d'éléments grossiers supérieurs à 16 mm, observée dans les zones extraites, est due à une augmentation de la proportion des lithoclastes mais plus particulièrement de celle des carbonates qui deviennent majoritaires pour cette gamme granulométrique.

L'augmentation de la proportion d'éléments supérieurs à 16 mm est associée à la mise à jour de sédiments plus grossiers. Ces éléments plus grossiers présentent de fortes teneurs de carbonate expliquées par la présence de coquilles et de la colonisation rapide des éléments grossiers par des tubes de pomatoceros.

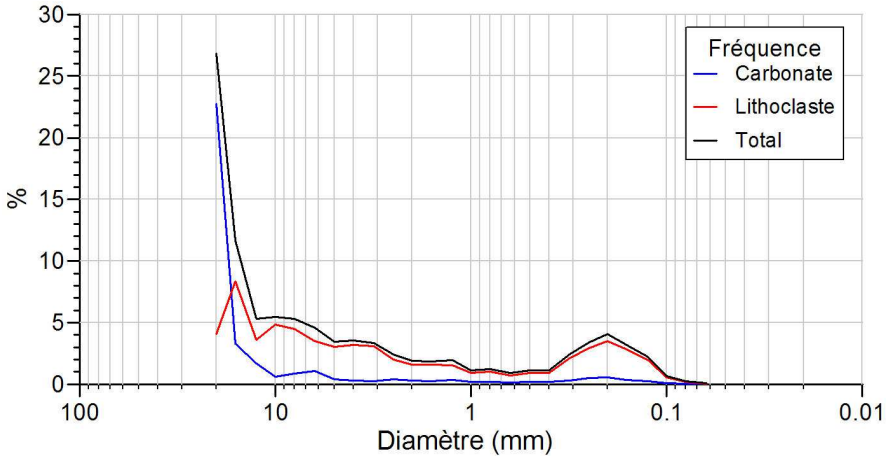


Figure 125 : Contribution des lithoclastes et carbonates sur la courbe granulométrique de fréquence d'un prélèvement sédimentaire impacté dans la zone d'extraction.

5. La restauration

Ce chapitre a pour objectif d'étudier la restauration physique de la zone A et de sa périphérie dont les extractions se sont terminées au cours de l'étude. L'efficacité d'un nivellement est étudiée par la comparaison de la restauration naturelle à court terme de la sous-zone A Nord avec celle de la sous-zone Sud, nivelée à la fin des extractions. A partir de ces observations réalisées sur le court terme, les durées nécessaires pour une restauration physique complète sont déterminées.

5.1. Zone de dépôt de surverse

Le début d'une restauration est observé pour les stations proches et éloignées avec un retour à la normale des sables moyens dès la campagne Gr09b (12 mois après). Cette restauration, entâchée par une nouvelle augmentation des sables et de silts, est observée pour Gr10a (17 mois après). Ce début de restauration sur la zone A dès 12 mois est favorisé par l'interruption des extractions sur la zone B sur la période estivale (3 mois). L'intensification des extractions à l'automne 2010 est responsable de l'augmentation des silts aux sables fins autour de la zone A.

L'étude de la restauration des zones de dépôt est réalisée sur les secteurs périphériques à la zone A et non sur la zone A en elle même où les impacts liés à l'excavation et aux dépôts se mélangent. Elle ne concerne que la sédimentologie des fonds, seul paramètre physique impacté par les dépôts dans notre étude. La lecture des courbes granulométriques a mis évidence que certaines stations montrent un gradient croissant du mode sableux et de la fraction silteuse en fonction du cumul des extractions tout en se maintenant dans l'enveloppe du milieu non impacté (Figure 126). Par la lecture seule de ces courbes, il n'est pas possible de mettre en évidence une restauration du milieu marquée par un gradient décroissant des sables et silts. Certes la teneur en silts diminue 12 mois après les extractions mais celle des sables reste anormalement élevée. De plus, 16 mois après l'extraction, les mêmes stations enregistrent un regain en silt et des fluctuations en sables laissant présager une influence des dépôts issus des panaches générés par l'extraction de la zone B.

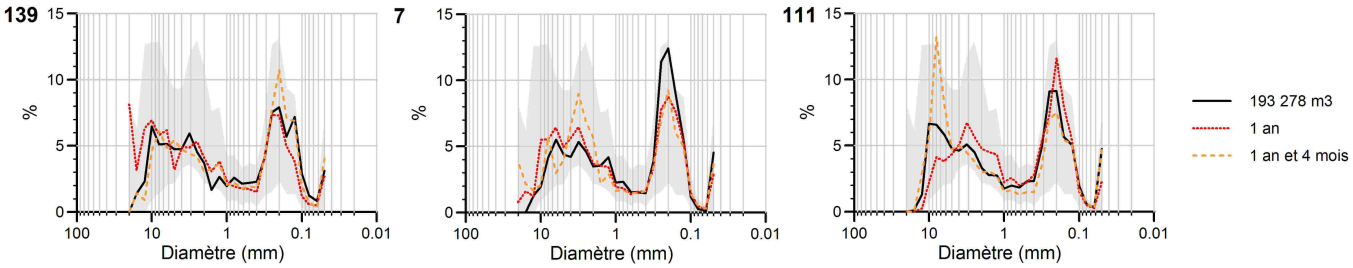


Figure 126 : Exemples d'évolution des courbes granulométriques de la périphérie de la zone A qui montraient un gradient croissant des sables et des silts au cours des extractions.

Les statistiques ont permis d'attester d'un possible impact des dépôts de surverse sur la périphérie de la zone A. Dès lors, des tests similaires de Kruskal-Wallis ont été effectués entre le groupe des stations périphériques proches, éloignées et celles non impactées après la fin des extractions et lors de leur restauration sur 16 mois (Annexe 3).

Ces tests montrent qu'en périphérie proche (< 250 m) :

- les teneurs en silts qui étaient contenues dans l'enveloppe du milieu non impacté deviennent supérieures à celle-ci après 16 mois, du fait de dépôts issus de la surverse de la zone B.

- les teneurs en sables très fins et fins restent significativement supérieures au milieu non impacté après 16 mois de restauration ce qui s'explique par une absence de restauration et/ou de l'impact de dépôts liés à la surverse de l'extraction sur la zone B,

- les teneurs en sables moyens et grossiers diminuent dès 12 mois ce qui témoigne d'une restauration en cours et l'absence d'influence des panaches de la zone B pour cette fraction,

- les sables très grossiers et graviers n'évoluent pas et leurs proportions restent significativement moins bien représentées que celles du milieu non-impacté.

En périphérie éloignée (800 m), on observe :

- après 12 mois, le maintien d'une proportion supérieure au milieu naturel pour les sables très fins et fins associée à l'absence de restauration et/ou l'influence des panaches générés sur la zone B. La diminution des sables moyens également observée indique la restauration de cette classe granulométrique,

- après 16 mois, une augmentation des silts, des sables très fins, fins et moyens jusqu'à 315 µm, associée au maintien de proportions plus faibles pour les sables grossiers. Cette absence de restauration peut être masquée par l'effet des dépôts des panaches générés par l'extraction de la zone B.

La nature du sédiment des zones de dépôts, toutes classes confondues, reste identique à celle des sédiments du milieu non impacté avec 65 % de lithoclastes et 35 % de carbonates. La proportion des lithoclastes par rapport à celle des carbonates par classe granulométrique reste similaire au milieu non impacté. L'augmentation de la proportion des sables fins à moyens est associée à une augmentation proportionnelle de lithoclastes et de carbonates.

5.2. Secteur extrait

5.2.1. Restauration morphologique

a. A l'échelle du sillon

L'étude de la restauration morphologique des sillons isolés est basée sur l'évolution de leurs sections transversales construites à partir des relevés bathymétriques postérieurs à l'arrêt des extractions sur la zone A (novembre 2008). A l'issue de la période d'extraction, l'accumulation des extractions sur les sous-zones A Nord et A Sud engendre une morphologie essentiellement constituée de dépressions et de quelques sillons isolés. Ce faible nombre de sillons isolés, associé à la difficulté d'identifier les conditions d'extractions de

ces derniers en raison des écarts de navigation avec leurs empreintes sur le fond, limite énormément le nombre de sillons isolés exploitables pour l'étude. Toutefois, certains sillons ont pu être identifiés et leur évolution dans le temps a pu être observée.

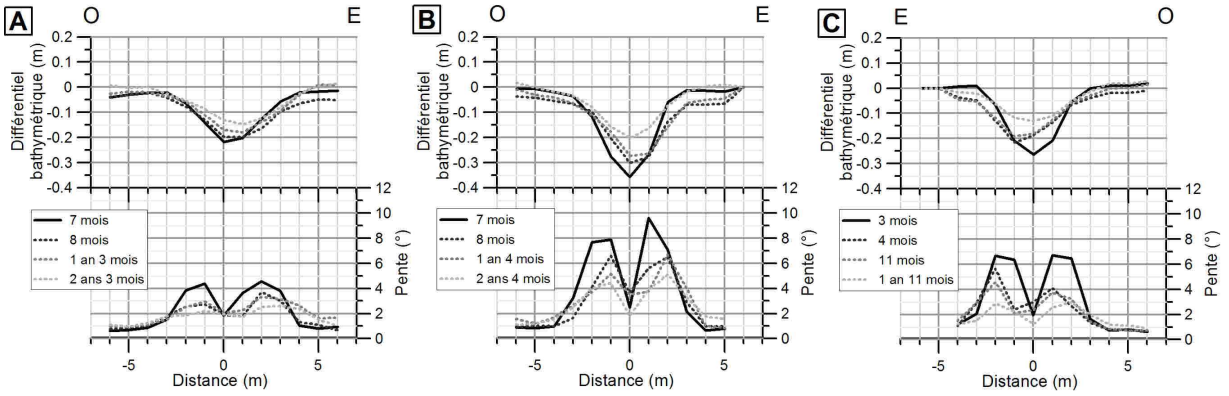
Comme pour l'étude de l'impact morphologique de l'excavation à l'échelle du sillon, les sections transversales sont moyennées sur des tronçons de plusieurs dizaines de mètres de long. Cette évolution est également basée sur les paramètres suivants : l'approfondissement (± 0,2 m) mesuré au centre du sillon, les pentes des flancs (± 11°) mesurées à une distance de 2 m de part et d'autre du centre, la largeur du sillon (± 1 m) et le volume excavé (± largeur × 0,2 m). Ici, une vitesse de comblement est proposée comme indicateur de vitesse de restauration. Celle-ci représente la différence d'approfondissement mesurée au centre du sillon sur la période de temps écoulé entre les deux relevés. L'incertitude de cette vitesse de comblement est élevée car elle représente le rapport de l'incertitude de l'approfondissement (+- 0,2 m) sur le temps écoulé entre les deux relevés. Par conséquent, plus les relevés bathymétriques sont rapprochés plus l'incertitude est grande.

- Sillon perpendiculaire au courant dominant

Les sillons les plus anciens, qui permettent l'observation de la plus longue période de restauration sont les sillons formés au mois de juin 2008 à contre-courant par la DAM Scelveringhe (Figure 127). L'évolution de leur section transversale indique bien qu'une restauration a eu lieu les années suivant l'extraction. Si on considère comme restauration le retour à un approfondissement nul alors cette restauration n'est pas complète au bout de 27 mois. Sur cette durée, le comblement de la partie centrale est de l'ordre de 40 à 45 %.

La restauration de la section transversale se manifeste par : (i) son comblement, (ii) la diminution des pentes des flancs, davantage marquée au niveau du flanc amont (flanc Ouest) dans le sens du transit sédimentaire, ce qui engendre progressivement une morphologie dissymétrique, (iii) son élargissement, et (iv) une légère translation du sillon dans le sens du transit sédimentaire, ici vers l'Est.

La vitesse de comblement est relativement élevée au cours des premiers mois (ici, pendant une période hivernale), comprise entre 0,5 et 2 $m.an^{-1}$. Celle-ci diminue dans le temps. L'élargissement des flancs et la diminution de leurs pentes indiquent que le comblement est en partie généré par l'effondrement des flancs. La dissymétrie de la section, marquée par un flanc amont vis-à-vis de la dynamique sédimentaire plus large et dont les pentes diminuent plus vite, indique qu'une partie du sédiment en provenance du flanc amont est probablement piégée dans les sillons. Le transit sédimentaire, initialement présent, peut également être en partie piégé par le sillon. L'augmentation du volume du sillon dans les premiers mois d'hiver (Figure 127) montre que l'ensemble des particules érodées des flancs n'est pas uniquement piégé au centre du sillon mais qu'une partie d'entre elles va être transportée au-delà du sillon. Par la suite, le volume diminue ce qui indique que le comblement est plus rapide que l'érosion sous l'effet du transport sédimentaire.



	Scelveringhe												Charlemagne					
	Sillon 1						Sillon 2											
	Durée restau.	Approf. (m)	Vitesse combl. (m/an)	Pente - 2 (°)	Pente +2 (°)	Largeur (m)	Durée restau.	Approf. (m)	Vitesse combl. (m/an)	Pente - 2 (°)	Pente +2 (°)	Largeur (m)	Durée restau.	Approf. (m)	Vitesse combl. (m/an)	Pente - 2 (°)	Pente +2 (°)	Largeur (m)
janv. 09	7 mois	-0.22		3.85	4.55	6	7 mois	-0.36		7.67	7.11	6	3 mois	-0.26		6.67	6.47	7
fév. 09	8 mois	-0.20	0.49	2.54	3.69	7	8 mois	-0.30	1.37	4.12	6.51	6	4 mois	-0.19	1.88	5.64	2.71	6
sept. 09	1 an 3 mois	-0.17	0.04	2.53	3.34	9	1 an 3 mois	-0.27	0.04	3.71	6.70	9	11 mois	-0.18	0.01	4.58	3.23	6
sept. 10	2 ans 3 mois	-0.13	0.04	1.86	2.53	9	2 ans 3 mois	-0.20	0.07	4.00	5.09	9	1 an 11 mois	-0.13	0.05	2.89	2.98	9

Figure 127 : Exemple de restauration de sillons isolés générés par la DAM Scelveringhe et la DAM Charlemagne.

La comparaison de la capacité de restauration pour des conditions estivales calmes et hivernales plus agitées est étudiée par la confrontation de l'évolution de sillons générés respectivement avant et après la couverture bathymétrique de juin 2008 (Tableau 14). Les conditions d'exploitation à l'origine de ces sillons sont par ailleurs similaires, à savoir formées par la même DAM Charlemagne, perpendiculairement au courant tidal dominant et contre les courants synchrones à l'extraction.

La restauration est plus importante en hiver comme le montrent les vitesses de comblement plus élevées. De plus, sur une période de 8 mois, ce comblement est de 30 % (de juin 08 à janvier 09) pour un sillon généré avant la période hivernale et seulement de 10 % (de janvier 09 à septembre 09) pour un sillon généré avant la période estivale. Lorsque les premiers mois de restauration ont lieu lors d'une période estivale, l'érosion observée est également plus faible que pour les premiers mois de restauration ayant lieu en hiver.

Tableau 14 : Comparaison des paramètres morphologiques de sillons générés par la DAM Charlemagne au printemps et à l'automne.

	Charlemagne													
	03/05/2008							23/10/2008						
	Durée restau.	Approf. (m)	Vitesse combl. (m/an)	Pente - 2 (°)	Pente +2 (°)	Largeur (m)	Volume (m3)	Durée restau.	Approf. (m)	Vitesse combl. (m/an)	Pente - 2 (°)	Pente +2 (°)	Largeur (m)	Volume (m3)
juin 08	1 mois	-0.27		7.34	3.52	5.00	0.63							
janv. 09	9 mois	-0.24	0.05	6.29	3.94	8.00	0.65	3 mois	-0.26		6.67	6.47	7.00	0.75
fév. 09								4 mois	-0.19	1.88	5.64	2.71	6.00	0.91
sept. 09								11 mois	-0.18	0.01	4.58	3.23	6.00	0.80
sept. 10								1 an 11 mois	-0.13	0.05	2.89	2.98	9.00	0.46

Les vitesses de comblement sur la période février 2009-septembre 2009, où seule la fin de la période hivernale est concernée, sont plus faibles que celles de l'année suivante, mesurées sur la période septembre 2009-septembre 2010, incluant un hiver complet. Ceci confirme que la restauration est plus active en période hivernale. Toutefois, d'une année à l'autre, cette restauration est de moins en moins marquée.

Pour des sillons générés par deux DAM différentes (ici Charlemagne et Scelveringhe) mais avec des conditions d'exploitation similaires (perpendiculaires aux courants tidaux dominants et générés à contre-courant), leur évolution ne montre pas de différence majeure. Seule une vitesse de comblement plus importante est observée en début de restauration. Cette différence est expliquée par l'âge du sillon généré par la Charlemagne, plus jeune et donc soumis à une restauration plus active que pour ceux générés par la Scelveringhe.

La comparaison de l'évolution de sillons formés avec courant et contre-courant par la même DAM Charlemagne ne montre pas de différence majeure (Tableau 15). Leur restauration est équivalente, d'environ 25 % pour un mois d'hiver et 50 % après 23 mois.

Tableau 15 : Comparaison de l'évolution des paramètres morphologiques de sillons générés par la DAM Charlemagne avec et à contre-courant.

	Charlemagne													
	23/10/2008							23/10/2008						
	Durée restau.	Approf. (m)	Vitesse combl. (m/an)	Pente -2 (°)	Pente +2 (°)	Largeur (m)	Volume (m3)	Durée restau.	Approf. (m)	Vitesse combl. (m/an)	Pente -2 (°)	Pente +2 (°)	Largeur (m)	Volume (m3)
juin 08														
janv. 09	3 mois	-0.26		6.67	6.47	7.00	0.75	3 mois	-0.22		5.07	5.12	5.00	0.63
fév. 09	4 mois	-0.19	1.88	5.64	2.71	6.00	0.91	4 mois	-0.17	1.01	4.32	5.32	8.00	0.70
sept. 09	11 mois	-0.18	0.01	4.58	3.23	6.00	0.80	11 mois	-0.13	0.07	2.32	3.91	7.00	0.52
sept. 10	1 an 11 mois	-0.13	0.05	2.89	2.98	9.00	0.46	1 an 11 mois	-0.11	0.03	2.57	2.50	9.00	0.18

- Sillon parallèle au courant dominant

Les sillons formés parallèlement aux courants tidaux dominants vont également montrer une restauration qui s'accompagne d'un élargissement, d'un comblement, d'une diminution des pentes plus marquée pour le flanc amont à la dynamique sédimentaire (ici, le flanc sud), générant une dissymétrie de la section transversale, et par une légère translation en direction du transit sédimentaire (ici, vers le Nord ; Figure 128). Toutefois, le rythme de restauration n'est pas le même. La restauration est plus lente avec des vitesses de comblement plus faibles. Un surcreusement lors des premiers mois suivant la formation du sillon peut même être observé. Le comblement de ces derniers ne survient qu'à partir du premier hiver de restauration. De plus, lors de la deuxième année de restauration, aucun comblement n'a été observé. L'élargissement est également moins important. Après 29 mois de restauration (avec deux périodes hivernales), ces sillons ne se sont comblés que de 25 %, présentant une largeur comprise entre 5 et 6 m et des pentes pouvant dépasser les 5°.

	Charlemagne 28/04/2008						
	Durée restau.	Approf. (m)	Vitesse combl. (m/an)	Pente -2 (°)	Pente +2 (°)	Largeur (m)	Volume (m3)
juin-08	2 mois	-0.26		6.47	6.67	4.00	0.75
janv. 09	9 mois	-0.35	-0.13	4.54	7.28	5.00	1.38
fév. 09	10 mois	-0.28	1.48	5.01	6.58	5.00	0.98
sept. 09	1 an 5 mois	-0.20	0.14	2.95	5.75	6.00	0.59
sept. 10	2 ans 5 mois	-0.20	0.00	5.15	4.02	5.00	0.94

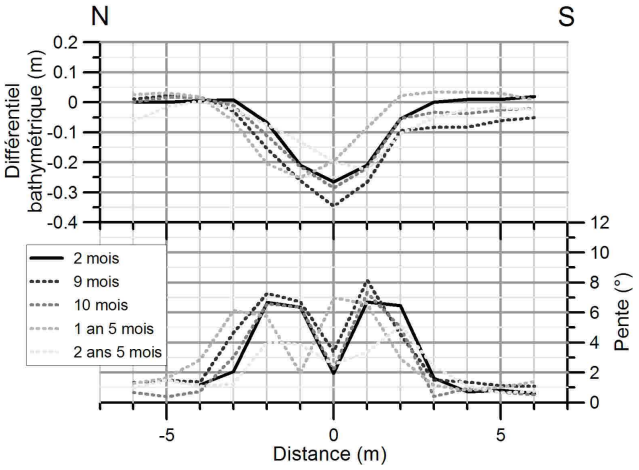


Figure 128: Exemple d'évolution d'un sillon isolé formé par la DAM Charlemagne parallèlement aux courants tidaux dominants.

- Effet du nivellement expérimental

L'effet du nivellement sur l'évolution de la morphologie d'un sillon est étudié par la comparaison des évolutions de deux sillons perpendiculaires aux courants tidaux dominants, générés par la même DAM Scelveringhe (Tableau 16).

A l'échelle du sillon, l'effet du nivellement expérimental, qui a été mené fin janvier 2009, n'est pas observé sur les paramètres morphologiques. Deux semaines après le nivellement, le comblement apparaît même moins important pour un sillon nivelé avec un pourcentage de comblement de 10 % contre 15 % pour un sillon non nivelé. Le nivellement expérimental est respectivement de 33 et 44 % après 27 mois de restauration, pour un sillon nivelé artificiellement et un sillon non nivelé.

Tableau 16 : Comparaison de l'évolution des paramètres morphologiques de sillons générés par la Scelveringhe avec et sans nivellement.

	Scelveringhe													
	23/06/2008							18/06/2008						
	Avec nivellement							Sans nivellement						
	Durée restau.	Approf. (m)	Vitesse combl. (m/an)	Pente -2 (°)	Pente +2 (°)	Volume (m3)	Largeur (m)	Durée restau.	Approf. (m)	Vitesse combl. (m/an)	Pente -2 (°)	Pente +2 (°)	Volume (m3)	Largeur (m)
juin-08														
janv. 09	7 mois	-0.33		7.53	7.88	0.88	6.00	7 mois	-0.36		7.67	7.11	1.18	6.00
fév. 09	8 mois	-0.30	0.71	6.68	6.31	1.09	8.00	8 mois	-0.30	1.37	4.12	6.51	1.42	6.00
sept. 09	1 an 3 mois	-0.27	0.05	5.09	5.77	1.05	7.00	1 an 3 mois	-0.27	0.04	3.71	6.70	1.29	9.00
sept. 10	2 ans 3 mois	-0.22	0.05	3.98	5.38	0.70	10.00	2 ans 3 mois	-0.20	0.07	4.00	5.09	0.71	9.00

b. A l'échelle de la dépression

Les dépressions évoluent de la même façon qu'un sillon isolé : comblement, élargissement, diminution des pentes, entraînant un élargissement mais aussi une dissymétrie de leur section transversale.

L'évolution des dépressions au droit du mouillage (40 $m^3.a^{-1}$ extraits) des courantomètres ponctuels (Aquadopp, § 4.2.3 p 196) a été étudiée. Les vitesses de comblement décroissent dans le temps et sont plus importantes lors des périodes hivernales (Figure 129).

La morphologie et le positionnement de ces dépressions par rapport à la dynamique sédimentaire semblent également influencer la vitesse de comblement. Celle-ci est plus importante pour des dépressions plus profondes, plus étroites et/ou en amont du transit sédimentaire.

Une légère érosion peut être observée lors de la première période hivernale.

Intervalle de temps	Durée de la restauration	Dépression		
		1	2	3
janv. 09 - fév. 09	3,5 mois	1.69	3.55	0.72
fév. 09 - sept. 09	11 mois	0.23	0.15	-0.04
sept. 09 - sept. 10	1 an 11 mois	0.22	0.23	0.13

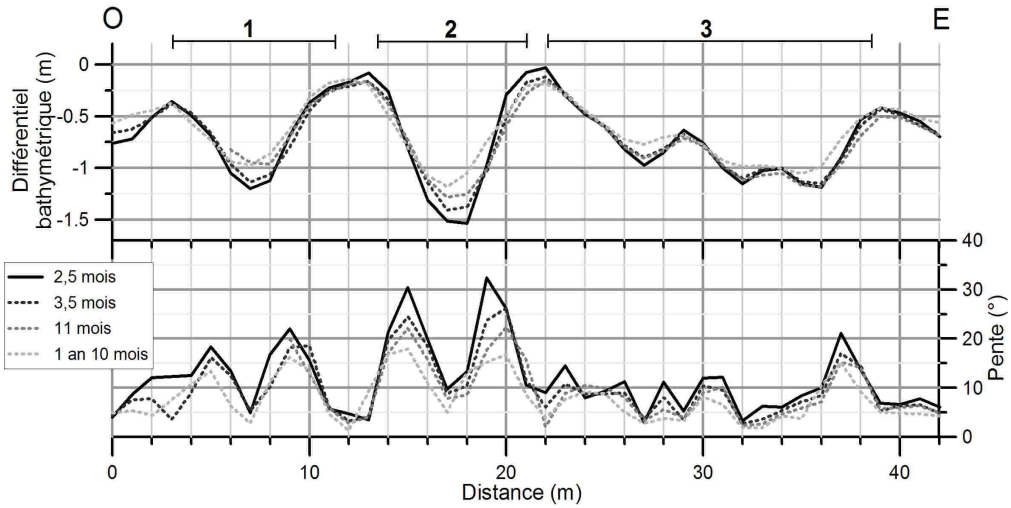


Figure 129 : Evolution temporelle des vitesses de comblement (m.an^{-1}) et des coupes transversales de l'approfondissement et des pentes des dépressions au droit du mouillage des courantomètres ponctuels (Aquadopp).

L'influence des dimensions d'une dépression sur la vitesse de restauration est connue par le calcul de l'évolution de l'approfondissement maximal par maille d'un are sur la sous-zone A Nord (Figure 130). La relation logarithmique entre les volumes extraits et l'approfondissement est maintenue au cours de la restauration de la sous zone, mais le facteur de cette loi logarithmique augmente au cours du temps. La première période hivernale montre une vitesse de restauration plus élevée pour des dépressions correspondant à des volumes extraits élevés. En dehors des périodes hivernales, cette vitesse est plus homogène. Le dernier différentiel calculé sur une année entière, intégrant une période hivernale complète, confirme que la vitesse de restauration est plus élevée pour des dépressions aux dimensions plus importantes.

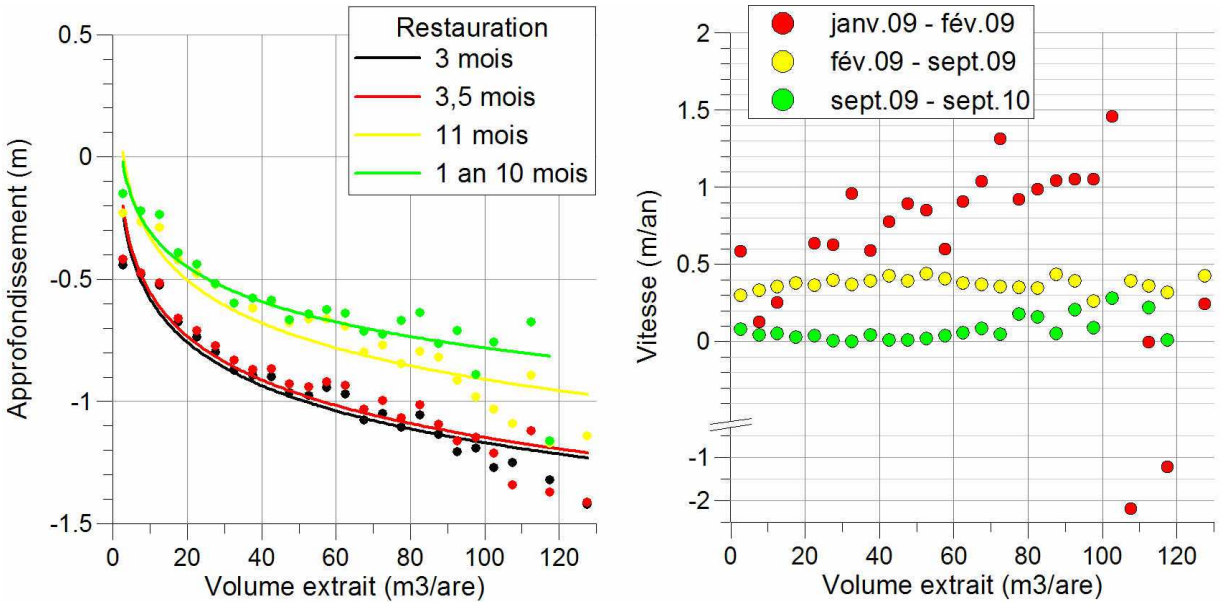


Figure 130 : Evolution de l'approfondissement et des vitesses de restauration des dépressions en fonction du volume extrait.

Pour un même volume extrait, l'évolution de l'approfondissement après l'arrêt des extractions va également suivre une loi logarithmique. La restauration est rapide au début notamment ici pour la zone A ou l'extraction s'achève avant une période hivernale puis la vitesse de restauration diminue progressivement.

Un modèle d'évolution de l'approfondissement en fonction du volume extrait et du temps de restauration est proposé (Figure 131). Ce modèle est construit à partir des valeurs d'approfondissement observées par maille d'un are en fonction du volume extrait sur les différents suivis bathymétriques. Ce modèle à deux paramètres suit une loi logarithmique de second ordre avec un coefficient de corrélation très bon (R^2=0,943) :

$$\Delta z = -0,8455 + 0,3282.\ln t - 0,0366.(\ln t)^2 + 0,1135.\ln V - 0,0567.(\ln V)^2 \quad (18)$$

avec t le temps depuis l'arrêt des extractions (mois) et V le volume extrait ($m^3.are^{-1}$).

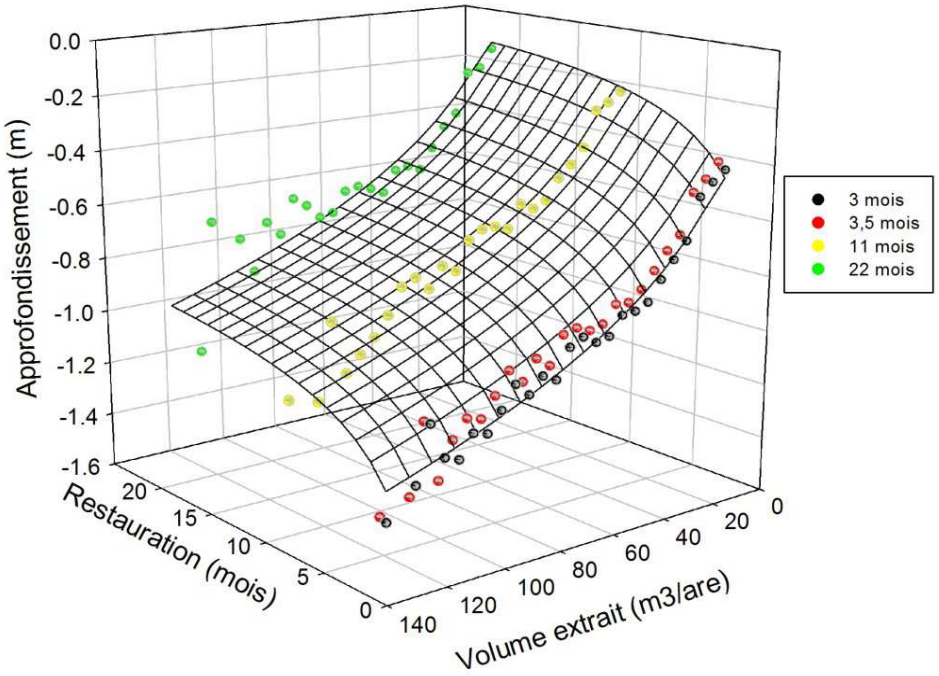


Figure 131 : Représentation 3D de l'évolution de l'approfondissement en fonction du temps de restauration et du volume extrait et représentation spatial du modèle d'évolution logarithmique de second ordre.

- Effet du nivellement expérimental

La comparaison des vitesses de restauration des dépressions en fonction du volume extrait entre la sous-zone A Nord non nivelée et la sous-zone A Sud nivelée montre que le nivellement a accéléré la restauration entre janvier et février 2009 pour des dépressions de faibles dimensions (Figure 132). Pour des dépressions correspondant à des volumes extraits jusqu'à 40 $m^3.are^{-1}$, le comblement est accéléré d'un facteur allant jusqu'à 7 dans le cas d'un nivellement.

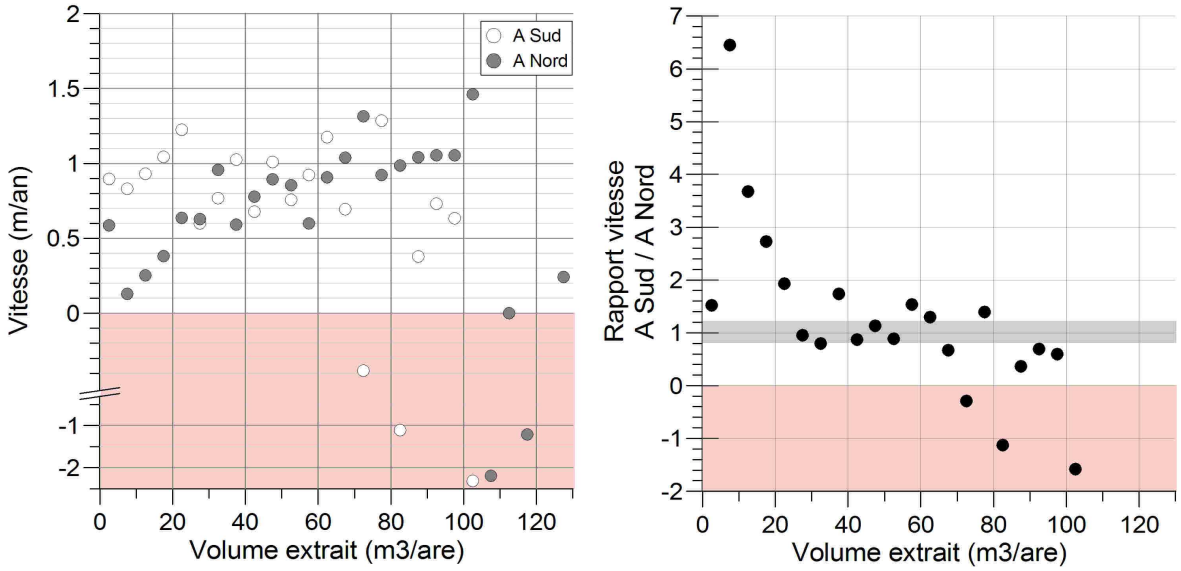


Figure 132 : Comparaison des vitesses de restauration des dépressions des sous-zones A Nord et A Sud en fonction du volume extrait.

c. A l'échelle de la zone

A cette échelle, la sous-zone A Nord et la sous-zone A Sud nivelée sont différenciées. Pour ces deux sous-zones, à la suite du premier hiver, l'élargissement et la diminution des pentes des flancs ainsi que le comblement du sillon sont à l'origine de l'homogénéisation des profondeurs. Cette homogénéisation se manifeste par une légère diminution de 3,5 % de l'écart-type de la bathymétrie calculé sur ses zones. Cette homogénéisation des profondeurs s'accompagne d'une baisse sensible de la moyenne bathymétrique (Figure 133) du fait d'une érosion des flancs plus importante que le comblement du centre des sillons et dépressions. Cette remarque est confirmée par la diminution moyenne des pentes. Par la suite, la poursuite de la baisse des pentes associée à la diminution de la profondeur moyenne des zones indique que le comblement de l'ensemble des zones se met en place. Lors de la deuxième année de restauration, les diminutions des pentes et de la profondeur des zones se poursuivent mais sont plus faibles ce qui indique un ralentissement de la restauration.

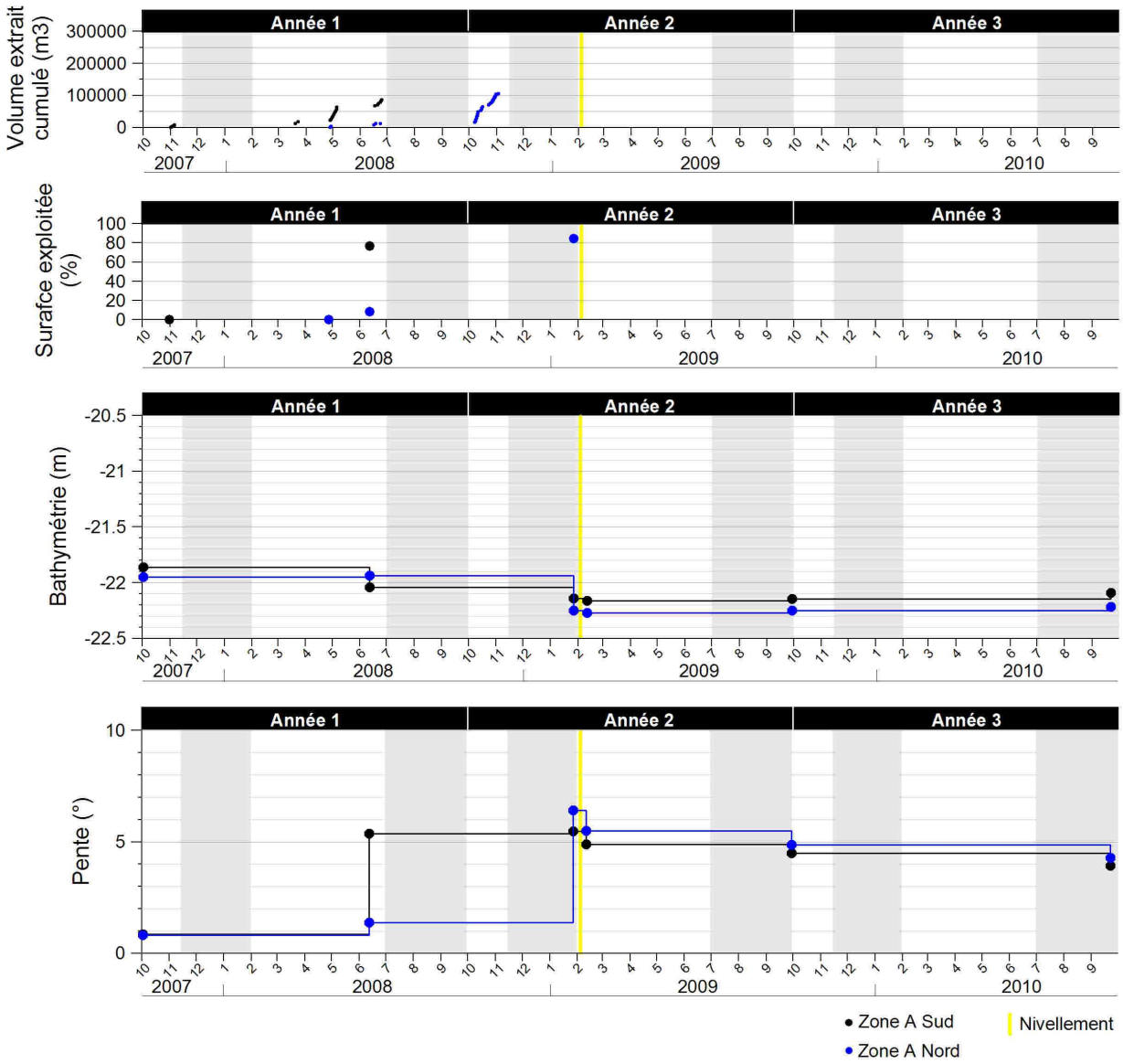


Figure 133 : Restauration de la zone A. Evolution des paramètres morphologiques des sous-zones A Nord et A Sud après l'arrêt des extractions.

- Effet du nivellement expérimental

L'effet du nivellement expérimental est étudié par la comparaison des valeurs moyennes de paramètres morphologiques de la sous-zone A Sud nivelée en janvier 2009 (cf. Chapitre 1, § 2.2.5, p 43) et la sous-zone A Nord non nivelée (Figure 133). La comparaison des vitesses de diminution de la moyenne bathymétrique et de diminution des pentes, calculées pour chacune des deux sous-zones à partir du différentiel bathymétrique anté- et post-nivellement. L'effet du nivellement pour la sous-zone A Sud dont l'intensité d'extraction est qualifiée de moyen-faible ne se fait pas ressentir de manière significative. En effet les vitesses de comblement obtenues de 0,14 cm.jour^{-1} et 0,06 °.jour^{-1} pour la sous-zone Nord contre 0,13 cm.jour^{-1} et 0,04 °.jour^{-1} pour la sous-zone S nivelée n'indiquent pas de différences caractéristiques.

5.2.2. Estimation de la durée de restauration

a. A l'échelle du sillon

Nous avons montré que la restauration pouvait être considérée comme à moitié réalisée pour certains sillons 27 mois après leur création, mais que la vitesse de restauration diminuait dans le temps et que celle-ci était plus importante en période hivernale (cf. §5.2.1.a, p 205). Par conséquent, la restauration ne sera pas complète pour 2 fois 27 mois, soit 54 mois (4 ans et 6 mois). Une estimation des temps de restauration peut être calculée à partir de la dernière vitesse de comblement calculée par le rapport entre l'approfondissement persistant lors du dernier levé bathymétrique (septembre 2010) et la dernière vitesse de restauration obtenue à partir du dernier différentiel bathymétrique sur une année complète (entre septembre 2009 et septembre 2010).

La durée de restauration t_r est définie d'après l'équation 19 :

$$t_r = \frac{\Delta_z}{v_c} + t_s \qquad (19)$$

avec t_r la durée de la restauration estimée, Δ_z l'approfondissement résiduel calculé lors du dernier relevé bathymétrique, v_c la vitesse de comblement obtenue pour le dernier différentiel bathymétrique effectué sur une année complète et t_s le temps écoulé entre la dernière extraction au droit de la dépression et le dernier relevé bathymétrique.

Cette restauration peut être estimée entre 4,5 ans et 7 ans pour des sillons perpendiculaires au courant, tous types de drague confondus, avec ou sans nivellement. La restauration pour des sillons parallèles devrait pouvoir être réalisée sur des périodes supérieures à 10 ans.

b. A l'échelle des dépressions

Trois approches sont proposées pour l'estimation des durées de restauration des dépressions.

La première approche porte sur l'évolution de sections transversales des trois dépressions au droit du mouillage des Aquadopp. La durée de restauration t_r est calculée à partir de l'équation 19.

Pour les dépressions 1, 2 et 3 (Figure 129, p 210) ces durées sont respectivement de 6,5, 7,5 et 9,5 ans.

La deuxième approche est une estimation des vitesses de restauration des mêmes dépressions au droit du mouillage des Aquadopp à partir de la différence des flux entrant et sortant des dépressions. On considère ici que cette différence correspond au flux de dépôt. En effet, nous considérons ici que les flux calculés sur la crête d'une dépression sont les flux entrants et ceux calculés en centre de la dépression sont les flux sortants. Les flux sont calculés à partir de la formule de Kleinhans et Van Rij (2002) couramment employée en sédimentologie, et à partir de la formule de Wu *et al.* (2000), plus adaptée au sédiment hétérogène qui caractérise la Bassin oriental de la Manche (Blanpain, 2009) et en intégrant l'effet d'entrave. Pour les calculs, les données de courantologie utilisées sont celles mesurées par les Aquadopp sur la crête et au centre d'une dépression sur un cycle tidal semi-diurne. Les données de granulométrie sont celles obtenues à partir des prélèvements effectués par les plongeurs sur une crête et au centre d'une dépression. Ces flux ont été calculés pour différentes conditions d'agitation caractéristiques du site, à savoir une période calme (H_s=0 m), une période d'agitation caractéristique (H_s=1,88 m) et une période de tempête exceptionnelle (H_s=4,34 m). Les évolutions des flux de dépôts, sans distinction de classes granulométriques, calculées pour ces différentes conditions au cours d'un cycle de marée, sont représentées sur la Figure 134.

Les flux sont plus faibles pour un calcul avec la formule de Wu *et al.* (2000). Ils sont plus faibles lors des étales et même quasi nuls lors de l'étale de PM. Ils sont positifs pour la plupart des conditions d'agitation observées sur site, ce qui indique un dépôt au niveau des dépressions mais selon la formule de Wu *et al.* (2000). Ils sont essentiellement négatifs en période de tempête ce qui indique une érosion des dépressions et non leur comblement. Ces dépôts sont essentiellement constitués de particules allant des silts aux sables grossiers avec une prépondérance des sables fins à moyens. L'érosion calculée par la formule de Wu *et al.* (2000) en période de tempête concerne l'ensemble des classes granulométriques des silts jusqu'aux graviers.

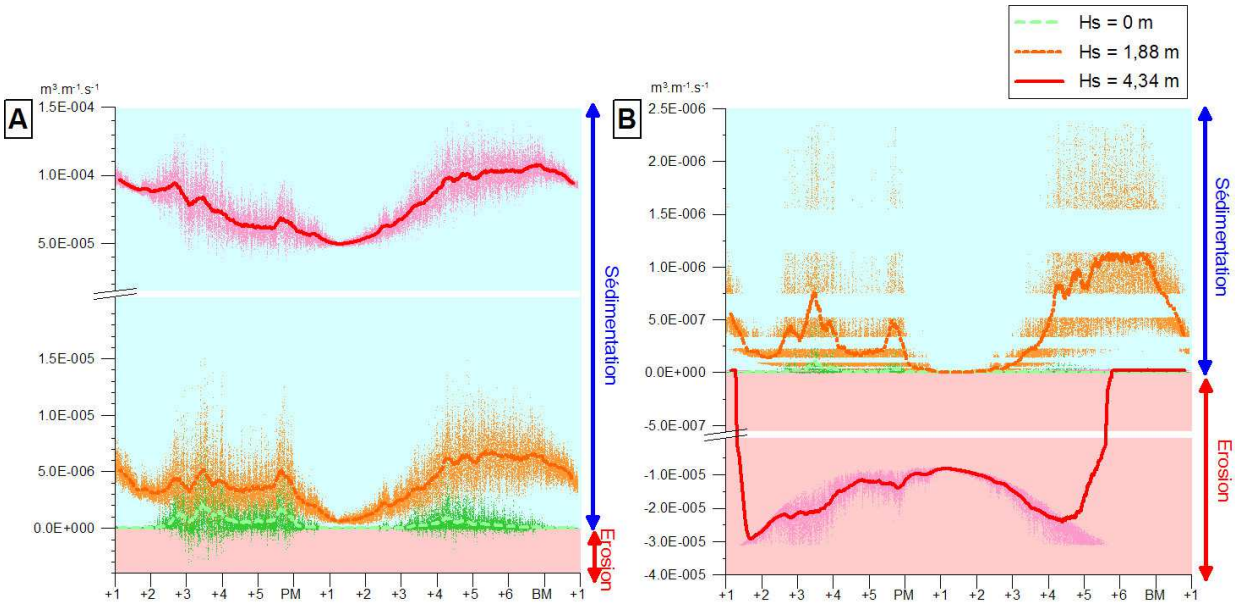


Figure 134 : Evolution des flux de dépôt calculés pour différentes conditions d'agitation à partir (i) des mesures de courant et (ii) des prélèvements sédimentaires, réalisés au centre et sur une crête de dépressions. A: selon la formule de Kleinhans et Van Rijn (2002). B: selon la formule de Wu et al. (2000).

Les flux de dépôts à l'échelle d'une année sont estimés à partir des flux calculés à l'échelle du cycle semi diurne pour les différentes conditions d'agitation et de la fréquence de ces périodes d'agitation au cours d'une année (cf. Figure 52, p 83). Nous considérons que les périodes calmes, agitées et fortement agitées sont rencontrées respectivement à 95 %, 4,99 % et 0,01 % de l'année. Le flux annuel de comblement est ainsi obtenu est de 17,62 $m^3.m^{-1}.an^{-1}$ selon la formule de Kleinhans et Van Rijn (2002) de 0,82 $m^3.m^{-1}.an^{-1}$ d'après la formule de Wu *et al.* (2000). Ce deuxième flux de comblement calculé est proche des volumes comblés obtenus par le différentiel bathymétrique de la dernière année de suivi sur les dépressions étudiées.

Les temps de restauration sont obtenus par le rapport du volume du creusement de la dépression avec les flux de comblement. Pour les trois dépressions étudiées sont respectivement de 7 mois, 8 mois et 1 an à partir du calcul des flux selon Kleinhans et Van Rijn (2002) et de 8, 8,5 et 17 ans à partir du calcul des flux selon Wu *et al.* (2000). Les valeurs obtenues avec la formule de Kleinhans et Van Rijn (2002) sont très faibles comparées aux temps de restauration estimés précédemment et confirment que cette formule n'est pas adaptée. Les valeurs obtenues avec la formule de Wu *et al.* (2000) sont du même ordre de grandeur que les temps de restauration précédemment calculés et sont relativement proches pour de faibles dimensions. Toutefois, la durée de restauration pour la dépression 3 aux dimensions plus importantes est doublée par rapport à celle obtenue selon la première approche.

Notons que cette méthode de calcul n'intègre pas les effets de pente qui interragisse sur les flux charriés.

La troisième approche repose sur la prise en compte du volume extrait et du rapport entre l'approfondissement maximal par maille d'un are du dernier relevé bathymétrique avec les vitesses de comblement correspondantes, issues du dernier différentiel bathymétrique annuel (Figure 135). En

supprimant les points aberrants non conformes aux temps de restauration donnés par les études antérieures, une loi polynomiale qui caractérise ces temps de restauration est proposée. Les temps de restauration sont compris entre 3 et 20 ans. Ils sont maximums pour des volumes extraits intermédiaires entre 40 et 80 $m^3.are^{-1}$. D'après la régression polynomiale, le temps de restauration des dépressions 1, 2 et 3 pour respectivement 53, 71 et 74 m^3 extraits sont proches et compris entre 13 et 14,5 ans. Ces valeurs sont donc supérieures aux valeurs obtenues avec l'approche 1 (6,5, 7,5 et 9,5 ans) et supérieures pour les dépressions de faibles dimensions (dépressions 1 et 2) dans le cas de l'approche 2 (8, 8,5 et 17 ans).

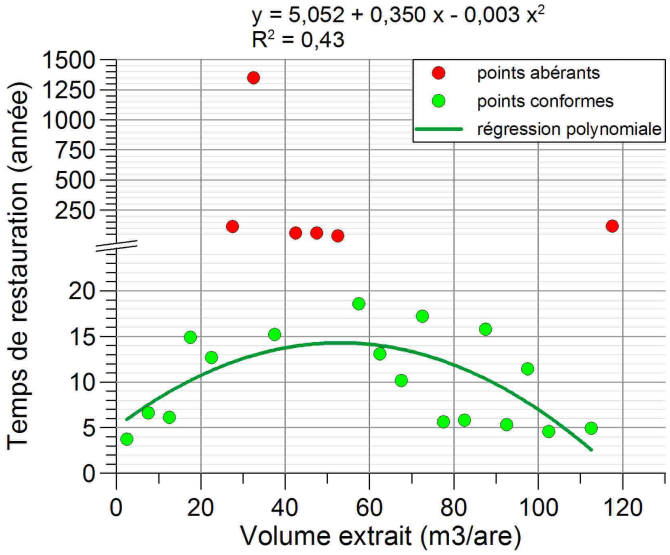


Figure 135 : Temps de restauration des dépressions en fonction du volume extrait.

Précisons que ces approches aboutissent à des temps de restauration sous-estimés car elles n'intègrent pas la diminution de la vitesse de comblement dans le temps.

Enfin, les deux premières approches sont préférées. En effet, la troisième approche est potentiellemnt la méthode la moins précise pour le calcul du temps de restauration. L'imprécision de la localisation des passages de tête d'élinde et donc du dénombrement de quantité de passage au sein d'une même maille d'un are rajoute une nouvelle incertitude pour cette troisième approche.

c. A l'échelle de la zone

Il est possible d'estimer le temps de restauration morphologique du site à l'échelle de la zone à partir de l'approfondissement moyen calculé sur la zone étudiée (équation 20) et à partir de la pente moyenne calculée sur la zone étudiée (équation 21).

$$t_r = \frac{\Delta_{z_{moy}}}{v_{c_{moy}}} + t_s \qquad (20)$$

$$t_r = \frac{\Delta_{dz_{moy}}}{v_{dz_{moy}}} + t_s \qquad (21)$$

avec t_r la durée de la restauration estimée, Δ_{zmoy} l'approfondissement résiduel calculé lors du dernier relevé bathymétrique, v_{cmoy} la vitesse de comblement obtenue pour le dernier différentiel bathymétrique effectué sur une année complète, Δ_{dzmoy} l'anomalie de pente moyenne calculée lors du dernier relevé bathymétrique, v_{dzmoy} la vitesse de diminution moyenne des pentes obtenue pour le dernier différentiel bathymétrique effectué sur une année complète, et t_s le temps écoulé entre la dernière extraction au droit de la zone et le dernier relevé bathymétrique. Précisons que ces variables sont des moyennes calculées à l'échelle de la zone étudiée.

Deux années après l'arrêt des extractions (plus exactement 23 mois), l'approfondissement moyen et l'augmentation moyenne des pentes de la sous-zone A Nord sont respectivement de 0,27 m et de 3,45°. La vitesse de comblement est d'environ 3,2 cm.an^{-1} et celle de la diminution des pentes est d'environ 0,60°.an^{-1} pour la dernière année de suivi. Par conséquent, à partir du dernier jour d'extraction sur la zone A Nord, il est estimé qu'environ 10,5 ans sont nécessaires pour que la moyenne bathymétrique revienne à celle de référence mais seulement 7,5 ans pour que la moyenne des pentes atteigne celle de référence. Précisons que ces valeurs sont propres à l'historique des extractions de cette sous-zone et n'est donc pas applicable à des zones d'extractions ayant cumulé des volumes extraits différents.

Pour la sous-zone A Sud, ces temps sont plus faibles principalement du fait d'un impact plus faible (volume extrait plus faible). La restauration de la moyenne bathymétrique est ici de 5 ans et celle des pentes de 3 ans.

5.2.3. Restauration sédimentaire

La lecture graphique des courbes granulométriques des stations des sous-zones A Sud et A Nord indique que le milieu n'est pas encore restauré après 17 mois. Certaines stations présentent des proportions d'éléments supérieurs à 16 mm, plus élevées que le milieu (Figure 136, station 122). L'hétérogénéité des sédiments est encore importante 17 mois après l'extraction comme le montrent des valeurs de silts pouvant être très élevées ou faibles (Figure 136, stations 122 et 124).

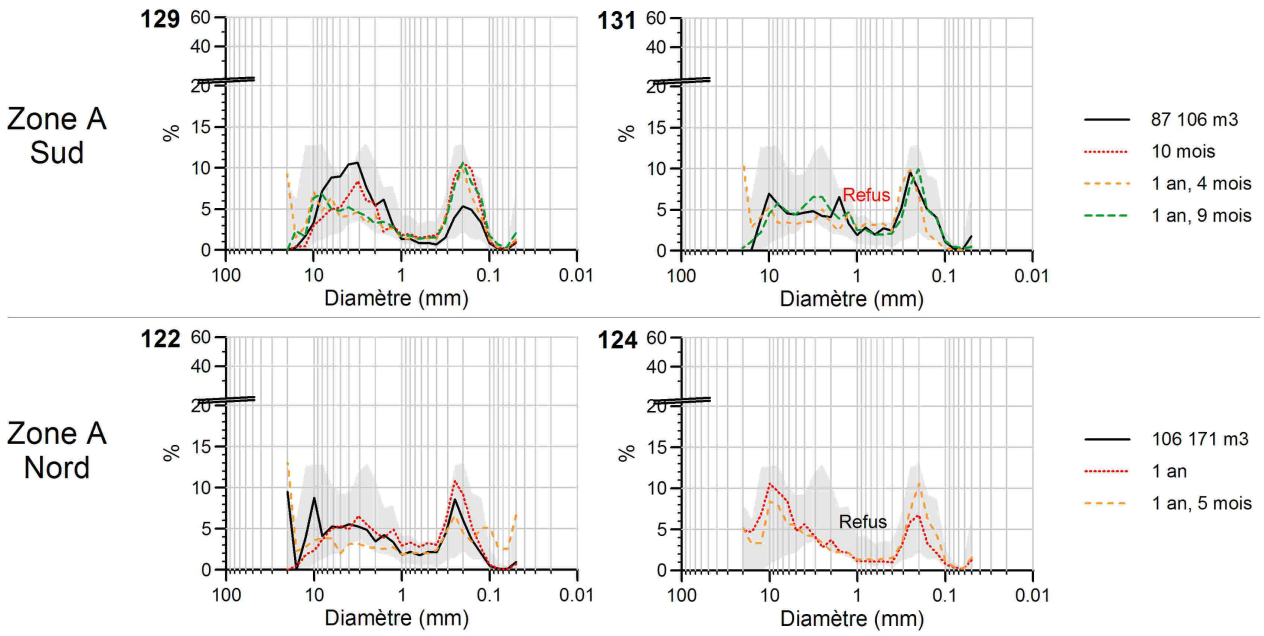


Figure 136 : Restauration sédimentaire de la zone A. Evolution de la granulométrie des stations de la zone A après l'arrêt des extractions.

Un test statistique de Kruskal-Wallis (Annexe 3), pour chacune des fractions granulométriques entre le groupe de stations de la zone A et celui des stations du milieu non impacté lors de la restauration, indique que :

- après 1 an, les proportions de sables fins et moyens sont toujours plus élevées que celles du milieu non impacté et celles des silts, sables grossiers, sable très grossiers et graviers sont toujours moins importantes que le milieu non impacté avec toutefois une augmentation de la fraction supérieure à 16 mm. Ces évolutions n'attestent pas d'une restauration mais d'une dynamique sédimentaire importante marquée par l'augmentation du matériel le plus grossier.
- après 1 an et 5 mois, une augmentation des proportions de silts et de sables très fins est nettement visible, rendant ces fractions supérieures à celles du milieu non impacté, et associée à une diminution des sables fins et moyens, redevenus conformes aux proportions du milieu non impacté. Ceci peut être induit par une restauration qui s'opère progressivement, couplée à des dépôts de surverse issus de l'extraction sur de la zone B.

- Estimation de la nature des sédiments après restauration morphologique

La granulométrie des sédiments qui rempliront les dépressions peut être estimée à partir des flux de comblement obtenus par la différence des flux charriés d'après la formule de Wu *et al.* (Wu *et al.*, 2000) entre le centre d'une dépression et sa crête (Figure 137). En condition de fortes agitations permanentes, les éléments supérieurs à 20 mm comblent la dépression ; ce qui a pour conséquence, d'entraîner un remplissage de graviers. Pour une agitation significative du site (H_s=1,88 m) ou en l'absence d'agitation, un sable

unimodal avec un mode centré sur les sables fins à moyens comblerait la dépression. Dans le cas de conditions d'agitations significatives, les proportions des sables grossiers aux graviers seraient légèrement plus élevées que pour des dépôts en conditions calmes. Le cumul des trois conditions aurait pour conséquence de former des dépôts de sables unimodaux différents de l'enveloppe naturelle initiale. Ces sables présentent un pic resserré autour des sables fins à moyens, une proportion sensible de silts et quelques rares éléments grossiers supérieurs à 20 mm déposés lors des périodes de tempêtes. Ces dépôts correspondent aux fractions granulométriques principales charriées sur le site : silts et sables fins à moyens.

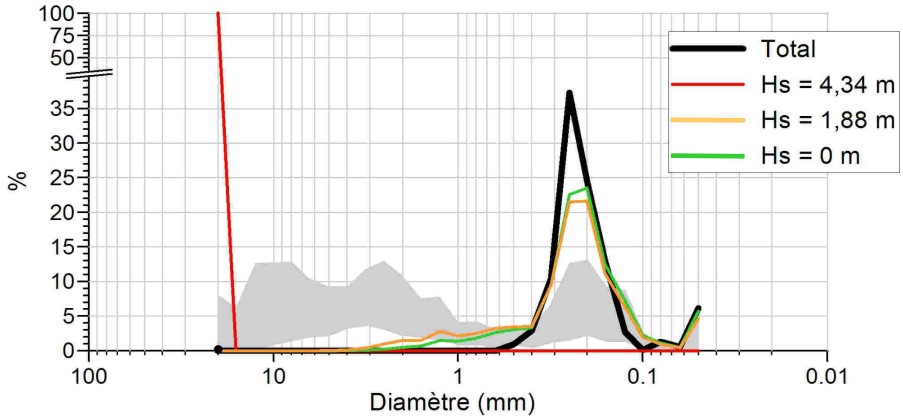


Figure 137 : Restauration sédimentaire de la zone A. Courbes granulométriques estimées du sédiment de remplissage des dépressions en fonction de l'agitation.

6. Synthèse/Discussion

Contrairement à l'étude du panache turbide, l'étude des impacts morpho-sédimentaires ne concerne que le site de Baie de Seine. Le site de Dieppe a été étudié antérieurement par l'UMR CNRS 6143 (Desprez, 2000; Desprez *et al.*, 2010; Le Bot *et al.*, 2010). Cette synthèse a pour objectif de faire le bilan des impacts et de la restauration observés et estimés sur le site de Baie de Seine, de les comparer au site de Dieppe, d'essayer d'extraire les paramètres de contrôle des impacts et de la restauration, caractéristiques du contexte hydro-sédimentaire de la Bassin oriental de la Manche, et enfin de proposer des indicateurs d'évaluation des impacts pour faciliter leur comparaison avec les travaux antérieurs et futurs sur d'autre sites.

6.1. Impacts morpho-sédimentaires : Baie de Seine et Dieppe

6.1.1. Caractéristiques du milieu non impacté

Les caractéristiques morpho-sédimentaires des deux sites de Baie de Seine et de Dieppe sont sensiblement différentes mais représentatives des caractéristiques de la Bassin oriental de la Manche. Le site de Baie de Seine est situé sur le banc de Seine, remplissage holocène se surimposant aux terrasses fluvio-marines de la paléo-Seine. Le site de Dieppe est localisé sur un ensemble de cordons littoraux témoins de l'évolution du trait de côte quaternaire et de la remontée du niveau marin. La hauteur d'eau est différente sur les deux sites, de 20 à 22 m en Baie de Seine pour 10 à 15 m à Dieppe, mais suffisamment faible pour que les fonds soient sensibles à l'action de la houle. Avec des pentes inférieures à 1°, la morphologie des fonds est peu accidentée pour le site de Baie de Seine, hormis en direction de la crête du banc de Seine, à plusieurs kilomètres au Sud et au SE, où des dunes sableuses ont été cartographiées (Figure 96, p 166). Par contre, la morphologie est plus accidentée à Dieppe avec des pentes qui peuvent atteindre 6° (d'après bathymétrie SHOM, 1993) au niveau de certains aplombs morphologiques entourant le site et au niveau des dunes situées au NO du site.

La couverture sédimentaire du site de Baie de Seine est constituée d'un gravier sableux bimodal, mal classé (pic à 225 µm dans les sables fin à moyens), avec un diamètre médian de 2,25 mm. Cette couverture évolue peu dans le temps et dans l'espace hormis en direction de la crête du banc de Seine où la couverture se réorganise en dunes de sables graveleux. Le site de Dieppe est formé par une couverture beaucoup plus hétérogène avec un gradient d'affinement depuis des cailloutis à l'Ouest jusqu'à des sables très fins à l'Est du site, en passant par des graviers et des sables graveleux (Cabioch et Glaçon, 1977). La médiane des sédiments varie entre 0,18 et 13,3 mm (Le Bot *et al.*, 2010). Dans les deux cas, les sédiments sont formés d'un mélange de particules siliceuses terrigènes et de fragments de coquilles carbonatées.

Pour les deux sites un gradient vertical est observé avec des sédiments plus grossiers en profondeur, constituant le matériel recherché par les carriers. Ce sédiment provient de terrasses gravelo-sableuses pour le site de Baie de Seine et de cordons de galets pour le site de Dieppe, tous deux surmontés d'une couverture sablo-graveleuse mobile.

Les courants sont respectivement sub-alternatifs et alternatifs pour le site de Baie de Seine et celui de Dieppe. Pour le site de Baie de Seine, le transit sédimentaire est orienté vers le SE mais évolue progressivement vers le NE en se rapprochant des côtes de Haute-Normandie. Pour le site de Dieppe la direction du transit est relativement stable, orientée vers le NE du fait d'un trait côte globalement linéaire. Pour les deux sites, les particules mobilisées concernent principalement la fraction comprise entre les silts et les sables grossiers.

D'après la classification de Connor et al. (2006), les deux sites se classent comme une plateforme peu profonde au substratum grossier avec une contrainte tidale élevée (classe PGE, cf. Figure 13, p 31).

6.1.2. Caractéristiques des impacts

Les impacts morpho-sédimentaires engendrés sur les fonds marins par l'extraction de granulats réalisée par une DAM se distinguent en deux catégories : directs et indirects. L'aspiration de sédiment par la tête d'élinde génère un impact direct d'excavation. La remise en suspension de particules par le passage de la tête d'élinde sur le fond et par la surverse forme un panache turbide à l'arrière de la DAM qui finit par engendrer un impact indirect sur le fond par la décantation des particules remises en suspension.

Les échelles spatiales de ces impacts sont différentes : l'excavation à lieu au droit de la zone d'extraction et les dépôts s'étendent au-delà de la zone d'extraction.

Ces deux types d'impacts sont caractérisés par des modifications sédimentaires, alors que seule l'excavation est caractérisée par des modifications morphologiques. Une Analyse Factorielle Discriminante (AFD) réalisée par regroupement spatial des résultats des tests de Kruskal-Wallis, effectués sur la granulométrie des sédiments, confirme que ces impacts se distinguent par des échelles spatiales différentes (Figure 138). Trois comportements d'échantillons se distinguent nettement selon leur localisation : en zones d'extractions, en zones de dépôts proches (< 250 m) ou en zones de dépôts éloignés (> 250 m) où les caractéristiques sédimentaires sont proches de celles du milieu naturel.

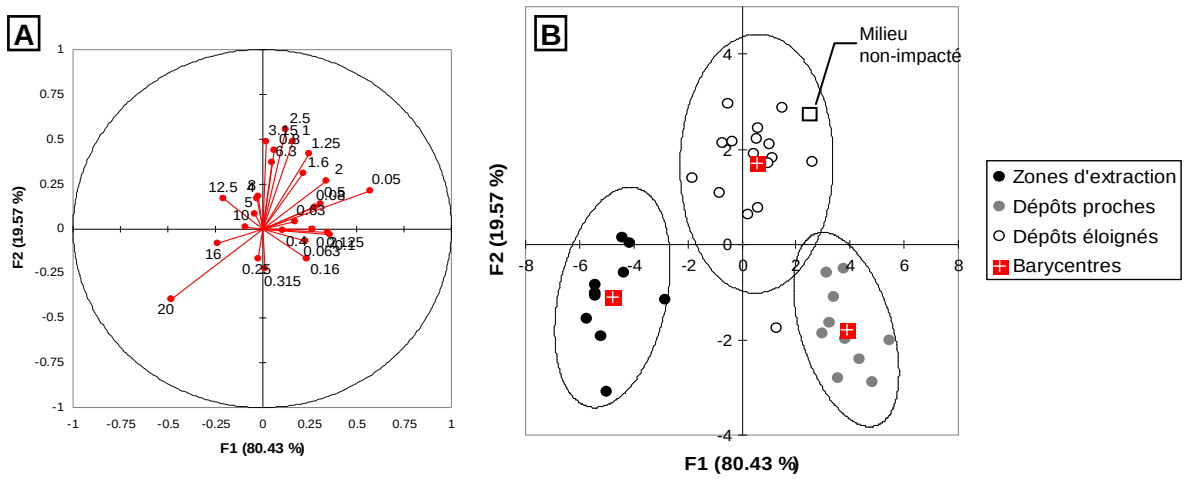


Figure 138 : Analyse Factorielle Discriminante par regroupement spatial des résultats des tests de Kruskal-Wallis effectué sur les classes granulométrique des échantillons sédimentaires prélevés sur le site de Baie de Seine. L'axe F1 représente 80 % de la variabilité granulométrique et l'axe F2 20 %. A : projections des corrélations des classes granulométriques avec les axes F1 et F2. B : projections factorielles des échantillons.

a. Excavation

L'impact direct d'excavation au droit des zones d'extraction est caractérisé par des modifications morphologiques et sédimentaires. Ces modifications sédimentaires sont clairement identifiées par l'AFD. Toutefois, les modifications morphologiques sont prédominantes sur les modifications sédimentaires. Les paramètres morphologiques d'approfondissement et de pente sont les paramètres les plus représentatifs de l'impact direct d'excavation.

Des études antérieures ont montré que les morphologies des excavations sont fortement influencées par les protocoles d'extractions : DAM, drague aspiratrice à l'ancre ou drague à godet (Kubicki *et al.*, 2007; Birchenough *et al.*, 2010; Manso *et al.*, 2010).

Ici, les caractéristiques morphologiques principales (approfondissement, pente et largeur) des excavations générées par une DAM sont fonction de l'intensité d'extraction et plus précisément du nombre de passages de la tête d'élinde dans un même secteur. En effet, un unique passage génère un sillon isolé dont la morphologie dépend de la puissance d'aspiration de la pompe d'extraction, de son orientation par rapport au courant dominant et du sens de l'extraction par rapport à la direction des courants au moment de l'extraction. La largeur globale du sillon est de 4 à 8 m (± 1 m) avec des flancs d'environ 2 m de large (± 1 m). L'approfondissement est de 0,08 à 0,44 m (± 0,10 m). Les pentes des flancs sont de 2 à 10° (± 10°). Des DAM à fort débit d'aspiration génèrent des sillons aux volumes excavés plus importants, ce qui se manifeste par une largeur, un approfondissement et des pentes plus importantes. Les sillons formés perpendiculairement au courant dominant sont plus larges, d'égal approfondissement et par conséquent avec des pentes plus faibles. L'orientation de l'extraction par rapport au courant observé pendant l'extraction semble influencer la vitesse de la DAM. Pour une extraction à contre-courant, le volume excavé est plus important avec un approfondissement et des pentes plus élevés.

La répétition du passage d'une élinde dans un même secteur a pour conséquence de cumuler les sillons formant des excavations appelées ici dépressions. Celles-ci sont donc plus larges, plus abruptes et plus profondes qu'un sillon isolé. L'approfondissement et l'augmentation des pentes suivent des lois logarithmiques en fonction des volumes extraits cumulés. Ces paramètres augmentent rapidement pour des faibles volumes extraits puis leur augmentation est moins marquée pour des volumes extraits plus importants (au-delà de 20 $m^3.are^{-1}$).

Pour un nombre élevé de passages dans une même zone, l'accumulation de sillons et de dépressions donnent naissance à une morphologie qui s'apparente à celle d'une souille.

L'AFD synthétise les résultats issus des tests de Kruskal-Wallis et effectués sur les classes granulométriques des échantillons sédimentaires des zones excavées. Elle confirme également la lecture graphique des courbes granulométriques de ces échantillons. Ces échantillons présentent le même comportement : (i) ils sont situés dans les parties négatives des axes F1 et F2 (ou légèrement positives de F2), et (ii) la granulométrie devient plus hétérogène par le mélange de la couverture superficielle mobile avec les éléments fossiles plus grossiers (particules supérieures à 16 mm). Sur la zone B, où les extractions ont été

plus intenses, responsables d'un approfondissement plus important, les sédiments deviennent plus grossiers dès 1,50 m avec des proportions élevées des fractions supérieures à 16 mm.

Les images vidéos montrent une augmentation des éléments supérieurs à 20 cm pour un approfondissement supérieur à 2 m. Cette augmentation est liée à la présence d'une grille installée au niveau de la tête d'élinde filtrant les blocs et à une intensité associée à un approfondissement de 2 m, suffisamment importante pour que le cumul des ces blocs soit perceptible par vidéo.

La nature des sédiments est relativement hétérogène avec certaines dépressions plus sableuses, d'autres plus graveleuses et certaines présentant un grand nombre de coquilles. Ces modifications sédimentaires (granulométrie et nature) au droit de l'excavation (sillons isolés, dépressions et zones d'extraction) dépendent surtout de la variabilité verticale du sédiment. L'hétérogénéité observée est induite par : (i) la mise à jour des couches plus profondes grossières, correspondant aux terrasses alluviales pour le site de Baie de Seine et aux cordons littoraux pour le site de Dieppe, (ii) la variabilité latérale des sédiments sous-jacents à la couverture sédimentaire mobile, et (iii) le piégeage dans le fond des sillons et dépressions des particules mobilisées par la dynamique sédimentaire naturelle et par l'extraction (remise en suspension). La mise à jour de sédiments fossiles plus grossiers avait déjà été observée par Kenny et Rees (Kenny et Rees, 1996) en Mer du Nord au large du North Norfolk (R-U).

A partir d'un approfondissement d'1,50 m, la nature de sédiments des zones excavées devient légèrement plus carbonatée en raison de l'inversion du rapport lithoclaste/carbonate des éléments grossiers entraînant une prédominance des carbonates en profondeur. Cette augmentation des teneurs en carbonates peut être induite par la mise à jour d'éléments carbonatés fossiles (coquilles ou calcaires) ou par la colonisation, dans les zones excavées, par des organismes encroûtants carbonatés.

b. Dépôt du panache

L'impact indirect, induit par les dépôts des particules issues de la décantation de la surverse et issues de la remise en suspension lors du passage de l'élinde sur le fond, est caractérisé par des modifications sédimentaires, qui sont clairement identifiées par l'AFD (Figure 138). Si des modifications morphologiques existent, celles-ci sont inférieures à la précision des mesures bathymétriques (10 cm).

La granulométrie de ces dépôts s'étend des silts jusqu'aux sables. L'épaisseur de ces dépôts est fonction de l'intensité de l'extraction (volume cumulé extrait), de la proportion de matériel solide remis en suspension par la surverse et par le passage de l'élinde sur le fond, et donc de la proportion de sables et silts contenus dans le matériel extrait et du mode opératoire de la surverse (par sabords latéraux ou par puits). Sur le site de Baie de Seine, les estimations des épaisseurs des dépôts peuvent dépasser le mm par an pour une extraction de 280 000 $m^3.an^{-1}$. L'extension de ces dépôts est fonction du comportement du panache turbide (dynamique ou passif, cf. Chapitre 2), de la vitesse de chute des particules remises en suspension (dépendant de leur nature et de leur granulométrie) et des courants établis au cours de l'extraction et pendant toute la

durée de vie du panache turbide. Si les particules remises en suspension sont hétérogènes, les dépôts présenteront un gradient de granulométrie et de densité (masse volumique) décroissant en s'éloignant de la zone d'extraction. Un tel gradient est observé sur le site de Baie de Seine, autour de la zone B (dont l'intensité des extractions est plus importante que celle de la zone A), où les analyses statistiques ont montré que les dépôts à proximité (< 250 m) sont principalement constitués de sables fins à moyens alors que ceux plus éloignés (au minimum jusqu'à 800 m) sont exclusivement composés de silts et de sables fins. Les estimations ont montré que les dépôts de sables fins à moyens peuvent s'étendre jusqu'à 800 m et les silts jusqu'à 6,5 km. Etant donné l'exploitation encore jeune sur le site de Baie de Seine, ces dépôts ne modifient pas considérablement la granulométrie du sédiment qui reste un sable graveleux avec une proportion de sables et silts, légèrement supérieure au milieu non impacté.

Les études antérieures ont observé des extensions de dépôts de sables fins globalement comparables, avec des enrichissements en sables fins dans un rayon inférieur à 500 m (Desprez, 2000) et inférieur à 1 km (Gajewski et Uścinowicz, 1993), sans toutefois établir de discrimination granulométrique spatiale. En Mer du Nord, dans le cas d'extractions avec criblage, des dépôts de sables fins ont été cartographiés jusqu'à une distance de 2,4 km (Robinson *et al.*, 2005) et au-delà de 3 km (Evans, 1994).

L'AFD synthétise et confirme ce gradient granulométrique des dépôts. Les zones de dépôts proches et éloignées sont clairement distinguées dans l'espace F1-F2 de l'analyse. Les zones de dépôts proches sont situées dans le cadran de coordonnées F1 négatives et de coordonnées F2 positives, témoignant d'une augmentation des sables très fins à moyens. Les zones de dépôts éloignés marquées par une coordonnée F1 positive et une cordonnée F2 autour de 0, sont situées dans un cadran témoignant de la stabilité des éléments grossiers et des sables très fins à moyens mais d'une augmentation sensible de silts (Figure 138, p 222). Les dépôts éloignés sont projetés à proximité du milieu non impacté ce qui confirme une meilleure stabilité sédimentaire des zones éloignées et donc un impact moindre que ceux observés sur les zones de dépôts proches et sur les zones extraites.

Les résultats des analyses sédimentaires ont montré l'influence de l'intensité des extractions sur l'augmentation de la proportion des silts et sables fins à moyens au niveau des zones de dépôt, comme observée autour de la zone B où le cumul des volumes extraits était plus important. Sur Dieppe, cette influence est confirmée avec une augmentation de 23 % et 54 % de la proportion de sables et silts respectivement pour un degré d'extraction croissant (Desprez *et al.*, 2010).

6.1.3. Caractéristiques de la restauration

Après la période d'extraction, les évolutions temporelles des excavations et des dépôts engendrent des impacts indirects liés à la restauration progressive du milieu. Cette évolution affecte la morphologie, les sédiments, les courants et les flux sédimentaires.

L'Analyse Factorielle Discriminante par regroupement liée à l'activité des extractions (milieu non impacté, extraction et restauration) des résultats des tests de Kruskal-Wallis, effectués sur la granulométrie des sédiments, confirme l'évolution morpho-sédimentaire (excavation et dépôts) des zones impactées après l'arrêt des extractions (Figure 139). Ainsi trois comportements sont distingués : zone non impactée, zone impactée (en cours d'extraction) et zone en restauration (période post-extraction). L'axe F1, qui comporte plus de 92 % de la variabilité granulométrique des échantillons, semble opposer les fonds naturels aux fonds impactés. L'axe F2, qui exprime environ 8 % de cette variabilité, semble discriminer les zones en cours d'extraction (barycentre à coordonnées positives) et les zones en restauration (coordonnées négatives).

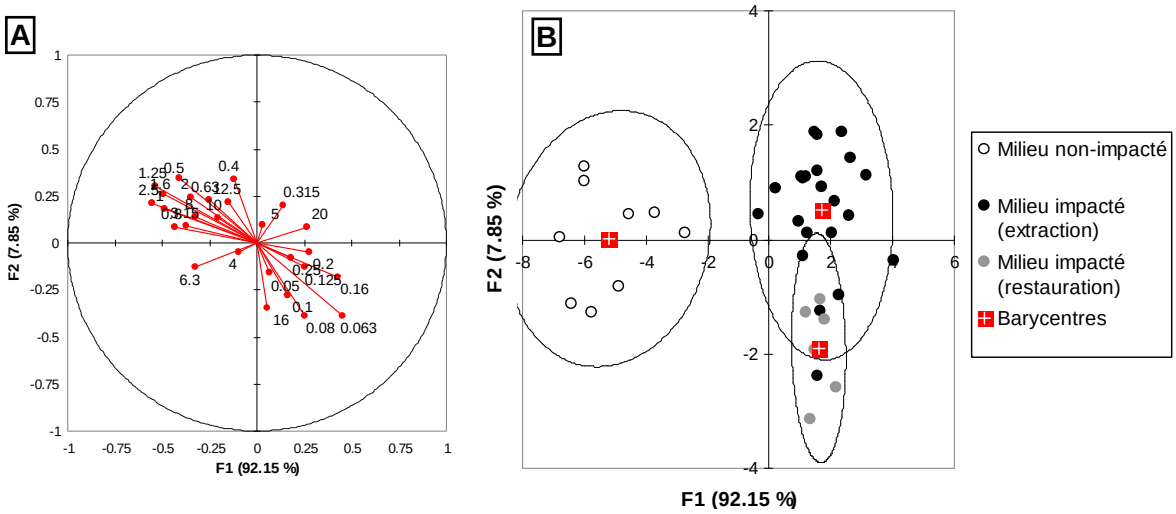


Figure 139 : Analyse Factorielle Discriminante par regroupement thématique des résultats des tests de Kruskal-Wallis effectué sur les classes granulométrique des échantillons sédimentaires prélevés sur le site de Baie de Seine. L'axe F1 représente 92 % de la variabilité granulométrique et l'axe F2 8 %.
A : projections des corrélations des classes granulométriques avec les axes F1 et F2. B : projections factorielles des échantillons.

Au droit des zones excavées, sur le site de Baie de Seine, des modifications courantologiques sont observés dès un volume extrait cumulé de 40 $m^3.are^{-1}$. Ces modifications des courants, associées au changement de nature des fonds, entraînent une modification des flux sédimentaires. A leur tour, les modifications des flux ont pour conséquence de faire évoluer progressivement les morphologies et les sédiments des zones excavées. Au droit des zones de dépôt, les modifications des sédiments impliquent également des modifications des flux par la modification du disponible sédimentaire. Ces évolutions progressives contribuent : (i) à la restauration des zones excavées si le disponible sédimentaire est suffisant et si les conditions hydrodynamiques ne sont pas trop fortes de sorte qu'un dépôt comble les dépressions, (ii) à la restauration des zones de dépôts si les flux charriés sont suffisamment forts entraînant la reprise des dépôts par la dynamique sédimentaire, ou (iii) à l'absence de restauration voire l'accentuation des excavations si le disponible sédimentaire n'est pas suffisant et/ou si les courants sont trop forts, comme observé sur le Kwinte Bank (Degrendele *et al.*, 2010) dont la stabilité atteste d'une absence de restauration 2 ans après l'arrêt des extractions.

Un modèle de restauration morphologique des excavations est proposé à partir des valeurs d'approfondissement en fonction de la durée de restauration et des volumes extraits par are. Ce modèle suit une loi logarithmique de deuxième degré avec des vitesses de comblement diminuant dans le temps. Cette restauration est plus forte en hiver comme l'ont observée Simonini *et al.* (2007). Ici, nous avons quantifié un potentiel de restauration environ 3 fois plus important en hiver qu'en été.

Les temps de restauration à l'échelle de la zone sont ici évalués à environ 11 ans. Pour le site de Dieppe, la restauration morphologique est supérieure à 10 ans. En effet, dans le couloir Sud-Ouest de la zone d'extraction de Dieppe, des traces d'excavations subsistent plus de 10 ans après leur creusement (Le Bot *et al.*, 2010). Ces temps de restauration ne sont pas directement comparables en raison de l'absence de connaissance des intensités de l'extraction responsable des excavations étudiées sur Dieppe. Toutefois, ces résultats permettent d'incrémenter le graphe des temps de restauration en fonction du milieu construit par Foden *et al.* (2009) (Figure 140). Nos résultats sont très différents de la restauration d'environ 4 ans de l'unique autre site au paysage sous-marin (Kenny et Rees, 1994, 1996; Kenny *et al.*, 1998b; Cooper *et al.*, 2007a; Cooper *et al.*, 2008). Il apparaît ici que la classification des paysages sous-marins proposée par Connor *et al.* (2006) ne permet pas une discrimination suffisante des environnements et que le graphe de Foden *et al.* (2009) n'est pas complètement adapté. Ces différences semblent être dues à des outils d'évaluation différents, des intensités d'extractions différentes et à des milieux aux caractéristiques différentes malgré leur regroupement sous un même paysage sous-marin. De plus le graphe de Foden *et al.* (2009) ne prend pas en compte les intensités d'extractions, facteur primordial pour la durée de restauration comme le montre le modèle de restauration morphologique des dépressions fonction du volume extrait.

Pour des dépressions circulaires générées par des extractions en points fixes en Mer Baltique, dans un environnement microtidal dominé par la houle, compris entre 9 et 21 m CM, formé de sédiment sablo-graveleux, et des volumes extraits proches de notre site d'étude (104 000 m^3 en 2000), les vitesses de comblement ont été quantifiées par Kubicki *et al.* (2007). Elles diminuent dans le temps et sont également proches de celles estimées dans notre étude autour de 3,5 $cm.an^{-1}$, une année après l'arrêt des extractions. L'environnement et le mode d'extraction (à l'ancre) sont différents de notre étude, mais les vitesses de comblement similaires tendent à confirmer que l'intensité d'extraction est un paramètre fortement influant sur la durée de restauration.

Notre étude montre également une éventuelle influence de l'orientation des sillons sur leur potentiel de restauration. En effet, les sillons formés perpendiculairement au courant dominant semblent plus larges, d'égal approfondissement et par conséquent avec des pentes plus faibles. Ceci s'explique par une restauration plus rapide des sillons formés perpendiculairement contrairement à ceux formés parallèlement aux courants dominants et à la dynamique sédimentaire. Cette remarque est argumentée par l'absence de restauration de la souille formée parallèlement aux courants sur le Kwinte Bank (Bellec *et al.*, 2010; Degrendele *et al.*, 2010).

Environnement marin (profondeur)	Substratum	Contrainte tidale (courants)	Abbréviation
Estuaire (0-30m)	Principalement meubles, occasionnellement rocheux	Variable : modérée à forte	EV
Plateforme peu profonde (0 à limite d'influence de la houle)	Grossiers	Faible	PGF
		Modérée	PGM
		Elevée	PGE
	Hétérogènes	Modérée	PHM
	Sables à sablo-vaseux	Variable	PV
Plateforme profonde (0 à limite d'influence de la houle)	Grossiers	Modérée	PPGM
		Elevée	PPGE
	Hétérogènes	Modérée	PPHM
	Sables à sablo-vaseux	Variable	PPV

Contrainte tidale : faible= 0 à 1,8 N m–2, modérée = 1,8 à 4,0 N m–2, et élevée >4,0 N m–2

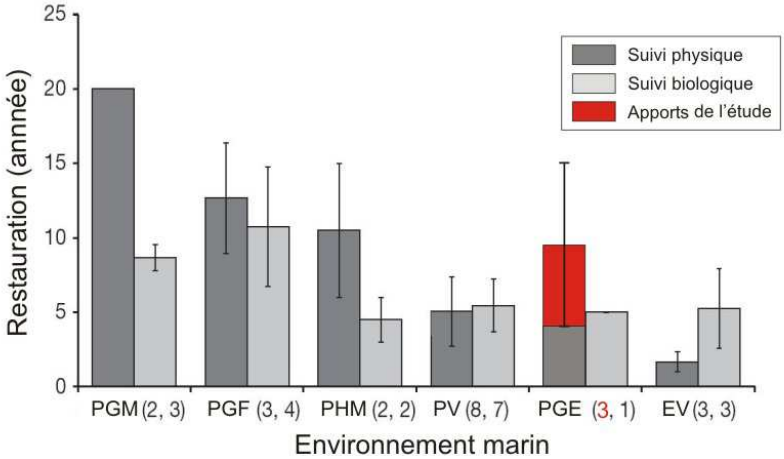


Figure 140 : Synthèse des temps de restauration étudié en fonction du milieu étudié (d'après Foden *et al.*, 2009) et apports de la présente étude.

L'évolution des sédiments des excavations sur la zone A montre un enrichissement en silts et sables très fins, au bout de 1 an et 5 mois. Deux sources peuvent être attribuées à ces comblements : (i) le transit sédimentaire naturel principalement constitué de silts et de sables très fins jusqu'aux sables moyens, et (ii) des dépôts issus des panaches turbides générés sur la zone B en cours d'extraction. En effet, nous avons montré que la zone A est sous l'influence des dépôts de particules fines de surverse de la zone B. La contribution de chacune de ces sources n'est pas quantifiée. Toutefois, la zone d'extraction A ne s'enrichit pas en éléments grossiers, constituants majeurs des sédiments fossiles excavés. Dès lors, il apparaît évident qu'une restauration sédimentaire à l'identique n'a pas lieu. L'estimation de la nature finale du comblement sur la base des calculs de flux sédimentaires indique un remplissage de silts et sables très fins à moyens.

Ces évolutions sédimentaires sont confirmées par l'AFD qui montre le début de la distinction des groupes de sédiments en cours de restauration, induit par leur enrichissement en silts et sables très fins à fins (Figure 139). Cette analyse confirme également l'absence d'une restauration mais un comblement en matériel plus fins que les sédiments initiaux.

L'évolution sédimentaire des zones de dépôts de la périphérie de la zone A est étudié jusqu'à 16 mois après l'arrêt des extractions. L'augmentation des proportions de silts, des sables très fins à fins en périphérie proche (< 250 m) et éloignée (800 m), et celle des sables moyens uniquement pour la périphérie

éloignée indiquent l'absence de restauration des dépôts et la contribution de ceux induits par les panaches turbides générés sur la zone B, exploitée après l'arrêt des extractions de la zone A.

L'AFD permet de bien distinguer cette évolution post-extraction vers des silts jusqu'aux sables moyens et l'absence d'un retour vers les caractéristiques des sédiments du milieu non-impacté.

Cette analyse statistique montre également que les sédiments supposés en restauration, des zones excavées et des zones de dépôts, évoluent de la même façon vers un enrichissement de matériel sableux fin. Cette évolution similaire appuie l'hypothèse de l'influence des dépôts des panaches générés sur la zone B.

6.2. Indicateurs

Pour faciliter la comparaison entre les différents impacts et leurs potentiels de restauration, en fonction des protocoles d'extraction (intensité d'extraction, débit d'aspiration des DAM, modes de surverse, orientation de l'extraction par rapport au courant dominant et sens des courants contemporains à l'extraction) et des conditions environnementales (caractéristiques du site), des indicateurs doivent être définis.

Pour exprimer l'**intensité d'extraction**, nous avons montré que la durée en $h.ha^{-1}.an^{-1}$ n'était pas le meilleur indicateur de cette activité du fait de l'intervention de diverses DAM, aux débits d'aspiration et aux modes de surverse différents, intervenant sur les zones d'extraction (cf. Chapitre 1 § 3.4, p 74). Nous en avons conclu que le paramètre de volume cumulé extrait par an était plus approprié. Pour ce cumul de volume extrait, il est impératif de connaître la surface extraite par an. Ceci permet de distinguer des extractions intensives et extensives, faibles et fortes. Toutefois la durée des extractions et la surface extraite doivent être renseignées. Rappelons que pour une comparaison plus aisée avec la synthèse bibliographique de Foden *et al.* (2009), l'intensité d'extraction est également exprimée en $t.km^{-2}.an^{-1}$.

Pour la définition d'indices propres aux impacts, il faut tout d'abord sélectionner les paramètres morpho-sédimentaires les plus discriminants pour la définition des impacts. Au droit de la zone d'extraction, nous avons montré que la morphologie était plus impactée que la sédimentologie et que l'approfondissement était le paramètre le plus sensible. Pour les impacts liés aux dépôts, c'est la sédimentologie des fonds qui est la plus affectée et plus particulièrement la proportion de sables et de silts par rapport à celle du milieu non impacté. Par conséquent, pour l'excavation, les indicateurs sont basés sur l'approfondissement et pour les dépôts sur les proportions de sables et de silts. Nous avons également montré dans cette étude une diminution des valeurs de ces paramètres après l'arrêt des extractions, que l'on peut considérer comme représentative de la restauration des fonds impactés.

Pour les zones extraites, la **valeur moyenne d'approfondissement** par zone constitue donc un bon indice si la bathymétrie initiale est connue (Tableau 17). Cet indice permet d'étudier l'évolution bathymétrique de la zone en cours d'extraction. Il reflète l'importance des volumes extraits sur la morphologie comme le montre les approfondissements plus importants pour des volumes extraits plus élevés entre les différentes sous-zones sur le site de Baie de Seine. Il confirme également le lien entre la durée de

restauration et les volumes exploités comme le montre les approfondissements des sous-zones A Nord et A Sud sur le site de Baie de Seine. Les approfondissements calculés en Mer Adriatique (Simonini *et al.*, 2007) et sur le Kwinte Bank (Degrendele *et al.*, 2010) montrent des variations importantes vraisemblablement liées à des caractéristiques du milieu différentes (sédiment, courants, etc.).

Tableau 17 : Approfondissement moyen par zone après l'extraction et lors de la restauration.

Site	Localisation	Baie de Seine				Mer Adriatique	Kwinte Bank
		Zone A N	Zone A S	Zone B N	Zone B S	(Simonini et al., 2007)	(Degrendele et al., 2010)
	Surface (km2)	0,31	0,31	0,31	0,31	1	1
Impact	Durée extraction	7 mois	8 mois	20 mois	5 mois	2 mois	3,5 ans
	Volume extrait (m3)	106 171	87 106	292 933	145 276	800 000	≈ 175 000
	Surface extraite	84%	84%	97%	87%	-	-
	Approfondissement (m)	**0,30**	**0,28**	**0,86**	**0,38**	**0,35**	**0,61**
Restauration	Durée	22 mois	27 mois	-	-	24 mois	15 mois
	Approfondissement (m)	**0,27**	**0,23**	-	-	**0,30**	**0,72**
	Durée (estimée)	10,5 ans	5 ans	-	-	-	-
	Approfondissement (m)	**0**	**0**	-	-	-	-

Pour les zones de dépôts (proches et éloignées), la **proportion de sables et de silts** est un bon indicateur à condition de connaître la gamme de variation naturelle de cette fraction granulométrique (Tableau 18). Cet indice confirme l'augmentation des dépôts en relation avec l'augmentation des volumes exploités comme le montre les différences entre les périphéries des zones A et B sur le site de Baie de Seine. Sur le site de Dieppe, cette relation avec l'intensité d'extraction est confirmée (Desprez *et al.*, 2010; Le Bot *et al.*, 2010). Cet indice permet aussi d'étudier la variabilité spatiale de ces dépôts. Il indique une diminution de l'importance des dépôts en s'éloignant de la zone A pour des faibles intensités d'extraction. Il permet de suivre la restauration des fonds impactés par ces dépôts, comme le montre la diminution des valeurs de l'indice en périphérie proche de la zone A, 22 mois après l'arrêt des extractions. L'augmentation observée en périphérie éloignée de la zone A, 22 mois après l'arrêt des extractions, peut être induite par l'influence des dépôts issus de l'extraction en cours sur la zone B où une reprise des dépôts par la dynamique sédimentaire. Enfin, la différence de valeur de cet indice entre le site de la Baie de Seine et celui de Dieppe indique l'importance des caractéristiques du site pour l'évolution temporelle des dépôts. Dix années après l'arrêt des extractions, les faibles valeurs en périphérie proche associées à des fortes valeurs en périphérie éloignée indiquent la reprise des dépôts par la dynamique sédimentaire sur le site de Dieppe où les forces de contraintes sur le fond sont plus élevées qu'en Baie de Seine.

Tableau 18 : Evolution de la proportion des sables et silts dans les zones de dépôts.

Site	Localisation	Baie de Seine				Dieppe	
		Zone A		Zone B			
	Surface (km^2)	0,62		0,62		6,12	
	Sable+Silt (%)	**47,5**		**47,5**		**51,63**	
Extraction	Durée	8 mois		20 mois		10 ans	
	Volume extrait (m^3)	193 277		438 209		-	
	Surface extraite	84%		92%		-	
Impact	Distance	< 250 m	250 m - 1 km	< 250 m	250 m - 1 km	< 250 m	250 m - 1 km
	Sable+Silt (%)	**59,0**	**56,7**	**63,8**	**65,0**	**52,06**	**71,32**
Restauration	Durée	22 mois		-	-	-	-
	Sable+Silt (%)	**51,9**	**61,3**	-	-	-	-

Ensuite, un **outil d'évaluation spatiale et temporelle de l'impact global** est proposé pour l'excavation et les dépôts du panache turbide afin de comparer, d'un site à un autre et d'une condition donnée à une autre, la persistance de ces impacts et leurs influences spatiales (Figure 141). Cet outil est un tableau à double entrée avec les distances d'impact exprimées par différentes colonnes et la persistance dans le temps de l'impact renseignée dans différentes lignes. Le degré d'impact est matérialisé par le remplissage des cellules du tableau selon un gradient de couleur allant du vert (faible) au rouge (fort), en passant par le jaune (modéré).

Pour l'excavation, ce degré d'impact est déterminé à partir de trois seuils d'approfondissement moyen :

- faible, dès qu'un approfondissement de 0,2 m est atteint ; ce seuil est celui qui permet d'intégrer l'incertitude de la mesure bathymétrique (0,1 m) et celle d'un différentiel bathymétrique,
- modéré, pour un approfondissement moyen supérieur à 0,5 m ; ce qui permet dans le cadre de notre étude de différencier les impacts sur la zone A et la zone B aux intensités d'extraction différentes,
- élevé, pour un approfondissement moyen supérieur à 1 m ce qui permet de distinguer des extractions très intenses.

Pour les dépôts, ce degré d'impact est déterminé à partir de trois seuils de proportions de la classe sédimentaire des silts aux sables :

- faible, dès que la proportion est supérieure à la moyenne à laquelle on ajoute un écart-type de celle du milieu non impacté,
- modéré, pour un taux supérieur à la moyenne auquel on ajoute 2 écarts-types ; ce qui permet de distinguer les impacts sur la zone A et la zone B,
- élevé, pour un taux supérieur à la moyenne auquel on ajoute 4 écarts-types ; ce qui permet de distinguer les zones à fort dépôt.

Il est important de préciser que pour le gradient d'impact des dépôts, nous intégrons l'ensemble des sables. En effet, les sables très grossiers, pourtant pas ou peu représentés dans la surverse, sont intégrés pour deux raisons : (i) pouvoir appliquer cet indice aux études antérieures, qui ne distinguent pas toujours la proportion des différentes classes de sables (cas de Dieppe), et (ii) l'absence de connaissances précises des particules remises en suspension par l'élinde pouvant potentiellement concerner les sables très grossiers.

Trois échelles de distance logarithmique sont choisies et sont identiques pour le tableau des impacts de l'excavation et celui des dépôts. Celles-ci sont également similaires au tableau construit pour l'évaluation des impacts du panache turbide (cf. Chapitre 2 § 4.3.1) :

- faible : de l'arrière de la DAM jusqu'à 1 km ; ce qui permet de différencier les dépôts de sables, qui ne dépassent pas le kilomètre,
- modérée : de 1 km à 10 km ; ce qui permet de différencier les dépôts de particules fines communément observés comme c'est le cas dans notre étude,

- forte : supérieure à 10 km ; ce qui englobe les dépôts éloignés de particules fines, observés dans certaines études antérieures.

Trois échelles temporelles logarithmiques similaires pour l'excavation et les dépôts, mais différentes de celles retenues pour l'évaluation des impacts du panache turbide, de durée de vie beaucoup plus courte, sont choisies à partir de l'instant où l'extraction a lieu :

- faible : de l'instant où le chargement est terminé,
- modérée : entre 2 ans et 10 ans ; ce qui permet de différencier des durées d'impacts fréquemment observées,
- forte : supérieure à 10 ans ; ce qui permet de différencier certains impacts persistants, observés sur certaines zones d'extraction.

Certaines gammes de distances et de persistances temporelles présentent une importante variation du degré d'impact. Par conséquent, ces gammes présentent plusieurs degrés d'impact.

Cet outil appliqué à l'approfondissement et aux dépôts permet donc d'étudier l'importance des impacts, leur étendue spatiale et leur pérennité dans le temps. L'influence de l'intensité d'extraction, sur l'excavation, les dépôts et leurs restaurations est visible comme le montre les tableaux sur le site de Baie de Seine, dont les sous-zones présentent des cumuls d'extraction différents (Figure 141).

Ces tableaux permettent également d'indiquer le manque de connaissance sur la durée de restauration de ces impacts sur de nombreux sites surtout dans le cas d'extractions étalées dans le temps qui masquent la restauration des impacts précédents comme le montrent les tableaux des dépôts (exemples des sites de Baie de Seine et de Dieppe). La durée de restauration, souvent longue, sur plusieurs années voire décennies après l'arrêt des extractions, contribue également à ce manque d'information. En effet, les sites étudiés récemment, qui intègrent des états de références, ne sont souvent pas encore restaurés.

Ces trois indices sont de bons outils pour la caractérisation des impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats marins, leur restauration et leur comparaison en fonction des protocoles d'extraction et des caractéristiques de l'environnement. Appuyons le fait que la construction du tableau spatio-temporel des impacts morphologiques de l'excavation et celui des impacts sédimentaires des dépôts nécessite respectivement la détermination de l'indice d'approfondissement et d'augmentation de la proportion des sables et silts.

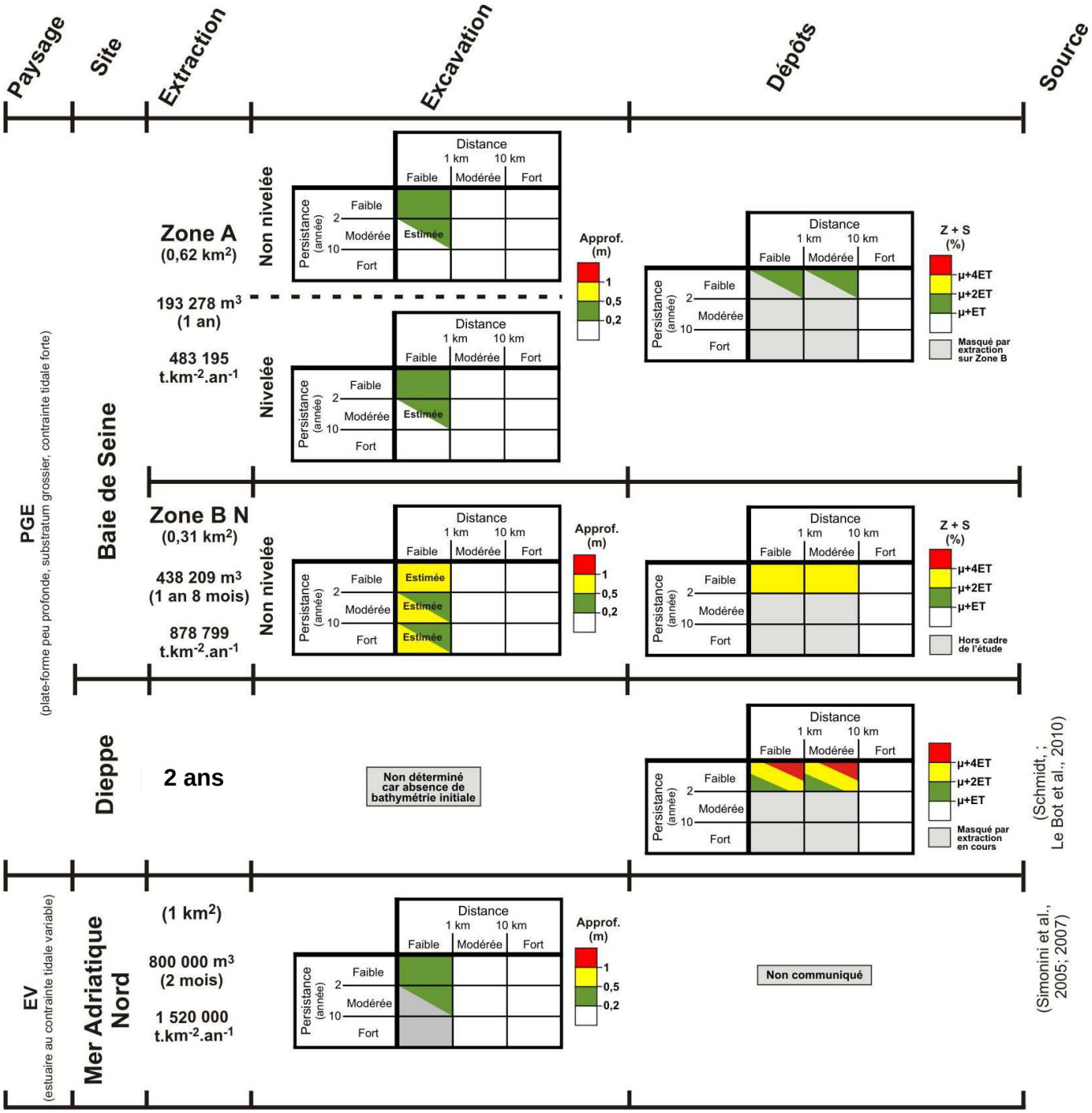


Figure 141 : Evaluation de l'impact spatio-temporel des impacts morpho-sédimentaire (excavation et dépôt) sur le milieu.

6.3. Relation avec le milieu du vivant

Les résultats des suivis morpho-sédimentaires sont confrontés aux autres suivis menés dans le cadre du GIS SIEGMA, concernant le benthos, la ressource halieutique et les relations trophiques. La comparaison des résultats permet d'établir une synthèse sur les impacts d'une extraction d'intensité moyenne-faible (1-2,5 $h.ha^{-1}.an^{-1}$) menée pendant un an sur la zone A et le processus ultérieur de restauration (cf. Annexe 4), avec l'impact d'une extraction d'intensité plus élevée (2,5-5 $h.ha^{-1}.an^{-1}$) menée pendant deux ans sur la zone B (cf. Annexe 5).

Au cours des extractions, quatre principaux effets sont observés sur le compartiment biologique au droit de la zone d'excavation. (1) La couche sédimentaire active, habitat du benthos, est extraite ce qui engendre la disparition ou la destruction de l'épibenthos et de l'endobenthos (Newell *et al.*, 1998; Desprez, 2000; ICES, 2009). Pour cet effet, ce n'est pas l'intensité d'extraction qui est primordiale mais plutôt le pourcentage surfacique extrait de la zone. (2) La destruction du benthos et, dans une moindre mesure, l'augmentation de la turbidité liée à la surverse des fractions fines du sédiment, provoquent la fuite des principales espèces de la communauté halieutique (Desprez, 2008; ICES, 2009). (3) La mise à disposition de MO liée au dépôt des panaches turbides, lors des premières semaines d'extraction qui affectent la couche biologiquement active du sédiment a pour conséquence d'attirer les soles. (4) Pour une durée et une intensité d'extraction plus importantes (cas de la zone B), l'approfondissement supérieur à 1,5 m provoque une modification nette du substrat qui devient plus hétérogène et plus grossier. En plus de la disparition de la communauté initiale, ce changement de substrat engendre l'apparition de nouvelles communautés benthiques et halieutiques ; le site est colonisé par des balanes et des étrilles caractéristiques du substrat plus grossier (Desprez, 2000; Boyd *et al.*, 2005; Cooper *et al.*, 2007b). Il paraît fort probable que ces organismes bénéficient aussi de l'apport en MO organique lié à la surverse (Desprez *et al.*, 2010), même si cet apport est moindre, une fois la couche superficielle extraite, puisqu'il s'agit d'individus filtreurs (balanes) ou nécrophages (étrilles).

Pour les zones de dépôts périphériques (Desprez *et al.*, 2010; Le Bot *et al.*, 2010), caractérisées par une faible augmentation des teneurs en silts et en sables fins à moyens, aucun effet significatif n'a été observé sur les principaux paramètres de peuplement (nombre d'espèces, abondance, biomasse) de la communauté benthique après une seule année d'extraction sur la zone A. Pour une extraction plus importante, sur la zone B, une tendance à l'augmentation de ces paramètres a été constatée en accord avec des observations réalisées à Dieppe et sur certains sites britanniques (Newell *et al.*, 1998; Desprez, 2000).

Sur la zone A, la restauration de la communauté benthique, appauvrie par les extractions, montre d'abord une colonisation du site par les étrilles puis les buccins (espèces nécrophages) avant le retour progressif de l'ensemble de la communauté bentho-halieutique 2,5 ans après l'arrêt des extractions (Desprez *et al.*, 2012).

7. Conclusions partielles

(1) Deux types d'impacts morphosédimentaires sont distingués : (i) un impact direct d'excavation, au droit de la zone d'extraction, marqué par des modifications principalement morphologiques mais aussi sédimentaires, et (ii) un impact indirect, au droit de la zone d'extraction et au-delà lié aux dépôts des particules remises en suspension sous forme de panaches turbides, uniquement marqué par des modifications sédimentaires.

(2) La morphologie des excavations est fonction de l'intensité d'extraction (nombre de passages répétés de la tête d'élinde) qui engendre des sillons isolés pour un passage, des dépressions dès deux passages et des souilles pour un nombre de passages élevé dans une même zone. La morphologie des sillons isolés est fonction de la puissance d'aspiration de la DAM, du sens par rapport au courant dominant et de l'orientation de l'extraction par rapport au courant contemporain de l'extraction. La morphologie des dépressions est fonction du volume extrait cumulé en suivant une loi logarithmique.

(4) La nature des sédiments des zones extraites devient plus hétérogène et peut varier d'une dépression à une autre (gravier, sable, coquille). Toutefois, une tendance à l'apparition de sédiments plus grossiers est relevée pour des approfondissements supérieurs à 1,50 m en raison de la progression des extractions dans les nappes alluviales fossiles, plus grossières que la couverture sédimentaire superficielle. Une densification des blocs supérieurs à 20 cm est observée avec la progression des extractions en raison de la grille placée sur la tête d'élinde et empêchant leur aspiration. Ces modifications sédimentaires sont fonction de la variabilité verticale sédimentaire, du potentiel de comblement des excavations par les particules mobilisées par la dynamique sédimentaire ou par celles remobilisées par l'extraction (au fond par l'élinde et en surface par la surverse).

(5) Les dépôts sont caractérisés par une granulométrie qui s'étend des silts jusqu'aux sables avec un gradient granulométrique décroissant en s'éloignant de la zone d'extraction. Dans les conditions d'extraction étudiées en Baie de Seine, les épaisseurs de dépôt, fonctions de l'intensité d'extraction (volume cumulé extrait), sont faibles et sont en moyenne inférieures à 1 $mm.an^{-1}$. Ces faibles dépôts entraînent des modifications certes significatives des proportions de silts et de sables, et plus précisément celles des sables fins à moyens (classes prédominantes dans la surverse), mais restent dans la même classe granulométrique des sables graveleux. L'extension des dépôts de sables moyens (classe des sables principalement remobilisée) est limitée à 250 m alors que celle des silts peut atteindre 6,5 km. Ces extensions sont fonction de la dynamique du panache turbide, de la vitesse de chute des particules et des courants.

(6) Après l'arrêt des extractions, ces impacts vont évoluer sous l'influence de flux sédimentaires eux même impactés. Au droit des zones de dépôts, la modification des flux est induite par celles des sédiments Au droit des zones excavées, la modification des courants amplifie l'impact sur les flux. Ces flux sédimentaires peuvent être érosifs ou favorable à un comblement selon le disponible sédimentaire et la contrainte de cisaillement.

(7) Sur le site de Baie de Seine, la restauration morphologique des excavations s'opère par élargissement, diminution des pentes et comblement des sillons et dépressions. Cette restauration morphologique est plus forte en hiver et diminue d'une année à l'autre. A partir de l'observation de l'évolution de l'approfondissement après extraction sur deux années, d'une surface de 0,31 km^2 extraite à plus de 80 % et dont l'approfondissement moyen est de 0,90 m la restauration morphologique est estimée à 10,5 ans.

(8) Une évolution sédimentaire des zones excavées est observée au bout de 1 an et demi après l'arrêt des extractions, mais n'est pas achevée. Cette évolution montre le début d'un comblement par les sables fins à moyens transportés par la dynamique sédimentaire, de nature et granulométrie différentes des dépôts grossiers fossiles extraits. Par conséquent, une restauration sédimentaire du site à l'identique n'a pas lieu.

(9) Une relation étroite des impacts morphosédimentaires existe avec ceux observés sur le biologique. L'excavation entraîne la raréfaction du benthos et la fuite de la communauté halieutique, hormis la sole attirée lors des premiers mois de l'extraction. La nature du substrat excavé et la nature du comblement post-extraction conditionne une restauration par une communauté biologique adaptée.

(10) Des indicateurs sont proposés pour chacun des deux types d'impacts morpho-sédimentaires. Pour l'impact direct d'excavation, l'indicateur proposé est l'approfondissement moyen par zone d'extraction. Pour l'impact indirect de dépôts, l'augmentation des proportions de sables et silts est un bon paramètre de contrôle, quantifiable et facilitant la comparaison. Enfin, pour chacun de ces impacts un tableau à double entrée, basé sur ces indices, permet d'évaluer et de comparer les degrés d'impacts à différentes échelles spatio-temporelles.

Conclusion générale

Les études antérieures, qui ont permis d'apporter des connaissances sur les impacts physiques induits par l'exploitation de granulats marins, ont peu quantifié les processus, notamment sur la plateforme continentale française. Le détail des mécanismes mis en jeu dans la formation et l'évolution des impacts ainsi que la détermination des paramètres-clés les contrôlant ne sont que rarement abordés. Quelques études publiées, essentiellement européennes, ont permis de distinguer deux types d'impacts directs : un impact morpho-sédimentaire au droit de la zone extraite et un impact affectant la colonne d'eau par la remise en suspension formant un panache turbide à l'arrière d'une Drague Aspiratrice en Marche (DAM). Un troisième impact, cette fois indirect, concerne le dépôt des particules du panache turbide sur le fond. Certains des travaux antérieurs proposent des temps de restauration en fonction des paysages sous-marins impactés mais ne tiennent pas compte de l'intégralité des paramètres forçants. Ces travaux ont souvent pour objectif premier d'étudier l'impact des extractions sur les organismes benthiques intégrateurs de ces modifications (e.g.Newell *et al.*, 2004; Lozach et Dauvin, 2012). En France, pour des extractions au large de la Loire, Boutmin (Boutmin, 1986) a étudié la remise en suspension liée à la surverse et a estimé la durée de vie du panache turbide résultant. Les impacts morpho-sédimentaires publiés n'ont été étudiés que sur le site de Dieppe malgré l'absence d'état de référence précis et de connaissances détaillées sur l'intensité d'extraction (e.g. Desprez, 2000; Desprez *et al.*, 2010; Le Bot *et al.*, 2010). Enfin, la restauration et la recolonisation ont été suivies sur la souille CNEXO au large du Havre en Baie de Seine en ne permettant toutefois qu'une connaissance moyenne, à l'échelle de l'ensemble de la zone (Lemoine *et al.*, 1999).

Les travaux de cette thèse permettent de caractériser les impacts physiques sur la colonne d'eau et sur le fond, induits par des modes d'extraction qui ont fortement évolué depuis les années 80 (nouvelles DAM plus puissantes et modes de surverse diversifiés). L'analyse et l'interprétation des suivis réalisés à l'aide d'outils acoustiques et optiques appropriés ont permis de comprendre les processus mis en jeu lors de la formation et de l'évolution du panache turbide. Par la comparaison de suivis de panache générés dans des conditions d'extractions et des conditions environnementales différentes, les paramètres influençant les caractéristiques intrinsèques du panache et sa durée de vie sont déterminés. Les impacts morpho-sédimentaires et leur restauration ont été déterminés en fonction des conditions d'extraction et de celles du milieu. Cette étude intégrative originale, couplant suivi du panache turbide dans la colonne d'eau et impacts morpho-sédimentaires sur les fonds, permet de corréler ces impacts entre eux et ainsi d'avoir une meilleure compréhension de leurs interactions. Des outils de gestion sont proposés afin de mieux appréhender ces effets et de réaliser des comparaisons inter-sites. L'ensemble des résultats a fait l'objet de publications scientifiques (Duclos *et al.*, 2009, 2010c, e, d; Duclos *et al.*, 2012 ; cf. Annexes 5,6 et 7) et d'une valorisation

sous la forme de rapports, de comptes-rendus et de présentations à destination des industriels, de la Préfecture et du GIS SIEGMA (e.g.Duclos *et al.*, 2010a, b; Desprez *et al.*, 2012).

I. Impacts indirects et directs

L'étude confirme : (i) des impacts directs, morpho-sédimentaires, sur les fonds au droit de l'extraction, induits par l'excavation, (ii) des impacts directs, hydrologiques, sur la colonne d'eau par la remise en suspension de particules sous forme d'un panache turbide à l'arrière de la DAM et issus de la surverse en surface et du passage de l'élinde sur le fond, et (iii) des impacts indirects, morphosédimentaires, liés aux dépôts des particules des panaches sur le fond. L'étude montre et quantifie la restauration et l'évolution de ces impacts dans le temps.

• Le panache turbide

La panache turbide formé à l'arrière de la DAM est généré par la rencontre de deux panaches : (i) un de surface, formé par la remise en suspension liée à la surverse (trop-plein d'eau chargé en particules fines rejeté en surface par la drague), et (ii) un benthique, induit par la remise en suspension liée au passage de la tête d'élinde sur le fond. Difficilement quantifiables, les proportions du panache benthique sont fonction de la nature du matériel extrait et du débit d'aspiration de la DAM. Ces deux panaches se confondent 10 min après le passage de la drague, par la dispersion du panache benthique et la décantation du panache de surface. Les modalités de la formation du panache de surface sont connues grâce aux prélèvements effectués à bord de la DAM. Les matières en suspension ont des concentrations variant entre 5 et 20 $mg.L^{-1}$ et sont formées essentiellement de particules organo-minrérales agrégées ou isolées dont la granulométrie correspond à des sables silteux. Les caractéristiques de la surverse sont fonction du matériel extrait, du débit d'aspiration et du mode de surverse (sabords ou puits central).

Le comportement du panache turbide, dynamique ou passif, dépend du type de surverse (puits central ou sabords) et de la pratique ou non d'un criblage. En Bassin oriental de la Manche, avec les caractéristiques d'extraction sans criblage, celui-ci est essentiellement passif. Son évolution, qui conduit à sa disparition progressive, est régit par des processus d'advection, de dispersion et de décantation.

Dans le contexte macrotidal de cette plateforme interne de Bassin oriental de la Manche, les conditions d'extraction (alternance avec ou contre-courant, débit de l'aspiration, capacité de chargement, type de surverse et pratique du criblage) contrôlent les concentrations initiales, la géométrie du panache (ici en chevrons), sa dynamique, mais pas son temps de dispersion qui reste constant quelles que soient les conditions d'extraction.

La qualité du matériel dragué et les courants tidaux conditionnent la mobilité du panache et donc l'extension des dépôts associés. En Baie de Seine, le panache turbide se développe jusqu'à 8,5 km au-delà du point de surverse lors du flot, pour des durées moyennes d'extraction de 3 heures.

En Bassin oriental de la Manche, les concentrations, la granulométrie et la nature initiale des matières en suspension sont surtout contrôlées par la nature du sédiment. La hauteur d'eau et le régime de

houle se rajouteront à ces paramètres-clés, notamment pour le temps de disparition du panache et la remise en suspension des particules de panaches antérieurs déjà décantées. Ce temps de disparition est d'environ 2h-2h30 pour la Baie de Seine et de 1 h pour Dieppe.

• L'excavation

Au droit des zones d'extraction, la morphologie est le paramètre le plus modifié. Des objets morphologiques d'ampleurs différentes sont créés selon l'intensité d'extraction, plus exactement selon le nombre de passages de la tête d'élinde. On distingue : (i) des sillons isolés générés par un passage unique, (ii) des dépressions formées par la répétition des passages dans un même secteur, et (iii) des souilles, résultat d'un grand nombre de passages entraînant un approfondissement de l'ensemble de la zone d'extraction.

Les paramètres morphologiques principaux des sillons sont leur approfondissement compris entre 0,08 m et 0,44 m, la pente de leurs flancs comprise entre 2 et 10° et leur largeur comprise entre 4 m et 8 m. Ces paramètres dépendent de la puissance d'aspiration de la DAM, de l'orientation du sillon par rapport au courant dominant et de l'orientation des profils d'extraction par rapport au courant contemporain de l'extraction. Les paramètres morphologiques des dépressions dépendent du volume extrait cumulé dans un même secteur et des distances entre les passages répétés. Les paramètres d'approfondissement et de pente maximale des flancs suivent une loi logarithmique qui est fonction du cumul de volume extrait. La morphologie d'ensemble des souilles dépend du caractère intensif ou extensif de l'extraction.

La nature des sédiments dans ces excavations est fonction de la variabilité de la lithologie. Dans notre cas, les sédiments excavés sont de plus en plus grossiers avec l'approfondissement et la dynamique sédimentaire entraîne un comblement par des sédiments sableux fins. Les excavations de faible approfondissement, induites par une intensité faible, montrent des sédiments hétérogènes. Pour un approfondissement supérieur à 1,5 m, la part de sédiments grossiers devient prédominante. Une densification des blocs supérieurs à 20 cm pour un approfondissement supérieur à 2 m, est liée à la présence d'une grille installée sur la tête d'élinde qui filtre ces blocs.

La modification morphologique de la zone excavée va engendrer celle des courants à proximité du fond. Associées aux changements sédimentaires, ces nouvelles conditions hydrodynamiques engendrent la modification des flux sédimentaires.

• Les dépôts

Les dépôts, dont la granulométrie s'étend des silts jusqu'aux sables moyens, montrent un gradient granulométrique décroissant en s'éloignant de la zone d'extraction. Dans les conditions d'extraction étudiées en Baie de Seine, les épaisseurs, variables en fonction du volume cumulé extrait, sont faibles et sont en moyenne inférieures à 1 $mm.an^{-1}$. Par conséquent, la couverture sédimentaire mobile sablo-graveleuse est peu modifiée. L'extension des dépôts de sables moyens est potentiellement limitée à 250 m autour de l'extraction alors que l'essentiel des silts se dépose jusqu'à 6,5 km. La distance de dépôt est fonction de la dynamique du panache turbide, de la vitesse de chute des particules et des courants. Leur nature est liée à

celle des particules remises en suspension par la surverse et par l'élinde sur le fond, donc par la nature du substrat et par la vitesse de la DAM.

• La restauration

La restauration morphologique des excavations s'opère par un élargissement, une diminution des pentes des flancs et un comblement. Elle est plus forte en hiver et sa vitesse diminue au cours du temps avec une vitesse de comblement estimée à 3,5 $cm.an^{-1}$ une année après l'arrêt des extractions. A partir des valeurs d'approfondissement, la restauration morphologique est estimée à 10,5 ans pour un approfondissement moyen de 0,90 m sur une zone de 0,31 km^2 extraite à plus de 80 %.

Cette restauration morphologique s'effectue d'abord par l'effondrement des pentes puis par le remplissage par des sédiments issus de la dynamique sédimentaire. Les sédiments en mouvement sont souvent différents des sédiments fossiles essentiellement par leur granulométrie puis par leur nature. Par conséquent, on ne peut pas parler de restauration sédimentaire à l'identique mais d'évolution sédimentaire. En Baie de Seine, le remplissage des sillons se fait par des sables fins à moyens.

Un test de restauration forcée par nivellement sur une zone faiblement exploitée (une année d'exploitation) ne montre pas de résultats significatifs sur l'accélération de la restauration morphologique.

Si les extractions sont trop proches, la restauration est masquée par les apports dus à la surverse de l'extraction d'une zone voisine, même située à quelques kilomètres. Toutefois, la diminution progressive des sables moyens indique le début d'une restauration impulsée par la dynamique sédimentaire de la couverture superficielle.

II. Recommandations

Les réflexions sur la stratégie des suivis et leur validation in situ permettent d'apporter des éléments pour améliorer les recommandations de suivi proposées par l'Ifremer (disponible sur wwz.ifremer.fr/drogm_eng/Mineral-resources/Marine-materials). L'étude des impacts sur différents environnements (Baie de Seine et Dieppe), sous différentes conditions d'extraction, et la comparaison des résultats de l'étude avec les travaux issus de la bibliographie permettent de proposer des outils de gestion, nécessaires pour évaluer le degré d'impact et les échelles spatio-temporelles concernées.

• Stratégie des suivis

Les recommandations proposées par Ifremer ne traitent que certains aspects du suivi des extractions. Les travaux présentés dans cette étude permettent de compléter les recommandations, en particulier pour ce qui concerne le panache turbide, la connaissance du milieu non impacté et le potentiel de restauration des zones impactées.

En effet, l'Ifremer ne propose pas aujourd'hui de suivi du panache turbide qui, certes, impacte la colonne d'eau sur des temps plutôt courts mais dont les dépôts modifient le fond sur des durées plus longues. Pour l'étude du panache turbide, un état de référence du milieu est nécessaire. Celui-ci passe par la connaissance des variations au cours de cycles tidaux des caractéristiques hydrologiques sur l'ensemble de la

colonne d'eau et de l'influence de la houle sur ces paramètres. Ensuite, des suivis lors des extractions doivent être effectués : (i) sur la DAM pour caractériser la surverse en fonction des caractéristiques de l'extraction (mode de surverse et débit d'aspiration des DAM), et (ii) au sein du panache selon un suivi lagrangien pour caractériser la dynamique du panache dans les conditions de vitesses maximales de courants, avec et sans agitation et selon différentes conditions d'extraction (contre et avec courants).

La connaissance des courants et celle du matériel rejeté par la drague (connu par le suivi du panache sur la DAM) sont essentielles afin de déterminer des zones de référence morpho-sédimentaire, suivies tout au long de l'extraction et non impactées par les dépôts. En effet, courants et nature du matériel rejeté par la surverse conditionnent l'extension des zones de dépôts des particules du panache turbide, en fonction du moment où se déroule les extractions au cours des cycles tidaux semi-diurnes et lunaires. Le protocole de l'Ifremer, recommandant l'existence de zones de référence, spécifie une distance minimale de 500 m pour leur placement, mais notre étude montre que cette distance, variable d'un site à l'autre, peut-être précisée. Soulignons que ces zones de référence sont essentielles afin de dissocier les éventuelles évolutions naturelles du milieu de celles induites par l'extraction.

Enfin, il est important d'avoir une meilleure évaluation des potentiels de restauration des zones impactées (zones excavées et dépôts). A partir de la connaissance des conditions hydrodynamiques et de la nature de la couverture sédimentaire superficielle, les flux sédimentaires peuvent être calculés. Grâce à la connaissance de ces flux et à celle des volumes excavés, des estimations de temps de restauration peuvent être proposées. Les travaux issus de la bibliographie estiment des temps de restauration étalés de deux années à plusieurs décennies en fonction de milieu, mais aussi parfois une absence de restauration (e.g. Degrendele *et al.*, 2010). Toutefois, en cas de manque de connaissance précise de la durée de restauration de ces impacts sur un site donné, il est important de réaliser des relevés morpho-sédimentaires après l'arrêt des extractions, selon un pas de temps plus court que celui de 5 ans proposé par l'Ifremer.

• Outils de gestion

L'étude des impacts physiques sur la colonne d'eau et sur le fond, par des mesures in situ, permet de proposer des lois de comportements et des indicateurs de caractérisation et de quantification des impacts.

Des modèles de l'impact de l'extraction sur la morphologie de la zone excavée sont proposés : des lois d'approfondissement et d'augmentation des pentes en fonction de l'intensité d'extraction (cumul du volume extrait) et une loi de diminution de l'approfondissement après l'arrêt des extractions en fonction du temps et de l'intensité des extractions.

Des indicateurs propres aux trois impacts (turbidité liée au panache, excavation et dépôts de panaches) sont proposés et permettent une comparaison inter-sites :

* le temps de disparition $T_{1,25[naturel]}$ et le rapport I/R de la masse de sédiments rejetée par surverse à celle chargée permettent une bonne description de la remise en suspension (concentration en MES) liée aux panaches turbides,

* l'approfondissement moyen à l'échelle de la zone est un bon indicateur de l'excavation,

* le pourcentage de sables et de silts est le meilleur indicateur de la présence de dépôts de panache.

Un tableau spatio-temporel a été établi pour définir le degré d'impact pour chacun des paramètres-clés (la concentration en MES pour la remise en suspension, l'approfondissement pour l'excavation et la teneur en sables et silts pour les dépôts de panaches), en fonction de la distance à l'extraction et de la persistance temporelle de l'impact après extraction.

Pour utiliser ces indicateurs, il est nécessaire de connaître l'intensité de l'extraction. Nous avons montré que les informations de cumul de volume, surface et durée des extractions sont plus pertinentes que les durées annuelles, utilisées actuellement.

III. Perspectives

Certaines interrogations demeurent et concernent les trois impacts et leurs évolutions dans le temps.

L'influence de l'agitation, par la houle en particulier, doit être évaluée sur la pérennité du panache turbide ainsi que sur l'extension des dépôts, en raison des possibilités d'extraction dans des conditions d'agitation relativement élevée. L'utilisation d'un outil de modélisation numérique permettrait par ailleurs de multiplier les scenarii dont celui d'une extraction avec criblage.

La présence d'un panache benthique, généré par le passage de l'élinde sur le fond, a pu être mise en évidence. Sa durée de vie semble très courte et une stratégie d'étude spécifique est à mettre au point pour permettre son suivi.

Le suivi de l'impact morpho-sédimentaire des dépôts doit être poursuivi pour un cumul d'extraction plus important. Des premières réponses pourront déjà être obtenues par le traitement et les interprétations d'une couverture sonar et de prélèvements sédimentaires effectués autour de la zone B lors de la dernière année d'ouverture de l'extraction sur cette zone.

Comme cela est recommandé dans plusieurs études (e.g. Cayocca et du Gardin, 2003), les effets à long terme des extractions doivent être davantage étudiés. L'étude donne des estimations de temps de restauration. Toutefois, il apparaît important de confirmer le potentiel de restauration des zones excavées en Baie de Seine par des relevés bathymétriques au cours des dix prochaines années. A partir de ces relevés, la loi de comportement de la restauration des excavations pourra être affinée pour une durée de restauration supérieure à celle de l'étude. Un effort supplémentaire sur la détermination des flux charriés au droit de l'excavation doit être mené. Pour cela, des travaux de modélisation physique et numérique aideraient à la compréhension des processus de restauration morphologique des excavations et à la détermination de la nature de leur remplissage.

Les impacts physiques permettent de bien caractériser l'évolution contrainte de l'habitat, qui doit être couplée aux impacts biologiques (benthos et halieutique). Les indicateurs proposés dans notre étude pourront être utilisés dans l'approche intégrée réalisée par le GIS SIEGMA, avec la mise en place d'un tableau de bord général qui pourrait être applicable à d'autres activités anthropiques sur le milieu marin.

Références

A

Alduc, D., 1979. La Bassin oriental de la Manche : étude géomorphologique du réseau de paléovallées. Thèse de Doctorat, Université de Caen. 146 pp.

Aminot, A., Guillaud, J.F. et Kérouel, R., 1997. La baie de Seine: hydrologie, nutriments, chlorophille (1978-1994). Plouzané, Ifremer. 148 pp.

Armède, R., 1999. Effet de l'extraction des granulats marins sur la stabilité du littoral. Rapport de fin d'étude à l'ENTPE pour le compte de l'Ifremer. 205 pp.

Auffret, J.-P., Alduc, D. et Larsonneur, C., 1982. La Bassin oriental de la Manche, carte des paléovallées et des bancs sableux à 1/500 000. Orléans, BRGM.

Auffret, J. et d'Ozouville, L., 1985a. Apports de l'imagerie fournie par le sonar à balayage latéral à la connaissance de la dynamique sédimentaire en Baie de Seine. La Baie de Seine (GRECO-MANCHE). 201-210.

Auffret, J. et d'Ozouville, L., 1985b. Cartographie du prisme sédimentaire holocène en Baie de Seine orientale, par sismique réflexion à haute définition. La Baie de Seine (GRECO-MANCHE). Université de Caen, 24-26 avril 1985. Actes de Colloques. Ifremer. 109-116.

Auffret, J.P. et Larsonneur, C., 1971. Paléovallées et bancs sableux entre l'estuaire de la Seine et le Nord Cotentin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie, 64*: 21-34.

Auffret, J.P., Larsonneur, C. et Smith, A.J., 1980. Cartographie du réseau des paléovallées et de l'épaisseur des formations superficielles meubles de la Bassin oriental de la Manche. *Annales de l'Institut océanographique, 56*: 21-35.

Augris, C., 2004. Evolution morpho-sédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime. Ifremer, Conseil général de la Seine-Maritime, EDF.Ed. Ifremer, Bilans et Prospectives. Plouzané, Ifremer. 159 pp.

Augris, C. et Clabaut, P., 2001. Cartographie géologique des fonds marins côtiers : exemples le long du littoral français. Ed. Ifremer. Bilans et Prospectives. Plouzané, Ifremer. 75 pp.

Augris, C. et Cressard, A., 1984. Les granulats marins. Brest, Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO). 90 pp.

Avoine, J., 1981. L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse de Doctorat, Université de Caen. 236 pp.

Avoine, J. et Crevel, L., 1985. Influence des apports fluviatiles en Baie de Seine. La Baie de Seine (GRECO-MANCHE). Université de Caen, 24-26 avril 1985. Actes de Colloques. Ifremer. 125-134.

B

Baas, J.H. et Lafite, R., Etude du dragage de granulats marins au large de Sieppe. L'incidence sur le régime naturel des houles et impact potentiel sur l'érosion littorale. UMR CNRS 6143 « M2C », Rouen. Non soumis.

Babut, B. et Le Bot, S., 2005. Carte sédimentologique 7417G (1:75 900). In: Natures de fond. Abords de Fécamp et Dieppe. Du cap d'Antifer à Dieppe. Carte spéciale G. Brest, SHOM.

Bagnold, R.A., 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. *US Geol. Survey Prof. Paper 442-1. USGS, Washington, DC.*

Bailly du Bois, P.B. et Dumas, F., 2005. Fast hydrodynamic model for medium-and long-term dispersion in seawater in the English Channel and southern North Sea, qualitative and quantitative validation by radionuclide tracers. *Ocean Modelling, 9*: 169-210.

Bellec, V.K., Van Lancker, V., Degrendele, K., Roche, M. et Le Bot, S., 2010. Geo-environmental characterization of the Kwinte Bank. *Journal of Coastal Research, Special Issue, 51*: 63-76.

Bellessort, B. et Migniot, C., 1986. Catalogue sédimentologique des côtes françaises. Côtes de la Mer du Nord et de la Manche : de la baie de Somme à la baie de Seine. *Laboratoire Central d'Hydraulique de France*: 135-230.

Benabdellouahed, M., 2011. La Seine fluviatile plio-quaternaire en baie de Seine : évolution morphologique et sédimentaire (rôle du substratum géologique et des cycles climato-eustatiques). Thèse de Doctorat, Université de Caen. 344 pp.

Birchenough, S.N.R., Boyd, S.E., Vanstaen, K., Coggan, R.A. et Limpenny, D.S., 2010. Mapping an aggregate extraction site off the Eastern English Channel: A methodology in support of monitoring and management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 87*: 420-430.

Biville, R., 2008. Morphologie et nature sédimentaire de fonds marins affectés par l'extraction de granulats. Mémoire de Master 1 "Sciences de la Mer et du Littoral", mention géosciences océan, Université de Bretagne Occidentale. 34 pp. + annexes.

Blanpain, O., 2009. Dynamique sédimentaire multiclasse : de l'étude des processus à la modélisation en Manche. Thèse de Doctorat, Université de Rouen. 315 pp.

Boutmin, G., 1986. Dragage et exploitation des sables marins - Qualité des matériaux et conséquences sur le milieu. Thèse de Doctorat, Université de Nantes. 203 pp.

Boyd, S.E., Cooper, K.M., Limpenny, D.S., Kilbride, R., Rees, H.L., Dearnaley, M.P., Stevenson, J., Meadows, W.J. et Morris, C.D., 2004. Assessment of the re-habilitation of the seabed following marine aggregate dredging. Science Series Technical Report, CEFAS Lowestoft, v 121. 154 pp.

Boyd, S.E., Limpenny, D.S., Rees, H.L. et Cooper, K.M., 2005. The effects of marine sand and gravel extraction on the macrobenthos at a commercial dredging site (results 6 years post-dredging). *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 62*: 145-162.

Boyd, S.E., Limpenny, D.S., Rees, H.L., Cooper, K.M. et Campbell, S., 2003. Preliminary observations of the effects of dredging intensity on the re-colonisation of dredged sediments off the southeast coast of England (Area 222). *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 57*: 209-223.

Breton, C., 2009. Evolutions et standardisations des chaînes de traitement des données bathymétriques des sondeurs multifaisceaux. Mémoire de Master 2 « Physique et Sciences de l'Ingénieur ». Université du Sud, Toulon, Var. Plouzané, Ifremer. 36 pp.

Brylinski, J.M., Lagadeuc, Y., Gentilhomme, V., Dupont, J.P., Lafite, R., Dupeuple, P.A., Huault, M.F., Auger, Y., Puskaric, E., Wartel, M. et Cabioch, L., 1991. Le fleuve côtier: un phénomène hydrologique important en Bassin oriental de la Manche. Exemple du Pas de Calais. *Oceanol. Acta, 11*: 197-203.

C

Cabioch, L., 1968. Contribution à la connaissance des peuplements benthiques de la Manche occidentale. *Cahiers de biologie marine, 9*: 489-720.

Cabioch, L., Gentil, F., Glaçon, R. et Retière, C., 1978. Le bassin oriental de la Manche, modèle de distribution de peuplements benthiques dans une mer à fortes marées. *Journal de recherche océanographique, 3*: 24.

Cabioch, L. et Glaçon, R., 1977. Distribution des peuplements benthiques en Bassin oriental de la Manche, du Cap d'Antifer à la Baie de Somme. *Comptes Rendus de la Académie des Sciences de Paris, 285*: 209-212.

Carpentier, A., Martin, C.S. et Vas, S., 2009. Channel Habitat Atlas for marine Resource Management, final report : Atlas des habitats des ressources marines de la Bassin oriental de la Manche, rapport final (CHARM phase II) INTERREG 3a Programme, IFREMER Boulogne-sur mer. 626 pp.

Cayocca, F., 2011. Modifications de la nature du fond et de la turbidité / SRM MMN. PI_Modifications_nature_fond_et_turbidité_V2_MMN. 9 pp. Disponible sur : < https://wwz.ifremer.fr/dcsmm/content/download/52398/744396/version/1/file/PI_230_Modifications_turbidite_MMN_V2.pdf> (consulté le 01/07/12).

Cayocca, F. et du Gardin, B., 2003. Assessing the impact of sand extraction on the shore stability: project for a methodological framework. European marine sand and gravel-shaping the future, EMSAGG Conference.

CETMEF, 2005. Notice sur les déversoirs – Synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et déversoirs. Compiègne, CETMEF. 89 pp.

CETMEF, 2010. Analyse des données de Houle. Le Havre. Mesures du 21/08/1996 au 20/09/2008. Plouzané, CETMEF. 163 pp.

CIDCO, 2006. Synthèse critique des outils de télédétection appliqués à la cartographie des habitats benthiques en domaine côtier (revue bibliographique). Ref 712-06. CIDCO, Rimouski (Quebec). 139 pp. Disponible sur : <http://www.cidco.ca/fr/documentation/teledetection_habitat_cotier.pdf> (consulté le 01/07/12).

Claveleau, D., 2007. Evolution morpho-sédimentaire quaternaire de la plate - forme continentale de la Côte d'Albâtre (Bassin oriental de la Manche, France). Thèse de Doctorat, Université de Rouen. 241 pp.

COB, 1978. Baie de Seine. Campagne Thalia mai 1978. Présentation des résultats. CNEXO-COB Département Environnement Littoral. 189 pp.

Connor, D.W., Gilliland, P.M., Golding, N., Robinson, P., Tod, D. et Verling, E., 2006. UK SeaMap: the mapping of seabed and water column features of UK seas. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough. 80 pp.

Cooper, K., Boyd, S., Aldridge, J. et Rees, H., 2007a. Cumulative impacts of aggregate extraction on seabed macro-invertebrate communities in an area off the east coast of the United Kingdom. *Journal of Sea Research, 57*: 288-302.

Cooper, K., Boyd, S., Eggleton, J., Limpenny, D., Rees, H. et Vanstaen, K., 2007b. Recovery of the seabed following marine aggregate dredging on the Hastings Shingle Bank off the southeast coast of England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 75*: 547-558.

Cooper, W.S., Townend, I.H. et Balson, P.S., 2008. A synthesis of current knowledge on the genesis of the Great Yarmouth and Norfolk Bank Systems. *The Crown Estate, v 69*.

Crown Estate, 1994. Marine aggregate extraction and the seabed. London, Crown Estate/MAFF.

Cugier, P., 1999. Modélisation du devenir à moyen terme dans l'eau et le sédiment des éléments majeurs (N, P, Si,) rejetés par la Seine en baie de Seine. Thèse de Doctorat, Université de Caen. 241 pp.

Cugier, P. et Blanpain, O., 2011. Flux sédimentaires en Manche Est. Modélisation du transport à long terme. Plouzané, Ifremer. 24 pp

Czabanski, V., 2006. Quantification des impacts de l'extraction des granulats marins sur la morphologie des fonds et de leur restauration (exemple de Dieppe). Mémoire de Master 1 « Sciences de l'Environnement », Université de Rouen. 38 pp. + annexes.

Czabanski, V., 2007. Evolution saisonnière à pluri-annuelle de fonds impactés par l'extraction de granulats marins. Exemple de Dieppe. Mémoire de Master 2 Recherche « Morphodynamique continentale et côtière », Université de Rouen. 39 pp.

D

Dankers, P.J.T., 2002. The behaviour of fines released due to dredging. A literature review. Delft University of Technology, The Netherlands, 59 pp.

Davies, C.M. et Hitchcock, D.R., 1992. Improving the exploitation of marine aggregates by the study of the impact of marine mining equipment. Ref : GR/G 20059. 110 pp.

De Groot, S.J., 1979. The potential environmental impact of marine gravel extraction in the North Sea. *Ocean Management, 5*: 233-249.

Degrendele, K., Roche, M., Schotte, P., Van Lancker, V., Bellec, V. et Bonne, W., 2010. Morphological evolution of the Kwinte Bank central depression before and after the cessation of aggregate extraction. *Journal of Coastal Research, Special issue 51*: 77-96.

Deloffre, J., 2005. La sédimentation fine sur les vasières intertidales en estuaires macrotidaux. Processus quantification et modélisation de l'échelle semi-diurne à l'échelle annuelle. Thèse de Doctorat, Université de Rouen. 230 pp.

Delsinne, N., 2005. Évolution pluri-millénaire à pluri-annuelle du prisme sédimentaire d'embouchure de la Seine. Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique. Thèse de Doctorat, Université de Caen. 179 pp.

Desprez, M., 2000. Physical and biological impact of marine aggregate extraction along the French coast of the Eastern English Channel: short-and long-term post-dredging restoration. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 57*: 1428-1438.

Desprez, M., 2008. Impact halieutique des extractions de sédiments marins sur le site d'extraction de Dieppe. Fréquentation halieutique et relations trophiques entre poissons et macrofaune benthique

C.R. Journée d'Etude « Gestion durable de l'extraction de sable et gravier sur le Plateau Continental Belge ». 7 pp.

Desprez, M., Duclos, P.A. et de Roton, G., 2012. Bilan définitif de l'extraction expérimentale de granulats marins de la Baie de Seine. Conformément à l'article 3.2.8 de l'arrêté préfectoral du 18/07/2005. 121 pp.

Desprez, M. et Duhamel, S., 1993. Comparison of impact of gravel extraction on geomorphology, sediment and macrofauna in two areas: Klaverbank (NL) and Dieppe (F). *ICES CM*: 51-66.

Desprez, M., Pearce, B. et Le Bot, S., 2010. The biological impact of overflowing sands around a marine aggregate extraction site: Dieppe (eastern English Channel). *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, *67*: 270-277.

Dickson, R.R. et Rees, J.M., 1998. Impact of dredging plumes on Race Bank and surrounding areas. CEFAS, LOWESTOFT. Unpublished Final Report to MAFF, UK. 15 pp.

Du Gardin, B. et Cayocca, F., 2008. Effets de l'exploitation des matériaux marins sur la stabilité du littoral, disponible sur wwz.ifremer.fr/drogm/Ressources-minerales/Materiaux-marins/Environnement/Effets-sur-la-stabilite-du-littoral, 02/05/12.

Duclos, P.-A., Le Bot, S., Rivoalen, E. et Lafite, R., 2010a. Etude de l'impact morpho-sédimentaire et de la dynamique du panache turbide créé par une extraction de granulat Groupement d'intéret scientifique « Suivi des Impacts de l'Extraction de Granulats MArins » (GIS SIEGMA). Compte-Rendu Assemblée Générale 24 juin 2010 Mont-Saint-Aignan, GIS SIEGMA. 15-22.

Duclos, P.-A., Le Bot, S., Rivoalen, E. et Lafite, R., 2010b. Impacts morpho-sédimentaires de l'extraction, Groupement d'intéret scientifique « Suivi des Impacts de l'Extraction de Granulats MArins » (GIS SIEGMA). Compte-Rendu Assemblée Générale 24 juin 2010 Mont-Saint-Aignan, GIS SIEGMA. 23-27.

Duclos, P.A., Lafite, R., Le Bot, S., Rivoalen, E. et Cuvilliez, A., 2012. Dynamics of turbid plumes generated by marine aggregate dredging. Example from a macrotidal environment (the Bay of Seine, France). Soumis à Journal of Coastal Research.

Duclos, P.A., Le Bot, S., Rivoalen, E. et Lafite, R., 2009. Caractérisation des impacts physiques sur le fond de l'extraction de granulats en mer, 12ème Congrès Français des Sédimentologistes. 27-29/10/09.

Duclos, P.A., Le Bot, S., Rivoalen, E. et Lafite, R., 2010c. Dynamics of turbid plumes generated by marine aggregate dredging. Example from a macrotidal environment (the Bay of Seine, France), 18th International Sedimentological Congress. 26/09-01/10/10.

Duclos, P.A., Le Bot, S., Rivoalen, E. et Lafite, R., 2010d. Dynamics of turbid plumes generated by marine aggregate dredging. Example from a macrotidal environment (the Bay of Seine, France), 23ème Réunion des Sciences de la Terre. 25-29/10/10.

Duclos, P.A., Le Bot, S., Rivoalen, E. et Lafite, R., 2010e. Impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats sur les fonds marins. Séminaire annuel du Grand Réseau de Recherche, Séminaire annuel du Grand Réseau de Recherche SCALE. 03/02/10.

Dupont, J., Lafite, R. et Lamboy, M., 1985. Contribution de l'étude des suspensions à la comprehension des mecanismes hydrosedimentaires estuariens et littoraux en Manche Centrale et Orientale. La Baie de Seine (GRECO-MANCHE). Université de Caen, 24-26 avril 1985. Actes de Colloques. Ifremer. 145-153.

Dupont, J.P., 1981. Relations entre Bios et Phenomenes sedimentaires intertidaux : le modèle de la Baie de Somme. Thèse de Doctorat, Université de Rouen. 310 pp.

Dupont, J.P., Collins, M.B., Lafite, R., Nash, L., Huault, M.F., Shimwell, S.J., Chaddock, S., Brunet, C., Wartel, M. et Lamboy, M., 1993. Annual variations in suspended particulate matter within the Dover Strait. *Oceanologica acta. Paris*, *16*: 507-516.

Dupont, J.P., Guézennec, L., Lafite, R., Le Hir, P. et Lesueur, P., 2001. Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension. Fascicule Programme Scientifique Seine Aval, Ifremer. 39 pp.

Dupont, J.P., Lafite, R., Huault, M.F. et Dupeuble, P.A., 1991. Apport des mesures physico-chimiques et caractérisation des matières en suspension dans l'étude de la dynamique des masses d'eaux en Bassin oriental de la Manche. *Oceanologica Acta*, *14*: 177-177.

Durrieu de Madron, X., Ferré, B., Le Corre, G., Grenz, C., Conan, P., Pujo-Pay, M., Buscail, R. et Bodiot, O., 2005. Trawling-induced resuspension and dispersal of muddy sediments and dissolved elements in the Gulf of Lion (NW Mediterranean). *Continental Shelf Research*, *25*: 2387-2409.

E

Escofier, B. et Pagès, J., 1990. Analyses Factorielles Simples et Multiples : Objectifs. Paris, Dunod. 267 pp.

Evans, N.C., 1994. Effects of dredging and dumping on the marine environment of Hong Kong. *Terra et Aqua*, *57*: 12-25.

F

Ferré, B., 2004. Comparaison de l'effet des tempêtes et du chalutage sur la resuspension et le transport de matières particulaires dans le Golfe du Lion. Thèse de Doctorat, Université de Perpignan. 256 pp.

Ferré, B., Durrieu de Madron, X., Estournel, C., Ulses, C. et Le Corre, G., 2008. Impact of natural (waves and currents) and anthropogenic (trawl) resuspension on the export of particulate matter to the open ocean: application to the Gulf of Lion (NW Mediterranean). *Continental Shelf Research*, *28*: 2071-2091.

Ferré, B., Guizien, K., Durrieu de Madron, X., Palanques, A., Guillén, J. et Grémare, A., 2005. Fine-grained sediment dynamics during a strong storm event in the inner-shelf of the Gulf of Lion (NW Mediterranean). *Continental Shelf Research*, *25*: 2410-2427.

Ferret, Y., 2011. Morphodynamique de dunes sous-marines en contexte de plate-forme megatidale (Bassin oriental de la Manche) - Approche multi-échelles spatio-temporelles. Thèse de Doctorat, Université de Rouen. 352 pp.

Fischer, H.B., 1979. Mixing in inland and coastal waters. New York, Academic Press. 483 pp.

Foden, J., Rogers, S.I. et Jones, A.P., 2009. Recovery rates of UK seabed habitats after cessation of aggregate extraction. *Marine Ecology Progress Series*, *390*: 15-26.

Folk, R.L., 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *The Journal of Geology*: 344-359.

Fournier, M., Massei, N., Bakalowicz, M., Dussart-Baptista, L., Rodet, J. et Dupont, J.P., 2007. Using turbidity dynamics and geochemical variability as a tool for understanding the behavior and vulnerability of a karst aquifer. *Hydrogeology Journal*, *15*: 689-704.

Francois, R.E. et Garrison, G.R., 1982a. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *72*: 1879-1890.

Francois, R.E. et Garrison, G.R., 1982b. Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *72*: 896.

G

Gajewski, L.S. et Uścinowicz, S., 1993. Hydrologic and sedimentologic aspects of mining aggregate from the shipsk bank (Baltic sea). *Marine Georesources & Geotechnology*, *11*: 229-244.

Garnaud, S., Lesueur, P., Lesourd, S., Poupinet, N. et Brun-Cottan, J.C., 2002. Caractérisation des variations lithologiques saisonnières des sédiments de la Baie de Seine orientale; impact des crues de la Seine (France). *Comptes Rendus Geoscience*, *334*: 323-330.

Garrad, P.N. et Hey, R.D., 1987. Boat traffic, sediment resuspension and turbidity in a Broadland river. *Journal of Hydrology*, *95*: 289-297.

Gartner, J.W., 2004. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, *211*: 169-187.

Gohin, F., Loyer, S., Lunven, M., Labry, C., Froidefond, J.M., Delmas, D., Huret, M. et Herbland, A., 2005. Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sensing of Environment*, *95*: 29-46.

Goosen, N.K., Kromkamp, J., Peene, J., van Rijswijk, P. et van Breugel, P., 1999. Bacterial and phytoplankton production in the maximum turbidity zone of three European estuaries: the Elbe, Westerschelde and Gironde. *Journal of Marine Systems*, *22*: 151-171.

Grochowski, N.T.L., Collins, M.B., Boxall, S.R., Salomon, J.C., Breton, M. et Lafite, R., 1993. Sediment transport pathways in the Eastern English Channel. *Oceanologica acta, 16*: 531-537.

Guegueniat, P., Bailly du Bois, P., Salomon, J.C., Masson, M. et Cabioch, L., 1995. FLUXMANCHE radiotracers measurements: a contribution to the dynamics of the English Channel and North Sea. *Journal of Marine Systems, 6*: 483-494.

Guyader, J., 1977. Le Quaternaire de la zone portuaire havraise. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre, LXIV (4)*: 39-63.

H

Hayes, D.F., Raymond, G.R. et McClellan, T.N., 1984. Sediment Resuspension from Dredging Activities. *In Proceedings of the ASCE Dredging '84 Speciality Conference*: 72-82.

Herrmann, C., Krause, J.C., Tsoupikova, N. et Hansen, K., 1999. Marine Sediment Extraction in the Baltic Sea : Status Report. Baltic Sea Environment Proceedings No.76 (Helsinki Commission (HELCOM), Baltic Marine Environment Protection Commission).

Hilton, M.J. et Hesp, P., 1996. Determining the limits of beach-nearshore sand systems and the impact of offshore coastal sand mining. *Journal of Coastal Research*: 496-519.

His, E., 2005a. Caractérisation morpho-sédimentaire et dynamique des fonds marins d'une zone d'extraction de granulats (Dieppe). Mise en évidence des impacts. Mémoire de stage de Master 2 recherche, Université de Rouen. 52 pp.

His, E., 2005b. Caractérisation morpho-sédimentaire et dynamique des fonds marins d'une zone d'extraction de granulats (Dieppe). Mise en évidence des impacts. Mémoire de Master 2ème année Recherche « Morphodynamique continentale et côtière », Université de Caen et Rouen. 62 pp.

Hitchcock, D.R. et Bell, S., 2004. Physical Impacts of Marine Aggregate Dredging on Seabed Resources in Coastal Deposits. *Journal of Coastal Research*: 101-114.

Hitchcock, D.R. et Drucker, B.R., 1996. Investigation of benthic and surface plumes associated with marine aggregates mining in the United Kingdom. *The global ocean–towards operational oceanography*. Proc. of Oceanology '96, Volume 2: 221-284.

Hitchcock, D.R., Newell, R.C. et Seiderer, L.J., 1999. Investigation of Benthic and Surface Plumes associated with Marine Aggregate Mining in the United Kingdom. Bridgend, Coastline Survey. 108 pp.

Hitchcock, D.R., Newell, R.C. et Seiderer, L.J., 2002. On the impacts of marine aggregate mining on the seabed : Part I Physical. Proceedings of XXIst Information Transfer Meeting, Gulf Coast Region INTERMAR, New Orleans, USA. 9 pp.

Holmes, P.R., 1988. Environmental implications of exploiting marine sand. *Geological Society of Hong Kong*: 143-159.

HR Wallingford, 1993. Shingle Bank, Hastings : Dispersion of dredged material. Report EX 2811. Wallingford (UK), HR Wallingford.

HR Wallingford, 2011. Area 473 East. Dredger and plume monitoring study. Report EX 6215. Wallingford (UK), HR Wallingford. 390 pp.

Humphreys, B., Coates, T., Watkiss , M. et Harrison, D., 1996. Beach Recharge Materials: Demand and Resources. CIRIA Technical Report No. 154. London, Construction Industry Research and Information Association. 176 pp.

I

ICES, 2009. Effects of Extraction of Marine Sediments on the Marine Ecosystem. Cooperative Research Report n° 297. 182 pp.

ICES, 2010. Report of the Working Group on the Effects of Extraction of Marine Sediments on the Marine Ecosystem (WGEXT), 31 May-4 June 2010, Djurönäset, Sweden. ICES CM 2010/SSGHIE:10. 108 pp.

Ifremer, 2006. Inventaire des ressources en matériaux marins, Façades "Manche-Est" et "Loire-Gironde". Convention Ifremer-Ministère de l'Industrie n° 2004 -00258-00-07. 165 pp.

IHC, 2005. "Wild Dragon" rules the sediments. *Ports and Dredging, 163*: 14-17.

J

James, J., Evans, C., Harrison, D., Ooms, K., Vivan, C. et Boyd, S.E., 1999. The effective development of offshore aggregates in south-east Asia. Technical Report WC/99/9. Notthingam, British Geological Survey. 138 pp.

K

Kenny, A.J. et Rees, H.L., 1994. The effects of marine gravel extraction on the macrobenthos: early post-dredging recolonization. *Marine Pollution Bulletin*, *28*: 442-447.

Kenny, A.J. et Rees, H.L., 1996. The effects of marine gravel extraction on the macrobenthos: results 2 years post-dredging. *Marine Pollution Bulletin*, *32*: 615-622.

Kenny, A.J., Rees, H.L., Greening, J. et Campbell, S., 1998a. The effects of marine gravel extraction on the macrobenthos at an experimental dredge site off North Norfolk, UK (Results 3 years post-dredging). *ICES, CM 1998/V14, 1-7*.

Kenny, A.J., Rees, H.L., Greening, J. et Campbell, S., 1998b. The effects of marine gravel extraction on the macrobenthos at an experimental dredge site off North Norfolk, UK.(Results 3 years post-dredging). *ICES, Copenhagen(Denmark). 14*: 1998.

Kiørboe, T. et Møhlenberg, F., 1981. Dispersion of suspended material from an operating sand suction dredge in the Øresund, Denmark. *Water Research*, *37*: 303-309.

Klein, M.D., 1999. Large-scale sandpits. Hydrodynamic and morphological modelling of large-scale sandpits. Master Thesis. WL, Delft Hydraulics.

Kleinhans, M.G. et Van Rijn, L.C., 2002. Stochastic prediction of sediment transport in sand-gravel bed rivers. *Journal of hydraulic engineering*, *128*: 412.

Krause, J.C., Diesing, M. et Arlt, G., 2007. The physical and biological impact of sand extraction: a case study of a dredging site in the western Baltic Sea. *Journal of Coastal Research, Special issue 51*: 215-226.

Kruskal, W.H. et Wallis, W.A., 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American statistical Association*: 583-621.

Kubicki, A., Manso, F. et Diesing, M., 2007. Morphological evolution of gravel and sand extraction pits, Tromper Wiek, Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *71*: 647-656.

L

Lafite, R., Dupont, J.P. et Lamboy, M., 1985. Stratégie d'étude des suspensions mise en oeuvre en Baie de Seine. La Baie de Seine (GRECO-MANCHE). Université de Caen, 24-26 avril 1985. Actes de Colloques. Ifremer. 145-154.

Lafite, R., Shimwell, S., Grochowski, N., Dupont, J.P., Nash, L., Salomon, J.C., Cabioch, L., Collins, M. et Gao, S., 2000. Suspended particulate matter fluxes through the Straits of Dover, English Channel: observations and modelling. *Oceanologica Acta*, *23*: 687-700.

Laignel, B., Costa, S., Lequien, A., Massei, N., Durand, A., Dupont, J.P. et Le Bot, S., 2008. Apports sédimentaires continentaux aux plages et à la mer de la Manche. Exemple des falaises et des rivières littorales de l'Ouest du Bassin de Paris. *Zeitschrift für Geomorphology*, *3*: 21-40.

Larsonneur, C., 1971. Manche centrale et Baie de Seine: Geologie du substratum et des depots meubles. Thèse de Doctorat, Université de Caen. 394 pp.

Larsonneur, C., Bouysse, P. et Auffret, J.P., 1982. The superficial sediments of the English Channel and its western approaches. *Sedimentology*, *29*: 851-864.

Larsonneur, C., Vaslet, D. et Auffret, J.P., 1978. Les sédiments superficiels de la Manche. Carte à l'échelle 1/500 000. Paris, Cnexo-BRGM.

Larsonneur, C., Vaslet, D. et Auffret, J.P., 1979. Les sédiments superficiels de la Manche, Carte géologique de la marge continentale française. Orléans, BRGM.

Larsonneur, C. et Walker, P., 1982. Le Golfe Nomand-Breton : Synthèse sédimentologique. Contrat CNEXO 81/6646. 80 pp.

Latteux, B., 2008. Exploitation de matériaux marins et stabilité du littoral. Versailles, Quae, Ifremer, 162 pp.

Lautridou, J.P., 1985. Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie. Thèse d'Etat, Université de Caen. 907 pp.

Lautridou, J.P., Auffret, J.P., Baltzer, A., Clet, M., Lecolle, F., Lefebvre, D., Lericolais, G., Roblin-Jouve, A., Balescu, S. et Carpentier, G., 1999a. Le fleuve Seine, le fleuve Manche. *Bulletin de la Société géologique de France, 170*: 545-558.

Lautridou, J.P., Baize, S., Clet, M., Coutard, J.P. et Ozouf, J.C., 1999b. Les séquences plio-pléistocènes littorales et estuariennes de Normandie [Littoral and estuarine plio-pleistocene sequences in Normandy (France)]. *Quaternaire, 10*: 161-169.

Le Bot, S., 2001. Morphodynamique de dunes sous-marines sous influence des marées et des tempêtes. Processus hydro-sédimentaires et enregistrement. Exemple du Pas-de-Calais. Thèse de Doctorat, Université de Lille 1. 301 pp.

Le Bot, S., Lafite, R., Fournier, M., Baltzer, A. et Desprez, M., 2010. Morphological and sedimentary impacts and recovery on a mixed sandy to pebbly seabed exposed to marine aggregate extraction (Eastern English Channel, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 89*: 221-233.

Le Hir, P., 2001. Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau. Fascicule Programme Scientifique Seine Aval, Ifremer. 32 pp.

Le Hir, P. et L'Yavanc, J., 1985. Observations de courant en Baie de Seine. La Baie de Seine (GRECO-MANCHE). Université de Caen, 24-26 avril 1985. Actes de Colloques. Ifremer. 25-34.

Le Hir, P., Salomon, J., Leprovost, C., Chabert d'Hieres, G. et Mauvais, J., 1985. Approche de la circulation résiduelle en Baie de Seine. La Baie de Seine (GRECO-MANCHE). Université de Caen, 24-26 avril 1985. Actes de Colloques. Ifremer. 63-72.

Lebart, L., Morineau, A. et Piron, M., 1995. Statistique exploratoire multidimensionnelle. Paris, Dunod. 437 pp.

Lefebvre, D., Antoine, P., Auffret, J.P., Lautridou, J.P. et Lécolle, F., 1994. Réponses de la Seine et de la Somme aux événements climatiques, eustatiques et tectoniques du Pléistocène moyen et récent: rythmes et taux d'érosion [The responses of the river Seine and of the river Somme to the climatic, eustatic and tectonic controls during the Upper and Middle Pleistocene: Rhythms and rates of erosion.]. *Quaternaire, 5*: 165-172.

Lemoine, M., Clabaut, P., Simon, S. et Augris, C., 1999. Etude de la souille expérimentale d'exploitation de granulats marins dite" souille CNEXO" en baie de Seine. Evolution morpho-sédimentologique et faunistique entre 1981 et 1996. Synthèse des connaissances. Rapport d'étude. Plouzané, Ifremer. 23 pp.

Lericolais, G., 1997. Évolution Plio-quaternaire du Fleuve Manche: stratigraphie et Géomorphologie d'une plateforme continentale en régime périglaciaire. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux. 265 pp.

Limpenny, D.S., Boyd, S.E., Meadows, W.J. et Rees, H.L., 2002. The utility of habitat mapping techniques in the assessment of anthropogenic disturbance at aggregate extraction sites. *ICES CM 2002/K 04*.

Lloyd Jones, D., Van Rhee, C. et Gibbs, T., 2010. Mitigation of marine aggregate dredging impacts - benchmarking equipment, practices and technologies against global best practice., Rapport MEPF/08/P33, Marine Aggregate Levy Sustainability Fund (MALSF).

Lozach, S., 2011. Habitats benthiques marins du bassin oriental de la Manche : Enjeux écologiques dans le contexte d'extraction de granulats marins Thèse de Doctorat, Université de Lille 1. 298 pp.

Lozach, S. et Dauvin, J.-C., 2012. Temporal stability of a coarse sediment community in the Central Eastern English Channel Paleovalleys. *Journal of Sea Research, 71*: 14-24.

Lurton, X., 1998. Acoustique sous-marine : présentation et applications. Plouzané, Ifremer. 110 pp.

M

Manso, F., Radzevicius, R., Blazauskas, N., Ballay, A. et Schwarzer, K., 2010. Nearshore dredging in the Baltic Sea: Condition after cessation of activities and assessment of regeneration. *Journal of Coastal Research*: 187-194.

MEDDTL, 2012. Stratégie nationale pour la création et la gestion des aires marines protégées, Rapport, La Défense, Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement - Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature. 89 pp. Disponible sur :

<http://www.aires-marines.fr/Documentation/Strategie-nationale-pour-la-creation-et-la-gestion-des-aires-marines-protegees> (consulté le 01/07/12).

MEEDDM, 2010. Guide d'évaluation des incidences des projets d'extraction de matériaux en mer sur les sites Natura 2000, vol. 1 analyse des incidences extraction matériaux, Rapport, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer. 36 pp. Disponible sur : <http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/couv_et_doc_analyse_p_1_a_p36_reduire.pdf > (consulté le 01/07/12)

Menegaki, M.E. et Kaliampakos, D.C., 2010. European aggregates production: Drivers, correlations and trends. *Resources Policy*, *35*: 235-244.

Michaux, P., 2003. Du sondeur vertical au sondeur multifaisceaux. La lettre du SHOM. Lettre n°17. Disponible sur : <http://www.shom.fr/fr_page/fr_prod_lettre/17/lettre17_2.htm> (consulté le 02/05/12).

Migniot, C. et Viguier, J., 1979. Etude de l'influence de dragages sur l'équilibre des fonds littoraux. Rapport LCHF pour CNEXO, CETMEF, SCTPVN, Rapport.

Migniot, C., Viguier, J. et Roques, J.M., 1983. Analyse par simulation des effets sur le littoral de l'ouverture de souilles destinées à l'extraction de granulats marins. Rapport LCHF pour CETMEF, SCTPVN, CNEXO, SNAEMM.

Mikkelsen, O.A. et Pejrup, M., 2000. In situ particle size spectra and density of particle aggregates in a dredging plume. *Marine Geology*, *170*: 443-459.

Millner, R.S., Dickson, R.R. et Rolfe, M.S., 1977. Physical and biological studies of dredging ground off the east coast of England. *ICES CM*, *48*.

N

Newell, R.C., Hitchcock, D.R. et Seiderer, L.J., 1999. Organic enrichment associated with outwash from marine aggregates dredging: a probable explanation for surface sheens and enhanced benthic production in the vicinity of dredging operations. *Marine Pollution Bulletin*, *38*: 809-818.

Newell, R.C., Seiderer, L.J. et Hitchcock, D.R., 1998. The impact of dredging works in coastal waters: a review of the sensitivity to disturbance and subsequent recovery of biological resources on the sea bed. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, *36*: 127-178.

Newell, R.C., Seiderer, L.J., Simpson, N.M. et Robinson, J.E., 2002. Impact of marine aggregate dredging and overboard screening on benthic biological resources in the central North Sea: Production Licence Area 408, Coal Pit. Marine Ecological Surveys Limited. Technical Report No ER1/4/02 to the British Marine Aggregate Producers Association (BMAPA). 72 pp. Disponible sur : <http://www.bmapa.org/documents/Area_408_Biological_Impact_Report_MESL.pdf> (consulté le 01/07/12)

Newell, R.C., Seiderer, L.J., Simpson, N.M. et Robinson, J.E., 2004. Impacts of marine aggregate dredging on benthic macrofauna off the south coast of the United Kingdom. *Journal of Coastal Research*: 115-125.

P

Pomerol, C., 1978. Evolution paléogéographique et structurale du Bassin de Paris, du Précambrien à l'actuel, en relation avec les régions avoisinantes. *Geol. Mijnbouw*, *57*: 533-543.

Q

Quesney, A., 1983. Manche occidentale et Mer Celtique : étude des paléovallées, des fosses et des formations surperficielles. Thèse de Doctorat, Université de Caen. 162 pp.

R

Rivière, A., 1977. Méthodes granulométriques - Techniques et interprétations. Paris, Masson. 170 pp.

Robinson, J.E., Newell, R.C., Seiderer, L.J. et Simpson, N.M., 2005. Impacts of aggregate dredging on sediment composition and associated benthic fauna at an offshore dredge site in the southern North Sea. *Marine Environmental Research*, *60*: 51-68.

S

Salomon, J., 1985. Courantologie calculee en Baie de Seine. La Baie de Seine (GRECO-MANCHE). Université de Caen, 24-26 avril 1985. Actes de Colloques. Ifremer. 35-42.

Salomon, J.C. et Breton, M., 1991. Courants résiduels de marée dans la Manche. *Oceanologica Acta*, *14*: 47-47.

Salomon, J.C. et Breton, M., 1993. An atlas of long-term currents in the Channel. *Oceanologica acta. Paris*, *16*: 439-448.

Secrétariat Général de la Mer, 2006. Extraction de granulats marins. Document d'orientation pour une politique nationale. Secrétariat Général de la Mer. 83 pp. Disponible sur : < http://www.sgmer.gouv.fr/IMG/pdf/2009-04-29_-_Extraction_des_granulats_marins_-_Document_d_orientation_pour_une_politique_nationale.pdf> (consulté le 01/07/12).

Sequoia, 2007. LISST-100X Particle Size Analyzer. User's Manual Version 4.65. 78 pp.

Simon, S. et Dupont, J.P., 1983. Suivi biosédimentaire et impact biologique des travaux d'aménagements dans la centrale de Paluel. Rapport E.D.F, Suivi 1981-82. 145 pp.

Simonini, R., Ansaloni, I., Bonini, P., Grandi, V., Graziosi, F., Iotti, M., Massamba-N'Siala, G., Mauri, M., Montanari, G., Preti, M., De Nigris, N. et Prevedelli, D., 2007. Recolonization and recovery dynamics of the macrozoobenthos after sand extraction in relict sand bottoms of the Northern Adriatic Sea. *Marine Environmental Research*, *64*: 574-589.

Smith, S.J. et Friedrichs, C.T., 2011. Size and settling velocities of cohesive flocs and suspended sediment aggregates in a trailing suction hopper dredge plume. *Continental Shelf Research*, *31*: 50-63.

Soulsby, R., 1997. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. London, Thomas Telford. 249 pp.

Spearman, J., Bray, R.N., Land, J., Burt, T.N., Mead, C.T. et Scott, D., 2007. Plume dispersion modelling using dynamic representation of trailer dredger source terms, *in* J.P.Y. Maa, L.P.S.etSchoellhamer, D.H., eds., Proceedings in Marine Science, Volume 8, Elsevier. 417-448.

Stokes, G.G., 1851. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Trans. Cambridge Philos. Soc.* , *9*: 8-106.

Stramski, D., Boss, E., Bogucki, D. et Voss, K.J., 2004. The role of seawater constituents in light backscattering in the ocean. *Progress In Oceanography*, *61*: 27-56.

T

Tessier, C., Le Hir, P., Lurton, X. et Castaing, P., 2008. Estimation de la matière en suspension à partir de l'intensité rétrodiffusée des courantomètres acoustiques à effet Doppler (ADCP). *Comptes Rendus Geosciences*, *340*: 57-67.

Tillin, H.M., Houghton, A.J., Saunders, J.E., Drabble, R. et Hull, S.C., 2011. Direct and Indirect Impacts of Aggregate Dredging, Rapport MEPF/10/P144. 41 pp. Disponible sur : < http://www.cefas.co.uk/media/463388/monograph1.pdf> (consulté le 01/07/12).

Truitt, C.L., 1988. Dredged material behavior during open-water disposal. *Journal of Coastal Research*: 489-497.

U

Uda, T., Agemori, C. et Chujo, N., 1986. Beach changes caused by offshore dredging. *Coastal Engineering in Japan*, *29*: 215-226.

UEPG, 2011. Bilan annuel de l'UEPG 2010-2011. Bruxelles, UEPG. 35 pp. Disponible sur : <http://www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/pub-40_en-bilan_annuel_2010-2011.pdf> (consulté le 01/07/12).

UNPG, 2005. Les Granulats Géologie Industrie Environnement. Rapport. Paris, UNPG. 32 pp.

UNPG, 2011. Livre blanc - Carrières et granulats, pour un approvisionnement durable des territoires. Paris, UNPG. 132 pp. Disponible sur : <http://www.unpg.fr/developpement_durable/livre_blanc> (consulté le 01/07/12).

V

Van Dalfsen, J.A., Essink, K., Madsen, H.T., Birklund, J., Romero, J. et Manzanera, M., 2000. Differential response of macrozoobenthos to marine sand extraction in the North Sea and the Western Mediterranean. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 57*: 1439-1445.

Van Der Veer, H.W., Bergman, M.J.N. et Beukema, J.J., 1985. Dredging activities in the Dutch Wadden Sea: effects on macrobenthic infauna. *Netherlands Journal of Sea Research, 19*: 183-190.

Van Moorsel, G.W.N.M. et Waardenburg, B., 1993. Long-term recovery of geomorphology and population development of large molluscs after gravel extraction at the Klaverbank (North Sea). Bureau Waardenburg.

Van Rijn, L.C., 1984. Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering, 110*: 1431-1456.

Van Rijn, L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Amsterdam, Aqua Publications.

Velegrakis, A.F., Collins, M.B., Bastos, A.C., Phaphitis, D. et Brampton, A., 2010. European marine aggregates resources: Origins, usage, prospecting and dredging techniques. *Journal of Coastal Research, Special Issue 51*: 1-14.

Velegrakis, A.F., Gao, S., Lafite, R., Dupont, J.P., Huault, M.F., Nash, L.A. et Collins, M.B., 1997. Resuspension and advection processes affecting suspended particulate matter concentrations in the central English Channel. *Journal of Sea Research, 38*: 17-34.

W

Whiteside, P.G.D., Ooms, K. et Postma, G.M., 1995. Generation and decay of sediment plumes from sand dredging overflow. *Proceedings of the 14th World Dredging Congress, 14*: 877-892.

Willoughby, M.A. et Crabb, D.J., 1983. The behaviour of dredge generated sediment plumes in Moreton Bay. Sixth Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering, 1983: Preprints of Papers. 182 pp.

Willoughby, M.A. et Foster, D.N., 1983. Middle Banks Humber River plume mapping and hydrographic surveys, 18 June to 3 July 1982. Tech. Rep. 1-13.

Winterwerp, J.C., 2002. Near-field behavior of dredging spill in shallow water. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 128*: 96-98.

Wu, W., Wang, S. et Jia, Y., 2000. Nonuniform sediment transport in alluvial rivers Transport de sédiments non uniformes en rivière alluviale. *Journal of Hydraulic Research, 38*: 427-434.

Wyns, R., 1977. Tectonique récente dans l'Ouest du bassin de Paris: méthodes d'étude et bilan des déformations plio-quaternaires. *Bull. Soc. Géol. Fr, 7*: 1093-1101.

Y

Yano, S., Kumamoto, H., Watanabe, T., Ogawa, T. et Miyake, N., 2006. "Seiryu-maru" - Trailing Suction Hopper Dredger With Oil Recovery System. Technical Review, 43.

Z

Zanke, U. et Küsteningenieurwesen, F.-I.f.W.u., 1977. Berechnung der sinkgeschwindigkeiten von sedimenten. EV.

Glossaire

Agrégats : assemblages cohérents de particules fines entre elles et/ou adhésion de particules fines sur des éléments de taille plus importante pour constituer des éléments plus gros ; les matières organiques constituent souvent le liant de ces structures.

Bathymétrie : mesure de la profondeur d'eau en domaine marin réalisée par rapport au zéro hydrographique qui correspond au niveau des plus basses mers de vive-eau.

Benthos : organismes aquatiques vivant à proximité ou dans les fonds, également appelés organismes benthiques.

Charriage : mode de déplacement de particules sédimentaires par glissement, roulement ou saltation sur le fond.

Clapage : vidange des produits de dragage par une barge ou drague.

Criblage : méthode de tri du sédiment extrait, effectué lors du chargement de la drague. Il est réalisé afin de charger sur la drague une fraction granulométrique choisie et de rejeter en mer la fraction non désirée.

Diatomée : algues microscopiques unicellulaires munies de 2 valves siliceuses ornementées, vivant dans des milieux d'eaux douces, saumâtres ou marins.

Drague Aspiratrice en Marche (DAM) : drague conçue pour extraire les sédiments marins par aspiration hydraulique tout en se déplaçant et pour stocker le matériel extrait dans son bassin de chargement.

Elinde : conduit par lequel le sédiment est aspiré depuis le fond jusqu'à la DAM.

Flocs : assemblages organominéraux plus ou moins souples et robustes de particules fines entre elles et/ou d'éléments de taille plus importante pour constituer des particules plus grosses.

Flot (courant de) : courant de marée dans le sens de la propagation de l'onde de marée, qui s'établit lors de la marée montante.

Granulats : matériaux d'origine minérale se présentant sous la forme de grains de taille inférieure à 125 mm (Norme NPF18-101). Ils peuvent provenir de roches meubles, massives, de minerais ou de leur transformation thermique, ou bien encore de sous-produits de l'industrie.

Holocène : période géologique du Quaternaire débutée il y a 10 000 ans, au cours de plus récent réchauffement global du climat jusqu'à aujourd'hui.

Jusant (courant de): courant de marée dans le sens opposé à la propagation de l'onde de marée, qui s'établit au cours de la marée descendante.

Lagrangien : méthode de résolution ou de mesure qui consiste à suivre les particules d'eau dans leurs mouvements advectifs.

Macrotidal : s'applique à des zones soumises à des marées de forte amplitude (marnage > 4m).

Marnage : différence entre le niveau de pleine mer et le niveau de basse mer.

Matières en suspension (MES) : ensemble de particules solides de petite taille, supérieure à 0,45 µm, transportées en suspension au sein de la masse d'eau.

Morte-eau : marée d'amplitude la plus faible se produisant deux fois par mois (premier et dernier quartiers de lune).

Morphosédimentaire : caractérise la morphologie et la sédimentologie d'un lieu ou d'un objet.

Phytoplancton : plancton végétal.

Plancton : organismes aquatiques (animaux ou végétaux) se développant en pleine eau, entraînés par les courants.

Pléistocène : période la plus ancienne de l'ère quaternaire comprise approximativement entre 2 millions d'années et 10 000 ans avant notre époque, pendant laquelle se sont produites la plupart des glaciations récentes.

Production primaire : quantité de matière organique produite à partir de matière inorganique grâce à une source d'énergie extérieure (lumière pour la production végétale).

Quaternaire : ère géologique au cours de laquelle nous vivons et qui a débuté il y a environ deux millions d'années.

Réplicat : résultat d'une mesure qui a été réalisée plusieurs fois sur un même échantillon.

Sabord : ouverture dans la partie supérieure du bassin de chargement de la DAM permettant le rejet de la surverse.

Semi-diurne : qualifié le cycle de marée qui, sur nos côtes, est proche de 12h30mn, soit 2 cycles par jour.

Surverse : rejet du trop plein d'eau aspirée par la DAM, mélangée aux particules les plus fines. Elle est rejetée soit par sabords latéraux en surface soit par un puits central sous la coque de la DAM.

Tête d'élinde : extrémité de l'élinde en contact avec le fond marin pendant l'extraction.

Tidal : relatif à la marée.

Turbidité : trouble visuel lié à la présence de particules fines en suspension dans l'eau.

Vive-eau : marée d'amplitude maximale se produisant deux fois par mois correspondant aux périodes de pleine et nouvelle lune.

Listes des figures

Figure 1 : Evolution de la consommation et du commerce extérieur de granulats en France depuis 1988. 6
Figure 2 : Evolution de la production française par types de granulats..... 7
Figure 3 : Evolution de la production annuelle de granulats marins pour les plus gros producteurs européens. 10
Figure 4 : Carte de localisation des permis d'extractions en cessation, en activité et en exploration en France. 11
Figure 5 : Schéma du chargement de granulats marins extraits par une drague aspiratrice en marche et des deux principaux types de surverse pouvant être rencontrés (sabords ou puits). 13
Figure 6 : Bloc 3 D synthétique des impacts physiques liés à l'extraction de granulats marins (Tillin *et al.*, 2011). 19
Figure 7 : Photographies du panache de surface généré à l'arrière de la drague. 22
Figure 9 : Comportement des panaches de surface en fonction du nombre de Richardson et du ratio de vitesses (Winterwerp, 2002) 25
Figure 10 : Images sonar de différents types d'empreintes laissés sur le fond par l'extraction de granulats (Krause *et al.*, 2007). 27
Figure 11 : Les différentes morphologies de sillons isolés (d'après Davies et Hitchcock, 1992 in Hitchcock *et al.*, 1999). 28
Figure 13 : Synthèse des temps de restauration étudié en fonction du milieu étudié (traduit d'après Foden *et al.*, 2009). 31
Figure 14 : Topographie de la Manche et localisation des sites étudiés. 33
Figure 15 : Isopaques des nappes alluviales et des bancs sableux (Auffret *et al.*, 1982 ; coordonnées WGS 84). 34
Figure 16 : Carte des marnages en Bassin oriental de la Manche en vive-eau moyenne issue du modèle Télémac (EDF-drd source SHOM). 34
Figure 17 : Distribution en surface des vitesses maximales des courants tidaux en $m.s^{-1}$ (A : Larsonneur *et al.*, 1982) et trajectoires résiduelles lagrangiennes issues de modélisation hydrodynamique avec un vent de secteur sud-ouest (B : Bailly du Bois et Dumas, 2005). 35
Figure 18 : Moyennes des température et salinité en surface pour les mois d'octobre et juillet de 1989 à 2006 (Carpentier *et al.*, 2009). 36
Figure 19 : Moyenne annuelle des concentrations en matière inorganique (PIM) d'après les images claires du satellite MODIS enregistrées en 2007 (Gohin *et al.*, 2005). 37
Figure 21 : Carte des sédiments superficiels de la Bassin oriental de la Manche (modifiée par Carpentier *et al.*, 2009 d'après Larsonneur *et al.*, 1979 ; coordonnées WGS 84), des gradients d'affinement (Larsonneur *et al.*, 1978). 38
Figure 22 : Cartographie des peuplements benthiques (d'après Cabioch *et al.*, 1978). 39
Figure 23 : Localisation des extractions (permis et projets) de granulats en Bassin oriental de la Manche (source Ifremer). 40
Figure 24 : Localisation du site de la Baie de Seine (coordonnées Lambert 1). Gauche : localisation dans le bassin oriental de la Manche. Droite : localisation sur le banc de Seine. 40
Figure 25 : Interprétation de profils sismiques réalisés à proximité du site de Baie de Seine (d'après Benabdellouahed, 2011). 41
Figure 26 : Localisation du secteur expérimental sur la carte des faciès et figures sédimentaires d'Auffret et d'Ozouville (Auffret et d'Ozouville, 1985a). 42
Figure 27 : Intensité moyenne d'extraction annuelle (gauche) et surfaces extraites (droite) sur les sites de Baie de Seine et de Dieppe. 44
Figure 28 : Restauration expérimentale : l'opération de nivellement. 45
Figure 29 : Localisation du site au large de Dieppe. Gauche : localisation dans le bassin oriental de la Manche. Droite : délimitation du site au large de Dieppe (coordonnées Lambert 1). 45
Figure 30 : Profil sismique Nord-Sud montrant les unités progradantes au niveau de l'unité médiane du cordon de galet (Claveleau, 2007). 46
Figure 31 : Carte sédimentaire du site d'étude (d'après Cabioch et Glaçon, 1977). 47

Figure 32 : Les suivis du panache turbide. 51
Figure 33 : Les courantomètres à effet Doppler utilisé lors des suivis. 52
Figure 34 : Principe de la mesure des ADP et du courantomètre à effet Doppler ponctuel. 53
Figure 36 : Le granulomètre laser LISST. 55
Figure 38 : Bouteille Niskin armée avant échantillonnage (A) et poste de filtration dans le laboratoire d'un navire océanographique (B). 57
Figure 39 : Calibration du signal acoustique rétrodiffusé enregistré par l'ADCP en concentration de MES pour les panaches turbides étudiés en Baie de Seine et à Dieppe. 59
Figure 40 : Les différentes échelles spatiales pour l'étude des impacts morpho-sédimentaires. 61
Figure 41 : Principe des faisceaux croisés employé pour le sondeur multifaisceaux (Michaux, 2003). 62
Figure 42 : Principe du sonar à balayage latéral (d'après Lurton, 1998). 64
Figure 43 : Benne Shipeck. A: la partie fixe et le demi-cylindre mobile. B: en position fermé après échantillonnage. 65
Figure 44 : Les caméras vidéos. 66
Figure 45 : Localisation des données antérieures utilisées dans le cadre de l'étude pour la caractérisation morpho-sédimentaire des impacts. 67
Figure 46 : Localisation des données acquises pour l'étude pour la caractérisation morpho-sédimentaire des impacts. 69
Figure 47 : Durée d'extraction et volume extrait en fonction du nombre de passage de la tête d'élinde sur le site de Baie de Seine. 74
Figure 48 : Simulation des courants de marée en Baie de Seine (Salomon, 1985). 80
Figure 49 : Profils verticaux des vitesses de courant au cours d'un cycle de marée selon différents coefficients et roses de courants associées (gris : fond, noire : surface mesurés par l'ADCP mouillé lors de la campagne Granimp08b). 81
Figure 50 : Simulation bidimensionnelle des courants résiduels lagrangiens intégré sur la colonne d'eau (Le Hir *et al.*, 1985). 82
Figure 51 : Roses des vents construites à partir des données relevées au Cap de la Hève 83
Figure 52 : Fréquence de la hauteur significative (1) et de la période significative (2) de la houle calculées à partir des enregistrements de la bouée LHA entre 1997 et 2008 (CETMEF, 2010). 83
Figure 53 : Zonation de la Baie de Seine d'après la relation salinité-éléments nutritifs (COB, 1978). 84
Figure 54 : Salinité et température de la colonne d'eau lors des points fixes de 13 h. 85
Figure 55 : Localisation de l'isoplèthe 5 NTU en surface en fonction du débit de la Seine et des conditions d'agitation (Aminot *et al.*, 1997) 87
Figure 56 : Concentration en MES dans la colonne d'eau lors des points fixes de 13 h. 88
Figure 57 : Evolution au cours d'un cycle ME/VE du signal rétrodiffisué (IV) et des paramètres de la houle enregistrés par l'ADP Sontek installé au mouillage lors de la campagne Granimp08b. 89
Figure 58 : Distributions géographiques typiques de la chlorophylle a en baie de Seine (Aminot *et al.*, 1997). 90
Figure 59 : Répartition granulométrique moyenne des MES en surface et au fond de la colonne d'eau mesurée par le LISST au cours du point fixe du 25/03/10. 91
Figure 60 : Evolution des classes granulométriques mesurées par le LISST lors du point fixe du 25/03/10.. 92
Figure 61 : Enveloppes granulométriques des MES contenues dans la colonne d'eau en fonction de la saison. 93
Figure 62 : Calcul du débit d'un déversoir rectangulaire à parois minces en écoulement dénoyé avec contraction latérale. 96
Figure 63 : Comparaison des granulométries de la surverse. 98
Figure 64 : Evolution temporelle en sub-surface des concentrations de MES du panache turbide. 103
Figure 65 : Extension et morphologie du panache global en fin de chargement pour différentes conditions tidales (A) et photographie aérienne oblique du panache généré au jusant en fin de chargement (B). 104
Figure 66 : Mosaïque des photographies aériennes des trois derniers tronçons de panache généré par la drague, 20 minutes après la fin des extractions. 105
Figure 67 : Section transversale des perturbations du signal acoustique (dB) mesuré par l'ADCP, réalisée à l'arrière de la DAM Scelveringhe sur le site de Dieppe en début de chargement avant que la surverse soit chargée de particules. 106
Figure 68 : Section transversale du signal rétrodiffusé calibré du panache à S+11 min 108

Figure 69 : Granulométrie des particules contenues dans le panache en surface (A) et au fond (B), et images MEB montrant les particules minérales dans le mode de sables très fins à moyens (C), les agrégats du mode de silts très fins à fins et les particules minérales du mode des argiles (D). 109
Figure 70 : Evolution temporelle d'une section transversale du panache formé à contre-courant au flot en conditions de ME. 111
Figure 71 : Evolution temporelle d'un panache formé à contre-courant lors du flot à ME en condition d'agitation calme..... 114
Figure 72 : Evolution temporelle d'un panache formé avec courant lors du flot à ME en condition d'agitation calme. 116
Figure 73 : Zones de dépôts des sables et particules fines du panache de surverse (bathymétrie SHOM). .. 117
Figure 75 : Résiduel de courant entre Dieppe et le Tréport (Ferret, 2011)..... 120
Figure 76 : Caractéristiques de la houle au large de Dieppe sur la période de 1979 à 2002. (données ANEMOC, point Coast-3506 d'après Ferret, 2011). 121
Figure 77 : Réponse acoustique d'un ADCP du large vers la côte (A) et calibration en concentration de MES (B). 123
Figure 78 : Granulométrie des particules en suspension dans le milieu naturel hors panache. 123
Figure 79 : Granulométrie des particules en suspension dans la surverse (mesures LISST laboratoire). 125
Figure 80 : Evolution temporelle en sub-surface des concentrations de MES du panache turbide. 126
Figure 81 : Extension des panaches à la fin du chargement de la drague lors des suivis du 08/10/10 (A) et du 09/10/10 (B). 128
Figure 82 : Section transversale du signal rétrodiffusé calibré du panache à S+14min. 129
Figure 83 : Evolution temporelle d'une section transversale du panache formé à contre-courant en fin de jusant en conditions de VE. 131
Figure 84 : Evolution temporelle d'un panache formé à contre-courant en fin de jusant en VE sans agitation. 133
Figure 85 : Evolution temporelle d'un panache formé avec courant lors en fin de jusant en VE sans agitation. 135
Figure 86 : Zones de dépôt potentielles des sables et particules fines du panache de surverse pour des extractions entre BM-1h et PM-1h. 136
Figure 87 : Comparaison du comportement des panaches sur les sites de Dieppe et de Baie de Seine d'après la classification de Winterwerp..... 142
Figure 88 : Synthèse de la dynamique du panache généré sur le site en Baie de Seine et sur le site de Dieppe à contre-courant pour une surverse par sabords..... 145
Figure 89 : Evaluation de l'impact spatio-temporel du panache turbide sur les concentrations en MES du milieu. 150
Figure 90 : Carte bathymétrique issue de la couverture SMF acquise lors de la campagne Granimp09b (maillage 10 m). 160
Figure 91 : Cartes bathymétriques des zones d'extraction A (à gauche) et B (à droite) avant le début de l'extraction, réalisées à partir des couvertures SMF de la campagne Granimp07 (maillage 10 m)..... 161
Figure 92 : Différentiels bathymétriques entre 1968 et 1978 (A) et entre 1978 et 2007 (B)..... 162
Figure 93 : Mosaïque sonar. Campagnes Granimp07. Campagnes Granimp09b..... 163
Figure 94 : Exemple de photographie de benne type et ensemble des courbes granulométriques cumulées. 164
Figure 95 : Contribution des lithoclastes et carbonates sur la courbe granulométrique de fréquence d'un prélèvement sédimentaire type du milieu non impacté..... 165
Figure 96 : Carte morpho-sédimentaire construite à partir des couvertures sonar et SMF réalisées lors de la campagne Granimp09b. 166
Figure 97 : Carte de la médiane issue de la grille de prélèvement sédimentaire réalisée lors de la campagne Granimp08a. 167
Figure 98 : Ecart du pourcentage par classe granulométrique entre les valeurs maximales et les moyennes pour les différents réplicats étudiés..... 168
Figure 99 : Photographies sous-marines prises lors de plongée sur le milieu non impacté..... 168
Figure 100 : Variabilité spatio-temporelle de la granulométrie de la couverture sédimentaire naturelle du secteur d'expérimentation. 169
Figure 101 : Comparaison des courbes granulométriques des stations suivies entre 1990 et 2007. 170
Figure 102 : Analyses granulométriques des carottes de 1972 et 1976..... 171

Figure 103 : Flux sédimentaires et contribution par classe granulométrique en fonction de l'agitation par la houle. Calcul effectué à partir de la formule de Wu et al. (Wu *et al.*, 2000). 174
Figure 104 : Comparaison des courbes de fréquences du signal acoustique de secteur non impacté et impacté. 177
Figure 105 : Spectre granulométrique des stations sédimentaires autour des zones d'extraction sortant de l'enveloppe granulométrique naturelle. 178
Figure 106 : Spectre granulométrique des stations sédimentaires montrant une augmentation des sables et silts au cours de l'extraction sans sortir de l'enveloppe naturelle. 178
Figure 107 : Représentation de l'évolution granulométrique des stations sédimentaires sous forme de fuseau rapporté aux proportions granulométriques moyennes de l'enveloppe naturelle sur un diagramme ternaire (gravier, sable et vase). 179
Figure 108 : Exemple de sillons isolés. 182
Figure 109 : Section transversale type d'un sillon (approfondissement et pentes). 183
Figure 110 : Paramètres morphologiques de la section transversale moyenne d'un sillon selon le type de drague. 184
Figure 111 : Paramètres morphologiques des sections transversales moyennes d'un sillon creusé par la Charlemagne, perpendiculairement et parallèlement au courant dominant (approfondissement et pentes). 186
Figure 112 : Paramètres morphologiques des sections transversales moyennes d'un sillon creusé par la Charlemagne à contre-courant et avec courant. Cas de sillons perpendiculaires au courant dominant. 187
Figure 113 : Exemples de sillons isolés observés sur une mosaïque sonar.. 188
Figure 115 : Paramètres morphologiques des sections transversales moyennes de sillons générés par plusieurs passages de la tête d'élinde. 190
Figure 116 : Approfondissement et pentes en fonction du volume extrait. 192
Figure 118 : Courbes granulométriques des échantillons prélevés dans une dépression. Echantillonnage effectué par des plongeurs le long d'une section transversale d'une dépression. 193
Figure 119 : Images vidéo des dépressions de la zone A et de la zone B. Captures d'écran à partir des images vidéo du ROV.. 195
Figure 120 : Courantométrie au centre d'une dépression et sur une crête. 197
Figure 121 : Bathymétrie de la zone A après l'arrêt des extractions (193 278 m^3 sur 12 mois) et de la zone B en cours d'extraction (293 635 m^3 sur 20 mois). 198
Figure 122 : Evolution des paramètres morphologiques des sous-zones des sites A et B en fonction du volume extrait cumulé. 200
Figure 123 : Mosaïque sonar de la zone A après la fin des extractions (193 278 m^3 sur 12 mois) et de la zone B en cours d'extraction (293 635 m^3 sur 20 mois). 201
Figure 124 : Evolution des courbes granulométriques des stations prélevées dans les zone d'extraction en fonction du volume extrait. 202
Figure 125 : Contribution des lithoclastes et carbonates sur la courbe granulométrique de fréquence d'un prélèvement sédimentaire impacté dans la zone d'extraction. 203
Figure 126 : Exemples d'évolution des courbes granulométriques de la périphérie de la zone A qui montraient un gradient croissant des sables et des silts au cours des extractions. 204
Figure 127 : Exemple de restauration de sillons isolés générés par la DAM Scelveringhe et la DAM Charlemagne. 207
Figure 128: Exemple d'évolution d'un sillon isolé formé par la DAM Charlemagne parallèlement aux courants tidaux dominants. 209
Figure 129 : Evolution temporelle des vitesses de comblement ($m.an^{-1}$) et des coupes transversales de l'approfondissement et des pentes des dépressions au droit du mouillage des courantomètres ponctuels (Aquadopp). 210
Figure 130 : Evolution de l'approfondissement et des vitesses de restauration des dépressions en fonction du volume extrait. 211
Figure 131 : Représentation 3D de l'évolution de l'approfondissement en fonction du temps de restauration et du volume extrait et représentation spatial du modèle d'évolution logarithmique de second ordre. 212
Figure 132 : Comparaison des vitesses de restauration des dépressions des sous-zones A Nord et A Sud en fonction du volume extrait. 212

Figure 133 : Restauration de la zone A. Evolution des paramètres morphologiques des sous-zones A Nord et A Sud après l'arrêt des extractions. 213
Figure 134 : Evolution des flux de dépôt calculés pour différentes conditions d'agitation à partir (i) des mesures de courant et (ii) des prélèvements sédimentaires, réalisés au centre et sur une crête de dépressions. 216
Figure 135 : Temps de restauration des dépressions en fonction du volume extrait. 217
Figure 136 : Restauration sédimentaire de la zone A. Evolution de la granulométrie des stations de la zone A après l'arrêt des extractions. 219
Figure 137 : Restauration sédimentaire de la zone A. Courbes granulométriques estimées du sédiment de remplissage des dépressions en fonction de l'agitation. 220
Figure 138 : Analyse Factorielle Discriminante par regroupement spatial des résultats des tests de Kruskal-Wallis effectué sur les classes granulométrique des échantillons sédimentaires prélevés sur le site de Baie de Seine. L'axe F1 représente 80 % de la variabilité granulométrique et l'axe F2 20 %. A : projections des corrélations des classes granulométriques avec les axes F1 et F2. B : projections factorielles des échantillons. 222
Figure 139 : Analyse Factorielle Discriminante par regroupement thématique des résultats des tests de Kruskal-Wallis effectué sur les classes granulométrique des échantillons sédimentaires prélevés sur le site de Baie de Seine. 226
Figure 140 : Synthèse des temps de restauration étudié en fonction du milieu étudié (d'après Foden *et al.*, 2009) et apports de la présente étude. 228
Figure 141 : Evaluation de l'impact spatio-temporel des impacts morpho-sédimentaire (excavation et dépôt) sur le milieu. 233

Liste des tableaux

Tableau 1 : Utilisations des granulats marins en Europe (traduit d'après Velegrakis *et al.*, 2010)..... 8
Tableau 2 : Estimation des ressources en granulats marins sur les façades "Manche-Est" et "Loire-Gironde" (Ifremer, 2006)..... 9
Tableau 3 : Volumes extraits selon les quotas autorisés pour les années 2008 et 2009 par type de matériaux marins et par région (ICES, 2010)..... 12
Tableau 4 : Dimensions moyennes, maximales et minimales des DAM en activité dans le monde (d'après Clarkson Research Services in Lloyd Jones *et al.*, 2010)..... 15
Tableau 5 : Proposition de classification des impacts physiques liés à l'extraction de granulats marins..... 20
Tableau 6 : Principaux impacts liés à la remise en suspension et leur conséquences sur l'environnement (traduit d'après Hitchcock *et al.*, 1999)..... 21
Tableau 7 : Synthèse des données sur la remise en suspension acquises lors des campagnes à la mer effectuées entre 2007 et 2010..... 56
Tableau 8 : Synthèse des données morpho-sédimentaires acquises lors des campagnes à la mer effectuées entre 2007 et 2010..... 68
Tableau 9 : Comparaison de la salinité et de la température sur le site d'étude à BM en ME à l'automne et au printemps..... 86
Tableau 10 : Bilan annuel des volumes particulaires dragués et rejetés par surverse, et des épaisseurs de dépôts correspondants..... 118
Tableau 11 : Estimation de masses de sédiments remis en suspension par les courants et la houle sur une zone d'extraction et comparaison avec les tonnages remis en suspension par la surverse..... 139
Tableau 12 : Rapport I/R entre le tonnage rejeté par surverse et celui chargé pour différentes DAM..... 147
Tableau 13 : Indice $T_{1,25[naturel]}$ en fonction du site d'extraction et des conditions d'extraction..... 148
Tableau 14 : Comparaison des paramètres morphologiques de sillons générés par la DAM Charlemagne au printemps et à l'automne..... 207
Tableau 15 : Comparaison de l'évolution des paramètres morphologiques de sillons générés par la DAM Charlemagne avec et à contre-courant..... 208
Tableau 16 : Comparaison de l'évolution des paramètres morphologiques de sillons générés par la Scelveringhe avec et sans nivellement..... 209
Tableau 17 : Approfondissement moyen par zone après l'extraction et lors de la restauration..... 230
Tableau 18 : Evolution de la proportion des sables et silts dans les zones de dépôts..... 230

Liste des planches

Planche 1 A: Tête d'élinde de type « fixed visor » ; B: Tête d'élinde de type « california » ; C : Elinde équipée d'un système de jet d'eau ; D : Elinde de grande dimension ; E: Déversement par tour centrale ; F: Déversement par ouverture dans le bassin. 16
Planche 2 A : Déversement et criblage par chenal central ; B : Déversement et criblage par tours rotatives ; C : Surverse par sabord continu ; D : Surverse par sabord discontinu ; E : Elinde ; F : Surverse par puits..... 17
Planche 3 : Extrait d'images réalisées au MEB des échantillons prélevés lors du jusant de ME du point fixe du 25/03/10. 94
Planche 4 : Images MEB des surverses de la SandHarrier et de la Charlemagne 100

ANNEXES

Annexe 1 : Coordonnées géographiques des sommets des sites d'étude (projection Lambert 1). 266
Annexe 2 : Localisation des stations sédimentaires suivis de 2008 à 2010 lors des campagnes Granimp08a, -b, -09a, -b et 10a. 267
Annexe 3 : Regroupement des classes granulométriques par groupe de prélèvements sédimentaires par analyse statistique de type Kruskal-Wallis. 268
Annexe 4 : Evolution des paramètres morpho-sédimentaires et biologiques sur la zone A du site Baie de Seine avant, pendant et après extraction (d'après Desprez *et al.*, 2012)..... 269
Annexe 5 : Evolution des paramètres morpho-sédimentaires et biologiques sur la zone B du site Baie de Seine avant et pendant extraction (d'après Desprez *et al.*, 2012). 270
Annexe 6 : Résumé de communication orale. Séminaire annuel du Grand Réseau de Recherche SCALE. 3 février 2010..... 271
Annexe 7 : Résumé de communication orale. 18th International Sedimentological Congress Mendoza, Argentina. 26/09/10 - 01/10/10..... 272

<u>Annexe 1</u> : Coordonnées géographiques des sommets des sites d'étude (projection Lambert 1).

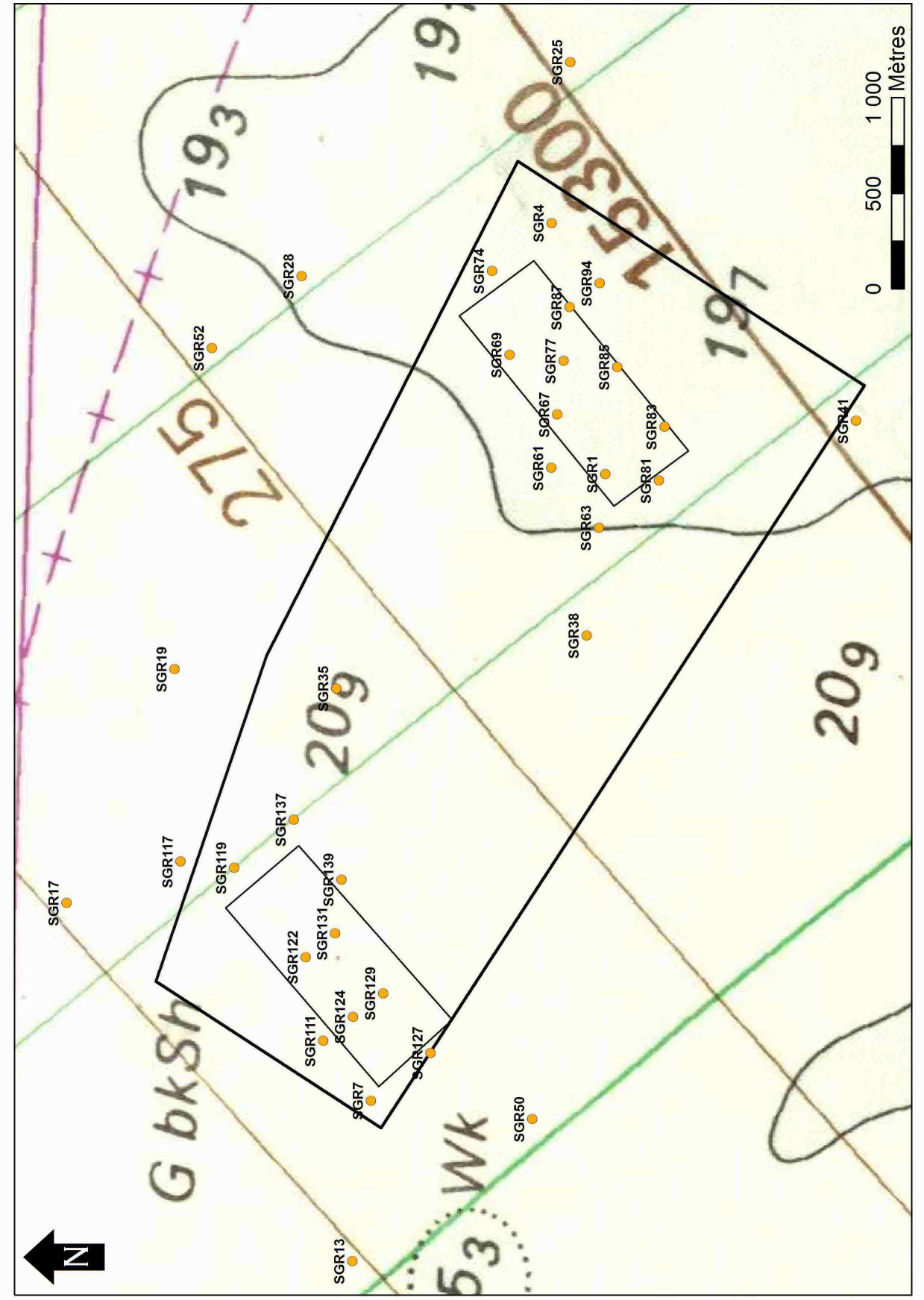
	Nom	X	Y
Site expérimentale	A	407063	208085
	B	408768	207506
	C	411354	206192
	D	410180	204378
	E	406297	206907
Zone A	A1	407448	207719
	A2	407773	207337
	A3	406863	206534
	A4	406514	206918
Zone B	B1	410544	206498
	B2	410832	206108
	B3	409838	205298
	B4	409550	205689

<u>Baie de Seine</u>

Nom	E	N
A	511656	255991
B	511676	257164
D	514861	257113
E	514832	255260
F	512442	255298
G	512453	255978
H	510067	254998
I	509913	255340

<u>Dieppe</u>

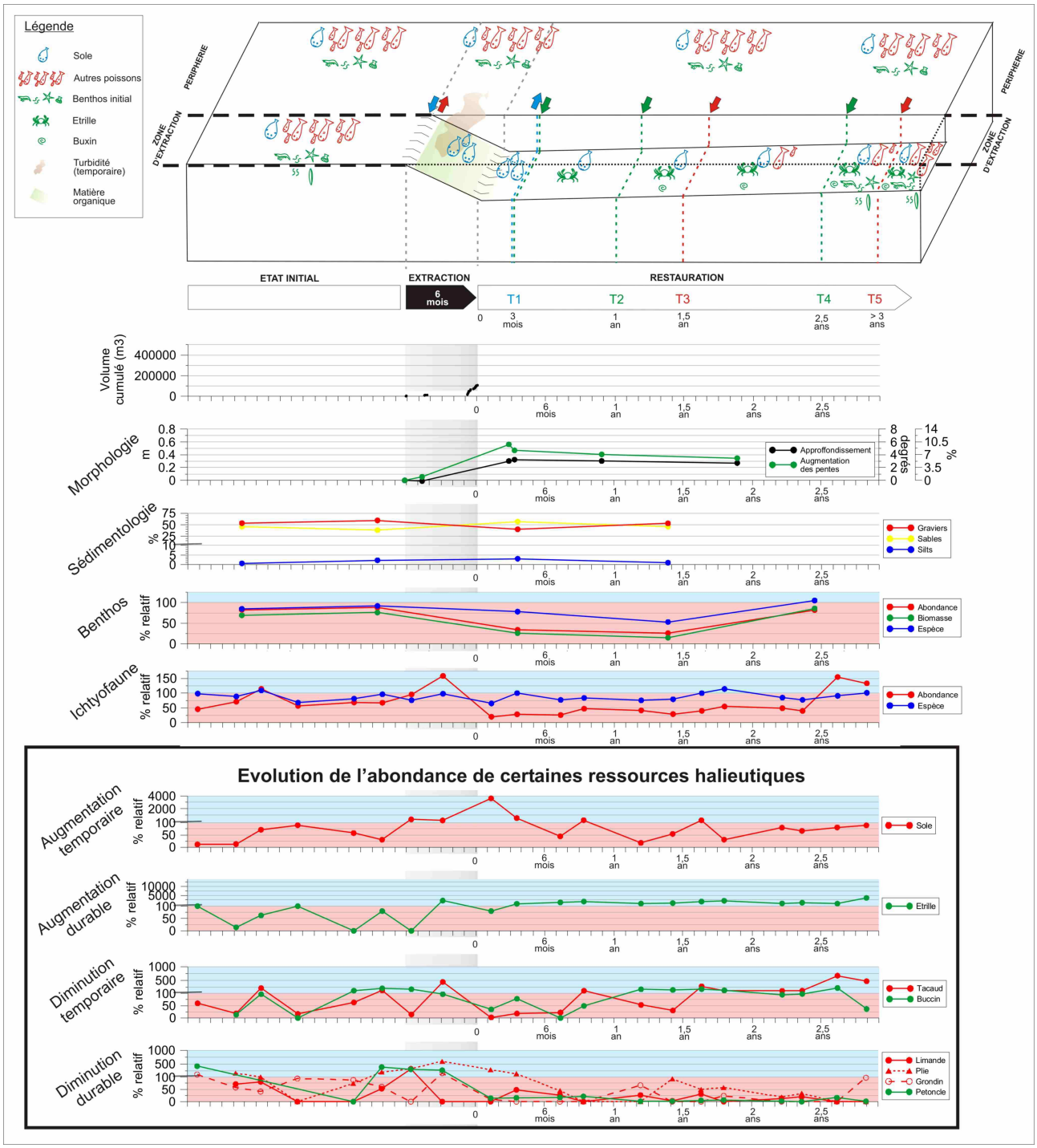
<u>Annexe 2</u> : Localisation des stations sédimentaires suivis de 2008 à 2010 lors des campagnes Granimp08a, -b, -09a, -b et 10a.



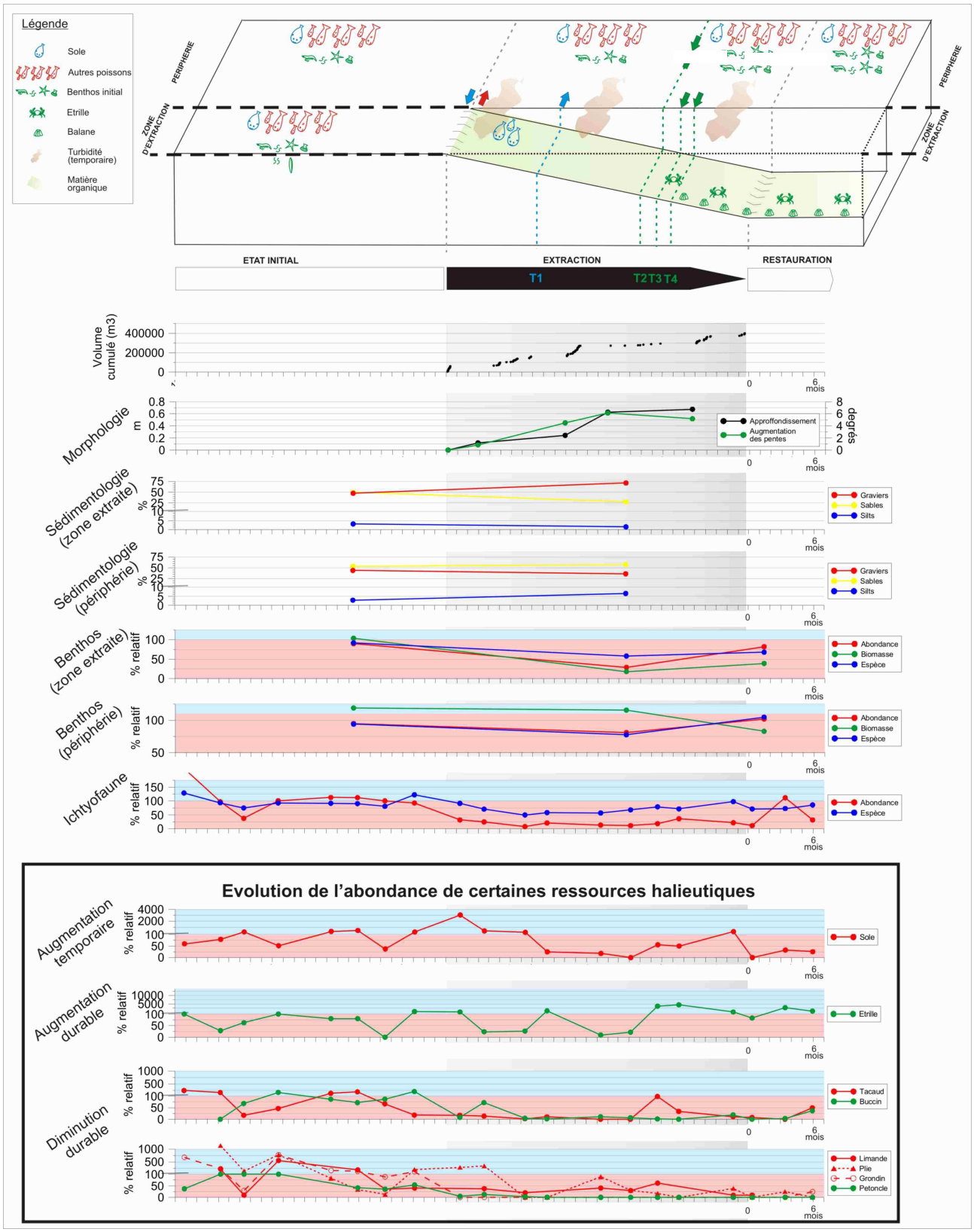
Annexe 3 : Regroupement des classes granulométriques par groupe de prélèvements sédimentaires par analyse statistique de type Kruskal-Wallis.

	0.05	0.063	0.08	0.1	0.125	0.16	0.2	0.25	0.315	0.4	0.5	0.63	0.8	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	STRUCT	STRUCTURE GE	
Env. Naturel	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	3	2	2	3	3	2	2	3	3	3	1	2	1	1	C	1=ENVIF
ZA 08a	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	3	2	3	2	3	3	1	1	1	2	A	2=EXTR/
ZA 08b	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	3	2	3	1	3	1	1	1	1	2	A	3=REST
ZA 09a	1	1	1	1	1	1	2	2	3	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	3	2	1	1	1	1	1	1	2	A	A=ZONE
ZA 09b	1	1	1	1	1	1	2	2	3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	3	1	3	2	3	A	B=PROC
ZA 10a	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	3	A	C=ELOIC
ZAPp 08a	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	3	3	1	1	1	2	B	
ZAPp 08b	2	1	1	1	2	2	1	2	3	1	2	1	1	1	1	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	B	
ZAPp 09a	2	2	2	2	2	2	3	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	B	
ZAPp 09b	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	1	3	B	
ZAPp 10a	3	2	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	1	3	B	
ZAPe 08a	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2	3	1	1	2	1	1	2	C	
ZAPe 08b	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	2	C	
ZAPe 09a	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	C	
ZAPe 09b	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	2	3	1	1	1	1	1	3	C	
ZAPe 10a	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	3	C	
ZBN 08a	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	3	1	1	2	2	1	1	3	3	2	2	2	1	1	A	
ZBN 08b	2	1	2	2	2	1	1	2	3	3	3	1	2	2	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	A	
ZBN 09a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	3	2	3	1	1	2	3	2	2	A	
ZBN 09b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2	A	
ZBN 10a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	3	2	2	A	
ZBS 08a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	3	3	3	1	3	1	1	A	
ZBS 08b	3	1	2	2	2	1	2	1	1	2	3	3	2	2	3	3	2	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	A	
ZBS 09a	2	2	2	3	3	2	2	1	1	3	2	2	1	1	1	1	1	2	3	2	2	1	1	1	1	2	1	1	A	
ZBS 09b	3	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	3	1	3	2	1	A	
ZBS 10a	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	A	
ZBPp 08a	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	2	3	2	2	3	2	1	1	2	2	2	2	1	1	1	B	
ZBPp 08b	2	1	2	2	2	2	2	1	2	3	3	3	2	1	2	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	B	
ZBPp 09a	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	3	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	B	
ZBPp 09b	3	2	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	B	
ZBPp 10a	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	3	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	B	
ZBPe 08a	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	2	2	1	1	3	1	1	C	
ZBPe 08b	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	3	3	1	3	1	1	1	1	C	
ZBPe 09a	3	2	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	3	1	2	C	
ZBPe 09b	3	3	3	2	2	2	1	1	2	1	2	3	2	2	3	2	3	3	2	1	1	1	1	1	1	3	1	2	C	
ZBPe 10a	3	2	3	1	3	2	3	1	1	2	2	1	1	2	3	2	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	C	
Plongeur	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	3	2	2	A	

<u>Annexe 4</u> : Evolution des paramètres morpho-sédimentaires et biologiques sur la zone A du site Baie de Seine avant, pendant et après extraction (d'après Desprez *et al.*, 2012).



<u>Annexe 5</u> : Evolution des paramètres morpho-sédimentaires et biologiques sur la zone B du site Baie de Seine avant et pendant extraction (d'après Desprez *et al.*, 2012).



Annexe 6 : Résumé de communication orale. Séminaire annuel du Grand Réseau de Recherche SCALE. 3 février 2010.

Auteurs & laboratoires : Duclos P-A.[1*], Le Bot S.[1], Rivoalen H.[2], Lafite R.[1].
[1] : Laboratoire de Mophodynamique Continentale et Côtière, Université de Rouen, CNRS, UMR 6143 M2C, IRESE A, Place E. Blondel, 76821 Mont-Saint-Aignan.
[2] : Laboratoire des Ondes et des Milieux Continus, Université du Havre, CNRS, 53 rue de Prony, BP 1123, 76600 Le Havre.

*Bourse CIFRE financée : ANRT, Les Graves de l'Estuaire, Université de Rouen, Université du Havre.

Impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats sur les fonds marins. Séminaire annuel du Grand Réseau de Recherche

Face à l'augmentation des demandes d'extraction de granulats sur la plate-forme marine, il est apparu indispensable d'acquérir une connaissance et une compréhension scientifiques des impacts physiques de l'extraction sur l'environnement marin. Le projet de recherche a pour but d'étudier les impacts morpho-sédimentaires d'un site expérimental en Baie de Seine. Une comparaison sera établie avec une autre exploitation située au large de Dieppe.

Le premier objectif de ces travaux est la caractérisation des évolutions morphologique et sédimentaire, naturelle et induite par l'activité de la drague. Celle-ci se fera à l'échelle du sillon, empreinte laissée par la drague sur le fond, et à l'échelle de l'exploitation (quelques km^2). Les capacités de restauration naturelle et artificielle seront examinées. Des missions en mer, semestrielles, hors période d'exploitation, permettront d'acquérir les paramètres essentiels à cette première problématique. La bathymétrie, l'imagerie sonar et l'échantillonnage des fonds seront les moyens d'investigation.

Le second objectif est de comprendre la dispersion du nuage turbide créé par l'élinde et par l'eau de surverse rejetée par la drague. Ceci permettra de localiser et de quantifier le dépôt de surverse sur le fond. Un modèle numérique 2D puis 3D sera mis en oeuvre afin de simuler les différentes conditions hydro-sédimentaires. La création d'un tel outil passe par la mesure des données d'entrée pour le modèle. Ainsi les propriétés du milieu marin (température, salinité, turbidité, houle, courants, etc), du matériau de surverse (nature, granulométrie, forme, etc) et le comportement des particules dans la colonne d'eau (vitesse de chute) seront autant de paramètres à mesurer *in situ* et au laboratoire. Les premiers résultats du point zéro sont présentés. Des missions en mer programmées en même temps que les extractions, seront réalisées afin d'acquérir un échantillonnage du nuage turbide en fonction des différentes conditions hydrodynamiques (cycle semi-diurne, vive-eau / morte-eau, houle, crue et étiage de la Seine).

Cette étude permettra d'évaluer les impacts physiques d'une extraction et de mettre en place des outils et des protocoles de suivis de ces impacts. Ce projet se fait en synergie avec la connaissance de l'évolution de la faune benthique. Il se positionne dans une démarche globale des différents partenaires en vue d'une gestion intégrée des zones côtières.

<u>Annexe 7</u> : Résumé de communication orale. 18th International Sedimentological Congress Mendoza, Argentina. 26/09/10 - 01/10/10.

Dynamics of turbid plumes generated by marine aggregate dredging. Example from a macrotidal environment (the Bay of Seine, france).

Duclos Pierre-Arnaud [1,2], Le Bot Sophie [1], Rivoalen Elie [2] & Lafite Robert [1].

1 : Laboratoire de Mophodynamique Continentale et Côtière, Université de Rouen, CNRS, UMR 6143 M2C, 76821 Mont-Saint-Aignan, France.
2 : Laboratoire des Ondes et des Milieux Complexes, Université du Havre, CNRS, 76600 Le Havre, France.
3 : Laboratoire de Mécanique de Rouen, INSA de Rouen, 76801 Saint Etienne du Rouvray, France.

Contact : pierre-arnaud.duclos@etu.univ-rouen.fr

During the last decades, marine aggregate extraction has increased in the English Channel (NW European marine platform). This environment is sensitive and already anthropized (fisheries and 20% word maritime traffic). Following the international recommendations (Rio de Janeiro in 1992 and Johannesburg in 2002), in an Integrated Coastal Zone Management context, it is necessary to get a better understanding of the physical impact of dredging activities on this sensitive environment. The present study is realised in the framework of the regional programme “SIEGMA” including scientists and stakeholders, and is reported to the ICES Working Group “WGEXT” and the COST “MAGGNET” european programme.

The research project is carried on an experimental area in the Bay of Seine (Eastern English Channel, France), situated on a marine continental platform submitted to macrotidal régime and caracterize by coarse sediment (fine sediment < 1 to 2%).

During dredging operations, turbidity is created by the head of dredge pipe on the seabed (bottom plume) and by the throw back of the sediment-water mixture from the dredge vessel (surface plume). The aim is to determined the plumes geometry and composition, the time of plumes dispersion under various environmental conditions and to evaluate the evolution of the seabed due to the plumes particules settling.

This characterization is based on field measurements of the properties of the marine environment (turbidity, temperature, salinity, currents, waves), materials overflow (nature, size, morphology) and particle behavior in the water column (settling velocity, dispersion). These surveys are repeated several times in order to cover different hydro-sedimentary conditions (tidal cycles, wave, wind) and different dredging terms (dredging course against current, kind of overflow and nature of suspended sediments). A numerical model is also developed to simulate the plume dispersion for various hydro-sedimentary and dredging scenarii. The field data constitute the primary model inputs.

The tools used during the oceanographic surveys (LISST, ADP, OBS) allow to characterize surface plumes due to overflow. An active surface plume settles quickly under the dredging vessel and around the dredging area and is principally made of fine sand. A passive surface plume settles slowly, moves with the currents as far as 7 km beyond dredging area and persists about 3 hours depending on the hydrodynamic conditions. Monitoring from the oceanographic vessel does not provide a detailed picture of the bottom plume. The bottom plume seems to settle quickly below the dredge and / or could be anecdotal compared to the surface plume. This field data are compared to the model results. The model allows to define the plume depositional area that is compared with the field observations.

Impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats marins. Application au bassin oriental de la Manche.

Le bassin oriental de la Manche, correspondant à une mer épicontinentale à régime macrotidal, est soumis au développement croissant de l'activité d'extraction de granulats marins depuis plusieurs décennies. Des impacts sur le paysage sous-marin et sur l'écosystème sont conditionnés par les impacts physiques induits par l'extraction. Dans le cadre d'une gestion intégrée des zones côtières, une bonne connaissance des impacts, de leurs paramètres forçants et des potentiels de restauration est nécessaire. Pour cela deux sites d'extraction aux environnements physiques caractéristiques du bassin oriental de la Manche sont étudiés au large de Dieppe et en Baie de Seine. Sur ce dernier, l'extraction est menée dans un contexte expérimental et suivie durant 3 années, pendant et après extraction, sur un substrat sablo-graveleux. L'étude se concentre sur trois principaux impacts physiques : (i) un impact hydrologique, direct, lié à la remise en suspension de sédiment et formant un panache turbide à l'arrière de la drague, (ii) un impact morpho-sédimentaire, direct, généré lors de l'excavation de sédiment au droit de la zone d'extraction, et (iii) un impact morpho-sédimentaire indirect correspondant aux dépôts des particules du panache turbide à l'intérieur et autour de la zone d'extraction. Le panache turbide, pour lequel une stratégie d'étude est proposée, dure environ 2 à 3h avec une dynamique essentiellement passive et soumise à des phénomènes de dispersion, décantation et advection. Les concentrations, la granulométrie et la nature des matières en suspension du panache turbide sont surtout contrôlées par la nature du sédiment extrait et le débit d'aspiration de la DAM (Drague Aspiratrice en Marche). La hauteur d'eau et le régime de houle contrôlent le temps de disparition du panache et la remise en suspension des particules des panaches antérieurs déjà décantés. Les impacts au droit de la zone d'extraction sont concernés par des sillons ou dépressions dont les paramètres morphologiques dépendent du caractère intensif ou extensif de l'extraction. La nature des sédiments dans ces excavations est fonction de la variabilité sédimentaire verticale et du potentiel de comblement (flux sédimentaires). Au droit des zones de dépôts, l'impact morpho-sédimentaire est essentiellement marqué par une augmentation de la proportion des silts et des sables. L'extension des dépôts des sables moyens est potentiellement limitée à 250 m autour de l'extraction alors que celle des silts peut atteindre une distance de 6,5 km. La distance des dépôts est fonction de la dynamique du panache turbide, de la vitesse de chute des particules et des courants. Leur nature est liée à celle des particules remises en suspension par la surverse et par l'élinde sur le fond, donc par la nature du substrat et par la vitesse de la DAM. La restauration morphologique des zones excavées est estimée à 10,5 ans en Baie de Seine, confirmant ce qui est généralement admis dans la littérature pour ce type de fonds. Des recommandations pour les suivis de ces impacts et des outils de gestion (indices et lois de comportement) sont proposés pour appréhender ces effets et les comparer d'un site à l'autre.

Mots-clés : granulats marins, sédimentologie, impacts, panache turbide, mesures in situ, bassin oriental de la Manche.

Morphosedimentary impacts of marine aggregate extraction. Eastern English Channel case study.

The Eastern English Channel is a macrotidal epicontinental sea, subject to an increasing demand for marine aggregate extraction since several decades. Effects on the submarine landscapes and ecosystems are conditioned by the physical impacts generated by extraction. In the objective of the integrated coastal zone management, a good knowledge of impacts, of their forcing parameters and their recovery potential is necessary. Two extraction sites with physical characteristics typical of the Eastern English Channel are studied off Dieppe and in the Bay of Seine. For the last one, extraction is experimental and has been monitored for 3 years, during and after extraction, on a sandy-gravelly substrate. The study focuses on 3 main physical impacts: (i) a direct hydrological impact due to sediment resuspension, forming a turbid plume at the back of the dredger, (ii) a direct morphosedimentary impact generated during sediment excavation in the extraction zone, and (iii) an indirect morphosedimentary impact corresponding to the deposition of the particles from the turbid plume, in and around the extraction zone. The turbid plume, for which a monitoring strategy is proposed, lasts around 2-3h and displays a dynamics which is essentially passive and subject to dispersion, settlement and advection processes. Concentrations, grain-size and nature of the suspended matter composing the turbid plume are mainly controlled by the nature of the extracted sediment and the pump discharge of the dredger. Water level and wave climate control the plume dispersion time and the resuspension of the sediment that settled from previous plumes. The impacts in the extraction zone are concerned with furrows and depressions whose morphological parameters depend on extraction intensity. In excavations sediment nature is function of the vertical sediment variability and the infilling potential (sediment fluxes). In the vicinity of the depositional areas, the impact is essentially concerned with an increase in the proportion of silts and sands. Extension of medium sands is potentially restricted to 250 m around the extraction location, whereas silts may extend up to 6.5 km. Deposit distance depends on turbid plume dynamics, particle settling velocity and current velocity. The nature of deposits is function of the nature of the sediment put in suspension at the surface from the overflow and at the sea bottom by the dredging draghead, so by the nature of substrate and the speed of the TSHD (Trailing Suction Hopper Dredger). Morphological recovery of excavated areas is estimated to reach 10.5 years in the Bay of Seine, as generally reported in the literature for this type of seabed. Recommendations for the monitoring of impacts and management tools (indices and equations) are proposed to characterize and quantify impacts, and compare them form one site to another.

Key-words: marine aggregates, sedimentology, impacts, turbid plume, in situ measurements, Eastern English Channel.