

COLMATAGE

Couplages bio-morpho-sédimentaires et dynamique à long terme des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques en Seine aval



Programme de recherche financé par le GIP Seine-Aval
dans le cadre de sa phase 4 (2007-2012)

BERYOUNI K., MÉAR Y., MURAT A. et POIZOT E

7 MARS 2011

Sommaire

INTRODUCTION	8
LA BASE DE DONNEES SEDIMENTOLOGIQUES	9
VARIABILITE A DIFFERENTES ECHELLES SPATIALES	14
<i>I. Introduction.....</i>	<i>14</i>
<i>II. Le positionnement géographique</i>	<i>17</i>
<i>III. Les principaux faciès sédimentaires.....</i>	<i>19</i>
<i>III. Variabilité du taux de fraction fine à différentes échelles spatiales.....</i>	<i>21</i>
III.1 Action 1 : 30 échantillons avec le bateau à l'ancre.....	21
III.2 Action 2 : 9 échantillons avec le bateau à l'ancre.....	32
III.3 Action 3 : Prélèvements avec le bateau en route, à l'échelle de la centaine de mètres.	35
<i>III.4 Conclusion.....</i>	<i>43</i>
INFLUENCE DE LA STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE.....	44
<i>I. Introduction.....</i>	<i>44</i>
<i>II. Trois radiales et trois réplicats</i>	<i>44</i>
<i>III. Echantillonnage suivant une grille régulière.....</i>	<i>47</i>
<i>IV. Conclusion</i>	<i>50</i>
VARIABILITE LIEE A LA TECHNIQUE DE PRELEVEMENT	52
<i>I. Introduction.....</i>	<i>52</i>
<i>II. Les apports du programme Colmatage.....</i>	<i>52</i>
<i>III. Conclusion.....</i>	<i>60</i>
ETUDE DES RELATIONS ENTRE LES POPULATIONS D'OPHIURES ET LE SEDIMENT	63
<i>I. Introduction.....</i>	<i>63</i>
<i>II. Les populations d'ophiures à l'échelle de la baie de Seine orientale.</i>	<i>66</i>
<i>III. Relation entre taux de fraction fine et populations d'ophiures</i>	<i>73</i>
III.1 En période de crue.....	76
III.2 Après une forte tempête.....	77
III.3 En période de stabilité.....	78
III.4 Le faciès sédimentaire des « vases noires »	78
<i>IV. Relations entre COT, ST et populations d'ophiures</i>	<i>79</i>
<i>V. Conclusion</i>	<i>82</i>

Liste des figures

Figure 1 : Structure de la base de données SEDIGEST.	11
Figure 2 : Caractérisation des principaux faciès sédimentaires en baie de Seine orientale.	20
Figure 3 : Position géographique des stations 30-x.	22
Figure 4 : Photographie de sédiments caractéristiques des faciès étudiés pour l'action 30-x.	23
Figure 5 : Détail de la position géographique des échantillons prélevés sur la station 30-1.	25
Figure 6 : Détail de la position géographique des échantillons prélevés sur la station 30-2.	25
Figure 7 : Détail de la position géographique des échantillons prélevés sur la station 30-3.	26
Figure 8 : Comparaison entre le taux de fraction fine global et le taux de fraction fine normalisé.	28
Figure 9 : Abaques nombre d'échantillons/précision (à 95 %) pour les différents faciès sédimentaires étudiés.	31
Figure 10 : Position géographique des stations 1 et 2 prises en compte pour l'étude de la variabilité métrique.	33
Figure 11 : Photographie de sédiments caractéristiques des faciès étudiés pour l'action « 9 répliqués », station 1 : sable gris envasé ; station 2 : vase estuarienne.	34
Figure 12 : Position géographique des stations prises en compte pour l'étude de la variabilité hectométrique.	35
Figure 13 : Position géographique des stations A à D utilisées pour l'étude de la variabilité spatiale à l'échelle de la centaine de mètres.	36
Figure 14 : Position géographique des stations E à H utilisées pour l'étude de la variabilité spatiale à l'échelle de la centaine de mètres.	36
Figure 15 : Illustration des principaux faciès étudiés pour la mise en évidence de la variabilité géographique (sables fins envasés, vase beige, vase graveleuse à graviers envasés) à l'échelle de la centaine de mètres.	37
Figure 16 : Evolution de l'écart type de la variabilité spatiale en fonction du taux de fraction fine.	41
Figure 17 : Boxplot de l'ensemble des données concernant la variabilité spatiale à différentes échelles.	42
Figure 18 : Position géographique des stations « 3 répliqués, 3 radiales » prises en compte pour l'étude de la variabilité hectométrique.	44
Figure 19 : Différentes cartographies possibles à partir des taux de fraction fine déterminé sur chaque répliqués (3 radiales).	46
Figure 20 : Position géographique des stations « 3 répliqués, grille » prises en compte pour l'étude de la variabilité hectométrique.	48
Figure 21 : Différentes cartographies possibles à partir des taux de fraction fine déterminé sur chaque répliqués (grille régulière).	49
Figure 22 : Cartographie de la différence de taux de fraction fine (échantillon A de la grille régulière contre moyenne des 3 radiales).	50
Figure 23 : Principales techniques utilisées en baie de Seine pour prélever des sédiments.	53
Figure 24 : Box-plot mettant en évidence pour le faciès de sable fin envasé la plus grande hétérogénéité du jeu de données obtenu par carottage Reinek.	55
Figure 25 : Box-plot mettant en évidence pour le faciès de vase sableuse la plus grande hétérogénéité du jeu de données obtenu par carottage Reinek.	57
Figure 26 : Box-plot mettant en évidence pour le faciès de vase graveleuse une grande hétérogénéité du jeu de données obtenu par différentes techniques.	58
Figure 27 : Box-plot du faciès des jeux de données obtenu par différentes techniques pour le faciès de vase graveleuse normalisée.	59
Figure 28 : Box-plot des jeux de données obtenues par différentes techniques pour le faciès de vase sur sable.	60
Figure 29 : Région étudiée à travers les données acquises au cours des missions de cartographie réalisées en septembre 1986 et juillet 1991.	64

<i>Figure 30 : Région étudiée à travers les données acquises au cours des missions de cartographie réalisées en septembre 1998, mai 1999 et février 2009.</i>	64
<i>Figure 31 : Influence relative des forçages environnementaux (houle et crue de la Seine) lors des missions de prélèvement.</i>	66
<i>Figure 32 : Cartographie des populations d'ophiures en baie de Seine orientale (septembre 1986).</i>	67
<i>Figure 33 : Cartographie des populations d'ophiures en baie de Seine orientale (juillet 1991).</i>	68
<i>Figure 34 : Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (septembre 1986).</i>	69
<i>Figure 35 : Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (juillet 1991).</i>	70
<i>Figure 36 : Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (septembre 1998).</i>	71
<i>Figure 37 : Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (mai 1999).</i>	72
<i>Figure 38 : Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (février 2009).</i>	73
<i>Figure 39 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m² (ensemble de la baie de Seine et zone d'Antifer).</i>	74
<i>Figure 40 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m² (détail).</i>	75
<i>Figure 41 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m² en fonction des forçages environnementaux (Crue de la Seine).</i>	76
<i>Figure 42 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m² en fonction des forçages environnementaux (forte houle).</i>	77
<i>Figure 43 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m² en fonction des forçages environnementaux (Stabilité).</i>	78
<i>Figure 44 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m² pour le faciès spécifique des vases noires.</i>	79
<i>Figure 45 : Relation entre carbone organique total et nombre d'ophiures par m².</i>	81
<i>Figure 46 : Relation entre soufre total et nombre d'ophiures par m².</i>	81
<i>Figure 47 : Exemple type de sédiments prélevés au large du port d'Antifer.</i>	82
<i>Figure 48 : Envasement progressif des fonds marins par les ophiures.</i>	82
<i>Figure 49 : Envasement progressif des fonds à ophiures s'accompagne d'un profond changement de couleur (beige -> noire).</i>	83
<i>Figure 50 : Remaniement des fonds à ophiures par une forte houle conjuguée à une vive eau.</i>	83
<i>Figure 51 : Sédiment fin accumulés dans les zones à ophiures après ablation de la population d'ophiures et dépôt d'une vase liquide oxydée.</i>	84
<i>Figure 52 : Modèle d'évolution des fonds de la baie de Seine sous la quadruple action des apports fluviaux de la Seine, des courants de marée, de la houle et d'une forte population d'ophiures.</i>	85

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Missions réalisées en baie de Seine et dont les données granulométriques disponibles ont été intégrées dans la BDSI.</i>	12
<i>Tableau 2 : Précision théorique des systèmes de radiopositionnement mis en œuvre.</i>	19
<i>Tableau 3 : Position géographique des stations de type 30-x.</i>	22
<i>Tableau 4 : Dimension des zones de prélèvement pour les stations trente-x.</i>	26
<i>Tableau 5 : Taux de fraction fine des échantillons trente-1</i>	28
<i>Tableau 6 : Taux de fraction fine des échantillons trente-2.</i>	29
<i>Tableau 7 : Taux de fraction fine des échantillons trente-3.</i>	29
<i>Tableau 8 : Précision (au seuil de confiance de 95%) obtenue pour les faciès sédimentaires étudiés.</i>	30
<i>Tableau 9 : Taux de fraction fine pour les stations « 9 réplicats »</i>	34
<i>Tableau 10 : Variabilité sédimentaire à l'échelle de la centaine de mètres.</i>	39
<i>Tableau 11 : Influence de la normalisation (suppression de la fraction graveleuse) sur le taux de fraction fine.</i>	40
<i>Tableau 12 : Moyenne, écart-type et encadrement de la variabilité spatiale pour les différents faciès étudiés.</i>	41
<i>Tableau 13 : Taux de fraction fine pour les stations « 3 réplicats, 3 radiales »</i>	45
<i>Tableau 14 : Taux de fraction fine pour les stations « 3 réplicats, grille ».</i>	48
<i>Tableau 15 : Comparaison des taux de fraction fine pour les stations A, D, D', F et H en fonction de la technique de prélèvement.</i>	54
<i>Tableau 16 : Résultats des tests de Wilcoxon comparant les TF2 obtenus par plongée et ceux obtenus par les autres méthodes (Faciès «sable fin envasé»).</i>	55
<i>Tableau 17 : Résultats des tests de Wilcoxon comparant les TF2 obtenus par plongée et ceux obtenus par les autres méthodes (Faciès «vase sableuse»).</i>	56
<i>Tableau 18 : Résultats des tests de Wilcoxon comparant les TF2 obtenus par plongée et ceux obtenus par les autres méthodes (Faciès «vase graveleuse»).</i>	57
<i>Tableau 19 : Résultats des tests de Wilcoxon comparant les TF² obtenus par plongée et ceux obtenus par les autres méthodes (Faciès «vase graveleuse normalisée à 2 mm»).</i>	59
<i>Tableau 20 : Résultats des tests de Wilcoxon comparant les TF2 obtenus par plongée et ceux obtenus par les autres méthodes (Faciès «vase sur sable»).</i>	60
<i>Tableau 21 : Place des missions dans le contexte des forçages environnementaux (houle et crue de la Seine).</i>	65
<i>Tableau 22 : Paramètres Crue et Houle caractéristiques des missions analysées.</i>	66
<i>Tableau 23 : Nombre et pourcentage d'échantillons de sédiments colonisés par les ophiures en fonction du taux de fraction fine.</i>	75

Introduction

Depuis sa création, le groupe de recherche GEOCEANO du cnam/intechmer étudie les environnements marins en mettant en œuvre une démarche d'assurance qualité pour toutes les étapes de l'étude entreprise (Méar, 2004). Cette démarche garantit une meilleure fiabilité des études, analyses et essais qui lui sont confiés et devrait permettre une bonne reconnaissance des activités réalisées tant du point de vue scientifique que technique auprès des différents chercheurs, institutions, grands organismes et industriels.

Dans le cadre du programme COLMATAGE, mené sous la direction du Pr Jean-Claude Dauvin (Programme Seine Aval IV), le travail qui a été confié à GEOCEANO a été de participer au **recensement des données** sédimentologiques **existantes sur le territoire de la partie orientale de la baie de Seine** et d'optimiser l'utilisation de la base de données ainsi créée afin d'aider à sa valorisation dans la description des évolutions spatio-temporelles de la couverture sédimentaire et des habitats et peuplements benthiques au cours des trente dernières années. A terme, l'objectif est de proposer une stratégie d'observation de cette partie orientale de la baie de Seine pour les 2 à 3 prochaines décennies.

Pour optimiser l'utilisation de la base **de données sédimentologiques mise en place**, plusieurs questions doivent trouver une réponse :

- Quelle est la part de la variation spatiale lors des comparaisons de données portant sur des échantillons censés avoir été prélevés sur le même site ?
- Les échantillons de sédiments prélevés au moyen de différentes techniques de prélèvement sont-ils comparables ?
- Quelle est l'influence de certains traitements subis par les échantillons au cours de la chaîne analytique ?
- Qu'en est-il des résultats granulométriques obtenus ?

Pour répondre à ces questions, il faut choisir un paramètre analytique qui soit parmi les plus utilisés dans l'étude des environnements. C'est le Taux de Fraction Fine du sédiment (ici appelé TF²) qui a servi de fil conducteur à cette étude.

La base de données sédimentologiques

Le programme COLMATAGE a été l'occasion de la mise en place d'une base de données sédimentologiques regroupant les informations des différents laboratoires participant au projet. La mise en place de cette base de données obéit à plusieurs objectifs :

- rassembler les informations dispersées,
- uniformiser leur présentation,
- améliorer leur disponibilité,
- permettre leur pérennisation,
- vérifier et caler des modèles numériques.

La bancarisation numérique de données réclame à ce qu'une réflexion soit menée pour définir le type et la nature de l'information qui va être stockée. Cette étape de la création d'une base de données numérique est qualifiée de structuration des données, et est guidée principalement par deux contraintes antinomiques 1) que le maximum d'informations puisse être stockées 2) que l'ensemble des informations enregistrées soient les plus « légères » possible en terme d'espace de stockage (minimum d'espace).

Lors de notre précédente participation au Pnec « Baie de Seine », nous avons mis en place une base de données sédimentologiques permettant de regrouper les différentes informations acquises par notre groupe de recherche sur la baie de Seine. Avec cette première mouture, nous avons souhaité être exhaustif autant que cela était possible pour la conservation de l'information à la fois de terrain et celle issue des analyses. L'utilisation pratique de cet outil et la confrontation avec les données sédimentologiques des groupes de recherche partenaires a montré qu'un volume non négligeable d'informations n'était pas toujours disponible.

La masse de données sans cesse croissante nous a amené à proposer une refonte de la BDD existante. Les multiples intérêts portés à cet outil de gestion par les partenaires du programme Colmatage, nous a permis de réaliser cette évolution en tenant compte d'avis divers et variés aussi bien en tant que fournisseurs de données que d'utilisateurs. Les améliorations que nous y avons apportées ont eu comme objectifs :

- de permettre une plus grande simplicité de la saisie des données en limitant le nombre de champs à remplir, tout en conservant le maximum d'informations utiles,
- de structurer les bases de données de façon à ce qu'elle puisse se connecter à d'autres bases de données (par exemple MABES) et

que l'ajout d'informations supplémentaires soit possible,

- d'intégrer la dimension spatiale en permettant une visualisation de l'information au travers d'outils SIG.

Nous avons donc mené un nouveau travail de structuration de l'information pour intégrer à la fois l'expérience de la première version de la base de données et les nouvelles contraintes technologiques et techniques. Les améliorations se sont basées sur la mise en œuvre des outils SIG libre et le suivi des spécifications OpenGIS. Ces choix permettent de s'affranchir de l'acquisition de licence de logiciels dédiés parfois coûteux. Il est ainsi laissé toute liberté à chaque composante du projet d'utiliser ses propres outils tout en gardant une accessibilité maximum aux données, sans contraintes sur les formats d'échanges de données.

La mise en commun de données sédimentaires provenant de divers laboratoires, acquises et traitées de manière différente, réclame à ce que parmi les données stockées, soient conservées celles qui permettent de signifier ces différences. La base de données constitue, par essence, un rassemblement de données disparates en dépit de l'uniformisation de leur format. En effet, les techniques de prélèvements utilisées, les méthodes de conservation des échantillons, les techniques d'analyses, etc., sont autant d'informations qualifiées de « meta-données », qui permettront d'exploiter au mieux les données granulométriques, données centrales d'une base de données sédimentaires. Il convient donc de garder la trace de cette diversité de provenance des données, afin de prendre en compte les spécificités au moment de leur exploitation.

La base de données **SEDIGEST** est constituée de huit tables relationnelles (Fig. 1), qui ont été définies en rassemblant les données relatives à :

- la campagne de prélèvements sur le terrain,
- le point géographique où a été effectué le prélèvement,
- le ou les échantillons conservés au point d'échantillonnage,
- la granulométrie des sédiments de chaque échantillon,
- le protocole d'analyse granulométrique mis en œuvre,
- la technique de prélèvement utilisée.



Figure 1 : Structure de la base de données SEDIGEST.

Les relations définies entre les tables de la base de données relationnelles permettent de stocker à la fois les données d'un unique échantillon en un point de l'espace géographique, mais aussi les données de plusieurs échantillons au même point, comme cela est nécessaire dans le cas d'un carottage par exemple.

Ce sont 25 missions (entre 1985 et 2012) qui ont été recensées par GEOCEANO (Tab. 1) et les données granulométriques obtenues sur les échantillons prélevés (plus de 1100) au cours de ces missions ont été saisies dans la base de données SEDIGEST.

Pour l'ensemble des missions répertoriées dans le tableau 1, l'offset (la distance) séparant l'antenne de radiopositionnement de l'axe vertical du système de prélèvement est prise en compte. Ce n'est pas le cas général pour les missions réalisées par les scientifiques quelle que soit leur spécialité. A titre d'exemple, en fonction des navires utilisés, l'offset longitudinal peut atteindre plus d'une vingtaine de mètres et donc être d'un ordre supérieur à la précision du système de radionavigation.

Au cours des campagnes de prélèvement menées en baie de Seine, plusieurs systèmes de radio-positionnement ont été mis en œuvre en fonction de l'équipement des navires utilisés et de l'évolution des techniques de radio-positionnement. Le tableau 7 présente, pour chacune des techniques mises en œuvre, la précision moyenne, en mètre, du positionnement des échantillons.

Les échantillons qui peuvent être pris en considération pour étudier la

variabilité spatio-temporelle des sédiments fins en baie de Seine, doivent avoir été positionnés avec des systèmes de précision identique. Pour notre étude, les échantillons positionnés au moyen d'un DECCA ne peuvent donc pas être pris en compte. La précision des autres systèmes de radio-positionnement est de l'ordre de la centaine de mètres (Toran, GPS SA et naturel) ou de la dizaine de mètres (SYLEDIS, DGPS). La précision s'améliorant sans cesse avec les GPS différentiels, les GPS cinématiques (RTK) et le futur système européen GALILEO, nous avons donc, dans un premier temps étudié la variabilité géographique à l'échelle métrique et dans un deuxième temps à l'échelle de la centaine de mètres.

Mission	Date
Biog_ophy 2	mai-1986
SUIVI1	juin-1986
Biog_ophy 1	sep-1986
SUIVI2	oct-1986
Biog_ophy 3	f_v-1987
Biog_ophy 4	avr-1987
Biog_ophy 5	nov-1987
SUIVI3	avr-1988
Biog_ophy 6	mai-1988
SUIVI4	oct-1988
SUIVI5	d_c-1988
PlancSeine 1	juin-1989
TPINT89	juin-1989
SUIVI6	nov-1989
Fluxmanche 2	juil-1991
Epsom 1	oct-1991
Benthoseine 98	sep-1998
Benthoseine 99-2	mai-1999
Vastedeba 1a	f_v-2000
Vastedeba 2	mai-2001
SUIVI7	juin-2001
BENSEI09	f_v-2009
COL9	avr-2009
COL10	mai-2010
BENSEI10	juin-2010

Tableau 1 : Missions réalisées en baie de Seine et dont les données granulométriques disponibles ont été intégrées dans la BDS1.

Notre groupe de recherche GEOCEANO ayant déjà fait l'effort de réflexion et réalisation pour ces propres besoins d'une base de donnée, ce travail a servi de base de réflexion pour la définition et création de la base de données du GIP Seine Aval, qui, à terme, doit regrouper l'ensemble des données sédimentologiques en baie de Seine de tous les laboratoires participant au programme COLMATAGE. De nombreuses discussions ont eu lieu au cours des séminaires mis en place dans le cadre du programme «colmatage» qui se sont déroulés en 2007 et 2008 dans les locaux du GIP Seine Aval à Rouen.

Dans une première étape, pour faciliter d'une part les premiers échanges et pour d'autre pouvoir avoir une idée des différences mais aussi similitudes entre les

informations des différentes laboratoires, un format texte de type tableau a été retenu.

En parallèle, l'analyse croisée du format de la base de donnée SEDIGEST et des premiers fichiers textes reçus des groupes de recherche, a permis de définir la structure de la base de données sédimentologiques du GIP Seine Aval.

Variabilité à différentes échelles spatiales

I. Introduction

L'accession à la connaissance de l'environnement d'un site nécessite une approche pluridisciplinaire. La plupart des études environnementales d'un site aquatique se basent sur des comparaisons de données obtenues en plusieurs sites appelés stations. Ces stations ont souvent été sélectionnées en fonction de leur accessibilité et de la proximité des zones sources des phénomènes mesurés. Pour mener à bien ces comparaisons, il est classique de considérer un des points de prélèvement comme une station de référence. La notion de station de référence est aussi retrouvée lors de l'étude des variations temporelles (fluctuations saisonnières et interannuelles ainsi que tendances à long terme) de la qualité de l'environnement aquatique et pour l'étude des fluctuations spatiales. Cette station de référence doit refléter au mieux les variations naturelles du milieu afin de permettre la réalisation de séries chronologiques longues et la comparaison avec les autres stations. Son choix doit permettre d'éviter les bouleversements notables du programme au cours de sa réalisation.

Le choix d'un site de référence est une démarche difficile. Dans une zone très urbanisée et industrialisée, entourée de voisins gros producteurs de perturbations environnementales, il n'existe pas de région représentant les caractéristiques d'une «station blanche» que ce soit par rapport aux forçages anthropiques ou par rapport aux forçages naturels. Il est clair que les résultats obtenus dépendent du choix de la station dite « de référence ». Cependant, aucune procédure formelle n'a encore été proposée pour aider à ce choix. Dans les études basées sur le compartiment benthique, Hily et al. (2008) recommandent de ne considérer que les points situés loin des différentes limites de communauté. Pour Brandvold et Mc Limore (1998), il est fondamental de considérer l'hétérogénéité spatiale à petite échelle lorsqu'on étudie des variations dues aux phénomènes étudiés. Ne négligeant pas cette variabilité spatiale à petite échelle de la station de référence, De Paz et al. (2008) recommandent d'utiliser le même protocole d'échantillonnage pour toutes les campagnes de prélèvements-réplicats. Comme les interactions entre les organismes benthiques et les sédiments qui constituent leur habitat induisent des variabilités à petite échelle spatiale et temporelle (Tolhurst et Chapman, 2005), Frontier (1983) propose de réaliser des réplicats.

Les difficultés inhérentes au choix de la station de référence pouvant être considérées comme trop importantes, une autre approche de l'étude de la qualité environnementale d'un site consiste à essayer de s'affranchir de cette notion de station de référence. Ainsi, un des principaux résultats des programmes les plus récents tels qu'OSPAR (2005) consiste en la nécessité de définir des critères qualitatifs et de les faire évoluer en fonction des résultats obtenus en différents sites. Des indices tels que le BC (Background Concentration), le BAC (Background Assessment Concentration) ou encore l'EAC (Environmental Assessment

Criteria) ont été définis (Giltrap, 2008). Cependant, la valorisation des bases de données constituées jusqu'à présent impose de ne pas considérer la notion de station de référence comme un «fait réglé».

Ainsi, il n'est pas rare de constater que dans certains programmes de monitoring, les prélèvements biologiques et d'eau font l'objet de répliqués et pas ceux de sédiments (Palma et al., 2000).

Il est reconnu que l'échantillonnage des sols et sédiments influence de manière significative la qualité globale des mesures des paramètres caractéristiques de l'environnement étudié (Ramsey, 1997 ; Crumbling et al., 2001 ; de Zorzi et al., 2002 ; Heydorn, 2004 ; Kurfürst et al., 2004 ; Taylor et al., 2005 ; Van der Perk et al., 2008). On peut donc considérer que le taux de fraction fine d'un sédiment dépend de l'échantillonnage. En 2005, de Zorzi et al. ont défini l'incertitude de l'échantillonnage comme la partie de l'incertitude totale de la mesure qui est attribuable à l'échantillonnage. Elle est donc différente des incertitudes résultantes des opérations liées à l'analyse elle-même.

Il est courant, pour minimiser certains types d'erreurs, de réaliser des répliqués dans les mêmes conditions opératoires. Les questions qui se posent alors deviennent : 1) Combien de répliqués ? 2) Qu'en est-il de la variabilité spatiale à l'échelle des répliqués ?

Les répliqués doivent permettre de fournir :

- des estimations fiables et statistiquement valides du paramètre mesuré pour un site ou un moment donné et/ou,
- d'éventuelles différences spatiales et/ou d'éventuelles différences temporelles entre les sites d'échantillonnages, afin d'éviter des conclusions qui pourraient être erronées.

Le travail réalisé sur la baie de Seine a cherché à mettre en évidence la variabilité géographique du taux de fraction fine à l'échelle du prélèvement et plus exactement à l'échelle de la précision du système de positionnement. Le chapitre suivant présente un bref rappel du niveau de précision proposé par les différents systèmes de positionnement mis en œuvre au cours des 20 dernières années. L'étude de la variabilité spatiale a été menée en fonction des résultats ainsi obtenus. Les deux sites étudiés nous ont permis d'aborder la précision d'un prélèvement d'échantillon réalisé sur des sites atteignables à pied (Qualidia) ou seulement par bateau (baie de Seine).

Dans le cas du programme «Colmatage», la base de données sédimentologiques mise en place intègre des données obtenues entre 1985 et 2010. Au cours de cette période de temps, les techniques de positionnement en mer ont largement évolué et permettent d'améliorer constamment la précision du prélèvement. Cette base de données rassemble aussi des prélèvements qui ont été réalisés en mettant le navire support à l'ancre. La précision du positionnement se trouve donc théoriquement encore meilleure.

Pour comparer des données géoréférencées que ce soit dans l'espace ou dans le temps, il est important de connaître la variabilité spatiale afin d'en tenir

compte dans les interprétations finales. La grande variabilité des techniques de positionnement utilisées et les objectifs très différents des différentes missions dont les données sont centralisées dans la base Colmatage, nous amène à étudier la variabilité géographique du taux de fraction fine à différentes échelles.

Ces actions sont les suivantes :

- Action 1 : 30 échantillons avec le bateau à l'ancre,
- Action 2 : 9 échantillons avec le bateau à l'ancre,
- Action 3 : 9 prélèvements avec le bateau en route, à l'échelle de la centaine de mètres.

Pour réaliser les prélèvements, nous avons considéré que le carottier Reinek est le système permettant d'obtenir des sédiments les moins perturbés possible et donc les plus significatifs en ce qui concerne leur taux de fraction fine du sédiment. Les zones de prélèvement ont été choisies en fonction : 1) de leur faciès sédimentaire caractéristique (vase, sables fins envasés, vase graveleuse), 2) de leur situation à l'abri de l'intense trafic qui affecte cette région de la baie de Seine orientale, 3) de leur homogénéité acoustique.

Préalablement aux prélèvements de sédiments, une couverture au sonar latéral (EGG 272 TD) a permis en effet de vérifier l'homogénéité de la zone étudiée et l'absence de traces de dragages et chalutages récents. Pour les prélèvements à l'ancre, les prélèvements ont été effectués le plus rapidement possible pendant la période où le courant est clairement unidirectionnel que ce soit en flot ou en jusant. La vérification de l'orientation du navire pendant les prélèvements est systématiquement réalisé à travers l'étude de la valeur du cap donné par le gyrocompas et non pas par celle donnée par le DGPS. En ce qui concerne les prélèvements réalisés dans des surfaces bien définies, l'utilisation de SIG couplé à un DGPS a permis une vérification en temps réel de la position relative du prélèvement.

II. Le positionnement géographique

L'incertitude d'un positionnement géographique peut être exprimée classiquement comme la probabilité que l'erreur de positionnement ne dépasse pas une certaine valeur. Cette probabilité correspond à la magnitude de l'écart-type si l'on considère une loi normale de distribution. Appliqué à un espace à 2 dimensions, les zones correspondantes à des erreurs équivalentes à 1σ , 2σ et 3σ sont des ellipses appelées «ellipses d'erreur», dont les axes sont respectivement les orientations est-ouest et nord-sud (Kielland et Tubman, 1994). Les plus grandes causes d'erreur (HDOP: Horizontal Dilution Of Precision, GDOP Geometric Dilution Of Precision, PDOP: Position Dilution Of Precision et VDOP: Vertical Dilution Of Precision) sont liées à la géométrie. Elles sont qualifiées d'erreur de dilution. En mer, les effets de masquage par des obstacles de grandes hauteurs sont négligeables. Par contre, l'inclinaison variable de l'antenne (en fonction de l'état de la mer) est une source d'erreur non négligeable.

En conclusion, il faut retenir qu'en fonction des conditions de mise en œuvre, la précision d'un GPS peut aisément être de 2 à 3 dizaines de mètres. Les erreurs peuvent être liées à un bruitage de la transmission, à des biais dans la mesure ou à des erreurs aléatoires.

Lors des missions de test effectuées en Baie de Seine, le positionnement du bateau a été suivi par un NR 103 de chez Sercel. Le NR 103 est un récepteur GPS différentiel à 10 canaux, qui reçoit les informations des satellites et les corrections d'une station différentielle placée à terre sur la bande UHF. L'afficheur de ce récepteur DGPS offre une note de qualité représentée par un chiffre dans le codage suivant :

- un chiffre (entre 0 et 10 pour un récepteur 10 canaux),
- une lettre (N pour Naturel ou D pour Différentiel),
- un deuxième chiffre (entre 0 et 9 pour la qualité).

Ainsi la note 8D9 correspond à 8 satellites accrochés, D au fonctionnement en mode différentiel et 9 à la note de qualité maximale.

La note de qualité est obtenue par une équation (non fournie par le constructeur) prenant en compte le DRMS et l'EMLP. Le DRMS correspond à «Distance Root Mean Square» qui est calculé en tenant compte des «bruits» et du GDOP. Le GDOP (Geometric Dilution Of Precision) est un paramètre de géométrie pure qui ne peut être affiché sur le récepteur. Une bonne qualité de positionnement est obtenue avec un $GDOP < 3$ quel que soit le mode utilisé. L'EMLP (Erreur Moyenne des Lignes de Position) est un paramètre d'exactitude qui peut être affiché sur récepteur. De manière très simplifiée, on peut considérer que le GDOP qualifie la précision et que l'EMLP qualifie la cohérence et, à priori, l'exactitude de la position. Attention, il est possible d'être précis et inexact. Ainsi le positionnement peut être très précis (grâce à un bon EMLP) mais inexact à cause d'une mauvaise géométrie (GDOP), tout en ayant une note de qualité correcte affichée.

En raison de toutes ces incertitudes, si l'on veut une position géographique précise et exacte, il est nécessaire lorsque la latitude et la longitude sont enregistrées, de tenir compte de la note de qualité. Cette valeur varie en fonction de l'appareillage mis en œuvre, elle varie de 9 dans le cas du NR 103. Dans le cas où cette note de qualité n'est pas maximale, il faut vérifier que le GDOP est inférieur à 3 et que l'EMLP soit inférieur à 1,5. Si $EMLP > 1,5$ alors il existe un biais (perturbation) qui peut être une anomalie sur un satellite. Il est alors nécessaire de le désélectionner. Si le $GDOP > 3$ alors l'EMLP doit être considéré comme peu fiable, il faut chercher une meilleure géométrie et donc tenter d'accrocher d'autres satellites.

Actuellement, tout navigateur équipé d'un récepteur GPS peut se positionner à 30 mètres dans près de 95 % des cas, au lieu de plus de 100 mètres avant le 1er mai 2000, date à laquelle les USA ont supprimé la dégradation volontaire de précision du GPS. Un GPS différentiel (DGPS) permet une précision accrue (5 à 10 mètres). Les erreurs de type aléatoire et les problèmes de géométrie ne sont cependant pas pris en compte par la balise différentielle.

Le GPS fournit normalement des positions dans le référentiel WGS84. Pour la publication des cartes marines de métropole, le SHOM avait adopté le système géodésique ED50 utilisable sur tout le continent européen. Des écarts entre les positions d'un même point dans des systèmes géodésiques différents existent, ils

peuvent atteindre plus de 150 m entre l'ED50 et le WGS dans le cas de la baie de Seine. Dans certains cas, les données de position des prélèvements ne sont pas accompagnées de l'information relative à la géodésie. C'est l'erreur la plus importante qui peut être faite.

La dernière approche consiste à comparer des jeux de données rassemblés au sein d'une base de données géoréférencées. Le principal problème de cette approche est que les données ainsi regroupées ont des origines très diverses, ont été acquises par des techniques différentes et sont positionnées dans l'espace avec des précisions très différentes (du mille marin au centimètre). De plus, la saisie des données sur papier et ensuite sur tableur s'accompagne d'un nombre d'erreurs important. Pour optimiser l'interprétation de telles bases de données hétérogènes et dont des enregistrements sont manifestement erronés, Manhiem et al. (1998) ont développé une procédure basée sur la méthodologie Qualité Contrôle/Qualité Analyse (Baker et Kravitz, 1992 ; USEPA, 1995). C'est en suivant cette procédure relativement longue et complexe mais cependant indispensable pour valider la base de données finale que nous avons pu, au final, intégrer plus de 95 % des données disponibles. Environ 2 % des données étaient entachées d'erreurs qui ont pu être corrigées et 3 % ont été rejetées car affectées de problèmes d'identification ou de positionnement géographiques insolubles.

Système de radiopositionnement	Précision en mètres
DECCA	50 à 800 le jour
Dégradation la nuit (x6 à x8)	
TORAN	20-50
SYLEDIS	5 à 100
GPS	30 à 100
DGPS	5 à 10

Tableau 2 : Précision théorique des systèmes de radiopositionnement mis en œuvre.

III. Les principaux faciès sédimentaires

La cartographie la plus utilisée par les différents chercheurs travaillant dans le secteur de la baie de Seine orientale reste encore la carte des sédiments superficiels de la Manche, classiquement appelée "carte de Larsonneur". Cette cartographie au 1:500 000 a été réalisée sous l'égide du Centre national pour l'exploitation des océans, avec la collaboration du Laboratoire central d'hydraulique de France (Maisons-Alfort) et le concours du Centre national de la recherche scientifique (R.C.P. 314 "Géologie de la Manche" et R.C.P. 378 "Benthos de la Manche"). Cette carte a été éditée par le BRGM en 1978.

La méthode de caractérisation des faciès sédimentaires représentés sur la carte a été mise au point par Larsonneur (1971) à partir de l'étude d'environ 12 000 échantillons. Les sédiments ont été classés en 48 catégories selon la granulométrie et la teneur en calcaire. Ils peuvent être regroupés en cinq grandes classes de dépôts: cailloutis, graviers, sables lithoclastiques (origine minérale), sables bioclastiques (origine biologique) et sédiments vaseux. Par ordre

d'importance, cette classification tient donc successivement en compte du pourcentage de lutite (fraction fine), de sable... Elle mélange des paramètres granulométriques descriptifs, des paramètres quantitatifs et la nature des matériaux qui constituent le sédiment. Pour Crevel (1983), cette classification met clairement en évidence les zones envasées puisqu'une teneur supérieure à 5 % en fraction fine suffit à déclarer le sédiment comme vaseux.

Si elle met bien en évidence la partie biogène des échantillons, cette classification ne permet cependant pas de visualiser le mélange de plusieurs populations de particules (sédiments multimodaux). Alors que les graviers et les cailloutis sont très différenciés, les mélanges tels que l'association de sables et de graviers, de sables et de vase, sont très peu représentés. Les coupures apparaissent donc assez arbitraires et les distinctions entre faciès sédimentaires plus ou moins empiriques. Pour tenir compte de ces deux dernières remarques, Crevel (1983) a fait appel aux techniques statistiques pour regrouper les échantillons en faciès caractéristiques et mieux les qualifier. L'analyse factorielle des correspondances (AFC) lui a permis de déterminer des faciès caractéristiques dont la classification s'appuie sur la taille moyenne des grains et le classement des populations de particules qui le constituent. Appliquée à un très grand nombre d'échantillons prélevés dans la totalité de la baie de Seine orientale, cette procédure statistique nous a permis de retrouver les faciès précédemment définis par Crevel (1983) mais aussi d'en identifier d'autres.

Au total, ce sont donc 9 faciès sédimentaires qui ont ainsi pu être caractérisés sur des critères granulométriques, chromatiques et géochimiques (Fig. 2).

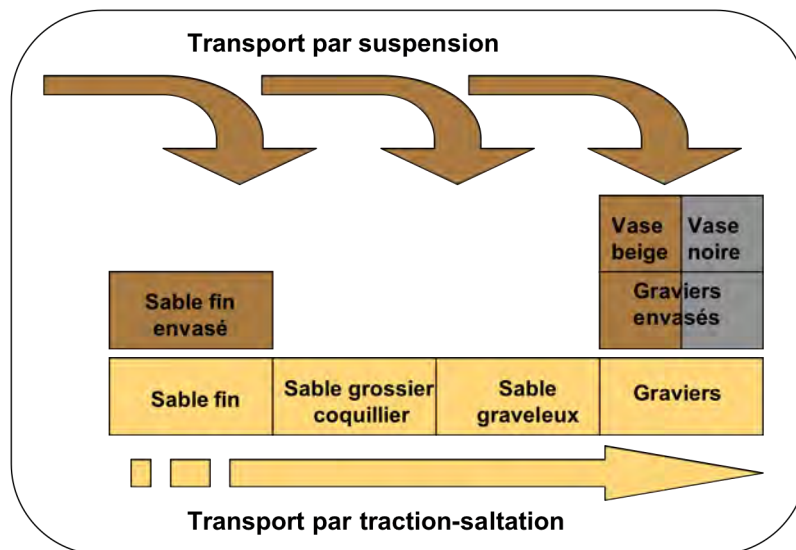


Figure 2 : Caractérisation des principaux faciès sédimentaires en baie de Seine orientale.

Les quatre premiers faciès se caractérisent par un pourcentage de fraction fine (en poids) inférieur à 5 %. Ils sont représentés sur la figure 2 en fonction de leur granulométrie croissante. Les sables fins constituent essentiellement de petites dunes plus ou moins isolées mais qui se marquent très bien dans la

morphologie. Le sable grossier constitue le stock principal des bancs et ridins tels que le banc de Seine et les ridins d'Antifer. Le sable graveleux constitue le substratum de la baie de Seine orientale. Il est actuellement reconnu dans la partie externe de la zone étudiée. Les graviers sont plus difficiles à cartographier. Comme le pourcentage des différentes fractions granulométriques a été déterminé par tamisage, c'est le poids de ces fractions qui a servi au calcul de leur pourcentage relatif. Il est apparu que, quelle que soit la technique de prélèvement étudiée, la présence d'un stock de graviers important ne permet pas un prélèvement significatif de la granulométrie réelle. Ainsi, dans certains cas, la fraction la plus fine (vase et sable) peut être sous représentée dans l'échantillon prélevé. Cependant, on peut noter que le faciès "Graviers" ne se retrouve qu'étroitement imbriqué dans le faciès "Sable graveleux". Cette imbrication suggère une filiation entre les 2 faciès.

Les 5 faciès suivants se caractérisent par un taux beaucoup plus important de fraction fine. Ici encore, le taux de fraction fine des différents faciès est difficile à estimer car il dépend fondamentalement du pourcentage de la population de graviers réellement prélevée. Il n'est cependant pas rare de mesurer des taux d'envasement voisin de 50 %. Les sables grossiers et les sables graveleux précédemment mis en évidence ne comportent pas d'équivalents envasés. On y retrouve donc que des sables fins envasés et des graviers envasés. Les sables fins envasés se retrouvent essentiellement au large de l'estuaire de la Seine et les graviers envasés sont observés au large du port d'Antifer où ils forment des « mud patches » (Méar et al., 2006). En fonction de la couleur des sédiments, nous avons distingué 2 sous faciès *i.e.* les « graviers envasés beiges » et les « graviers envasés noirs ». Les vases (> 50 % de fraction fine) ont été retrouvées à proximité immédiate de l'estuaire, dans la région la plus méridionale de la baie de Seine et à l'ouest du port d'Antifer. De couleur plutôt beige-marron (sédiment oxydé) ou de couleur noirâtre et très odorante (sédiment réduit), elles y forment, elles aussi, des « mud-patches ».

III. Variabilité du taux de fraction fine à différentes échelles spatiales

III.1 Action 1 : 30 échantillons avec le bateau à l'ancre

Le nombre de 30 échantillons a été déterminé en fonction 1) du nombre de prélèvements nécessaire pour une analyse statistique valide, 2) du rapport existant entre la durée des prélèvements et la possibilité de garder le navire support dans la même position (même cap) dans un contexte de marée macrotidale.

L'objectif de cette première action est d'étudier la variabilité spatiale à la plus petite échelle spatiale que l'ont puisse obtenir en réalisant des prélèvements de sédiments en mer.

Trois stations caractéristiques des principaux faciès sableux observés en baie de Seine orientale ont été investiguées (Tab. 3 et Fig. 3, 4).

Station	Faciès	X	Y
Station 30-1	Sable graveleux	49,75041	-0,36667
Station 30-2	Sable fin	49,66667	-0,11661
Station 30-3	Sable fin envasé	49,59274	0,07850

Tableau 3 : Position géographique des stations de type 30-x.

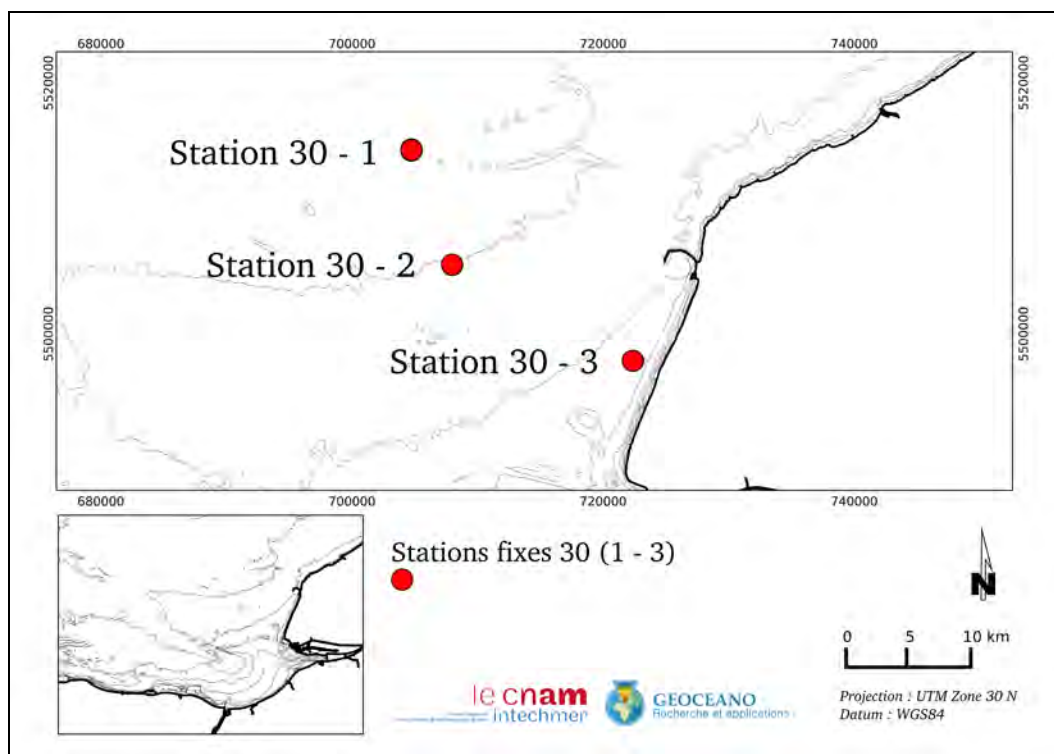


Figure 3 : Position géographique des stations 30-x.



Figure 4 : Photographie de sédiments caractéristiques des faciès étudiés pour l'action 30-x.

La figure 3 présente la position géographique des 3 sites investigués. La station trente-1 est caractéristique des sables graveleux à débris coquilliers. Le faciès constitue le substrat de la zone externe de la baie de Seine orientale. La station trente-2 caractérise un faciès de sable fin. Ce faciès ne forme pas de grandes étendues spatiales bien localisées. Ce sable constitue de petites dunes superposées au substratum de sables graveleux et mises en place par les courants de marée dans la zone externe. Le sable envasé prélevé au niveau de la station Trente-3 est un sédiment qui acoustiquement forme des épandages de grande superficie situés entre la zone externe et la bande côtière située au large du Pays de Caux. Contrairement aux deux sites précédents, cette zone est connue pour être soumise à de très nombreux forçages et donc présenter une forte variabilité spatiale et/ou temporelle.

Les trois stations sélectionnées permettent donc d'étudier la variabilité spatiale à très petite échelle :

- du substratum « grossier » et « hétérométrique » caractéristique de la zone externe de la baie de Seine orientale située en dehors des apports de la Seine,
- du sable fin mobilisé et transporté par les courants de marée,
- du sable envasé qui constitue une archive de l'interaction entre forçages anthropiques et naturels au large du Pays de Caux.

Pour chacune des 3 stations, les figures 5, 6 et 7 donnent respectivement la distribution spatiale des prélèvements réalisés. Le tableau 4 présente la dimension spatiale (longueur, largeur, surface) de la zone regroupant les points de prélèvement. Il apparaît immédiatement que malgré la précision théorique du DGPS, les 30 prélèvements ne sont pas réalisés au même point. Les 3 zones investiguées représentent toutes une superficie inférieure à un demi-hectare. Elles sont cohérentes entre elles et, compte tenu des conditions à la mer, semblent tout à fait acceptables. Une étude plus détaillée de la forme des nuages de points, permet cependant de montrer des différences notables entre ces 3 stations. La station 30-2 a la forme d'un rectangle quasiment parfait. Les prélèvements se répartissent aléatoirement dans ce rectangle. La Station 30-1 présente toujours la forme d'un rectangle, mais à l'intérieur de ce dernier les prélèvements ne sont pas équitablement répartis. Les premiers prélèvements sont tous groupés dans une zone centrale, puis un prélèvement est positionné 10 m plus au nord. Les 5 suivants qui sont aussi les 5 derniers de la série sont, quant à eux, positionnés plus au Sud. Ils y forment une nouvelle agglomération de points. La station 30-3, dans une moindre mesure, illustre aussi ce problème de dérive du point de positionnement avec le temps. Même si, pour cette station, la dérive n'est pas importante, elle existe bien. Dans ce nuage de points, les prélèvements se positionnent alternativement vers le Nord-Ouest et vers le Sud-Est avec un saut dimensionnel toujours plus important vers le Sud-Est. Ces évolutions sont dues à une mauvaise géométrie des satellites (GDOP : Geometric Dilution Of Precision) prise en compte dans le calcul des coordonnées géographiques.

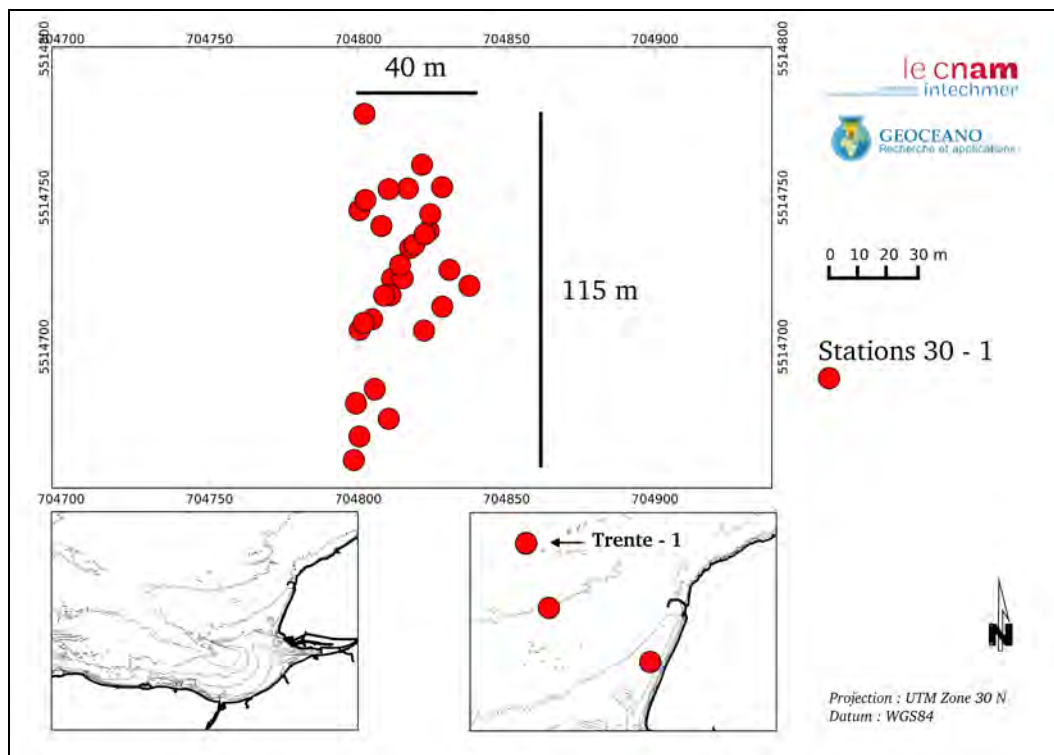


Figure 5 : Détail de la position géographique des échantillons prélevés sur la station 30-1.

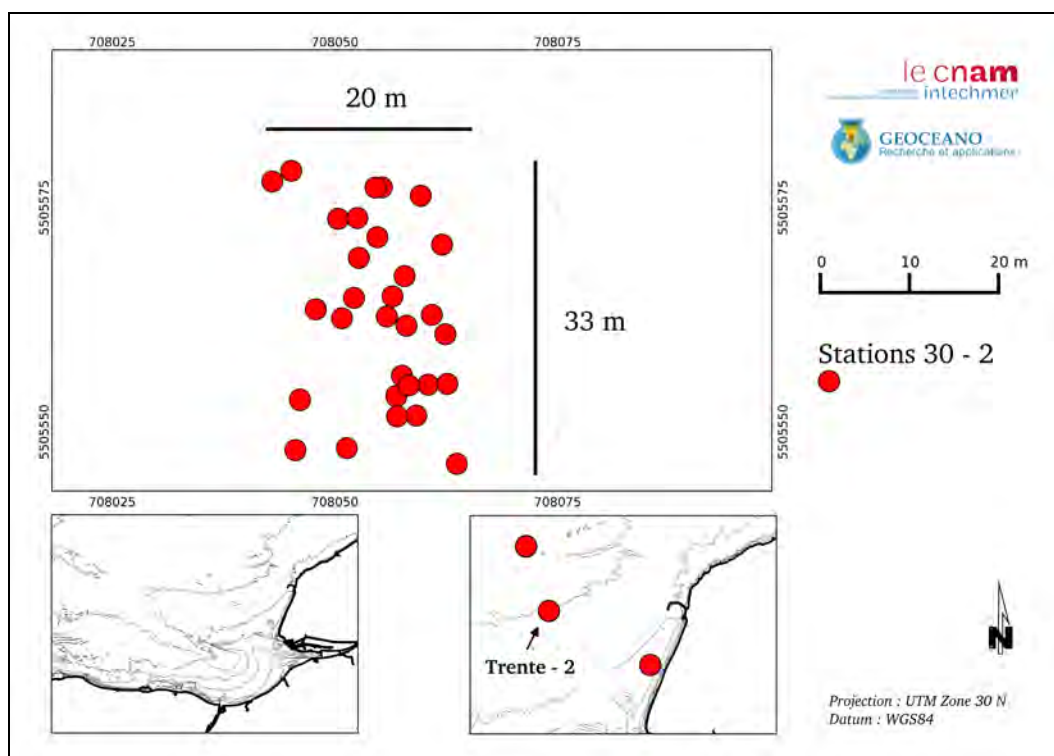


Figure 6 : Détail de la position géographique des échantillons prélevés sur la station 30-2.

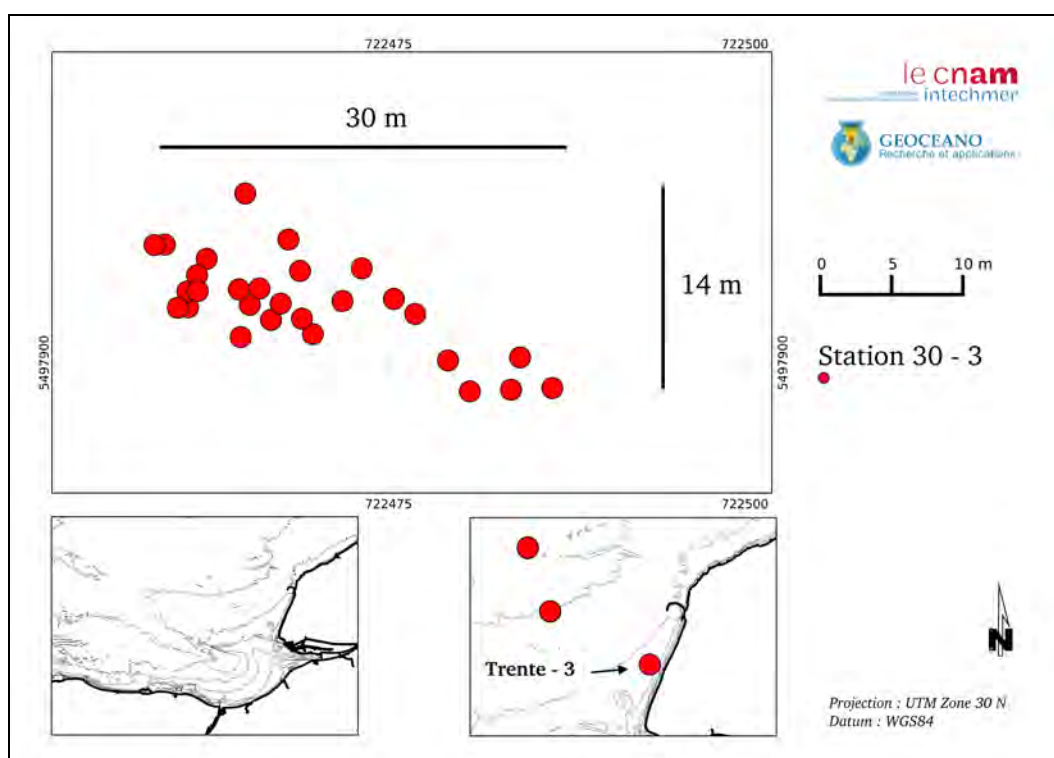


Figure 7 : Détail de la position géographique des échantillons prélevés sur la station 30-3.

Station	Dimensions (m)		Surface (m ²)
	X	Y	
Trente-1	40	115	4600
Trente-2	20	33	660
Trente-3	30	14	420

Tableau 4 : Dimension des zones de prélèvement pour les stations trente-x.

Station Trente-1

Le sédiment caractéristique de la station trente-1 est un sable graveleux qui présente une distribution granulométrique généralement trimodale. Le mode le plus fin (160-200 μm) est constitué par un sable fin terrigène essentiellement constitué par des grains de quartz. Le mode intermédiaire (630-800 μm) est constitué de débris coquilliers. Le mode le plus grossier est constitué par des graviers de taille supérieure à 2 mm. Dans quelques échantillons, des macro-débris coquilliers peuvent participer à ce mode grossier.

Les échantillons de la station trente-1, qu'ils soient considérés dans leur intégralité ou normalisés par le pourcentage de fraction graveleuse (> 2 mm) présentent une distribution statistique Normale (avec respectivement P-value = 0,13 et P-value = 0,69). Pour le sédiment brut, la moyenne s'établit à 3,2 % de fraction fine avec un écart-type de 1,7 % (Tab. 5). Le jeu de données traduit l'hétérogénéité de ce faciès. L'étude de la répartition granulométrique des

échantillons montre que cette hétérogénéité est en partie liée à la présence d'un stock graveleux plus ou moins présent. La détermination du taux de fraction fine se faisant par tamisage humide, c'est le poids de la fraction grossière qui est pesée pour déterminer ce pourcentage. Il apparaît qu'en fonction de la taille et donc du poids des graviers contenus dans le sédiment analysé, la valeur du taux de fraction fine peut varier drastiquement lorsqu'un seul gravier est rajouté ou enlevé au sédiment brut.

Pour tenir compte de l'incertitude engendrée par la présence des graviers (> 2 mm), une normalisation a été réalisée. La moyenne du taux de fraction fine fait plus que doubler en s'établissant à 7,9 % (Tab. 5). Le taux de fraction fine moyen est estimé par l'encadrement suivant [7,2 ; 8,6] au seuil de confiance de 95 %. L'écart type restant du même ordre de grandeur et, malgré des mécanismes de mise en place différents, la prise en compte ou non du stock graveleux n'affecte pas la précision de la mesure du taux de fraction fine.

La figure 8 montre qu'il n'existe aucune corrélation entre le taux de fraction fine globale et le taux de fraction fine calculé en ne prenant pas en compte la fraction graveleuse (> 2 mm). Cette dernière fraction agit donc comme un diluant de la fraction fine.

Station Trente-2

Le sédiment caractéristique de la station trente-2 est un sable fin unimodal (160-340 μm) dont la constitution minéralogique le rattache au mode intermédiaire du faciès précédent. Les échantillons de la station trente-2 sont constitués par du sable fin de couleur grise et constituent une population distribuée normalement (P-value = 0,36). Le taux de fraction fine moyen s'établit à 2,0 % et l'écart-type à 0,9 % (Tab. 6). L'encadrement est compris entre [1,7 ; 2,3].

Station Trente-3

Le sédiment caractéristique du troisième faciès est constitué par le mélange d'un sable fin (≈ 200 μm) et d'un mode argilo-silteux (16-32 μm) Les échantillons de la station trente-3 sont constitués par du sable fin de couleur grise envasé et constituent une population distribuée normalement (P-value = 0,85). Le taux de fraction fine moyen s'établit à 28,7 % et l'écart type à 5,3 % (Tab. 7). L'encadrement est compris entre [26,8 ; 30,6].

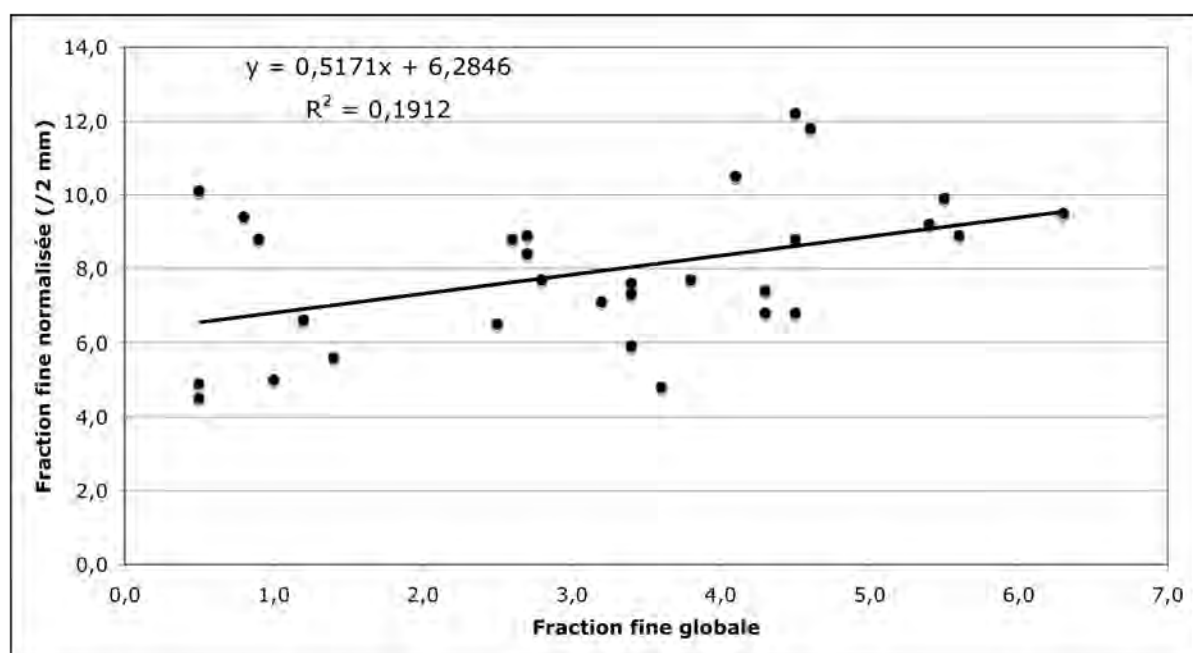


Figure 8 : Comparaison entre le taux de fraction fine global et le taux de fraction fine normalisé.

Numéro	X	Y	FF brute	FF normalisée
1TPINT89	49,75007	-0,36670	1,4	5,6
2TPINT89	49,75002	-0,36671	0,5	4,5
3TPINT89	49,75023	-0,36674	3,6	4,8
4TPINT89	49,74998	-0,36647	2,5	6,5
5TPINT89	49,74974	-0,36680	0,5	10,1
6TPINT89	49,75004	-0,36634	4,1	10,5
7TPINT89	49,75057	-0,36680	2,8	7,7
8TPINT89	49,74970	-0,36689	0,9	8,8
9TPINT89	49,74960	-0,36688	4,5	6,8
10TPINT89	49,75034	-0,36645	0,5	4,9
11TPINT89	49,75965	-0,36674	0,8	9,4
12TPINT89	49,74992	-0,36686	1,2	6,6
13TPINT89	49,75028	-0,36684	4,5	12,2
14TPINT89	49,75031	-0,36681	3,8	7,7
15TPINT89	49,75009	-0,36643	2,7	8,4
16TPINT89	49,74995	-0,36680	5,4	9,2
17TPINT89	49,74991	-0,36656	1,0	5,0
18TPINT89	49,75002	-0,36674	3,4	7,6
19TPINT89	49,75016	-0,36661	4,5	8,8
20TPINT89	49,75017	-0,36659	4,6	11,8
21TPINT89	49,75034	-0,36661	2,7	8,9
22TPINT89	49,75021	-0,36652	5,5	9,9
23TPINT89	49,75020	-0,36654	3,4	5,9
24TPINT89	49,74994	-0,36684	4,3	6,8
25TPINT89	49,74953	-0,36691	6,3	9,5
26TPINT89	49,75034	-0,36670	5,6	8,9
27TPINT89	49,75041	-0,36654	4,3	7,4
28TPINT89	49,75026	-0,36651	3,4	7,3
29TPINT89	49,75007	-0,36665	3,2	7,1
30TPINT89	49,75011	-0,36666	2,6	8,8
Moyenne			3,2	7,9
Ecart type			1,7	2,0
Coefficient de variation			0,5	0,3

Tableau 5 : Taux de fraction fine des échantillons trente-1

Sable fin				
Numéro	X	Y	FF brute	FF normalisée
31TPINT89	49,66667	-0,11667	1,2	1,2
32TPINT89	49,66652	-0,11650	2,3	2,3
33TPINT89	49,66681	-0,11677	0,8	0,8
34TPINT89	49,66667	-0,11653	1,5	1,5
35TPINT89	49,66657	-0,11656	1,2	1,2
36TPINT89	49,66659	-0,11659	2,1	2,1
37TPINT89	49,66661	-0,11658	2,2	2,2
38TPINT89	49,66665	-0,11651	1,3	1,3
39TPINT89	49,66660	-0,11654	1,7	1,7
40TPINT89	49,66657	-0,11659	2,2	2,2
41TPINT89	49,66660	-0,11651	1,7	1,7
42TPINT89	49,66673	-0,11664	2,3	2,3
43TPINT89	49,66677	-0,11667	0,6	0,6
44TPINT89	49,66654	-0,11675	3,6	3,6
45TPINT89	49,66659	-0,11674	3,0	3,0
46TPINT89	49,66668	-0,11671	3,4	3,4
47TPINT89	49,66680	-0,11660	1,4	1,4
48TPINT89	49,66669	-0,11654	0,6	0,6
49TPINT89	49,66674	-0,11651	1,0	1,0
50TPINT89	49,66671	-0,11657	3,3	3,3
51TPINT89	49,66669	-0,11659	2,4	2,4
52TPINT89	49,66660	-0,11657	0,7	0,7
53TPINT89	49,66667	-0,11660	2,7	2,7
54TPINT89	49,66666	-0,11657	3,1	3,1
55TPINT89	49,66654	-0,11667	1,8	1,8
56TPINT89	49,66669	-0,11665	1,5	1,5
57TPINT89	49,66675	-0,11661	2,4	2,4
58TPINT89	49,66677	-0,11664	3,1	3,1
59TPINT89	49,66680	-0,11661	2,4	2,4
60TPINT89	49,66682	-0,11674	3,8	3,8
Moyenne			2,0	
Ecart type			0,9	
Coefficient de variation			0,5	

Tableau 6 : Taux de fraction fine des échantillons trente-2.

Sable fin envasé				
Numéro	X	Y	FF brute	FF normalisée
obj01_01	49,59272	0,07852	36,1	36,1
obj01_02	49,59273	0,07851	35,3	35,3
obj01_03	49,59272	0,07845	23,6	23,6
obj01_04	49,59275	0,07845	28,4	28,4
obj01_05	49,59274	0,07846	34,7	34,7
obj01_06	49,59273	0,07848	31,0	31,0
obj01_07	49,59275	0,07845	27,8	27,8
obj01_08	49,59274	0,07840	19,7	19,7
obj01_09	49,59275	0,07840	23,7	23,7
obj01_10	49,59275	0,07847	28,5	28,5
obj01_11	49,59276	0,07851	31,6	31,6
obj01_12	49,59275	0,07841	25,8	25,8
obj01_13	49,59277	0,07842	27,5	27,5
obj01_14	49,59274	0,07849	28,1	28,1
obj01_15	49,59274	0,07855	29,4	29,4
obj01_16	49,59276	0,07841	27,6	27,6
obj01_17	49,59268	0,07875	24,7	24,7
obj01_18	49,59276	0,07857	31,4	31,4
obj01_19	49,59274	0,07839	31,8	31,8
obj01_20	49,59268	0,07867	37,4	37,4
obj01_21	49,59278	0,07838	23,9	23,9
obj01_22	49,59270	0,07872	32,7	32,7
obj01_23	49,59278	0,07850	18,5	18,5
obj01_24	49,59273	0,07862	19,2	19,2
obj01_25	49,59274	0,07860	27,0	27,0
obj01_26	49,59275	0,07841	29,4	29,4
obj01_27	49,59268	0,07871	23,6	23,6
obj01_28	49,59281	0,07846	30,1	30,1
obj01_29	49,59270	0,07865	34,5	34,5
obj01_30	49,59278	0,07837	39,1	39,1
Moyenne			28,7	
Ecart type			5,3	
Coefficient de variation			0,2	

Tableau 7 : Taux de fraction fine des échantillons trente-3.

Malgré leur homogénéité à grande et moyenne échelle, les faciès 1 et 2 apparaissent comme les plus variables à petite échelle. Pour la station trente-1, cette hétérogénéité spatiale est liée à une hétérogénéité à l'échelle de la population de particules. Le taux de fraction fine étant obtenu après un tamisage humide (mesure de la masse) la présence de quelques rares graviers ou macro débris coquilliers en plus ou en moins affecte cette détermination de manière importante. Pour la station trente-2, c'est l'hétérogénéité de l'unité sédimentaire qui est à l'origine de la variation du taux de fraction fine. La station trente-3 présente le meilleur résultat en ce qui concerne l'écart type des mesures. Cela peut sembler surprenant. En effet, le faciès sédimentaire étudié est très souvent colonisé par une faune benthique plus ou moins importante. Ces animaux sont responsables d'une intense bioturbation qui induit elle même une forte variabilité spatiale et/ou verticale dans la répartition de la fraction fine. Les sédiments caractéristiques de la station trente-3 ont été prélevés après une période de forte houle suivie par une période de vives eaux. La conjonction de ces deux forçages (houle et marée) est responsable de l'érosion du dépôt de dragage d'Octeville et d'un remaniement des sédiments de la bande côtière. Désolidarisé du dépôt de dragage, les sables fins, silts et vases sont redistribués vers le Nord-Est par le courant de marée (courant de jusant, dit de Verhaule).

Pour chacun des sites étudiés, l'application de la procédure statistique explicitée en annexe permet de définir :

- 1) Le nombre d'échantillons (n) à réaliser pour atteindre une précision donnée avec une certaine confiance (démarche réalisée à priori),
- 2) La précision obtenue en fonction du nombre d'échantillons prélevés (démarche à posteriori).

Dans notre étude, nous avons réalisé 30 échantillons (n=30). La précision obtenue sur la détermination du taux de fraction fine pour chaque site étudié est donnée par le tableau suivant.

Faciès	Précision (%) au seuil de confiance de 95%	Moyenne
Sable graveleux	0,6	3,2
Sable graveleux normalisé	0,7	7,9
Sable fin	0,3	2,0
Sable envasé	1,9	28,7

Tableau 8 : Précision (au seuil de confiance de 95%) obtenue pour les faciès sédimentaires étudiés.

Si on ne s'intéresse qu'aux valeurs numériques, il apparaît que pour le premier faciès composé de sables graveleux, la normalisation par rapport à la fraction graveleuse (> 2 mm) se traduit par une nette amélioration (d'un facteur 2 environ) de la précision. Si on considère une approche plus naturaliste, les résultats obtenus sont comparables et tous les deux satisfaisants. En effet la dynamique de la précision obtenue, dans les deux cas, est inférieure aux limites/coupures sédimentologiques utilisées classiquement pour les représentations cartographiques du taux de fraction fine. Les commentaires sont les mêmes pour le faciès « sables fins » qui, d'un point de vue de l'analyse numérique, présente la moins bonne précision de tous les faciès étudiés. Malgré cette relative imprécision, la faible teneur moyenne en fraction fine de ce faciès ne permet aucune ambiguïté sur sa classification/caractérisation. La détermination du taux de fraction fine du faciès « sable envasé » présente la meilleure précision de cette étude. Du point de vue numérique et du point de vue naturaliste, les résultats sont très satisfaisants.

L'approche statistique utilisée permet aussi de déterminer le nombre d'échantillons à prélever pour garantir une certaine précision. Cette approche s'intègre tout particulièrement dans les études basées sur le suivi temporel d'une station dite de référence. En effet, en fixant la précision recherchée, il est possible d'interpréter les variations mesurées de manière beaucoup plus fine et de déterminer le seuil à partir duquel on peut considérer les changements du taux de fraction fine comme étant significatifs.

La figure 9 présente une abaque, pour chacun des faciès sédimentaires étudiés, permettant de :

- 1) déterminer l'intervalle de confiance en fonction du nombre d'échantillons prélevés
- 2) déterminer le nombre d'échantillons (n) à faire pour obtenir une précision donnée.

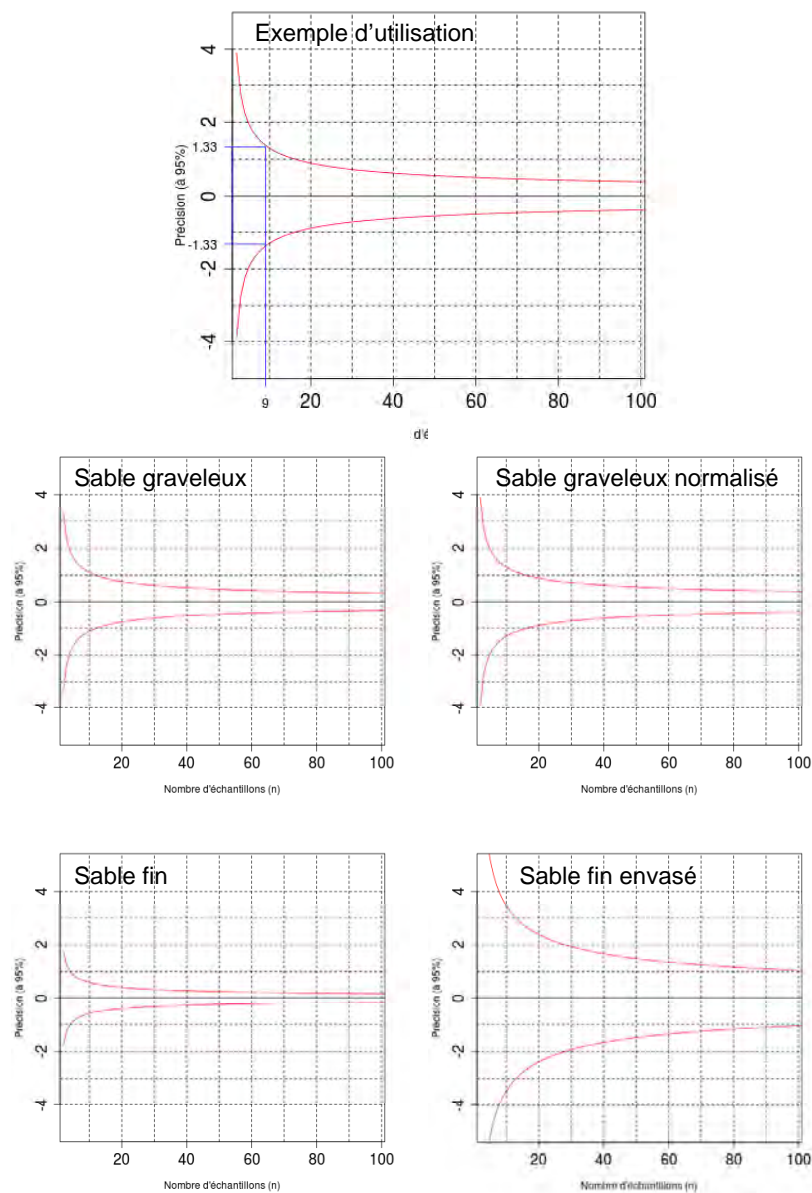


Figure 9 : Abaques nombre d'échantillons/précision (à 95 %) pour les différents faciès sédimentaires étudiés.

Un exemple est fourni permettant d'illustrer l'utilisation pratique de ces abaques. Ainsi, pour un écart-type de +/- 1,33 %, il faut prélever 9 échantillons. Inversement, le prélèvement de 9 échantillons autorise un écart-type de +/- 1,33 %.

III.2 Action 2 : 9 échantillons avec le bateau à l'ancre

Quel que soit l'objectif poursuivi, il est bien évident que de nombreuses contraintes (durée de la mission, météorologie, aspect financier...) ne permettent pas aux chercheurs de réaliser un aussi grand nombre de répliqués pour obtenir un résultat qui peut être considéré avec une grande confiance. Dans une deuxième étape, nous avons donc diminué le nombre d'échantillons à 9 pour chacune des stations investiguées. L'objectif de cette seconde action est toujours d'étudier la variabilité spatiale à la plus petite échelle spatiale que l'on puisse obtenir (navire à l'ancre) en réalisant des prélèvements de sédiment en mer. Par contre, le nombre d'échantillons prélevé rend compatible cette approche avec une étude environnementale qui se fixe comme objectif précis d'étudier une station de référence, station qui fait l'objet d'un suivi temporel à plus ou moins long terme.

Malgré toutes les précautions prises, des écarts de position du bateau qui peuvent aller jusqu'à 50 m ont été notés. Ces écarts ne peuvent être dus qu'aux mouvements du bateau autour de son ancre ou à des erreurs de position du système de radionavigation. A partir de la profondeur d'eau, de la longueur de la chaîne mouillée et de la variation du cap du navire ($\pm 5^\circ$), il est facile de calculer l'évitement du navire autour de son ancre. Pour toutes les stations investiguées, cet évitement a été trouvé inférieur à 7-8 m. Les positions relevées doivent donc logiquement se trouver sur un arc de cercle de longueur maximale inférieure à 10 m. Les écarts de position calculés à partir des coordonnées relevées lors des prélèvements allant jusqu'à 50 m, ces écarts ne sont donc pas liés au déplacement du bateau au mouillage mais plutôt à des imprécisions du système de radionavigation.

Pour les différentes zones investiguées, nous avons acquis des séries de données de radio-positionnement pour des durées de 2 heures avec une cadence d'acquisition d'une position géographique par seconde. La moyenne a été calculée pour ces 2 séries et le point ainsi obtenu est considéré comme le point de référence de la station (Fig. 10). Dans tous les cas, la note de qualité délivrée par le système de radio-positionnement indique que le système est en mode différentiel et que le nombre de satellites captés varie de 5 à 8 ce qui est un nombre de satellites tout à fait suffisants pour le calcul optimisé d'une position géographique.

L'analyse du jeu de données ainsi obtenu permet de souligner le fait que des points ayant la même notation de qualité peuvent se situer loin les uns des autres et loin du point théorique. La note de qualité du récepteur satellite ne semble donc être un paramètre sur lequel s'appuyer pour justifier la précision du positionnement du point d'échantillonnage.

Pour chacune des stations investiguées, nous avons calculé la moyenne et l'écart type sans biais du taux de fraction fine, défini suivant l'expression :

$$\hat{\sigma}_{TF2} = \sqrt{\frac{n}{n-1} \cdot \sigma_{TF2}^2}$$

Un encadrement (à 95% de chance) de la valeur réelle du TF^2 a aussi été calculé. Un TF^2 calculé sur un prélèvement réalisé dans la zone étudiée a 95% de chance de se situer entre les 2 bornes de cet encadrement. Pour ce calcul, nous avons utilisé l'expression suivante :

$$\bar{M}_{TF^2} \pm t_{\alpha} \cdot \left(\frac{\hat{\sigma}_{TF^2}}{\sqrt{n}} \right)$$

avec $n = 9$, le nombre d'échantillons étudiés. Comme n est inférieur à 10, c'est le t_{α} de la loi de Student qui a été pris en compte ($t_{\alpha} = 2,306$).

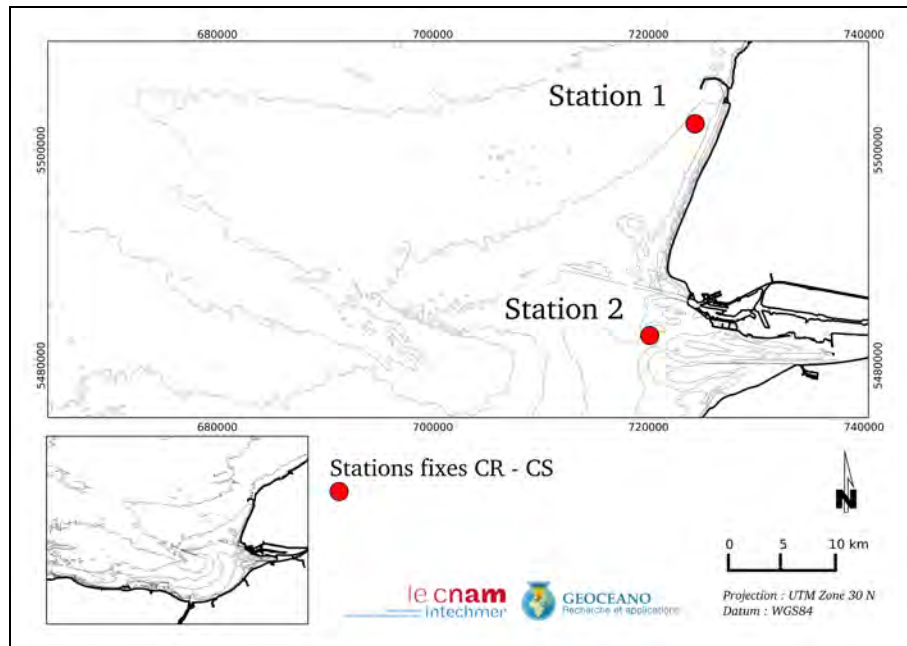


Figure 10 : Position géographique des stations 1 et 2 prises en compte pour l'étude de la variabilité métrique.

La station 1 est située à proximité immédiate de la station trente-3 qui vient d'être étudiée (Fig. 10). Elle est aussi caractéristique du même faciès sédimentaire (Fig. 11) et acoustique (sonar latéral). On considère donc que le jeu de 30 données obtenues sur la station trente-3 nous permet de bien connaître le taux de fraction fine de ce faciès. Ces résultats sont donc utilisés comme des résultats de référence. La comparaison des échantillons prélevés à la station 1 avec ceux caractéristiques de la station trente-3 située à proximité peut se faire grâce à l'application d'un test t de Student. Le résultat du test ($P\text{-value} = 0,34$) indique que nous ne pouvons conclure à une différence significative entre les 2 jeux de données au risque d'erreur de 5 %.

Pour le faciès sédimentaire étudié, prendre en considération un jeu de données obtenu par 30 prélèvements n'apporte pas plus de précision quant à la variabilité spatiale que la prise en compte d'un jeu de 9 prélèvements. Pour obtenir ce résultat, il aurait aussi été possible d'analyser le jeu de données Trente-3 suivant une approche itérative de type Monte Carlo. Cependant, nous avons préféré nous placer dans des conditions plus réalistes d'étude de la variabilité temporelle avec la ré-occupation d'une station de monitoring prédéfinie.

La station 2 a été prélevée à proximité immédiate de l'estuaire de la Seine (Fig.

10). Le choix de cette station a été guidé par la nécessité d'y installer une station de référence destinée à permettre l'étude de la variabilité mensuelle de la sédimentation dans cette zone hydrodynamiquement très active. Le sédiment est constitué par un liséré millimétrique de vase oxydée surmontant une masse grise riche en eau et très mobile (Fig. 11). Cette station ne présente pas une grande variabilité du taux de fraction fine avec une moyenne de 73,8%, un maximum de 76,1% et un minimum de 70,1% (Tab. 9).

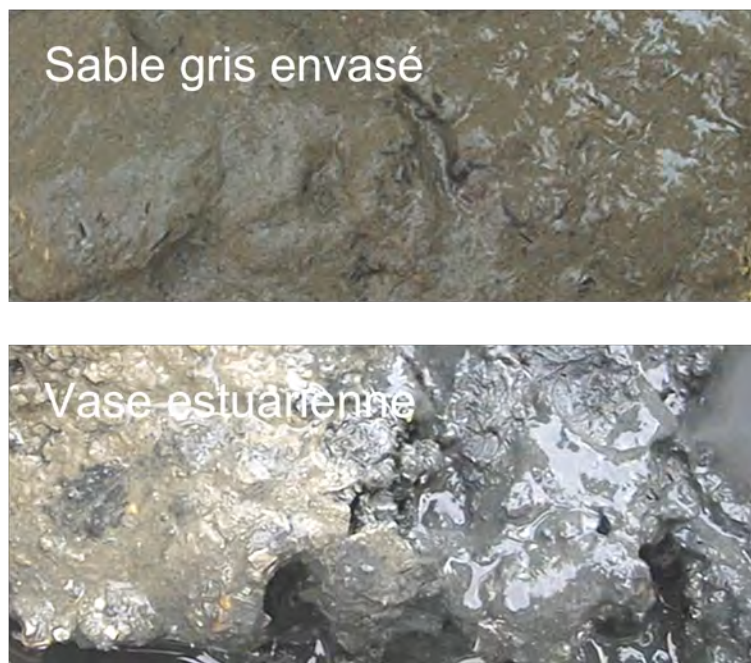


Figure 11 : Photographie de sédiments caractéristiques des faciès étudiés pour l'action « 9 réplcats ». station 1 : sable gris envasé ; station 2 : vase estuarienne.

Echantillon	Station 1 Sable gris envasé (large d'Antifer)	Station 2 Vase estuarienne (Rade de la Carosse)
1	28,1	70,2
2	26,7	72,1
3	28,4	74,8
4	29,4	75,7
5	20,3	73,3
6	26,7	75,0
7	24,1	72,7
8	30,0	73,9
9	31,8	76,1
Moyenne	27,3	73,8
Ecart type	3,4	1,9
Coefficient de variation	0,13	0,03

Tableau 9 : Taux de fraction fine pour les stations « 9 réplcats ».

III.3 Action 3 : Prélèvements avec le bateau en route, à l'échelle de la centaine de mètres.

Dans une dernière étape, nous avons choisi d'investiguer la variation spatiale à l'échelle de la centaine de mètres. Cette échelle correspond 1) à la précision obtenue par un GPS non différentiel dans la zone étudiée, 2) à la précision relative d'un prélèvement effectué dans des conditions de mission réalistes (courant vent, système de positionnement, qualité du navigateur, trafic maritime, offsets du navire...) en baie de Seine orientale. Pour cela, nous avons choisi de prélever 9 échantillons dans les mêmes conditions que celles qui ont présidé à l'objectif 2. Pour mieux analyser la variabilité géographique à l'échelle de la baie de Seine, nous avons placée 8 zones géographiques (Fig. 22) caractéristiques des principaux faciès reconnus dans la zone d'étude. Sur chacune de ces zones, une zone carrée de 100 m de côté (1 ha) a été déterminée par un logiciel de navigation. La seule consigne donnée au responsable de la navigation était que le prélèvement devait être réalisé dans la zone ainsi délimitée. La comparaison de la variabilité « métrique » obtenue par SYLEDIS ou DGPS et hectométrique (GPS) est ainsi rendue possible. Les figures 13 et 14 donnent les distributions spatiales des prélèvements réalisés dans chacune des zones délimitées.

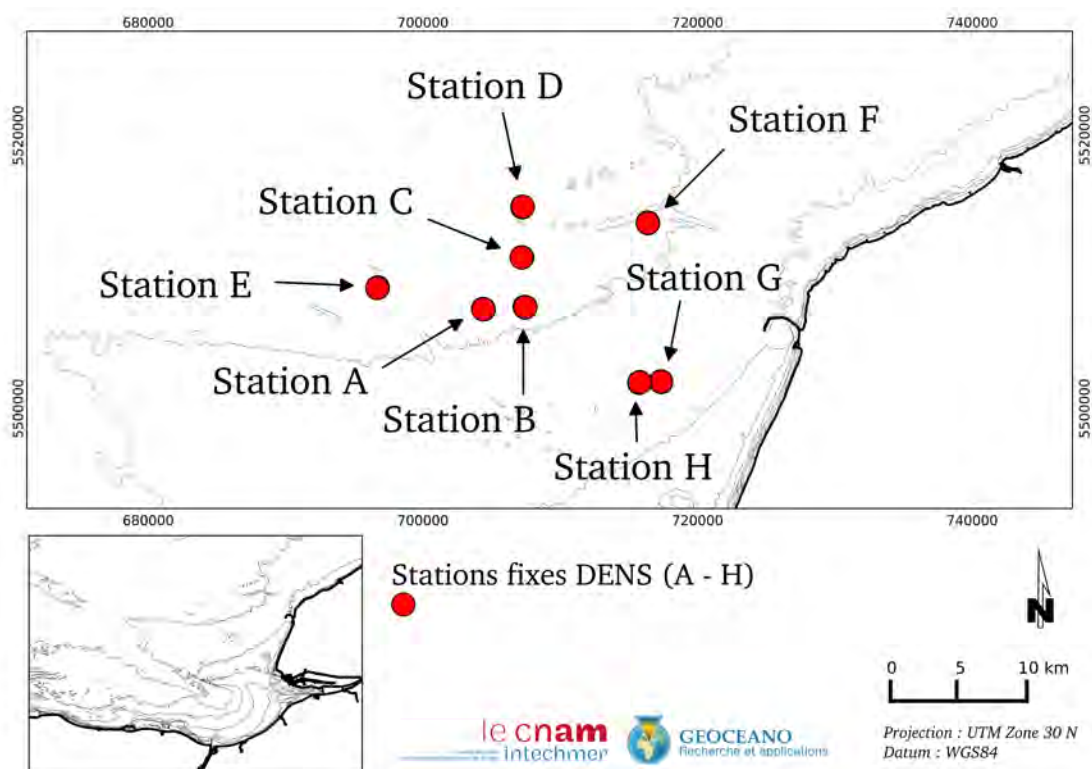


Figure 12 : Position géographique des stations prises en compte pour l'étude de la variabilité hectométrique.

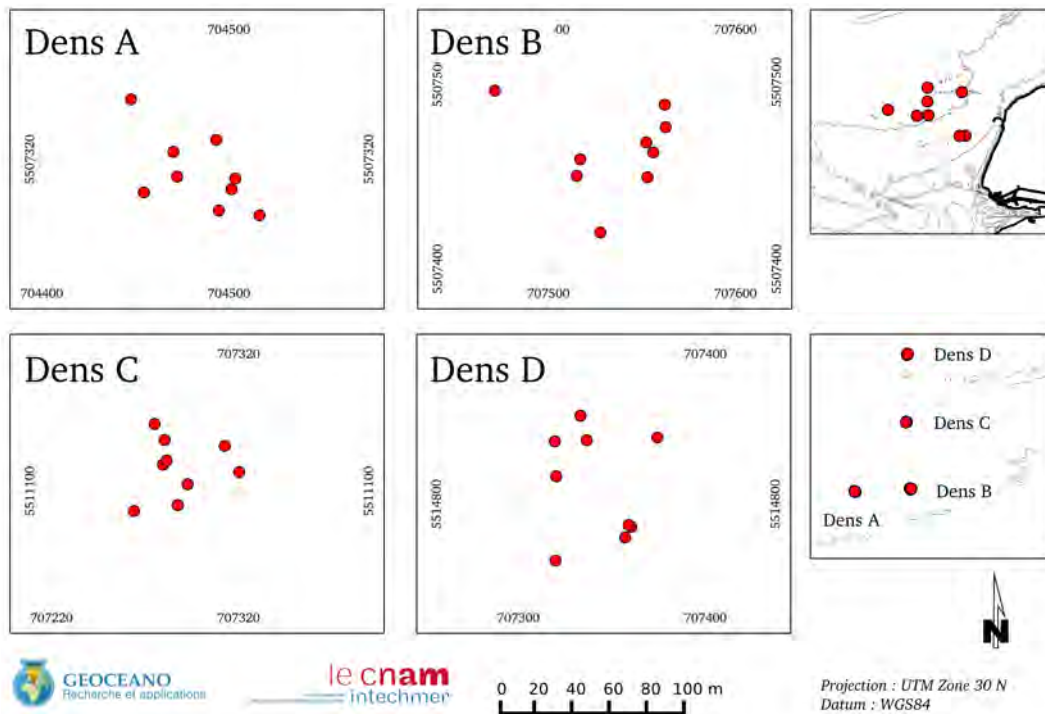


Figure 13 : Position géographique des stations A à D utilisées pour l'étude de la variabilité spatiale à l'échelle de la centaine de mètres.

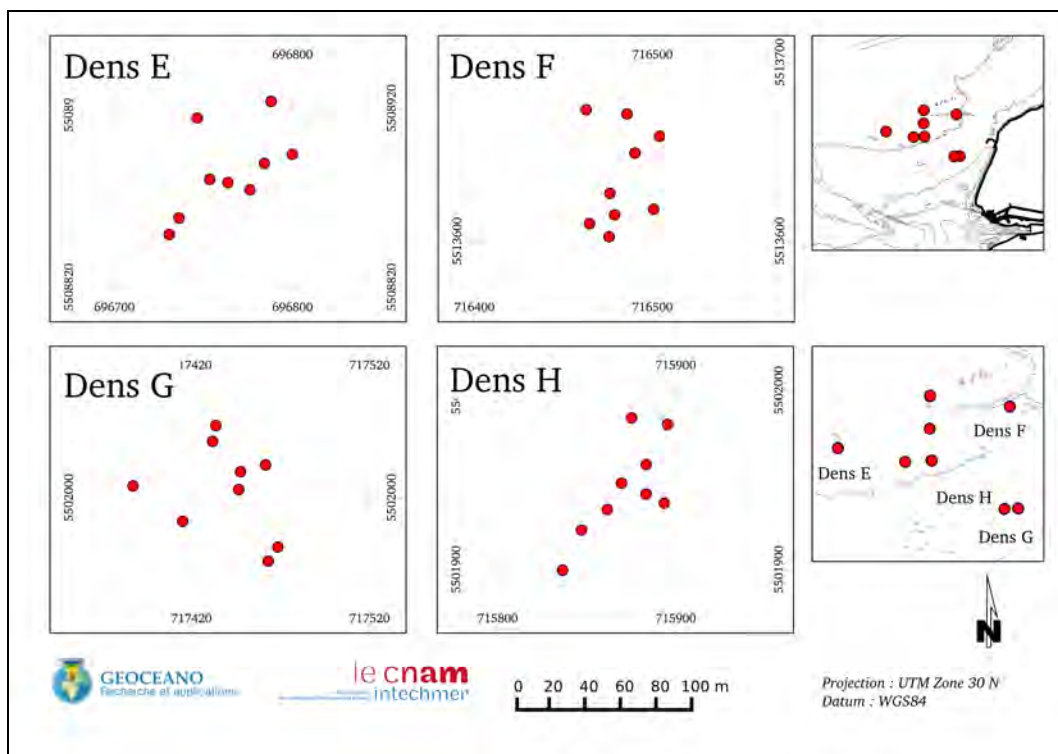


Figure 14 : Position géographique des stations E à H utilisées pour l'étude de la variabilité spatiale à l'échelle de la centaine de mètres.

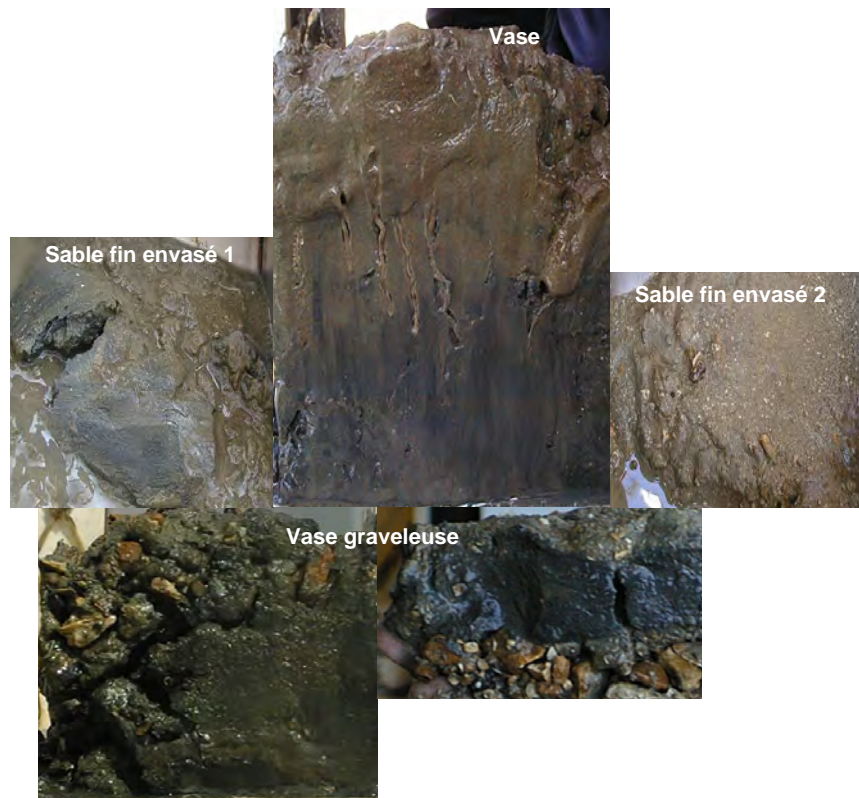


Figure 15 : Illustration des principaux faciès étudiés pour la mise en évidence de la variabilité géographique (sables fins envasés, vase beige, vase graveleuse à graviers envasés) à l'échelle de la centaine de mètres.

Sables fins envasés. Les sédiments prélevés aux stations A et B font partie du faciès que nous avons précédemment défini comme du « sable envasé » (TF^2 moyen de 25 %). Le faciès sédimentologique reconnu à la station A est constitué par un sable envasé de couleur noire présentant un liseré (millimétrique) d'oxydation en surface (Fig. 15). Le faciès sédimentologique prélevé à la station B est constitué par 1,5 cm de sable envasé gris-beige surmontant du sable fin légèrement envasé de même couleur. La moyenne granulométrique de ces 2 ensembles de sédiments varie peu, entre 160 et 250 μm . Pour quelques échantillons, des débris coquilliers forment un mode secondaire peu développé entre 630 μm et 1 mm. Pour les 2 stations A et B, caractéristiques des sables fins envasés, l'écart type (6,1 ; 6,9) est semblable. La station G est elle aussi caractéristique du faciès de sable envasé. Le sable se distingue cependant de celui des stations A et B par sa granulométrie strictement bimodale. Le sable fin est constitué par un mode se situant vers 125 μm et la fraction fine est retrouvée dans un second mode, bien distinct du premier, et inférieur à 40 μm . L'étude morphologique de la zone de prélèvement situe cette station à proximité d'une dune de sable qui serait le résultat des intenses courants de marée qui balaient la région.

Vase sableuse. La station C est représentative du faciès « vase » (Fig. 15). Le sédiment est granulométriquement homogène sur toute la hauteur du prélèvement (> 10 cm) mais présente un gradient de couleur très diffus passant du beige clair en surface vers un gris de plus en plus soutenu avec l'augmentation de la profondeur. Les sédiments prélevés à la station C ont un TF^2 moyen d'environ 57 %. Pour cette station, l'écart type atteint une valeur de 6,3 %. Les stations F et H sont elles aussi

caractéristiques du faciès vase sableuse. Les taux de fraction fine y sont quasiment identiques (51,3 et 52,3), les écarts types, les valeurs maximales et minimales y sont aussi du même ordre de grandeur. Les vases sableuses des stations F et H se distinguent cependant des vases reconnues sur la station C par une stratigraphie différente. Pour F et H, le sommet du sédiment est constitué par une vase beige, très liquide et mobile, sur une épaisseur millimétrique. Le passage vers les vases grises à noires se fait sans progressivité, laissant penser à une érosion. La plus forte cohésion des sédiments gris à noirs traduit elle aussi le fait que l'érosion d'une épaisseur pluri-centrimétrique des vases a du intervenir peu de temps avant le prélèvement.

Vase graveleuse. La station D a été choisie pour représenter les sédiments de type vase graveleuse à graviers envasés (Fig. 15). Le choix de cette station a été très difficile car la prospection au sonar a souligné l'extrême hétérogénéité spatiale du coefficient de rétrodiffusion et donc, dans une première approche, de la nature du sédiment. De plus, la présence d'éléments de la taille des graviers a rendu difficile le prélèvement d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Le stock de débris coquilliers, surtout présent dans la fraction la plus grossière du sédiment, peut être en proportion assez variable rendant le sédiment encore plus hétérogène. Les sédiments prélevés au niveau de la station D sont hétérométriques, formé d'un mélange de vase, de sable et de graviers. Le TF^2 moyen est d'environ 39 %. L'écart type est très largement supérieur à celui des échantillons précédents puisque voisin de 12 %. L'analyse du jeu de données souligne une très forte variabilité du TF^2 (min = 21,6 % ; max = 56,7 % et moyenne = 38,6 %). D'un point de vue granulométrique, on peut penser que la nette augmentation de l'écart type est liée à la présence d'un stock de graviers plus ou moins important. La mesure du TF^2 étant réalisée par tamisage, c'est le poids de la fraction inférieure à 50 μm qui est pris en compte. Dans ce cadre, la présence d'un seul gravier en plus ou en moins dans l'échantillon conduit à une très forte variabilité. Pour tester cette hypothèse, nous avons normalisé les données en éliminant la fraction supérieure à 2 mm. Le nouveau jeu de données est appelé station D' dans le tableau 10. La moyenne d'envasement est significativement supérieure (78 %). Parallèlement, l'écart type chute de 12,0 % à 5,8 %. La valeur de l'écart type se rapproche alors de celles calculées pour la vase et les sables envasés.

Sable graveleux. La station E a été choisie très au large pour être, théoriquement, à l'abri des apports fluviaux et donc pauvre en sédiments fins (Fig. 15). En effet, le taux de fraction fine y est inférieur à 5 % sans cependant que l'on soit réellement sûr de cette valeur à cause de la difficulté à prélever ce faciès graveleux. Celui-ci est principalement constitué de graviers et de macro débris coquilliers (souvent des valves entières de lamellibranches). Lorsque le volume de sédiment le permet, il est possible de montrer que le faciès caractéristique de la zone étudiée contient bien du sable en proportion notable. Il s'agit alors essentiellement d'un sable coquillier (sable grossier à très grossier) accompagné d'une plus faible fraction de sable moyens. La couleur uniquement ocre des sédiments traduit une forte oxygénation des fonds et donc une intense dynamique. Cependant la présence d'encroûtements (bryozoaires, serpulidés) sur les graviers et galets laisserait penser que ces éléments de grande taille sont relativement immobiles.

Station	Faciès sédimentaire	Numéro	TF2	Statistiques	Station	Types sédiment.	Numéro	TF2	Statistiques
A	Sable fin envasé 1	ACR1	22,5	Moyenne 25,3	E	Sable graveleux	ECR1	3,4	Moyenne 3,0
	Sable fin envasé 1	ACR2	32,1	Ecart-type 6,1		Sable graveleux	ECR2	5,2	Ecart-type 1,2
	Sable fin envasé 1	ACR3	19,5	Maximum 33,1		Sable graveleux	ECR3	2,6	Maximum 5,2
	Sable fin envasé 1	ACR4	29,5	Minimum 18,6		Sable graveleux	ECR4	1,9	Minimum 1,8
	Sable fin envasé 1	ACR5	31,3	Encadrement 20,5-30,0		Sable graveleux	ECR5	2,5	Encadrement 2,0-4,0
	Sable fin envasé 1	ACR6	21,8			Sable graveleux	ECR6	1,8	
	Sable fin envasé 1	ACR7	18,9			Sable graveleux	ECR7	2,6	
	Sable fin envasé 1	ACR8	33,1			Sable graveleux	ECR8	4,7	
	Sable fin envasé 1	ACR9	18,6			Sable graveleux	ECR9	2,0	
B	Sable fin envasé 2	BCR1	29,2	Moyenne 36,6	F	Vase sableuse 1	FCR1	44,4	Moyenne 51,3
	Sable fin envasé 2	BCR2	32,7	Ecart-type 5,4		Vase sableuse 1	FCR2	51,6	Ecart-type 4,6
	Sable fin envasé 2	BCR3	33,8	Maximum 44,5		Vase sableuse 1	FCR3	53,2	Maximum 59,9
	Sable fin envasé 2	BCR4	44,5	Minimum 29,2		Vase sableuse 1	FCR4	59,9	Minimum 44,4
	Sable fin envasé 2	BCR5	37,1	Encadrement 33,7-40,8		Vase sableuse 1	FCR5	46,0	Encadrement 48,7-52,7
	Sable fin envasé 2	BCR6	38,6			Vase sableuse 1	FCR6	53,1	
	Sable fin envasé 2	BCR7	38,9			Vase sableuse 1	FCR7	54,1	
	Sable fin envasé 2	BCR8	30,7			Vase sableuse 1	FCR8	48,7	
	Sable fin envasé 2	BCR9	43,7			Vase sableuse 1	FCR9	50,4	
C	Vase	CCR1	64,2	Moyenne 57,3	G	Sable envasé	GOR1	15,7	Moyenne 17,1
	Vase	CCR2	53,8	Ecart-type 4,1		Sable envasé	GOR2	17,5	Ecart-type 2,4
	Vase	CCR3	51,9	Maximum 64,2		Sable envasé	GOR3	19,2	Maximum 19,7
	Vase	CCR4	58,3	Minimum 51,9		Sable envasé	GOR4	18,0	Minimum 12,3
	Vase	CCR5	59,4	Encadrement 54,2-60,5		Sable envasé	GOR5	19,7	Encadrement 15,3-19,0
	Vase	CCR6	56,2			Sable envasé	GOR6	14,8	
	Vase	CCR7	53,1			Sable envasé	GOR7	12,3	
	Vase	CCR8	57,4			Sable envasé	GOR8	17,8	
	Vase	CCR9	61,6			Sable envasé	GOR9	19,3	
D	Vase graveleuse	DCR1	27,1	Moyenne 38,6	H	Vase sableuse 2	HCR1	54,5	Moyenne 52,3
	Vase graveleuse	DCR2	56,7	Ecart-type 12,0		Vase sableuse 2	HCR2	48,9	Ecart-type 3,4
	Vase graveleuse	DCR3	31,8	Maximum 56,7		Vase sableuse 2	HCR3	54,6	Maximum 57,2
	Vase graveleuse	DCR4	29,4	Minimum 21,6		Vase sableuse 2	HCR4	52,0	Minimum 47,2
	Vase graveleuse	DCR5	51,0	Encadrement 29,4-47,8		Vase sableuse 2	HCR5	54,1	Encadrement 49,7-54,9
	Vase graveleuse	DCR6	47,8			Vase sableuse 2	HCR6	57,2	
	Vase graveleuse	DCR7	21,6			Vase sableuse 2	HCR7	47,2	
	Vase graveleuse	DCR8	37,8			Vase sableuse 2	HCR8	53,6	
	Vase graveleuse	DCR9	44,1			Vase sableuse 2	HCR9	48,6	

Tableau 10 : Variabilité sédimentaire à l'échelle de la centaine de mètres.

Station	Faciès sédimentaire	Numéro	TF2	Statistiques	
D	Vase graveleuse	DCR1	27,1	Moyenne	38,6
	Vase graveleuse	DCR2	56,7	Ecart-type	12,0
	Vase graveleuse	DCR3	31,8	Maximum	56,7
	Vase graveleuse	DCR4	29,4	Minimum	21,6
	Vase graveleuse	DCR5	51,0	Encadrement	29,4-47,8
	Vase graveleuse	DCR6	47,8		
	Vase graveleuse	DCR7	21,6		
	Vase graveleuse	DCR8	37,8		
	Vase graveleuse	DCR9	44,1		
D'	Vase graveleuse normalisée	D'CR1	80,4	Moyenne	77,8
	Vase graveleuse normalisée	D'CR2	84,6	Ecart-type	3,3
	Vase graveleuse normalisée	D'CR3	77,8	Maximum	84,6
	Vase graveleuse normalisée	D'CR4	74,8	Minimum	74,1
	Vase graveleuse normalisée	D'CR5	77,0	Encadrement	75,3-80,3
	Vase graveleuse normalisée	D'CR6	74,1		
	Vase graveleuse normalisée	D'CR7	78,1		
	Vase graveleuse normalisée	D'CR8	74,9		
	Vase graveleuse normalisée	D'CR9	78,1		

Tableau 11 : Influence de la normalisation (suppression de la fraction graveleuse) sur le taux de fraction fine.

La figure 16 présente l'évolution des écart-types en fonction du taux de fraction fine. Les figurés de type « carré bleus » présentent la variabilité spatiale à l'ancre et les figurés de type « rond vert » représentent la variabilité à l'échelle de la centaine de mètres. Globalement, l'étude des deux jeux de données ne permet pas de conclure à une différence de variabilité spatiale aux deux échelles étudiées. Il apparaît donc possible de comparer entre eux les échantillons prélevés à une même station s'ils ne sont pas séparés d'une distance supérieure à la centaine de mètres. Au delà, comme l'a montré Méar et al. (2006), la comparaison n'est plus possible d'autant plus que les stations investiguées ont été choisies en fonction de leur homogénéité acoustique au travers l'étude de sonogrammes obtenus par sonar à balayage latéral.

La figure 16 illustre aussi la plus grande variabilité spatiale des sédiments hétérogènes. Les écart-types sont relativement faibles pour les sédiments sableux contenant peu de fraction fine et pour les échantillons constitués presque essentiellement de vase. Si la variabilité spatiale du taux de fraction fine apparaît forte pour les sédiments constitués de sables envasés ou de vases sableuses, elle est exacerbée lorsque le sédiment analysé contient des graviers. Outre une éventuelle association de plusieurs mécanismes sédimentaires ayant présidé à la mise en place des sédiments étudiés, il faut aussi prendre en compte le principe de la méthode utilisée pour déterminer le taux de fraction fine. Le tamisage humide permet d'obtenir la masse de sédiment inférieure à une certaine dimension. Cette masse est ensuite comparée à la masse totale de sédiment étudiée. Le protocole mis en place par GEOCEANO autorise l'analyse d'un poids brut compris entre 50 et 100 g de sédiment. Il apparaît que ce poids, limité par la nécessité de ne pas détériorer le tamis de lavage par une masse trop importante, ne permet pas d'obtenir des taux de fraction fine statistiquement validés. C'est une des limites de la méthode qui est atteinte ici.

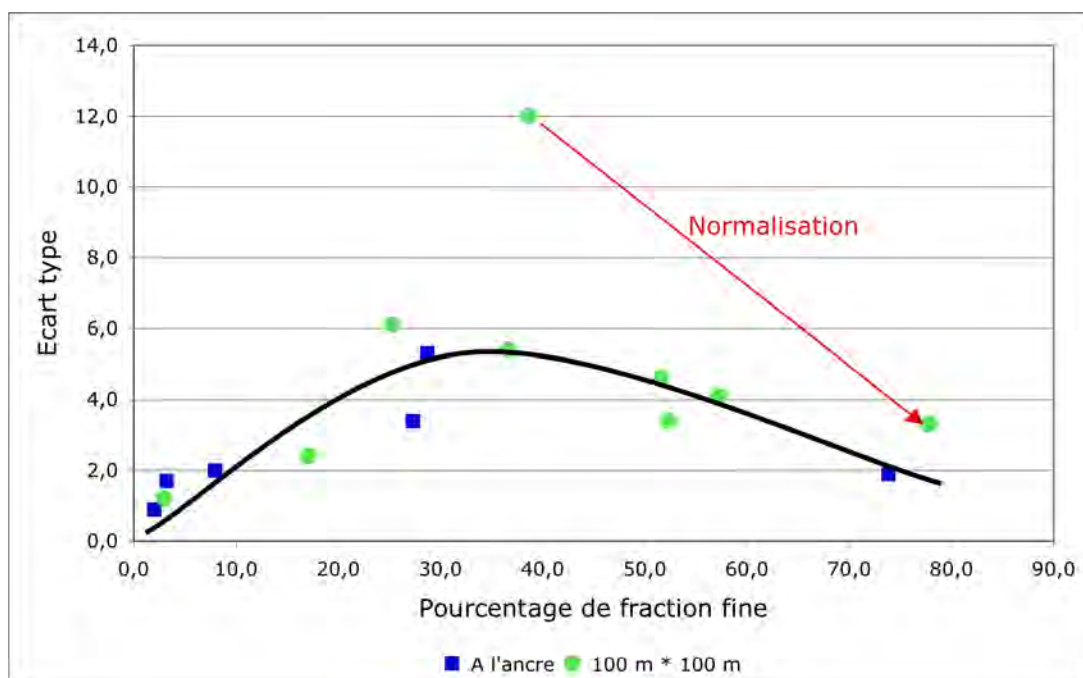


Figure 16 : Evolution de l'écart type de la variabilité spatiale en fonction du taux de fraction fine.

Le tableau 12 synthétise les résultats obtenus en fonction des faciès sédimentaires étudiés. Il permet, en particulier, de considérer la probabilité d'avoir un pourcentage de fraction fine ayant 95 % de chance de se situer dans un intervalle donné.

Nature du sédiment	Stations	Expérience : trente à l'ancre		
		Moyenne (%)	Ecart type (%)	Encadrement à 95%
Sable graveleux	Trente-1	3,2	1,7	2,5-3,7
Sable graveleux normalisé	Trente-1	7,9	2,0	7,2-8,6
Sable fin	Trente-2	2,0	0,9	1,7-2,3
Sable gris envasé	Trente-3	28,7	5,3	26,8-30,6
Nature du sédiment	Stations	Expérience : neuf à l'ancre		
		Moyenne (%)	Ecart type (%)	Encadrement à 95%
Sable gris envasé	Station 1 = trente-3	27,3	3,4	24,6-29,9
Vase estuarienne	Station 2	73,8	1,9	72,3-75,2
Nature du sédiment	Stations	Expérience : zone 100*100m		
		Moyenne (%)	Ecart type (%)	Encadrement à 95%
Sable fin envasé 1	Station ACR	25,3	6,1	2,5-3,7
Sable fin envasé 2	Station BCR	36,6	5,4	7,2-8,6
Vase	Station CCR	57,3	4,1	1,7-2,3
Vase graveleuse	Station DCR	38,6	12,0	26,8-30,6
Vase graveleuse normalisée	Station D'CR	77,8	3,3	75,3-80,3
Sable graveleux	Station ECR	3,0	1,2	2,0-3,0
Vase sableuse 1	Station FCR	51,6	4,6	48,7-52,7
Sable envasé	Station GCR	17,1	2,4	15,3-19,0
Vase sableuse 2	Station HCR	52,3	3,4	49,7-54,9

Tableau 12 : Moyenne, écart-type et encadrement de la variabilité spatiale pour les différents faciès étudiés.

La figure 17 de type « boxplot » ou « boîte à moustaches » présente une synthèse des résultats obtenus pour toutes les variabilités spatiales prises en compte et pour tous les faciès sédimentaires étudiés. Sont ainsi figurées, les différentes informations permettant de donner une note de qualité à la précision de la mesure du taux de fraction fine en fonction du type de faciès sédimentaire étudié.

L'échelle des valeurs du pourcentage de fraction fine se situe sur l'axe Y. La valeur du 1^{er} quartile Q1 (25 % des effectifs), correspond au trait inférieur de la boîte, la valeur du 2^{ème} quartile Q2 (50 % des effectifs) est représentée par un trait horizontal à l'intérieur de la boîte et la valeur du 3^{ème} quartile Q3 (75 % des effectifs) correspond au trait supérieur de la boîte. Les 2 «moustaches» inférieure et supérieure, représentées ici par les traits en pointillés délimitent les valeurs dites adjacentes qui sont déterminées à partir de l'écart interquartile (Q3-Q1). Sur ce graphique aucune valeur extrême atypique ou exceptionnelle (outliers) n'est représentée.

L'analyse du graphique présenté permet de répondre, pour chacun des faciès étudiés, aux questions suivantes :

- Existe-t-il des observations atypiques ?
- La distribution est-elle symétrique ?
- Quelle est l'allure des queues de distribution ?

Le graphique représenté par la figure 17 peut donc être considéré comme un outil mis à la disposition du chercheur afin de déterminer les variations temporelles obtenues sur une série de données peuvent être considérées comme vraiment liées à des évolutions dans les processus de la sédimentation ou simplement liée à une quelconque variabilité spatiale.

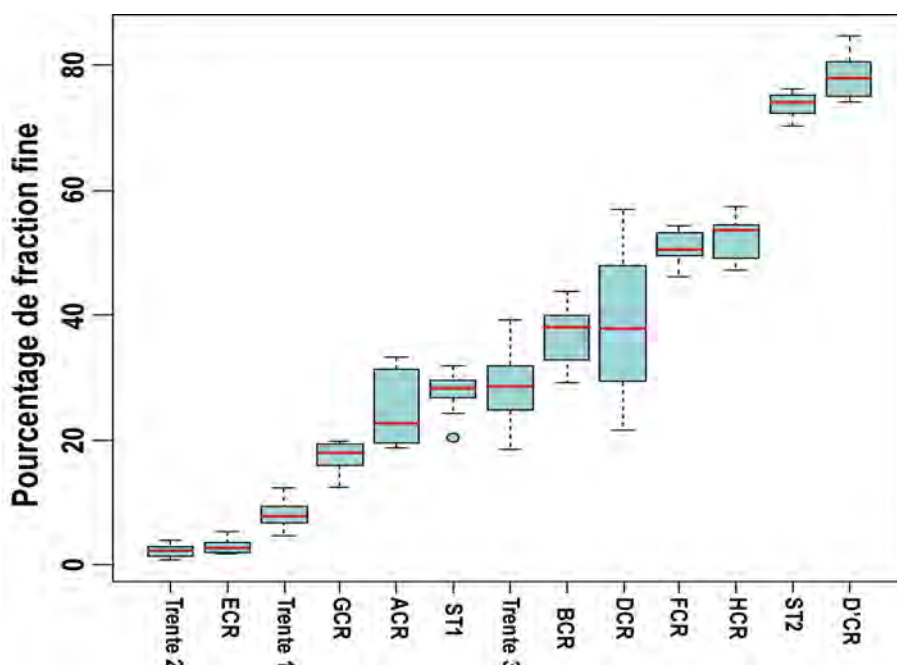


Figure 17 : Boxplot de l'ensemble des données concernant la variabilité spatiale à différentes échelles.

III.4 Conclusion.

L'étude de la variabilité spatiale dans la baie de Seine a été menée suivant trois actions :

- Action 1 : 30 échantillons avec le bateau à l'ancre, dans le but d'étudier la variabilité spatiale à la plus petite échelle possible,
- Action 2 : 9 échantillons avec le bateau à l'ancre, pour une optimisation économique du plan d'échantillonnage,
- Action 3 : prélèvements avec le bateau en route, à l'échelle de la centaine de mètres.

Lors des actions 1 et 2, la distribution spatiale des points montre que les 30 prélèvements pour l'action 1 et les 9 prélèvements pour l'action 2 ne sont pas réalisés au même point.

Les 3 zones (action 1) investiguées représentent toutes une superficie inférieure à un demi-hectare. Des écarts qui peuvent aller jusqu'à 50 m ont été notés lors de l'action 2. Ces distributions spatiales sont dues à une mauvaise géométrie des satellites (GDOP : Geometric Dillution of Precision) prise en compte dans le calcul des coordonnées géographiques et aux mouvements du bateau. Du point de vue sédimentologique, les trois stations de l'action 1 (sable graveleux, sable fin, sable fin envasé) présentent une variabilité du taux de fraction fine à petite échelle qui dépend à la fois du faciès et du taux de fraction fine.

Lors de l'action 2, deux stations ont été prélevées avec 9 réplicats pour chacune. L'une des deux stations est située à proximité immédiate de la station Trente-3 de l'action 1. Le même faciès y est retrouvé. La comparaison des jeux de données montre qu'il n'y a pas de différence significative ce qui nous permet de dire que le prélèvement de 30 échantillons n'apporte pas plus de précision quant à la variabilité spatiale que la prise en compte d'un jeu de données de 9 prélèvements.

L'action 3 nous a permis d'étudier la variabilité spatiale à l'échelle de la centaine de mètres. Les 8 stations prélevées présentent 4 groupes de faciès : sables fins envasés, vase sableuse, vase graveleuse et sable graveleux.

La comparaison des jeux de données de l'action 3 avec ceux de l'action 2 fait apparaître une plus grande variabilité spatiale des sédiments hétérogènes. Les écarts types sont relativement faibles pour les sédiments sableux contenant peu de fraction fine et pour les échantillons constitués presque essentiellement de vase. La variabilité spatiale du taux de fraction fine est forte pour les sédiments constitués de sables envasés ou de vases sableuses et elle est exacerbée dans le cas des sédiments contenant des graviers. Cette variabilité peut être expliquée, d'une part, par une éventuelle association de plusieurs mécanismes sédimentaires ayant présidé à la mise en place des sédiments étudiés et d'autre part, par le principe de la méthode utilisée pour déterminer le taux de fraction fine. En effet, la méthode par tamisage humide est basée sur la détermination d'une masse de sédiment. La présence d'un ou de quelques graviers supplémentaires peut ainsi modifier drastiquement le pourcentage de fraction fine du sédiment étudié.

Influence de la stratégie d'échantillonnage

I. Introduction

Très souvent, l'étude d'un site côtier passe aussi par la réalisation de cartographies représentant telle ou telle propriétés de sédiments. L'analyse spatiale ainsi rendue possible permet entre autre par l'intermédiaire de l'exploration topologique d'identifier les zones sources et les dépôts centres et d'étudier leurs relations. Il ne s'agit plus ici d'investiguer une station de référence unique mais une zone géographique plus ou moins étendue. L'effort d'échantillonnage est donc nettement revu à la hausse et, ce qui était possible (9 échantillons) au niveau d'une station de référence ne l'est plus dans le cas de ce type d'étude spatiale.

Dans le cas de ce travail nous avons choisi comme zone source le dépôt de dragage d'Octeville.

II. Trois radiales et trois réplicats

A partir de cette zone, nous avons suivi un premier plan d'échantillonnage constitué de 3 radiales (Fig. 18). La première permet d'étudier l'influence du dépôt de dragage vers le Nord et donc le long du littoral du Pays de Caux. La seconde est orientée vers le Nord-Ouest et donc vers la zone de dépôt de sédiments fins mise en évidence au large d'Antifer (Méar et al., 2006). La dernière est orientée vers l'Ouest et donc vers le domaine marin ouvert.

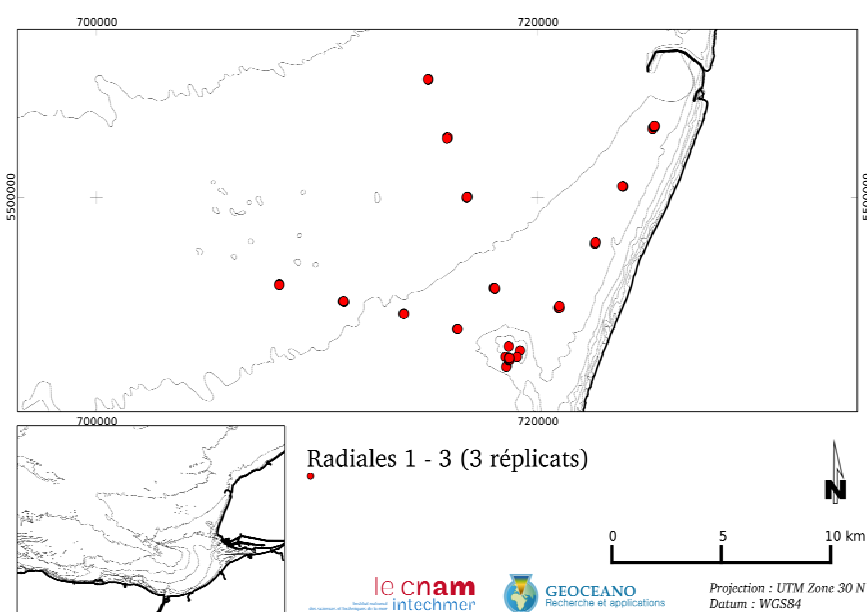


Figure 18 : Position géographique des stations « 3 réplicats, 3 radiales » prises en compte pour l'étude de la variabilité hectométrique.

Chacune de ces radiales représente moins de 15 km de long et a été échantillonnée à travers 13 stations au total. Trois répliquats ont été prélevés pour chacune des stations (39 échantillons). Le nombre de 3 répliquats a été choisi en fonction de ce qui est économiquement possible de faire dans ce type d'étude. Le tableau 13 présente le taux de fraction fine déterminé sur les 39 échantillons ainsi prélevés.

Echantillon	REPLICAT A	REPLICAT B	REPLICAT C	Moyenne
col-10-01-(0-1)	26,5	42,1	77,3	48,6
col-10-02-(0-1)	28,8	7,8	21,9	19,5
col-10-03-(0-1)	28,5	10,0	19,3	19,3
col-10-04-(0-1)	25,8	25,2	29,7	26,9
col-10-05-(0-1)	36,0	11,6	34,7	27,4
col-10-06-(0-1)	7,3	37,3	67,7	37,4
col-10-07-(0-1)	5,0	10,1	5,2	6,8
col-10-08-(0-1)	7,4	12,3	6,2	8,6
col-10-09-(0-1)	12,2	5,0	10,0	9,0
col-10-10-(0-1)	27,2	20,7	18,4	22,1
col-10-11-(0-1)	12,5	14,3	8,6	11,8
col-10-12-(0-1)	7,4	7,1	5,2	6,6
col-10-13-(0-1)	18,8	11,6	11,0	13,8

Tableau 13 : Taux de fraction fine pour les stations « 3 répliquats, 3 radiales ».

La figure 19 représente différentes cartographies réalisées après interpolation des jeux de données par la méthode IDW (Power 2) sous QGIS. Le même protocole d'interpolation a été suivi pour l'élaboration de toutes les cartes. La colonne de gauche présente les résultats obtenus avec successivement la prise en compte des échantillons, notés A, premier échantillon prélevé sur la station, les échantillons notés B, seconds échantillons prélevés sur la station et les échantillons notés C, troisième et dernier échantillon prélevé sur chaque station.

La comparaison de ces cartes permet de montrer que la mise en évidence d'une influence du dépôt de dragage ne se fait pas simplement. En effet, les échantillons A ne permettent même pas de le situer dans l'espace. Au contraire, ils soulignent la présence d'un gradient continu d'envasement de la côte vers le large. L'envasement plus important du secteur côtier est alors mis en évidence. Les échantillons B s'organisent de manière à montrer un léger envasement (< 30 %) dans une zone située immédiatement à l'ouest de la morphologie traduisant la présence des dépôts de sédiments fins. Enfin, les échantillons C, quant à eux, précisent très nettement l'existence et les contours des dépôts de dragage, confirmant l'extension vers l'ouest de ces dépôts. Le taux de fraction fine apparaît considérablement plus élevé (> 65 %).

Les différentes cartographies associées dans la colonne de droite de la figure 19 permettent de visualiser des situations extrêmes qui ont toutes la même probabilité d'exister. La dernière carte (random values) a été établie après un choix aléatoire d'une valeur parmi 3 (A, B ou C) des taux de fraction fine pour chacune des stations investiguées.

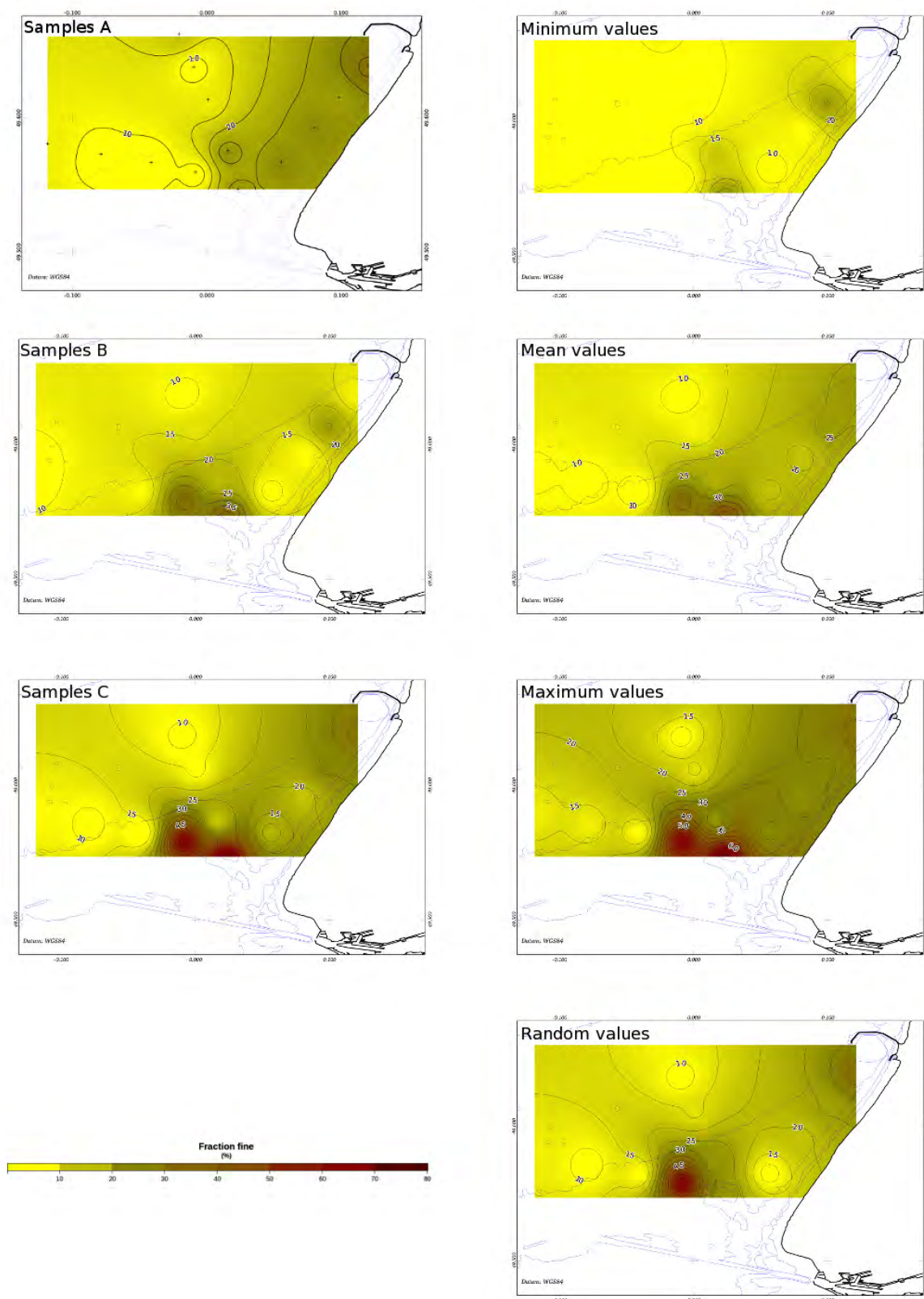


Figure 19 : Différentes cartographies possibles à partir des taux de fraction fine déterminé sur chaque réplicats (3 radiales).

Les cartes «Minimum value» et «Maximum value» permettent d'illustrer la différence obtenue entre la prise en compte de la totalité des valeurs les plus faibles (parmi 3) et la totalité des valeurs les plus fortes (parmi 3). Il apparaît clairement que l'interprétation qu'en fera le sédimentologue sera complètement différente. Dans le premier cas, seules deux taches montrant un léger envasement sont notées. Le dépôt de dragage ne montre pas d'envasement significatif dans le contexte de la zone étudiée. Si l'on prend en compte la cartographie des teneurs maximales, le dépôt de dragage est clairement identifiable. La quasi totalité des fonds marins qui constituent la zone étudiée apparaissent envasés avec des teneurs généralement supérieure à 20 %. Ces 2 cartes apparaissent bruitées avec soit la mise en évidence d'un dépôt centre situé au large du Pays de Caux ayant le même pourcentage d'envasement que la zone du dépôt de dragage soit des patches de sédiments très faiblement envasés en zone externe.

La cartographie de la valeur moyenne apparaît comme la plus fidèle à la réalité telle que l'étude bibliographique permet de s'en faire une idée et telle qu'elle a déjà été mise en évidence par les différents chercheurs travaillant dans cette région (voir par exemple : Crevel, 1983, Méar et al., 2006).

Pour la région étudiée, dans le contexte environnemental régnant au moment des prélèvements, et en considérant 3 radiales de prélèvements, il semble donc que le prélèvement d'un seul échantillon par station ne permette pas de rendre compte de la structuration spatiale du taux de fraction fine autour du dépôt de dragage d'Octeville. Dans certains cas, l'interprétation elle même de la répartition spatiale s'en trouve altérée amenant le chercheur à poser de fausses hypothèses de travail.

III. Echantillonnage suivant une grille régulière

Dans une seconde étape, nous avons cherché à voir si la réalisation d'un plan d'échantillonnage suivant une grille régulière permet d'améliorer notablement le rendu concernant la cartographie spatiale du taux de fraction fine autour du dépôt de dragage d'Antifer. L'objectif de ce travail n'est pas de prouver que plus de prélèvements mieux répartis spatialement autorise la réalisation d'une cartographie plus précise mais si l'amélioration de la précision ainsi apportée est supérieure à celle amenée par l'étude de 3 réplicats en chaque points au lieu d'un seul. Nous avons donc modifié le plan d'échantillonnage (Fig. 20) en prélevant suivant une maille carrée un nombre d'échantillons environ 2 fois supérieur (25 échantillons au total* 3 réplicats = 75 prélèvements au lieu de $13 \times 3 = 39$ prélèvements).

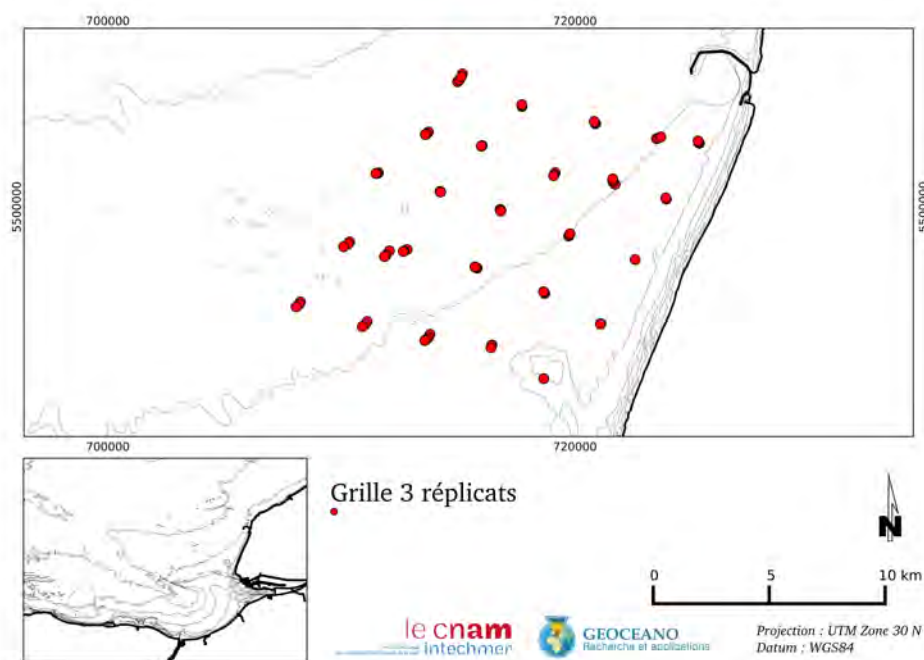


Figure 20 : Position géographique des stations « 3 réplicats, grille » prises en compte pour l'étude de la variabilité hectométrique.

Echantillon	Pourcentage de fraction fine	Moyenne	Echantillon	Pourcentage de fraction fine	Moyenne
Obj2-01A	14,3		Obj2-13A	9,1	
Obj2-01B	9,6		Obj2-13B	12	
Obj2-01C	11,3	11,7	Obj2-13C	13,6	11,6
Obj2-02A	14,2		Obj2-14A	12,5	
Obj2-02B	8,5		Obj2-14B	11	
Obj2-02C	13,9	12,2	Obj2-14C	8,2	10,6
Obj2-03A	15,3		Obj2-15ISO	21,8	21,8
Obj2-03B	11,4		Obj2-16A	23,4	
Obj2-03C	10,2	12,3	Obj2-16B	22,8	
Obj2-04A	13,6		Obj2-16C	17,4	21,2
Obj2-04B	10,2		Obj2-17A	12,8	
Obj2-04C	28,4	17,4	Obj2-17B	13,9	
Obj2-05A	21,4		Obj2-17C	17,3	14,7
Obj2-05B	16,3		Obj2-18A	12,7	
Obj2-05C	18	18,6	Obj2-18B	8	
Obj2-06A	9,1		Obj2-18C	11,6	10,8
Obj2-06B	28,2		Obj2-19A	9,4	
Obj2-06C	15,4	17,6	Obj2-19B	8,3	
Obj2-07A	14,9		Obj2-19C	11,3	9,7
Obj2-07B	12,8		Obj2-20A	4,8	
Obj2-07C	14,9	14,2	Obj2-20B	5,4	
Obj2-08A	11,4		Obj2-20C	9,3	6,5
Obj2-08B	13,5		Obj2-21A	8,7	
Obj2-08C	7,5	10,8	Obj2-21B	9,8	
Obj2-09A	11,6		Obj2-21C	6,3	8,3
Obj2-09B	14,7		Obj2-22A	11,5	
Obj2-09C	7,4	11,2	Obj2-22B	7,5	
Obj2-10A	8,9		Obj2-22C	10,2	9,7
Obj2-10B	12,5		Obj2-23A	9,1	
Obj2-10C	9,1	10,2	Obj2-23B	12	
Obj2-11A	6,7		Obj2-23C	15,2	12,1
Obj2-11B	9,7		Obj2-24A	54	
Obj2-11C	9,9	8,8	Obj2-24B	28,6	
Obj2-12A	11,6		Obj2-24C	61,4	48,0
Obj2-12B	10,8		Obj2-25A	77,8	77,8
Obj2-12C	8,9	10,4			

Tableau 14 : Taux de fraction fine pour les stations « 3 réplicats, grille».

Le tableau 14 présente les taux de fraction fine déterminés sur l'ensemble des échantillons prélevés. Le taux moyen de fraction fine est présenté pour chacune des stations.

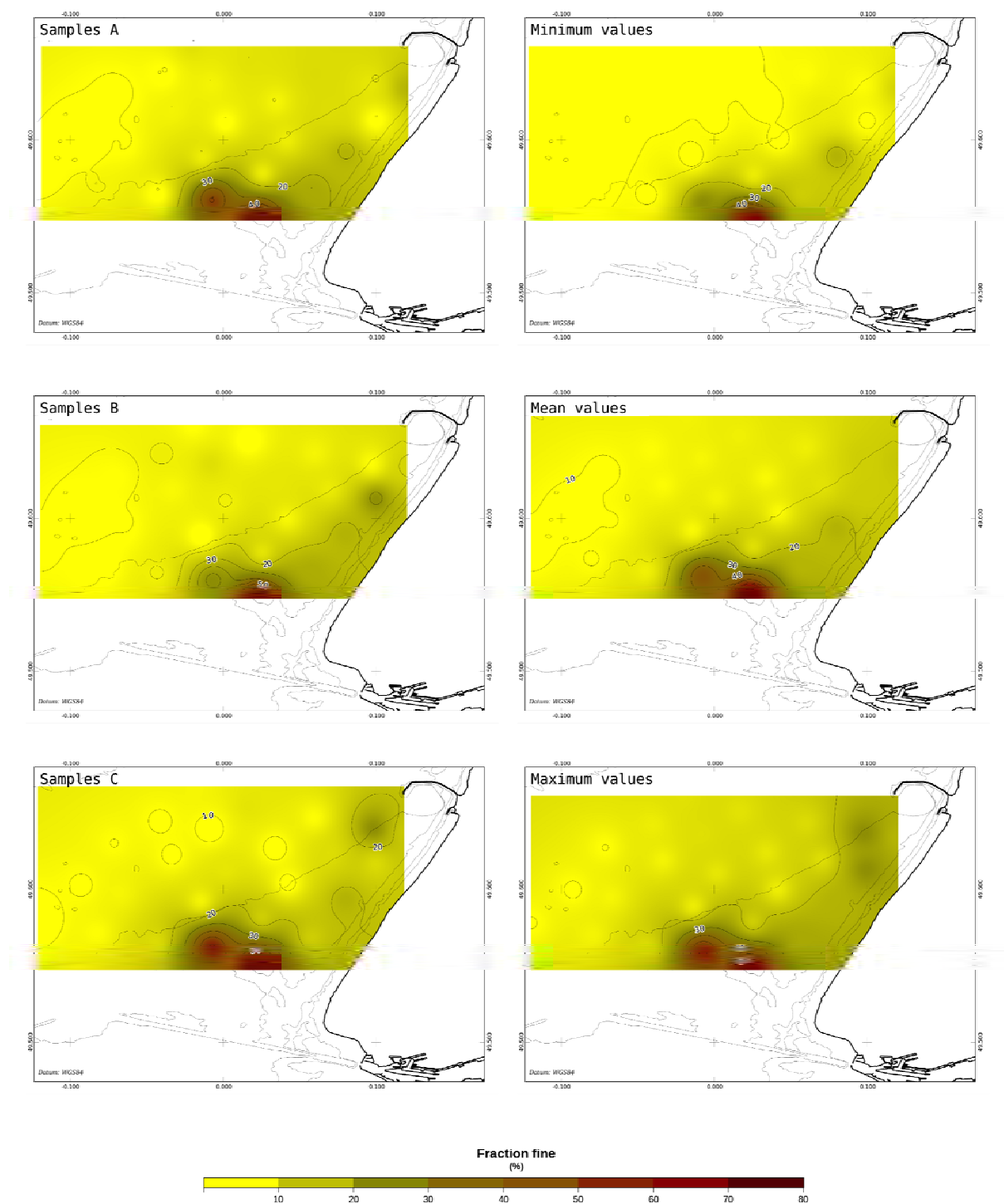


Figure 21 : Différentes cartographies possibles à partir des taux de fraction fine déterminé sur chaque réplicats (grille régulière).

La figure 21 est basée sur le même principe de représentation que celui de la figure 60. La méthode d'interpolation est identique pour les deux expériences. Sur la

colonne de gauche, les cartographies représentent les distributions spatiales obtenues en ne tenant compte que d'un seul échantillon par station, respectivement le premier prélevé (A), le second (B) et le troisième (C). La colonne de droite présente des cartographies plus élaborées puisqu'elle prend respectivement en compte les valeurs les plus basses, moyennes et les plus hautes dans le jeu de données.

Si les cartographies obtenues par interpolation de type IDW ne sont pas strictement identiques, elles présentent cependant les mêmes tendances. Seule l'intensité de la figure de sédimentation est modifiée. Sur toutes les cartes, le dépôt de dragage est bien identifié. Son extension vers l'Ouest est bien représentée. En particulier, il est intéressant de noter que les cartographies des échantillons A et B sont très semblables entre elles et avec la carte obtenue à partir des données moyennées.

IV. Conclusion

En conclusion, les deux stratégies d'échantillonnage testées amènent à prendre en considération deux répartitions spatiales du taux de fraction fine. La première stratégie amène à considérer une carte moyenne obtenue à partir de 3 prélèvements sur 3 radiales. La seconde stratégie amène à considérer une carte obtenue à partir d'une valeur unique obtenue suivant une grille régulière. La figure 22 présente une cartographie de la différence du taux de fraction fine déterminé par ces deux approches (échantillon A de la grille régulière moyenne des 3 radiales).

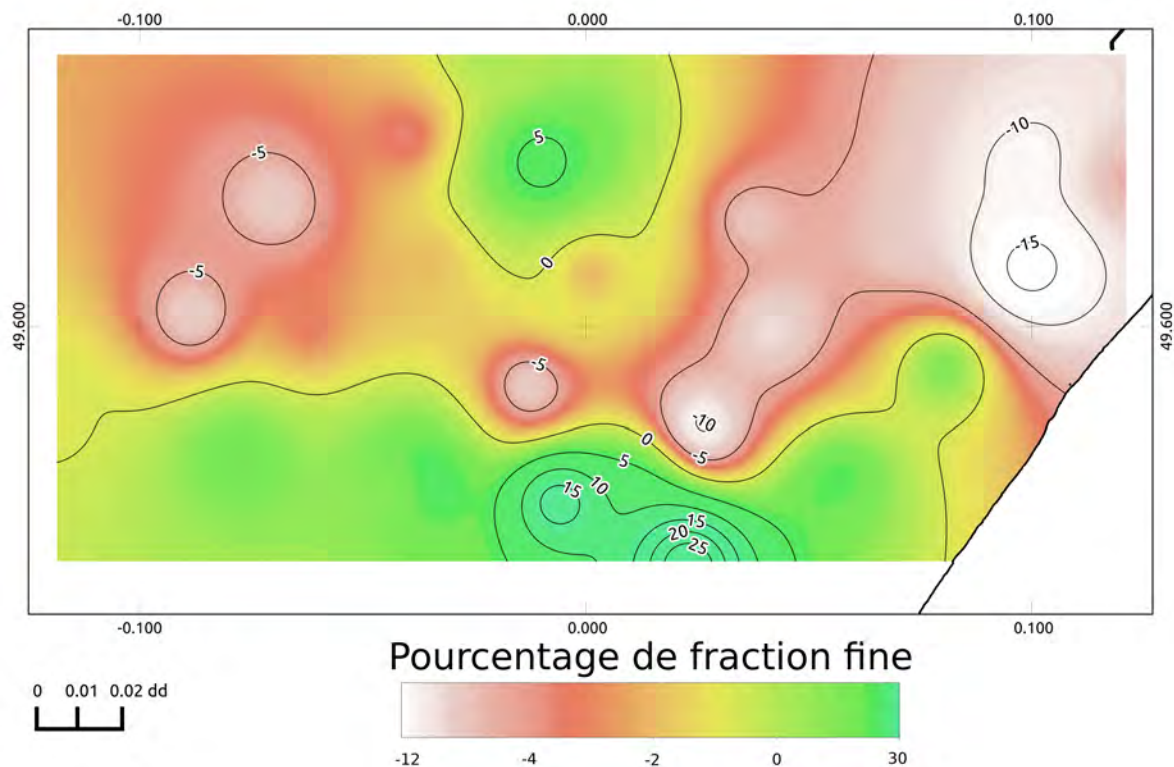


Figure 22 : Cartographie de la différence de taux de fraction fine (échantillon A de la grille régulière contre moyenne des 3 radiales).

L'objectif de ce travail est de définir la meilleure stratégie d'échantillonnage pour mettre en évidence un dépôt de dragage et son influence sur la distribution spatiale des fractions fines. Au terme de cette étude, il apparaît clairement que, si le schéma de prélèvement 3 radiales est choisi, il est nécessaire de faire au moins 3 échantillons par station et d'étudier la répartition spatiale de chaque jeu de réplicats ainsi que celle des valeurs maximales, minimales et moyennes. Au contraire, il n'est pas recommandé de «pooler» physiquement les échantillons lors des prélèvements.

En ce qui concerne la stratégie d'échantillonnage basée sur une grille régulière, les résultats obtenus sont globalement comparables que l'on considère le premier, le second ou le troisième réplicat ainsi que la moyenne des 3.

L'utilisation de la grille régulière permet de mieux mettre en évidence le dépôt de dragage d'Octeville et son extension vers l'Ouest. La comparaison des 2 cartographies retenues comme étant les plus significatives permet cependant d'observer des variations variant de - 17 % à + 30 % de fraction fine. Dans la zone côtière, au Sud du port d'Antifer, un déficit en taux de fraction fine est maximal (- 15 %). Dans le reste de la zone, les différences restent plus faibles entre -5 % et + 5 %. Ainsi, sur une même zone investiguée, le choix de la stratégie d'échantillonnage influe drastiquement sur les résultats. Ce choix n'est donc pas une étape anodine. Pour répondre à l'objectif fixé, il est préférable d'utiliser une stratégie privilégiant la couverture spatiale au détriment de la répétabilité de l'échantillonnage en chacune des stations investiguées. L'analyse globale de la couverture en sédiment fin nécessite cependant une approche de type « Assurance Qualité » qui fait intervenir les compétences du Géologue. Ainsi, le déficit mis en évidence au Sud d'Antifer est lié au taux de fraction fine déterminé sur un seul échantillon (A de la grille régulière) (Fig. 22). Le choix d'un autre échantillon (par exemple le B) aurait fortement atténué cette différence. La prise en compte de l'échantillon A dans le jeu de donnée est de la responsabilité du Géologue.

Variabilité liée à la technique de prélèvement

I. Introduction

Dans le cadre du programme Colmatage, nous avons rassemblé au sein d'une base de données tous les prélèvements de sédiments réalisés en baie de Seine par l'équipe GEOCEANO. L'étude de cette base de données permet, entre autres, de souligner la grande diversité des techniques de prélèvement mises en œuvre au cours des missions recensées dans cette base (Fig. 23). Pour les échantillons qui peuvent être considérés dans le cadre d'une étude de la variabilité spatiale et temporelle, ce sont 1 drague (Rallier), 3 bennes (Shipek, Van Veen et Smith-McIntyre) et 1 carottier (Reinek 0,02 m²) qui ont été mis en œuvre. Des prélèvements complémentaires par plongeur ont aussi été réalisés au moyen d'un tube de plexiglas de 10 cm de diamètre, biseauté et refermé par 2 bouchons plastiques.

L'étude de la littérature souligne les avantages mais aussi et surtout les inconvénients de chacune de ces méthodes. Il apparaît que, suivant les auteurs, aucune des méthodes utilisées ne permet de prélever un sédiment réellement significatif sauf, s'ils sont faits dans les règles de l'art, les prélèvements par plongeur (Thiel, 1990). Dans une première étape, à partir d'une étude bibliographique, nous mettons en évidence les avantages et inconvénients de chacune des méthodes afin de déterminer les échantillons qui pourront être pris en considération. Dans une deuxième étape, une comparaison des résultats obtenus par les techniques de prélèvement retenues est réalisée afin de déterminer l'influence de la technique sur le taux de fraction fine du sédiment. En conclusion, un facteur correctif fonction de la technique de prélèvement et du faciès sédimentaire prélevé est proposé.

II. Les apports du programme Colmatage

Dans cette étude, en accord avec les résultats de l'analyse bibliographique, le prélèvement par plongeur sert de référence en ce qui concerne le taux de fraction fine. La capacité des autres techniques à prélever correctement le sédiment et à préserver le sédiment et donc le taux de fraction fine, sera donc déterminée en comparant les résultats obtenus par la technique prise en considération avec ceux obtenus par plongée.

Nous avons travaillé sur les zones déjà investiguées lors de l'étude de la variabilité à 100 m. Les conditions opératoires étant strictement les mêmes (même météo, opérateur, matériel....), les résultats ainsi obtenus peuvent être comparés entre eux.

L'analyse du tableau 15 permet de mettre en évidence plusieurs points importants quant à la question posée qui est la quantification de l'effet de la technique de prélèvement sur la détermination du taux de fraction fine.

Quelque soit le faciès sédimentaire considéré, l'écart type calculé sur les échantillons prélevés par plongeur est systématiquement inférieur à celui qui est calculé sur les échantillons prélevés par carottier Reinek. Deux principales hypothèses peuvent

être évoquées pour justifier cette raison. La première d'entre elles consiste à considérer que le carottier Reineck ne permet pas d'obtenir des taux de fraction fine caractéristiques de la station étudié à cause d'une perte d'une certaine quantité de particules fines que ce soit à l'impact sur le fond, lors de la remontée dans la colonne d'eau ou lors de la récupération du sédiment. L'étude des pourcentages de fraction fine et les tests statistiques ne permettent pas de retenir cette hypothèse. La seconde hypothèse consiste à considérer que la variabilité géographique à l'échelle des prélèvements par plongeurs est inférieure à la variabilité spatiale du taux de fraction fine tel qu'il peut être déterminé avec un prélèvement fait à partir d'un bateau à l'ancre. C'est cette hypothèse que nous retiendrons dans ce travail à partir des études précédentes portant sur la variabilité spatiale à différentes échelles. En conséquence, la comparaison des résultats obtenus par les différentes bennes utilisées pour l'étude de la baie de Seine orientale peuvent être comparés soit avec les prélèvements réalisés par carottier Reineck soit par les prélèvements réalisés par plongeur.

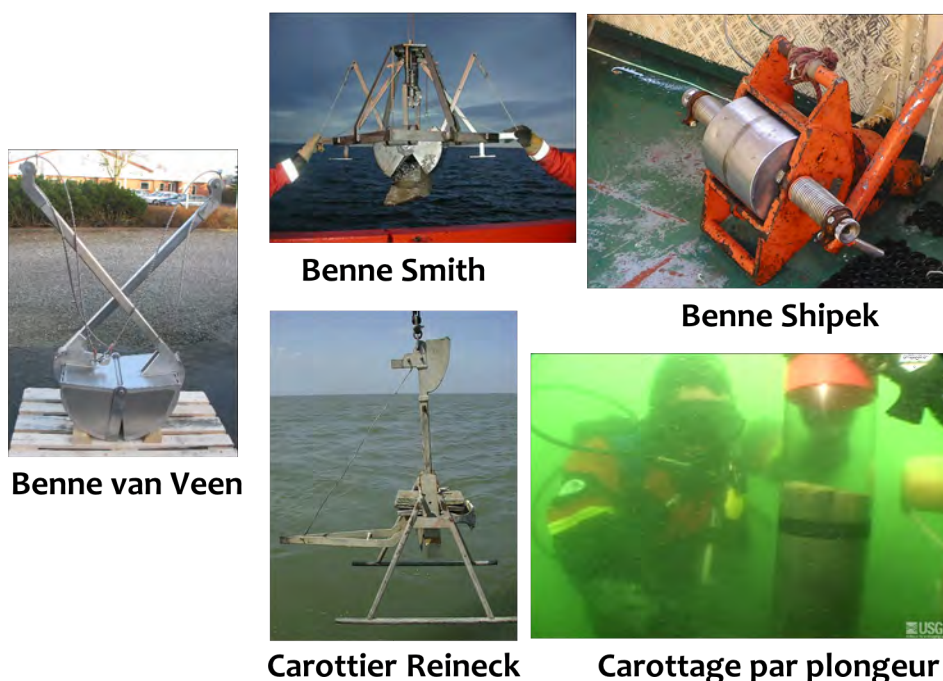


Figure 23 : Principales techniques utilisées en baie de Seine pour prélever des sédiments.

Technique mise en œuvre	Station ACR Sable fin envasé		Station FCR Vase sableuse		Station DCR Vase graveleuse		Station D'CR Vase graveleuse normalisée		Station HCR Vase sur sable envasé	
	N°	TF ²	N°	TF ²	N°	TF ²	N°	TF ²	N°	TF ²
Plongeur	ACRP1	24,0	FCRP1	51,4	DCRP1	46,2	D'CRP1	83,2	HCRP1	85,2
	ACRP2	23,7	FCRP2	52,8	DCRP2	54,8	D'CRP2	85,6	HCRP2	87,4
	ACRP3	26,8	FCRP3	49,6	DCRP3	42,1	D'CRP3	81,9	HCRP3	85,9
	ACRP4	25,4	FCRP4	53,8	DCRP4	31,6	D'CRP4	86,9	HCRP4	89,0
	ACRP5	26,9	FCRP5	53,5	DCRP5	41,4	D'CRP5	85,4	HCRP5	85,9
Moyenne	25,4		52,2		43,2		84,6		86,7	
Ecart type	1,5		1,7		8,4		2,0		1,5	
Carottier Reinek	ACRR1	19,3	FCRR1	54,7	DCRR1	38,4	D'CR1	82,4	HCR1	85,4
	ACRR2	27,2	FCRR2	56,1	DCRR2	59,3	D'CR2	80,3	HCR2	82,3
	ACRR3	24,8	FCRR3	53,8	DCRR3	41,7	D'CR3	84,0	HCR3	86,0
	ACRR4	22,8	FCRR4	47,8	DCRR4	43,1	D'CR4	83,5	HCR4	81,5
	ACRR5	27,0	FCRR5	48,9	DCRR5	28,3	D'CR5	86,2	HCR5	84,2
Moyenne	24,2		52,3		42,2		83,3		83,9	
Ecart type	3,3		3,7		11,2		2,20		1,9	
Benne van Veen	ACRVV1	24,8	FCRVV1	52,3	DCRVV1	56,8	D'CRVV1	81,8	HCRVV1	41,8
	ACRVV2	21,9	FCRVV2	54,5	DCRVV2	35,9	D'CRVV2	79,4	HCRVV2	48,5
	ACRVV3	22,7	FCRVV3	56,1	DCRVV3	29,1	D'CRVV3	76,2	HCRVV3	56,3
	ACRVV4	22,8	FCRVV4	53,3	DCRVV4	33,7	D'CRVV4	75,0	HCRVV4	45,1
	ACRVV5	25,5	FCRVV5	52,7	DCRVV5	35,1	D'CRVV5	77,3	HCRVV5	37,3
Moyenne	23,5		53,8		38,1		77,9		45,8	
Ecart type	1,5		1,5		10,8		2,7		7,20	
Benne Shipek	ACRS1	25,6	FCRS1	52,7	DCRS1	54,2	D'CRS1	74,8	HCRS1	34,8
	ACRS2	21,7	FCRS2	54,6	DCRS2	30,5	D'CRS2	72,2	HCRS2	47,4
	ACRS3	23,2	FCRS3	51,8	DCRS3	47,0	D'CRS3	71,8	HCRS3	51,8
	ACRS4	24,8	FCRS4	55,8	DCRS4	31,4	D'CRS4	69,3	HCRS4	49,3
	ACRS5	23,1	FCRS5	53,9	DCRS5	43,1	D'CRS5	73,1	HCRS5	53,1
Moyenne	23,7		53,8		41,2		72,2		47,3	
Ecart type	1,5		1,6		10,2		2,0		7,3	
Benne Smith-McIntyre	ACRSM1	24,8	FCRSM1	55,7	DCRSM1	32,8	D'CRSM1	82,5	HCRSM1	52,5
	ACRSM2	25,7	FCRSM2	53,8	DCRSM2	46,8	D'CRSM2	84,2	HCRSM2	64,2
	ACRSM3	26,2	FCRSM3	51,9	DCRSM3	51,0	D'CRSM3	84,1	HCRSM3	58,4
	ACRSM4	22,7	FCRSM4	50,7	DCRSM4	47,3	D'CRSM4	80,1	HCRSM4	60,1
	ACRSM5	23,1	FCRSM5	53,8	DCRSM5	39,5	D'CRSM5	82,9	HCRSM5	42,9
Moyenne	24,5		53,2		43,5		82,8		55,6	
Ecart type	1,6		1,9		7,3		1,7		8,30	

Tableau 15 : Comparaison des taux de fraction fine pour les stations A, D, D', F et H en fonction de la technique de prélèvement.

Dans cette étude, nous considérons que les prélèvements réalisés par le plongeur sur les différents faciès peuvent servir de référence. En effet, lors du prélèvement, le plongeur est à même d'éviter le remaniement du sédiment et la perte de la fraction fine en surface. Les résultats obtenus sont présentés faciès par faciès afin de mettre en évidence une éventuelle influence du faciès sur les résultats.

Sable fin envasé. Les données obtenues sur les prélèvements réalisés en plongée affectent à ce faciès un TF² moyen de 25,4 % et un écart type de 1,5 %. La précision obtenue est d'environ 4,2 %. Le test de Wilcoxon nous permet de comparer 2 à 2 les jeux de données obtenus à travers la mise en œuvre des autres techniques de prélèvement (Tab. 16).

Pour toutes les techniques de prélèvement, on ne peut rejeter, au risque de 5 %, l'hypothèse d'égalité des différentes populations. En conséquence, Sur ce faciès de sable fin envasé, toutes les techniques de prélèvement amènent à l'obtention d'un taux de fraction fine équivalent. Il apparaît que par rapport au prélèvement réalisé par un plongeur, toutes les autres techniques amènent à une légère sous-estimation du TF². Les sous-estimations les plus fortes sont liées à la mise en œuvre des bennes Van Veen et Shipek (Fig. 24).

Faciès de référence	Faciès à comparer	P-value	Moyennes
ACRP	ACRR	0,625	Semblables
	ACRVV	0,125	Semblables
	ACRS	0,187	Semblables
	ACRSM	0,625	Semblables

Tableau 16 : Résultats des tests de Wilcoxon comparant les TF2 obtenus par plongée et ceux obtenus par les autres méthodes (Faciès «sable fin envasé»).

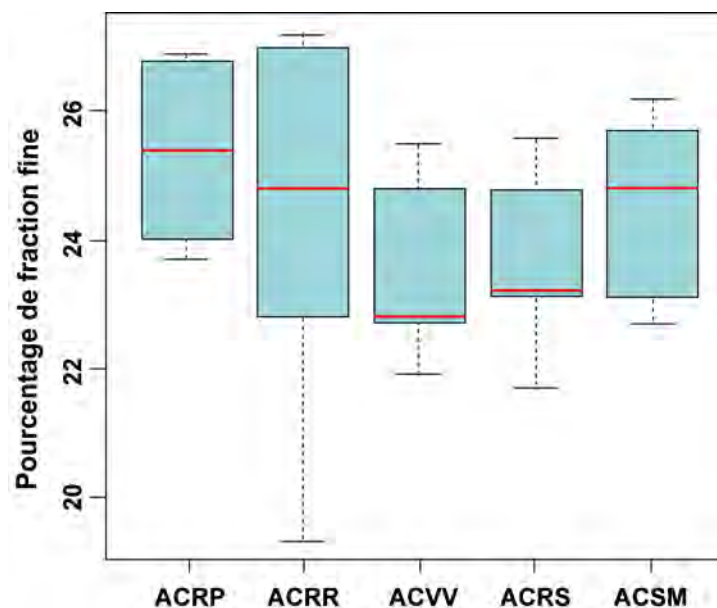


Figure 24 : Box-plot mettant en évidence pour le faciès de sable fin envasé la plus grande hétérogénéité du jeu de données obtenu par carottage Reinek.

Même si statistiquement, toutes les moyennes sont semblables, la mise en œuvre des bennes Shipek et Van Veen induit une perte de fraction fine notable. Parmi les bennes, seule la benne Smith permet de conserver un taux de fraction fine identique à celui obtenu par la mise en œuvre du carottier Reinek.

Vase sableuse. Les données obtenues sur les prélèvements réalisés en plongée affectent à ce faciès un TF² moyen de 52,2 % et un écart type de 1,7 %. La précision obtenue est d'environ 4,8 %. Le test de Wilcoxon nous permet de comparer 2 à 2 les jeux de données obtenus à travers la mise en œuvre des autres techniques de prélèvement (Tab. 17).

Pour toutes les techniques de prélèvement, on ne peut rejeter, au risque de 5 %, l'hypothèse d'égalité des différentes populations. En conséquence, Sur ce faciès de sable fin envasé, toutes les techniques de prélèvement amènent à l'obtention d'un taux de fraction fine équivalent. Il apparaît que par rapport au prélèvement réalisé par un plongeur, le prélèvement réalisé au moyen d'un carottier Reinek amène au même taux de fraction fine. On note toutefois que l'écart type est doublé (tests de variance : P-value = 0,17). La dispersion des valeurs (Fig. 25) et donc la précision de cette technique est inférieure à celle du prélèvement en plongée. On peut considérer que cette variabilité

des TF² obtenus sur les prélèvements réalisés au moyen d'un carottier Reinek est due à la variabilité spatiale. En effet, les prélèvements par plongeur sont au plus, distants de quelques mètres alors que les prélèvements réalisés par carottier sont distants de quelques dizaines de mètres.

Toutes les autres techniques amènent à une légère surestimation du TF² pour une précision comparable (tests de variance : P-value > 0,80). L'étude de la répartition spatiale des points de prélèvement montre que ceux-ci ont été faits dans la même zone géographique que les prélèvements réalisés au carottier. On ne peut donc pas attribuer cette différence à une quelconque variabilité spatiale.

Il semble donc que, malgré les précautions prises, l'échantillonnage dans les godets des différentes benne n'a pas permis de bien identifier la couche homogène de surface. Ce biais peut être lié à un léger remaniement de l'interface avec les couches sous-jacentes. Devant l'impossibilité de caractériser l'importance de ce remaniement, il est impossible de trancher entre les deux possibilités suivantes : les bennes sont responsables d'une perte de la fraction fine et l'expérience menée ne permet pas de le mettre en évidence ou les bennes ne sont pas responsables d'une perte de fraction fine mais il est très difficile de ne prélever que l'interface eau-sédiment.

Dans cette dernière hypothèse, les variations sont cependant extrêmement faibles.

Faciès de référence	Faciès à comparer	P-value	Moyennes
FCRP	FCRR	0,78	Semblables
	FCRVV	0,31	Semblables
	FCRS	0,06	Semblables
	FCRSM	0,44	Semblables

Tableau 17 : Résultats des tests de Wilcoxon comparant les TF² obtenus par plongée et ceux obtenus par les autres méthodes (Faciès «vase sableuse»).

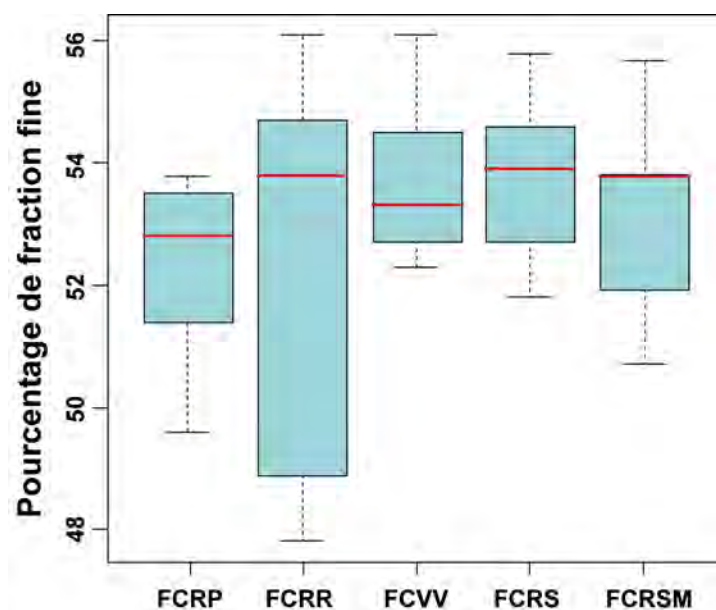


Figure 25 : Box-plot mettant en évidence pour le faciès de vase sableuse la plus grande hétérogénéité du jeu de données obtenu par carottage Reinek.

Vase graveleuse. Les données obtenues sur les prélèvements réalisés en plongée affectent à ce faciès un TF² moyen de 43,2 % et un écart type de 8,4 %. La précision obtenue est d'environ 23,3 %. Le test de Wilcoxon nous permet de comparer 2 à 2 les jeux de données obtenus à travers la mise en œuvre des autres techniques de prélèvement (Tab. 18).

Faciès de référence	Faciès à comparer	P-value	Moyennes
DCRP	DCRR	0,625	Semblables
	DCRVV	0,125	Semblables
	DCRS	0,625	Semblables
	DCRSM	0,980	Semblables

Tableau 18 :Résultats des tests de Wilcoxon comparant les TF2 obtenus par plongée et ceux obtenus par les autres méthodes (Faciès «vase graveleuse»).

Pour toutes les techniques de prélèvement, on ne peut rejeter, au risque de 5 %, l'hypothèse d'égalité des différentes populations. La dispersion des valeurs (Fig. 26) du taux de fraction fine obtenue à travers la mise en œuvre de toutes les techniques est très variable et très élevé. De même le nombre de valeurs extrêmes est notable. Ces valeurs extrêmes diminuent la robustesse du test employé. En effet sur 5 valeurs de fraction fine, il est fréquent d'observer 2 valeurs qui sortent de l'intervalle défini par les quartiles 25 et 75 %. En conséquence, les résultats des tests statistiques ne peuvent être considérés comme valides. Cette variabilité est liée à la présence de graviers en plus ou moins grand nombre dans la matrice sédimentaire.

Pour mieux comprendre l'influence des techniques de prélèvement sur ce type de faciès, nous avons créé une série d'échantillons virtuels constitués des échantillons de vase graveleuse normalisée. Pour cela, nous avons déterminée la masse de la fraction

granulométrie supérieure à 2 mm et recalculé le pourcentage de fraction fine en tenant compte de cette fraction grossière.

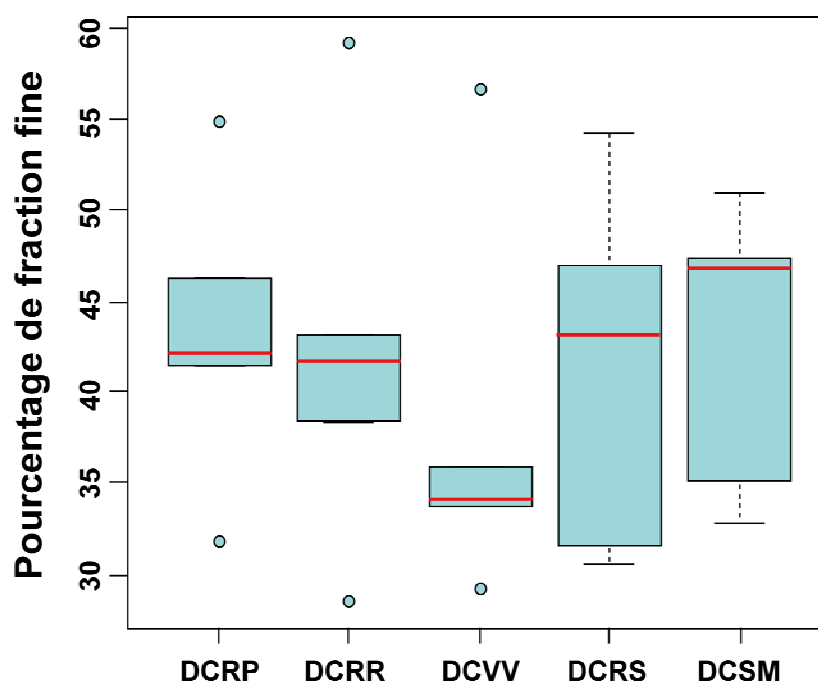


Figure 26 : Box-plot mettant en évidence pour le faciès de vase graveleuse une grande hétérogénéité du jeu de données obtenu par différentes techniques.

Vase graveleuse normalisée. Pour tenir compte de l'hétérogénéité des vases graveleuse, nous avons normalisé les données obtenues en ne prenant plus en compte la fraction granulométrique > 2 mm (taille des graviers). On espère ainsi mieux illustrer un éventuel impact d'une technique de prélèvement étudiée sur la conservation du taux de fraction fine du sédiment. D'après le tableau 19 aucune des moyennes des jeux de données obtenues n'est comparable avec la moyenne plongeur. On peut cependant considérer que le carottier Reinek et le plongeur amène à des résultats globalement semblables avec une légère perte de fraction fine pour le carottier Reinek (Fig. 27). La dispersion des 2 jeux de données est cependant identique.

L'utilisation des bennes Shipek et Van Veen amène à une diminution drastique du taux de fraction fine tandis que l'utilisation de la benne Smith amène à une moyenne du taux de fraction fine globalement identique à celle du plongeur. Malgré la normalisation réalisée, des valeurs extrêmes sont toujours retrouvées. L'étude de la fraction sableuse montre que la fraction supérieure à 630 μm est constituée de débris coquilliers. Il semble que ce soit le pourcentage de cette fraction biogène qui génère la dispersion des taux de fraction fine.

Faciès de référence	Faciès à comparer	P-value	Moyennes
D'CRP	D'CRR	< 0,05	Différentes
	D'CRVV	< 0,05	Différentes
	D'CRS	< 0,05	Différentes
	D'CRSM	<0,05	Différentes

Tableau 19 : Résultats des tests de Wilcoxon comparant les TF² obtenus par plongée et ceux obtenus par les autres méthodes (Faciès «vase graveleuse normalisée à 2 mm»).

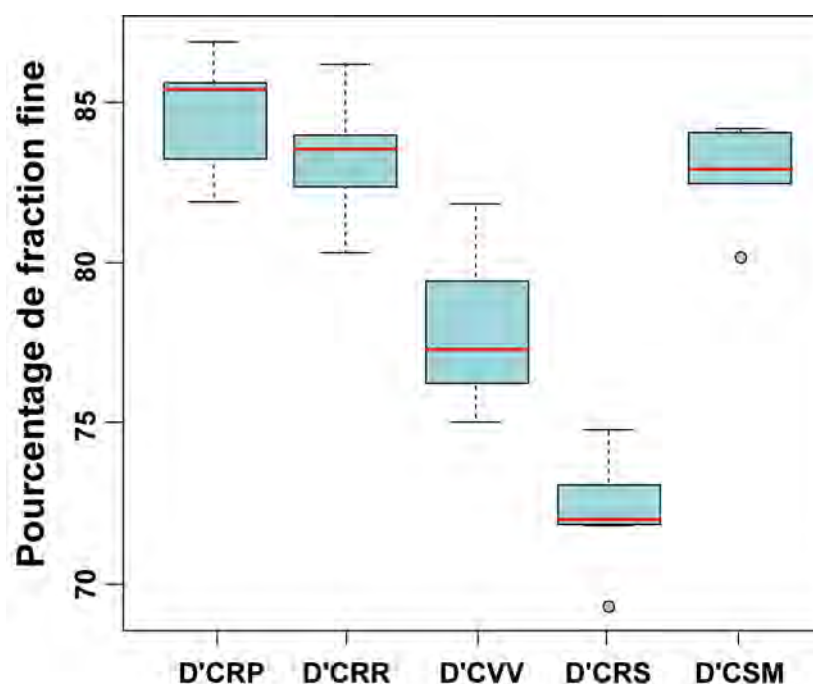


Figure 27 : Box-plot du faciès des jeux de données obtenu par différentes techniques pour le faciès de vase graveleuse normalisée.

Vase sur sable. D'après le tableau 20 aucune des moyennes des jeux de données obtenues n'est comparable avec la moyenne plongeur. On note toutefois des moyennes proches pour les prélèvements par plongeur et par carottage Reinek. Pour toutes les autres techniques mises en œuvre, le taux de fraction fine est dramatiquement plus bas, s'établissant entre 45 % et 55 % environ (Fig. 28). Ici, la superposition d'une couche de vase homogène, riche en eau, sur un sédiment lui aussi homogène mais plus compact (sable envasé) se traduit par une perte importante de la fraction fine du sédiment à l'interface. Cette perte est liée à l'onde de choc qui précède l'arrivée sur le fond des bennes de prélèvement et qui est responsable d'une chasse hydraulique et d'une remise en suspension des particules les plus fines. Pour les 3 bennes utilisées, la benne Smith-Mc Entyre, tout en perdant environ 20 % de la fraction fine, est celle qui occasionne la plus faible perte. Ceci semble lié au fait que l'onde de choc de cette benne est plus faible due aux clapets qui restent ouverts lors de la descente de l'engin, évitant ainsi une surpression à l'aplomb de l'engin. C'est aussi elle qui permet un meilleur prélèvement lors de l'échantillonnage sur le pont du navire.

Faciès de référence	Faciès à comparer	P-value	Moyennes
HCRP	HCRR	< 0,05	Différentes
	HCRVV	< 0,05	Différentes
	HCRS	< 0,05	Différentes
	HCRSM	<0,05	Différentes

Tableau 20 : Résultats des tests de Wilcoxon comparant les TF2 obtenus par plongée et ceux obtenus par les autres méthodes (Faciès «vase sur sable»).

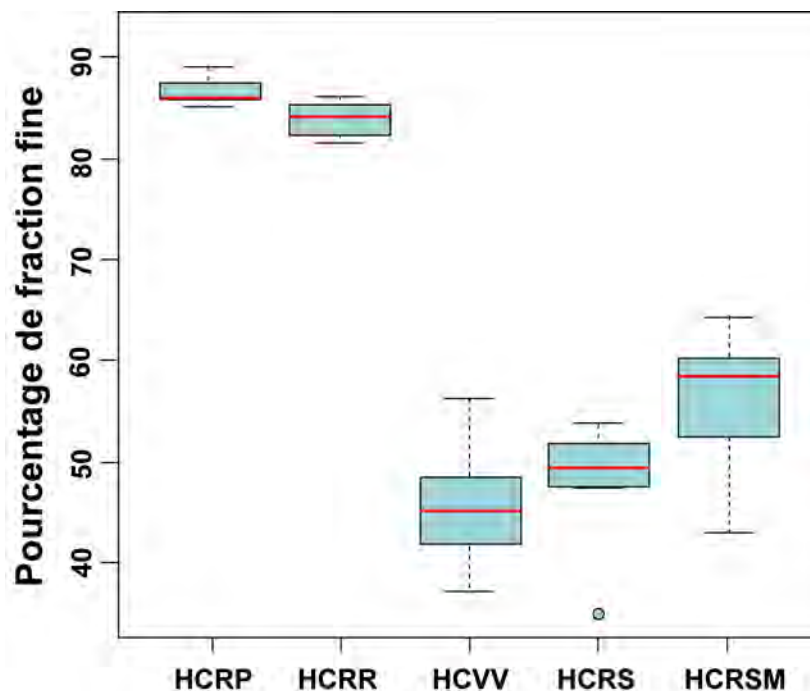


Figure 28 : Box-plot des jeux de données obtenues par différentes techniques pour le faciès de vase sur sable.

III. Conclusion

Les résultats de l'étude entreprise dans le cadre du programme Colmatage s'organise en différents points.

L'étude de l'influence des différentes techniques de prélèvement sur le taux de fraction fine du sédiment prélevé doit être réalisée en comparant chacune des techniques avec une technique servant de référence. Dans le cas de notre étude, ce sont les prélèvements réalisés par plongeur qui servent de référence. Il faut quand même garder à l'esprit que la variabilité spatiale du taux de fraction fine doit être pris en considération. Pour le plongeur, la variabilité spatiale est de l'ordre du mètre ; pour les autres techniques, les prélèvements étant réalisés bateau à l'ancre, la variabilité spatiale est estimée à une vingtaine de mètres.

Les résultats obtenus montrent que les faciès granulométriquement hétérogènes comme les vases graveleuses ne peuvent servir dans le cadre de ce type d'étude. En effet,

le taux de fraction fine est déterminé par tamisage humide et donc le résultat est exprimé à travers un rapport de masse. La présence d'un nombre plus ou moins important de graviers voir de débris coquilliers a une influence énorme sur le résultat rendant impossible toutes comparaisons.

La superposition verticale de faciès dont les caractéristiques géotechniques sont très différentes ne permet pas non plus ce type d'étude. En effet, la couche de surface a une épaisseur très variable due à des variations très localisées de la topographie (bioturbation...) et la différence de propriétés mécanique des couches favorise une séparation entre elles et donc une mauvaise conservation. Dans ce cas de figure, seul un prélèvement effectué, dans les règles de l'art, au moyen d'un carottier Reinek permet d'obtenir des taux de fraction fine tout à fait comparables avec ceux obtenus sur les sédiments prélevés par les plongeurs.

L'étude des faciès sédimentaires homogènes tels que les vases sableuses et les sables envasés permettent de préciser plusieurs points quant à l'influence des techniques de prélèvement sur la conservation du taux de fraction fine. Il apparaît que statistiquement, il n'existe pas de différences significatives en ce qui concerne les moyennes des taux de fraction fine obtenus sur des échantillons prélevés au moyen d'un carottier Reinek ou par une benne qu'elle soit de type van Veen, Shippek ou Smith-Mc Intyre. L'étude des figures 64 et 65 montre la persistance d'une organisation séparant d'un côté les prélèvements réalisés par le plongeur, les prélèvements réalisés par carottage Reinek et les prélèvements réalisés par benne. Dans les 2 cas, le carottier Reinek illustre la variabilité spatiale de chaque faciès à l'échelle de la vingtaine de mètres. Celle ci est d'environ deux fois supérieure pour les deux faciès. Les bennes, quant à elles, présentent des distributions moins dispersées ce qui, au regard de leur dispersion spatiales identique à celle du Reinek, peut être considéré comme une anomalie. Tout se passe comme si les bennes lissaient cette variabilité géographique. Il n'est cependant pas possible d'illustrer une quelconque influence de la technique mise en œuvre sur les valeurs moyennes de fraction fine. La variabilité géographique des sites étudiés est d'un ordre supérieur masquant toute variabilité d'ordre technologique.

Au terme de cette étude, il ne faut pas oublier que les comparaisons des taux de fraction fine réalisés sur différents faciès sédimentaires et sur des échantillons prélevés par différentes techniques n'ont été rendues possibles que parce que les prélèvements ont été réalisés par beau temps avec une mer plate. Il est certain que, dès que la mer se lève, il est très difficile de maîtriser les différentes étapes du prélèvement et de l'échantillonnage. Cette mauvaise maîtrise influe bien évidemment sur la note de qualité que l'on peut affecter à un résultat lorsqu'il est collationné au sein d'une base de données. Ainsi, il ne semble pas déraisonnable de rajouter dans les métadonnées d'une base de données sédimentologiques des informations relatives au bon déroulement des opérations de prélèvement en mer.

Le second objectif poursuivi concerne l'optimisation de la mise en œuvre des bases de données sédimentologiques. Depuis que le sédimentologue réalise des échantillonnages en mer les méthodes de positionnement géographique n'ont pas cessé d'évoluer vers des conditions toujours meilleures. La base de données sédimentologiques DBS1 rassemble les données sédimentologiques obtenues par le groupe GEOCEANO depuis 1985. Forte de plusieurs milliers d'échantillons, elle autorise

aussi bien des études spatiales que temporelles. Pour optimiser son utilisation il est donc important de quantifier pour chaque échantillon pris en compte la variabilité spatiale à l'échelle de la précision du système de positionnement. Des tests ont été réalisés en baie de Seine (prélèvement en bateau) et sur la lagune de Oualidia (prélèvement à pied). En baie de Seine, des tests ont été menés pour les principaux environnements sédimentaires avec un navire à l'ancre (précision du DGPS) ou dans des carrés délimités de 100 m de côté. Les résultats ainsi obtenus ont été appliqués lors de l'étude de l'influence du dépôt de dragage d'Octeville sur l'envasement de la baie de Seine orientale. Ce travail a été complété par une approche géostatistique qui amène à la prise en compte de la nécessaire adéquation entre l'échelle du phénomène étudié, le plan d'échantillonnage et le nombre de réplicats à prendre en compte.

Au terme de cette étude basée sur l'application des principes de l'Assurance Qualité en sédimentologie, le sédimentologue a maintenant à sa disposition une illustration concrète des différents problèmes qui peuvent apparaître tout au long de la chaîne analytique et ceci de la création du plan d'échantillonnage jusqu'à l'interprétation «clé en main» fournie par les systèmes d'analyse les plus récents. Dès lors, il pourra accorder une note de confiance aux résultats analytiques qu'il doit interpréter.

Le sédimentologue a maintenant la possibilité de borner le taux de fraction fine qu'il a déterminé ($X \% \pm x\%$). Il lui reste cependant à prendre en compte ou ne pas prendre en compte cette variabilité dans ses interprétations. Cette décision lui appartient comme il lui appartient de réaliser un prélèvement ou plusieurs réplicats. La connaissance de la « précision » du taux de fraction fine lui offre la possibilité de faire la différence entre les variabilités du taux de fraction fine liées à une option prise lors du schéma analytique (de la conception du plan d'échantillonnage à l'interprétation) et les variabilités naturelles qu'il cherche à mettre en évidence.

Il apparaît maintenant nécessaire de repenser les bases de données sédimentologiques afin d'y intégrer des champs importants, représentant des choix cruciaux pour la validité du résultat, et qui jusqu'à aujourd'hui ne sont jamais pris en compte. De nombreux concepts interprétatifs devront être revus afin de tenir compte de l'évolution des techniques. Ainsi, les schémas interprétatifs, les formules, plus ou moins empiriques, les classifications établies avec des données obtenues par tamisage ne peuvent continuer à être utilisées en intégrant des valeurs données par un diffractomètre laser.

Etude des relations entre les populations d'ophiures et le sédiment

I. Introduction

Au cours de l'année 2010, et conformément à notre plan de travail, nous avons porté notre effort sur l'étude des relations existantes entre les populations d'ophiures (*Ophiotrix fragilis*) et le sédiment.

Pour réaliser ce travail, nous avons exploité la base de données « Sédimentologie » mise en place dans la première partie du programme Colmatage et en particulier les informations relatives au taux de fraction fine (TF²). A ces informations, nous avons joint les données analytiques obtenues en 2010. Ces données portent essentiellement sur la qualité du sédiment avec la mesure du taux du Carbone Organique Total (COT) et du Soufre Total (ST).

Ce rapport présente dans une première partie les différentes cartographies des populations d'ophiures réalisées à partir des données obtenues lors des missions menées par le groupe GEOCEANO en baie de Seine orientale (Fig. 29). Dans une deuxième partie, l'étude porte sur la zone atelier que notre groupe de recherche a mise en place au large du port d'Antifer (Fig. 30).

Deux missions respectivement réalisées en 1986 (BIOGEOPHY) et 1991 (FLUXMANCHE) permettent de proposer 2 cartographies (Septembre 1986 et Juillet 1991) à l'échelle de la baie de Seine orientale. Par la suite l'étude a principalement porté sur la zone située au large du port d'Antifer. Les missions réalisées dans le cadre du programme BENTHOSEINE en 1998 et 1999 sont intégrées dans cette étude ainsi que les informations obtenus dans le cadre du programme COLMATAGE en 2009. Trois autres jeux de données ont été intégrés à cette étude. Ils ont été obtenus au cours des missions liées au programme BIOGEOPHY sur le site atelier situé au large d'Antifer. Ces échantillons ont comme spécificité d'avoir été prélevés après une forte tempête, une forte crue ou une période de stabilité environnementale (sans crue et sans tempête notables) prolongée.

Le faciès « vases noires » rassemble tous les échantillons prélevés, entre 1990 et 1999, sur la zone d'Antifer. Les Vases noires ne sont donc pas représentatives d'un forçage environnemental particulier. Ce faciès sédimentaire est constitué par des vases compacts de couleur noire et généralement odorantes à cause du dégagement d'H₂S. Très rarement, ces vases peuvent être recouvertes d'un liseré de vase oxydée. Il n'est cependant pas possible de savoir si son absence éventuelle est liée à un non dépôt, une érosion ou bien à une mauvaise manipulation lors du prélèvement.

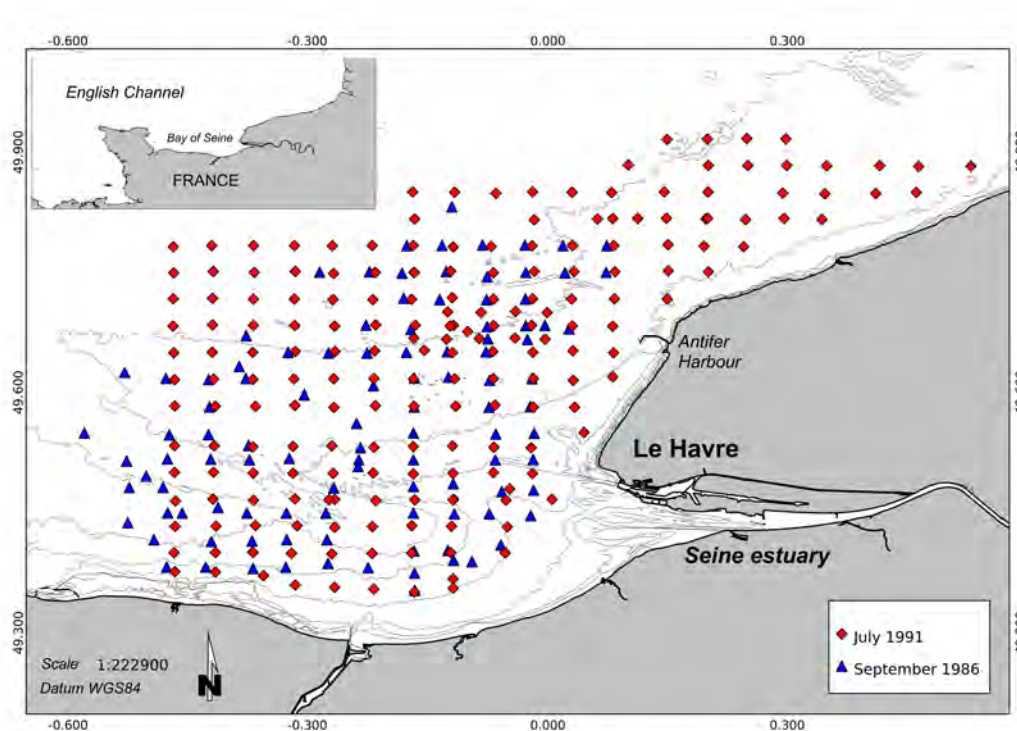


Figure 29 : Région étudiée à travers les données acquises au cours des missions de cartographie réalisées en septembre 1986 et juillet 1991.

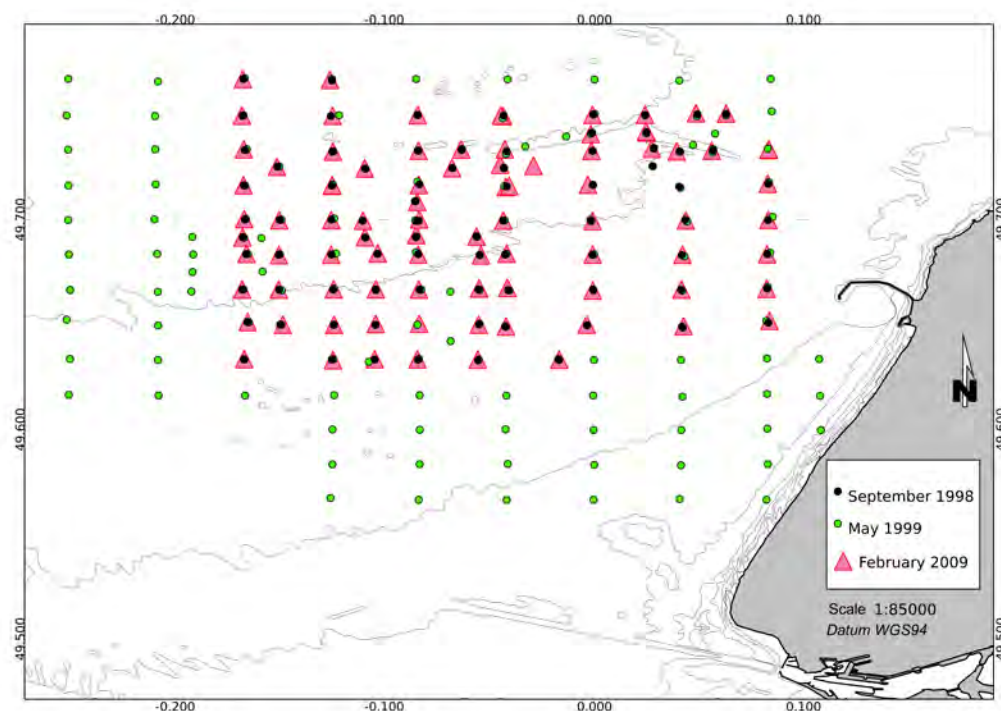


Figure 30 : Région étudiée à travers les données acquises au cours des missions de cartographie réalisées en septembre 1998, mai 1999 et février 2009.

Pour toutes les missions prises en compte dans cette étude, les prélèvements ont été réalisés au moyen d'une benne de type Shipek dont les dimensions du godet de prélèvement sont de 20 cm par 20 cm. Le nombre d'ophiures observées dans chaque prélèvement est multiplié par 25 pour obtenir la densité par m². Il est donc normal de ne pas trouver des nombres d'ophiures inférieurs à 25.

Pour replacer, dans leur contexte environnemental, les échantillons prélevés au cours des différentes missions prises en compte dans ce travail, nous avons calculé des indices « Crue » et « Houle ». Une crue est caractérisée par un débit supérieur à 1000 m³.s⁻¹. Une tempête est individualisée lorsque la valeur Hmo dépasse 4 m. Pour les deux forçages, le temps séparant l'événement (crue ou tempête) et le début de la mission est calculé. Pour la crue, le volume d'eau est déterminé sur la base du débit moyen et de la durée de la crue. Le paramètre « Crue » est calculé en divisant le volume d'eau amené par la crue par l'intervalle de temps séparant la crue du début de la mission. Le paramètre « Houle » est calculé en divisant la Hmo maximale de l'épisode tempétueux par l'intervalle de temps séparant la tempête du début de la mission. Des coefficients de normalisation sont ensuite appliqués pour obtenir des gammes de valeurs comparables. Le tableau 21 présente les caractéristiques des forçages pris en compte pour les missions considérées dans cette étude.

Nom série	Date prélèvement	Débit Seine			Tempête	
		Débit maximum de la crue (m ³ /s)	Volume de la crue (m ³)	Temps depuis la crue (jours)	Hmo (m)	Temps depuis la tempête (jours)
1986	Septembre 1986	1172	794880000	140	4,2	232
1991	Juillet 1991	1512	2358720000	160	4,1	169
1998	Septembre 1998	1359	1952640000	119	4,7	147
1999	Mai 1999	1338	1560384000	15	4	112
SA09	Février 2009	1490	1167091200	30	4,3	43
Crue	Avril 1999	1560	4103827200	5	4,5	197
Houle	Février 1990	1207	684633600	428	4,1	3
Stabilité	Octobre 1989	1207	684633600	289	4,6	661
Vases noires	1990-2009					

Tableau 21 : Place des missions dans le contexte des forçages environnementaux (houle et crue de la Seine).

Le tableau 22 présente les deux paramètres calculés (Crue et Houle) pour chacune des missions prises en compte dans cette étude. Dans ce tableau, les 2 premières missions (1986, 1991) avaient comme objectif de cartographier les ophiures à l'échelle de la baie de Seine Orientale (Fig. 29). Les 3 suivantes (1998, 1999, SA09) ont permis de réaliser un zoom au large d'Antifer (Fig. 30).

Les missions notées Crue, Houle, Stabilité et Vases noires sont respectivement caractéristiques des forçages indiqués dans leur dénomination ou du faciès sédimentaire pris en compte.

Nom série	Date prélèvement	Paramètre crue	Paramètre houle
1986	Septembre 1986	56,8	18
1991	Juillet 1991	147,4	24
1998	Septembre 1998	164,1	32
1999	Mai 1999	1040,3	36
SA09	Février 2009	389,0	100
Crue	Avril 1999	8207,7	23
Houle	Février 1990	16,0	1367
Stabilité	Octobre 1989	23,7	7
Vases noires	1990-2009		

Tableau 22 : Paramètres Crue et Houle caractéristiques des missions analysées.

La figure 31 permet de replacer l'ensemble des jeux de données analysés dans le contexte environnemental régnant au moment du prélèvement des échantillons. Les différentes missions « cartographiques » aux deux échelles prise en compte (ensemble de la baie de Seine et zone atelier d'Antifer) se situent à l'intérieur d'un triangle dont les trois sommets caractérisent des conditions environnementales où 1) la houle est le facteur dominant, 2) la crue est importante, 3) une période de stabilité pour laquelle la dernière crue et la dernière tempête sont lointaines.

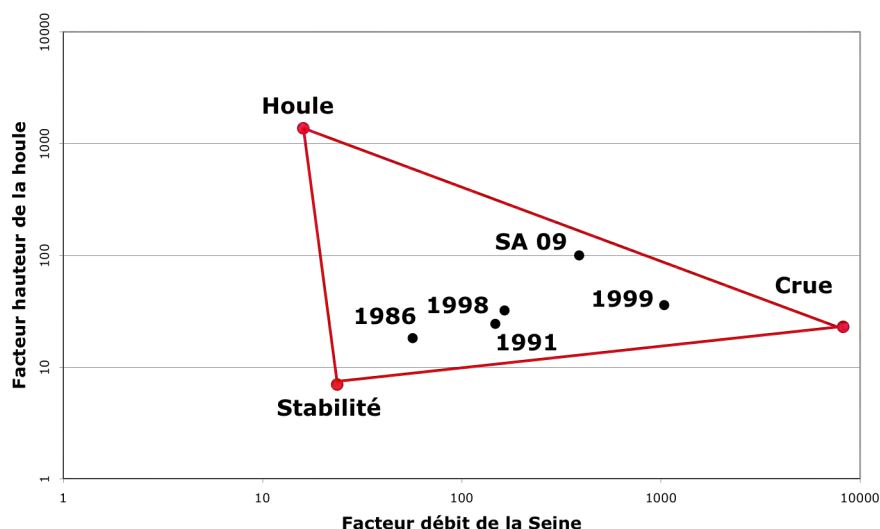


Figure 31 : Influence relative des forçages environnementaux (houle et crue de la Seine) lors des missions de prélèvement.

II. Les populations d'ophiures à l'échelle de la baie de Seine orientale.

La présentation de cartes spatialement interpolées de la densité d'ophiures ne permet pas de rendre compte de manière à la fois lisible, compréhensible et juste de la répartition spatiale de cette population. L'approche géostatistique indique que cette impossibilité est liée à la répartition très dispersée des ophiures en baie de Seine

orientale. Les « patches » d'ophiures qui ont au maximum quelques kilomètres de largeur peuvent être caractérisés par des populations d'ophiures de plusieurs milliers d'individus par m². Entre les patches, il n'est pas rare d'échantillonner des sédiments pour lesquels les ophiures sont absentes. Malgré le grand effort d'échantillonnage réalisé, le plan d'échantillonnage n'est pas suffisant pour obtenir une cartographie spatiale correcte. Pour les cartographies présentées dans ce chapitre, nous avons donc choisi de présenter des cartes thématiques. Sur ces cartes, les points rouges matérialisent les prélèvements pour lesquels aucune ophiure n'a été prélevée. Lorsque les ophiures sont présentes, le diamètre du cercle situé sur la position du point d'échantillonnage augmente proportionnellement à la densité de la population d'ophiures. En même temps, la couleur du point passe du vert au bleu foncé.

La figure 32 présente la répartition spatiale des ophiures telle qu'elle est déterminée à partir des données obtenues au cours de la mission réalisée en septembre 1986. Les fortes densités d'ophiures sont concentrées au large du port d'Antifer. Dans cette zone, la densité peut atteindre 7500 ind.m⁻². Cependant, la distribution apparaît spatialement très irrégulière. Les ophiures se concentrent dans des zones géographiquement limitées (de 1 à 3 km de diamètre). Cette répartition se traduit par la juxtaposition de zones très riches en ophiures et de zones plus ou moins désertiques. Plus au large, des populations isolées d'ophiures peuvent aussi être mises en évidence. Les deux populations reconnues dans ce contexte se situent à l'abri d'épaves.

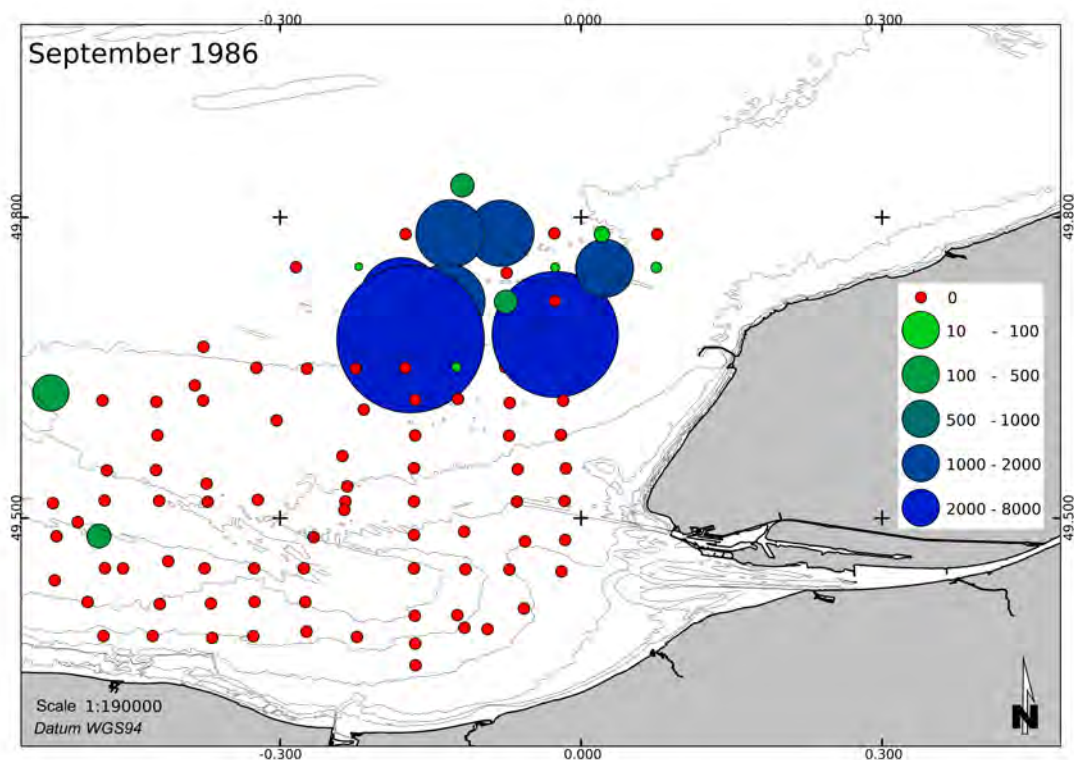


Figure 32 : Cartographie des populations d'ophiures en baie de Seine orientale (septembre 1986).

Le même type de distribution spatiale est retrouvé en juillet 1991 (Fig. 33). Les peuplements de la zone d'Antifer sont toujours présents. Ils occupent globalement la même zone avec le même type de répartition spatiale. Cependant, les plus fortes densités restent inférieures à 1000 ind.m⁻². La population isolée située à l'Ouest de la zone d'étude (environ 7 kilomètres au large d'Arromanches) est toujours présente. L'extension de la zone d'étude vers le Nord-Est permet de mettre en évidence une autre population isolée. Cette population se développe dans des zones abritées liées à la présence de blocs et de galets.

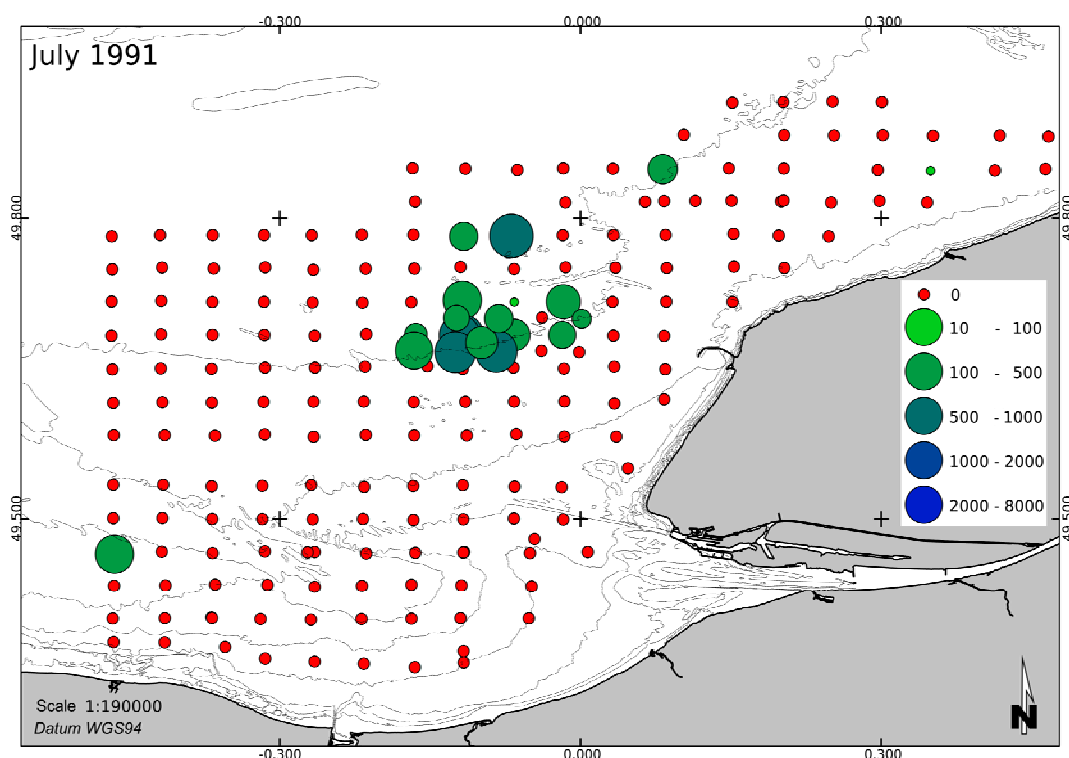


Figure 33 : Cartographie des populations d'ophiures en baie de Seine orientale (juillet 1991).

Pour les deux jeux de données étudiés, il apparaît que les populations d'ophiures sont principalement concentrées dans une zone située au large du terminal d'Antifer. C'est cette zone qui a été étudiée plus en détail au cours des missions suivantes (Benthoseine 98, Benthoseine 99 et Colmatage 2009). La base de données mise en place permet de proposer en plus des situations de 1986 et 1991, 3 nouvelles cartographies réalisées entre 1998 et 2009 (septembre 1998, mai 1999 et février 2009). Lors de la comparaison des cartographies spatiales, il convient de tenir compte de la disparité des plans d'échantillonnage qui sont nettement revus à la hausse pour les missions de 1998 à 2009.

Le zoom réalisé, à partir de la carte de 1986, dans la région située au large d'Antifer (Fig. 34) permet de mieux visualiser la structure spatialement discontinue des populations d'ophiures. Les populations les plus denses sont retrouvées à la fois au nord et au sud du banc d'Antifer. Les ophiures situées au nord de ce banc sont essentiellement retrouvées sur des graviers et des sables graveleux. A l'opposé, les ophiures les plus méridionales occupent des faciès beaucoup plus envasés (graviers envasés, vases noires...).

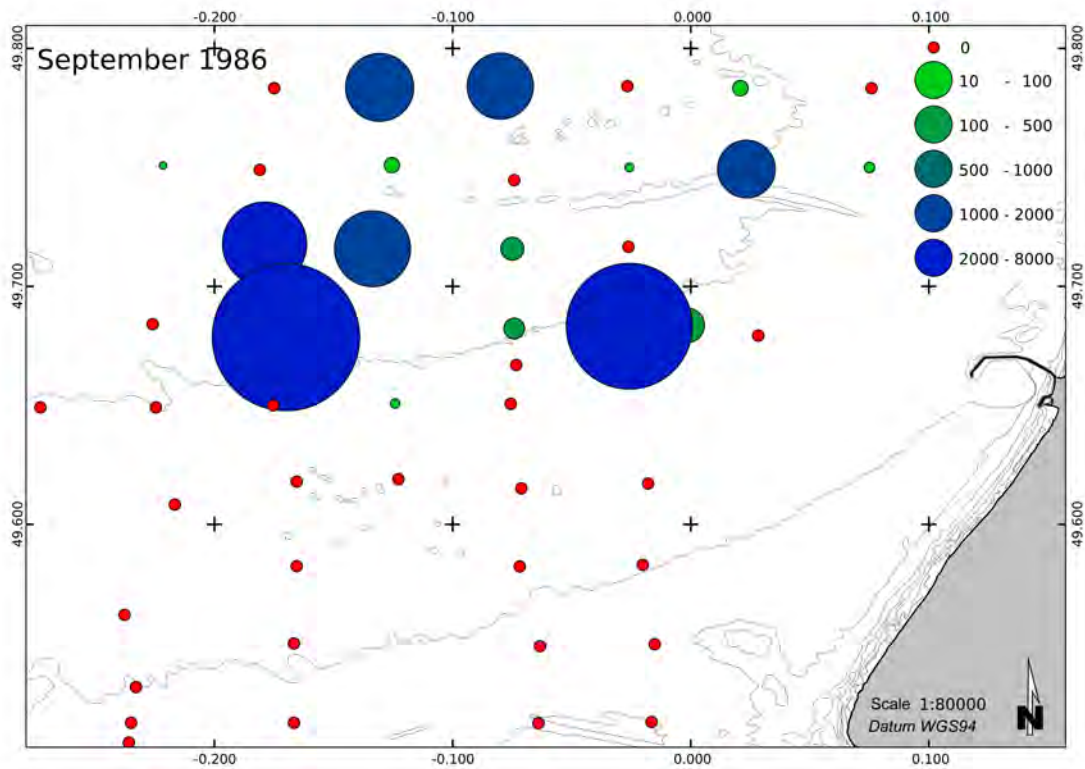


Figure 34 : Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (septembre 1986).

En 1991, les mêmes zones sont mises en évidence de part et d'autre du banc d'Antifer (Fig. 35). L'augmentation du nombre d'échantillon au sud du banc d'Antifer permet de mieux cerner la présence d'une tache principale et de deux taches secondaires. La densité des ophiures est globalement la même dans chacune de ces taches.

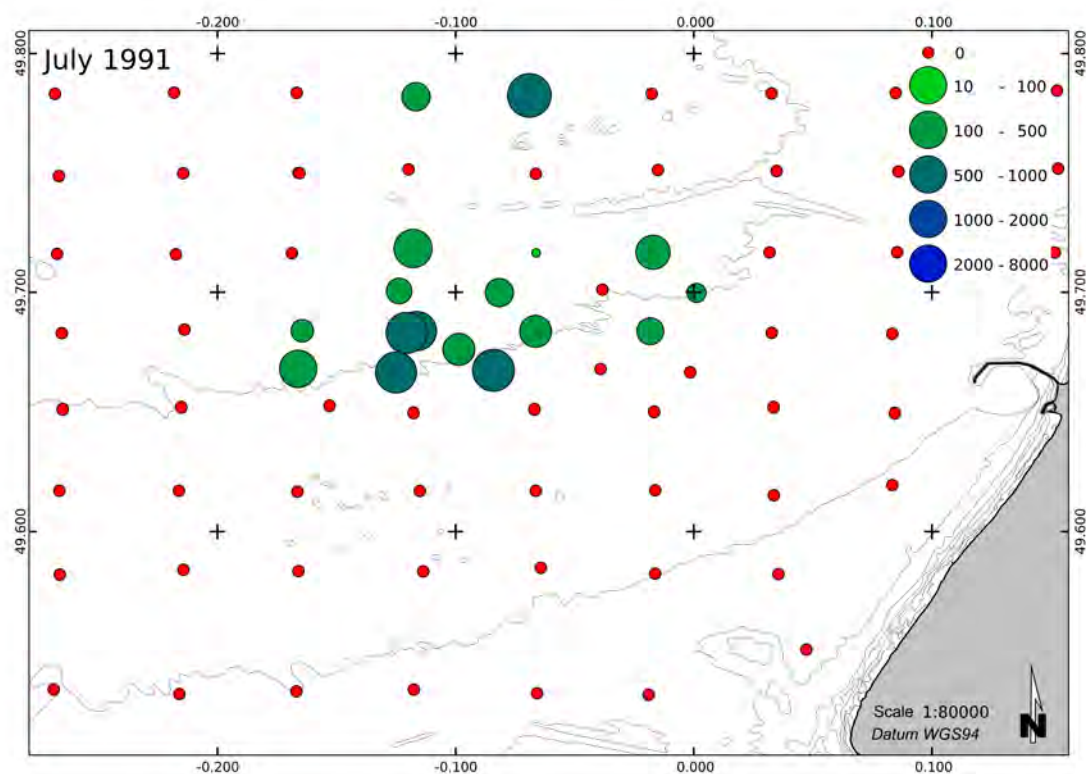


Figure 35 : Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (juillet 1991).

En 1998, l'effort d'échantillonnage a porté sur la zone située au large d'Antifer et plus particulièrement au sud du banc sableux d'Antifer (Fig. 36). Par rapport à la situation précédente de 1991, la densité spatiale de la population d'ophiure augmente fortement (jusqu'à 2500 ind/m²) sans toutefois atteindre les densités relevées en 1986.

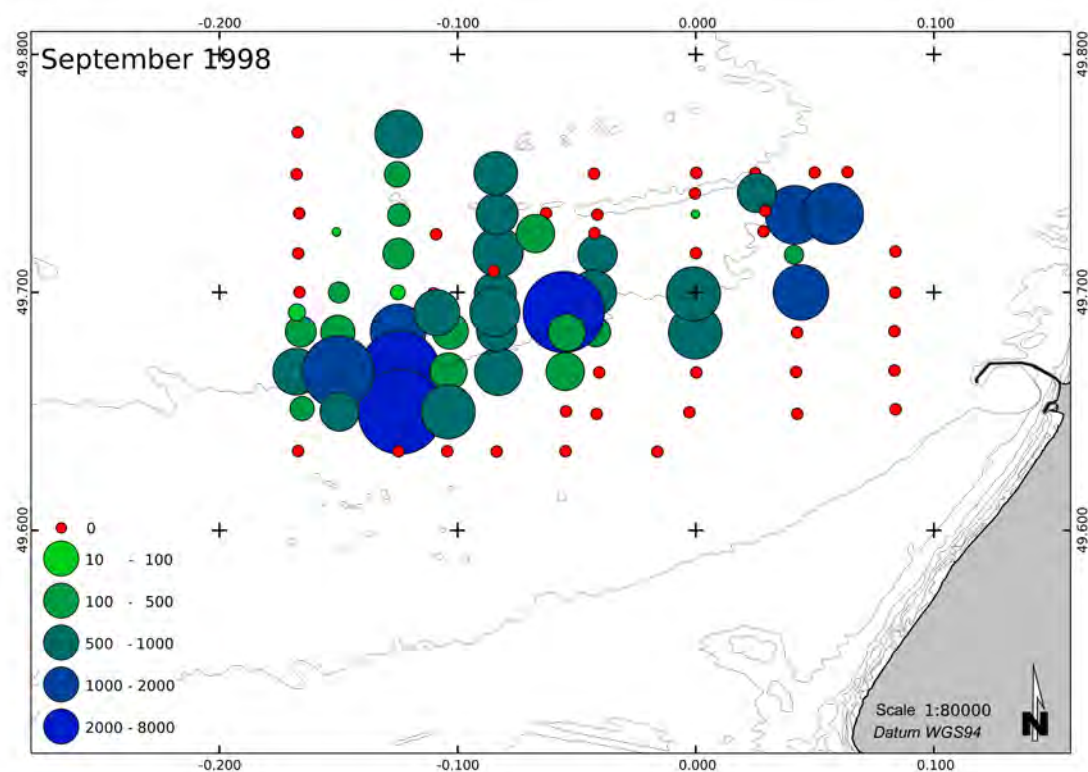


Figure 36 : Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (septembre 1998).

La comparaison 1986, 1991 et 1998 souligne la pérennité de la population d'ophiures au large d'Antifer sur les mêmes zones géographiques. Le resserrement du plan d'échantillonnage permet de souligner l'alignement de la tache principale, au sud du banc d'Antifer, sur l'isobathe des 30 m (orientation Nord Nord Est - Sud Sud Ouest). La jonction entre les taches septentrionales et méridionales n'est effective qu'à l'ouest du banc d'Antifer, région où il est moins individualisé et où les sédiments fortement sableux et coquilliers ne sont pas représentés.

En mai 1999, l'effort d'échantillonnage dans la zone située au large d'Antifer est similaire (Fig. 37). Les limites de l'extension spatiale de la population d'ophiures ont été recherchées à l'Est, au Sud et à l'Ouest. La densité maximale diminue légèrement pour n'atteindre que 1800 ind.m². La tache principale est toujours géographiquement stable. Par contre, dans le détail, les populations périphériques évoluent à la fois en densité et en position géographique. Spatialement, aucun trait général ne peut être mis en évidence.

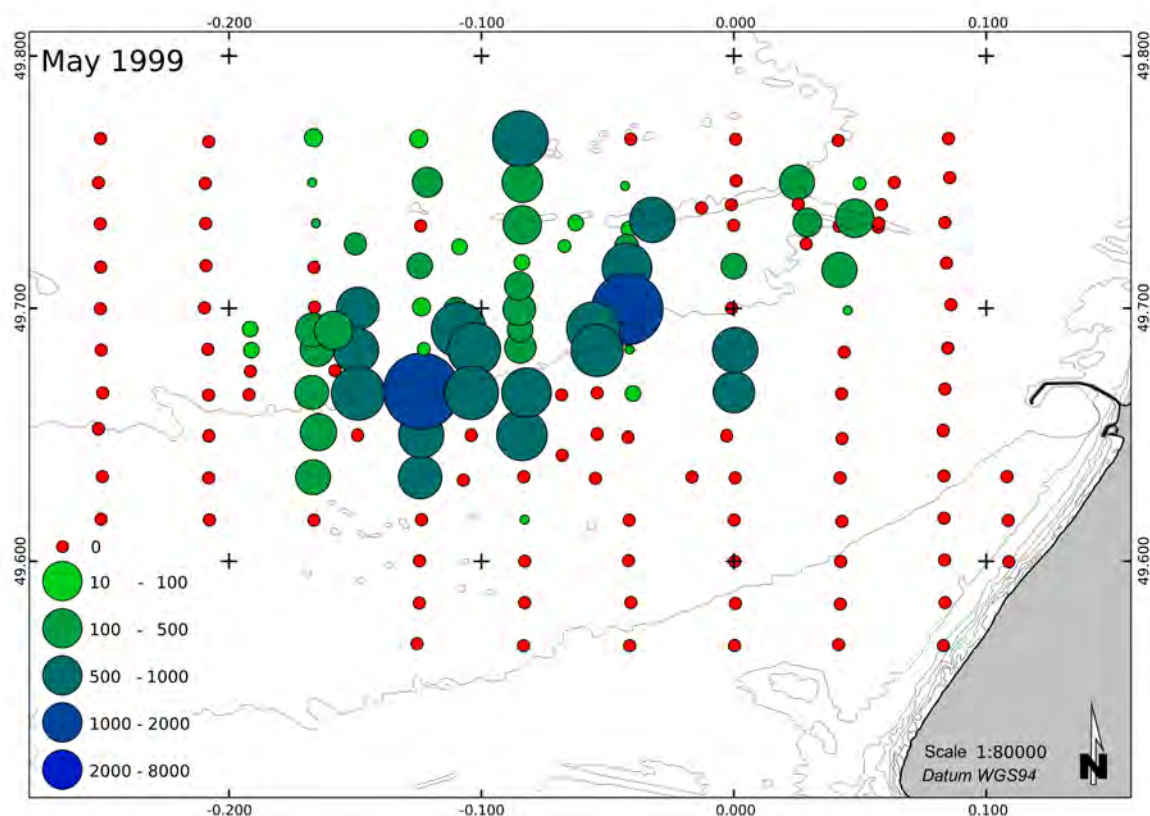


Figure 37 : Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (mai 1999).

Dix ans plus tard (février 2009), la distribution spatiale est assez similaire à la distribution de 1999 (Fig. 38). La densité maximale est d'environ 3400 ind.m². Cependant, l'alignement sur la ligne bathymétrique des 30 m est moins marqué. La tache principale est à la fois descendue vers le Sud et découpée en deux sous-taches. Pour la première fois, depuis 1986, des profondeurs plus faibles (25 m) sont occupées par les ophiures. Au nord du banc d'Antifer, la population d'ophiure apparaît beaucoup plus dense et spatialement plus importante.

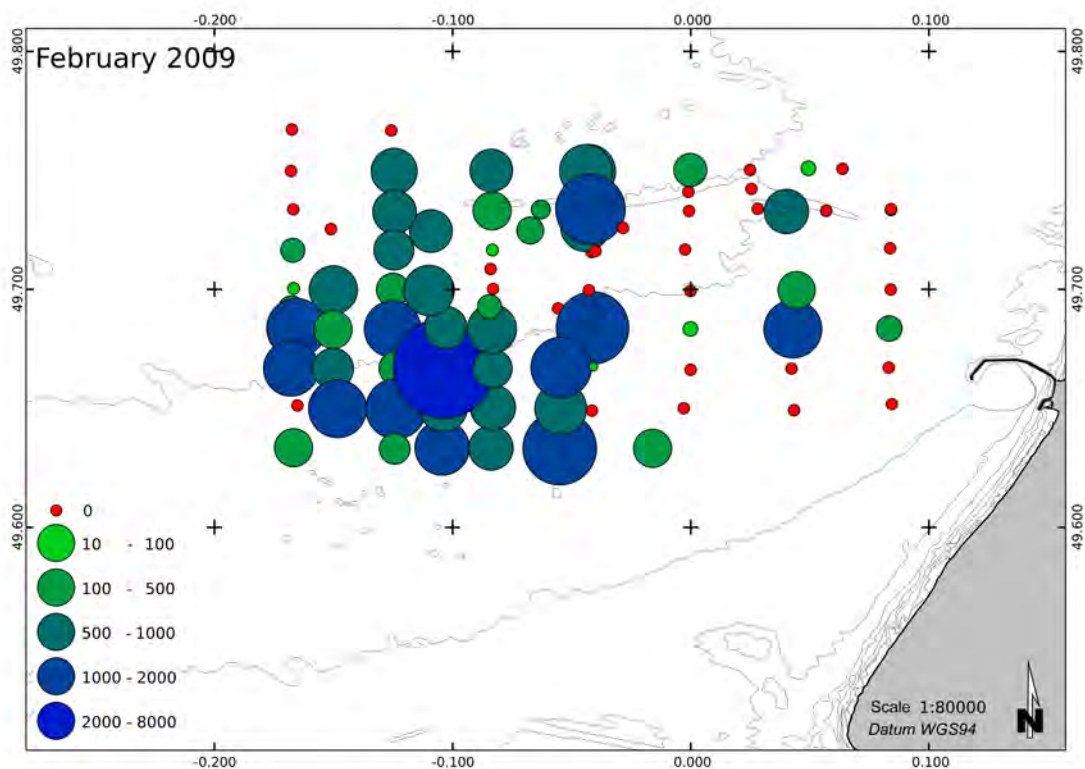


Figure 38 : Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (février 2009).

III. Relation entre taux de fraction fine et populations d'ophiures

Le taux de fraction fine représente ce qui est classiquement considéré comme « l'envasement ». Dans cette étude, ce paramètre représente le pourcentage de la fraction de sédiment dont les particules ont une taille inférieure à 63 microns. Ce paramètre est mesuré à la suite d'un tamisage humide et par différence de poids entre le sédiment total et la fraction supérieure à 63 microns (maille du tamis).

Sur la figure 39, nous avons reporté les informations disponibles pour les missions réalisées en 1986, 1991, 1998 et 1999.

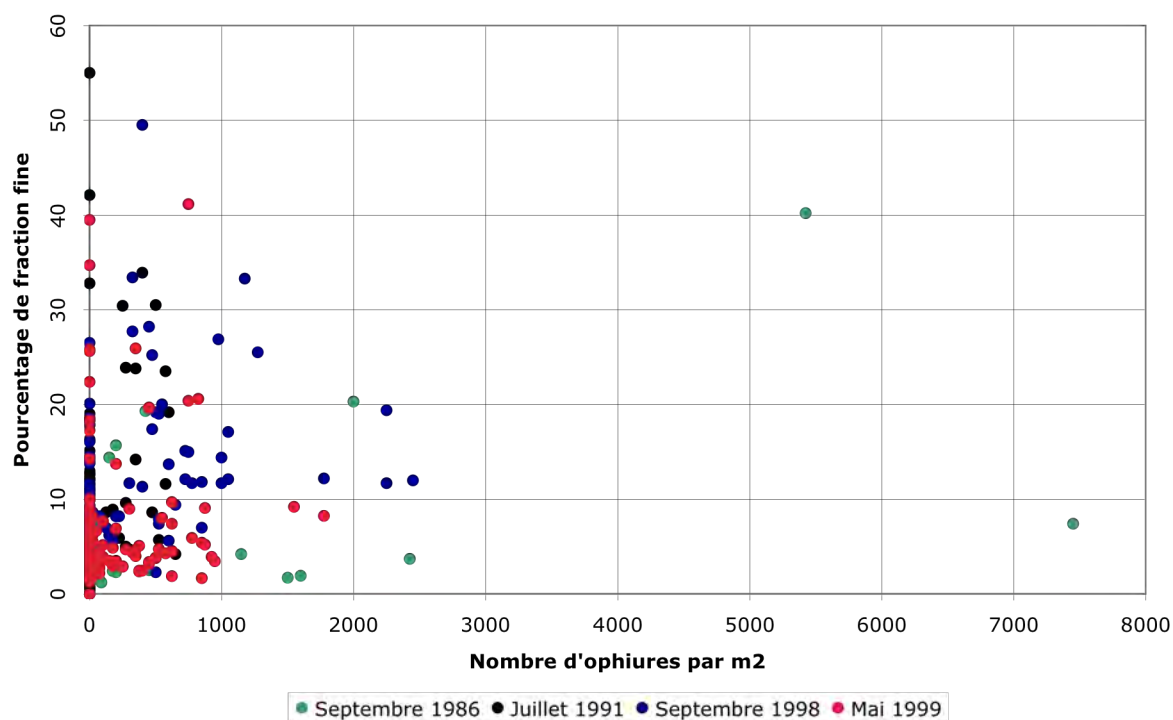


Figure 39 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m² (ensemble de la baie de Seine et zone d'Antifer).

Le taux de fraction fine varie entre environ 1 % et plus de 55 %. La majorité des échantillons analysés comporte moins de 20 % de fraction fine. Les teneurs supérieures à 30 % sont relativement rares. Pour toute la gamme des teneurs en fraction fine, il est possible de trouver des échantillons pour lesquels les ophiures sont absentes. Les faciès vaseux ne sont donc pas systématiquement associés à la présence d'ophiures. Cependant, la proportion d'échantillons associés à des populations d'ophiures augmente avec le pourcentage de fraction fine (Tab. 23). Pour les sédiments contenant moins de 5 % de fraction fine, seuls 19 % des échantillons sont associés à des ophiures. Ce pourcentage augmente jusqu'à atteindre 75 % des échantillons quant le taux de fraction fine dépasse 20 %. Au-delà de ce taux, il se stabilise aux environs de 70 %.

La série de données utilisée dans cette étude montre que les populations d'ophiures sont extrêmement variables dans la zone étudiée avec des valeurs s'étendant de 0 à plus de 7500 individus par m² pour la mission de septembre 1986. Cette dernière valeur est cependant exceptionnelle. Les concentrations maximales sont plutôt de l'ordre de 1500 à 2500 individus par m². En moyenne, elles semblent plus élevées en 1986 puis en 1998 et 2009 et décroissent en 1999. La densité la plus faible est notée en juillet 1991.

La figure 40 présente l'ensemble des données obtenues au cours des différentes missions réalisées entre septembre 1986 et mai 1999. Pour faciliter la lecture du graphique et l'interprétation du jeu de données, seules les stations pour lesquelles la présence d'ophiures a été notée sont prises en compte. Globalement, une augmentation du taux de fraction fine accompagne l'accroissement des densités d'ophiures. Pour des densités inférieures à 250 ind.m⁻², le taux de fraction fine est toujours inférieur à 20 %. A l'autre extrémité de la distribution, les fortes densités d'ophiures (> 2500 ind.m⁻²) sont

caractérisées par de forts taux d'envasement ($> 30\%$).

Fraction fine (%)	Nombre total d'échantillons	Echantillons avec ophiures Nombre	Echantillons avec ophiures Pourcentage
0-5	310	60	19
5-10	137	42	31
10-15	40	18	45
15-20	23	12	52
20-25	8	6	75
25-30	9	6	67
30-35	7	5	71
35-40	1	0	0
40-45	3	2	67
45-50	1	1	100
50-55	1	0	0

Tableau 23 : Nombre et pourcentage d'échantillons de sédiments colonisés par les ophiures en fonction du taux de fraction fine.

La figure 40 présente l'ensemble des données obtenues au cours des différentes missions réalisées entre septembre 1986 et mai 1999. Pour faciliter la lecture du graphique et l'interprétation du jeu de données, seules les stations pour lesquelles la présence d'ophiures a été notée sont prises en compte. Globalement, une augmentation du taux de fraction fine accompagne l'accroissement des densités d'ophiures. Pour des densités inférieures à 250 ind.m^{-2} , le taux de fraction fine est toujours inférieur à 20% . A l'autre extrémité de la distribution, les fortes densités d'ophiures ($> 2500 \text{ ind.m}^{-2}$) sont caractérisées par de forts taux d'envasement ($> 30\%$).

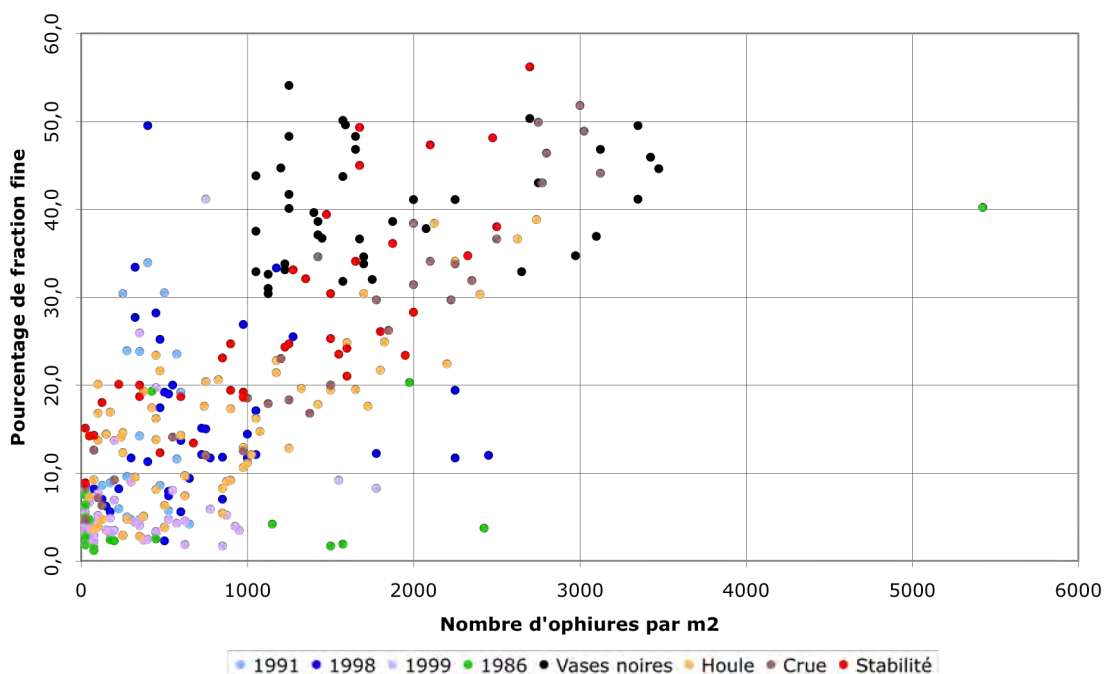


Figure 40 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m² (détail).

L'affinement de l'analyse nécessite de séparer les jeux de données en fonction de la date des missions. Dans ce rapport, nous avons choisi de présenter les missions dont les caractéristiques environnementales sont les plus marquées (crue, houle, stabilité) et le faciès sédimentaire particulier des « vases noires ».

III.1 En période de crue

En période de crue (Fig. 41), le nombre d'ophiures par m² augmente linéairement avec le taux de fraction fine ($r^2 = 0,91$). Les taux de fraction fine les plus faibles correspondent à des densités inférieures à 25 ind.m⁻². A l'opposé, les taux de fraction fine les plus élevés (50 %) sont associés à des densités légèrement supérieures 3000 ophiures par m².

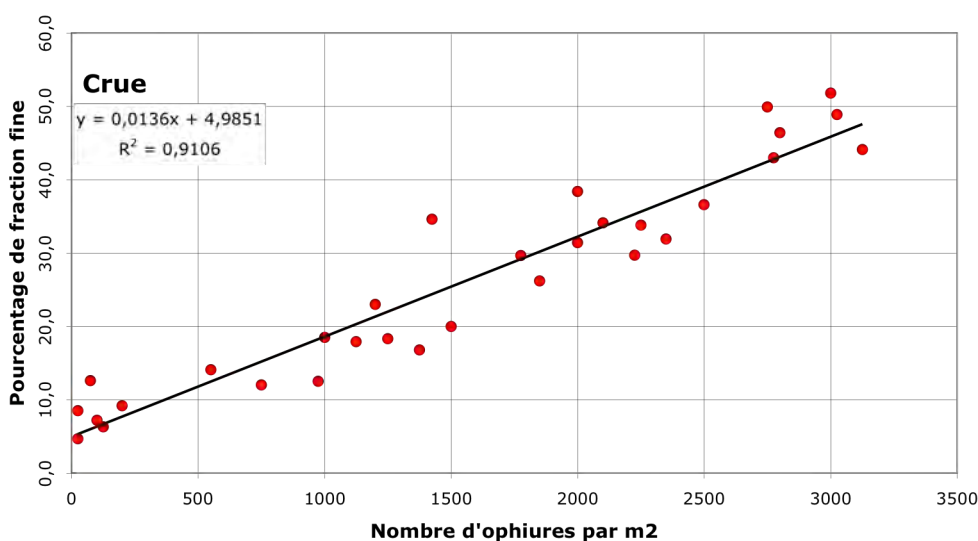


Figure 41 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m² en fonction des forçages environnementaux (Crue de la Seine).

L'analyse du jeu de données amène donc à penser que, pour la zone prise en compte, les ophiures sont responsables de l'envasement du sédiment. Cet envasement pourrait être lié :

- Au mode d'alimentation des ophiures qui au moyen de leurs bras collectent les particules en suspension. Ces particules sont ensuite rejetées sous forme de fèces. Ces dernières constituent des pelotes millimétriques faiblement consolidées et emballées dans une trame de mucus.
- A l'impact physique de la population d'ophiures à l'interface eau-sédiment. Si l'on considère une taille moyenne d'environ 8 cm pour une ophiure, la surface occupée par cette ophiure correspond à 0,02 m². Mises côte à côte, 900 ophiures occupent donc une superficie très largement supérieure au m². On peut alors penser que les ophiures présentes à l'interface sont fortement enchevêtrées, voire dans certains cas superposées. Cette disposition semble favoriser le

freinage de la couche limite de fond et par là même la sédimentation mécanique des particules les plus fines transitant au sein d'un néphéloïde benthique.

Dans les deux cas, l'envasement est proportionnel à la densité de la population.

III.2 Après une forte tempête

Le jeu de données caractéristique d'un fort remaniement des fonds marins ($H_{mo} > 4$ m, $Z = 30$ m) montre une corrélation beaucoup moins forte ($r^2 = 0,58$) entre le taux de fraction fine et la densité des populations d'ophiures.

Les faibles densités d'ophiures (< 50 oph.m⁻²) ont disparu. Ensuite, et jusqu'à 1000 oph/m², le pourcentage de fraction fine est très variable (3-24 %), et ce pour des densités d'ophiures équivalentes (Fig. 42). Au-delà d'une densité de 1000 oph.m⁻², le taux de fraction fine augmente avec le nombre d'ophiures par m² jusqu'à des densités d'environ 3000 ophiures par m² pour 40% de fraction fine. La même densité d'ophiures correspond à un envasement plus faible que pour la situation de « crue ».

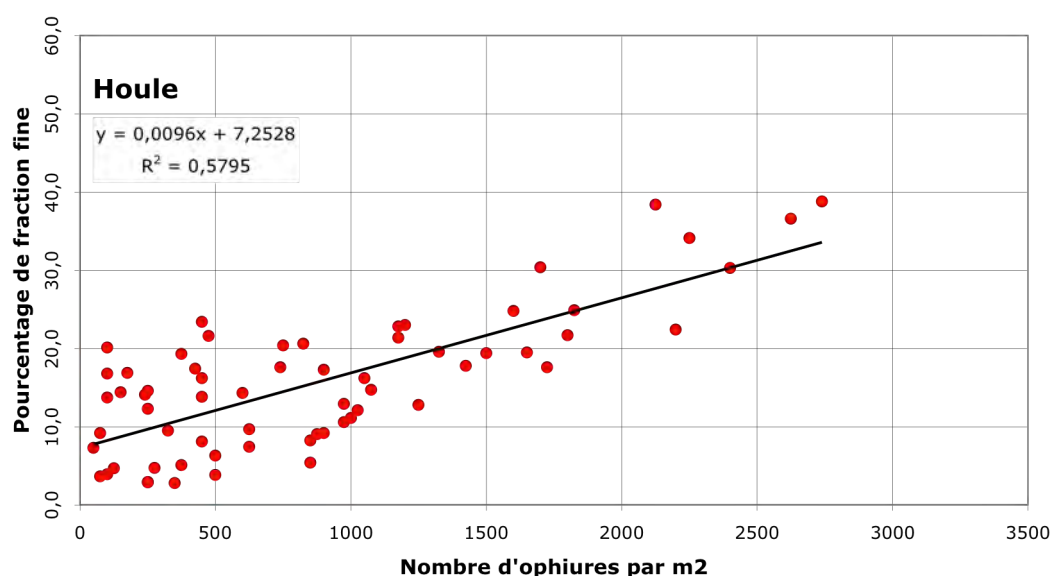


Figure 42 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m2 en fonction des forçages environnementaux (forte houle).

L'analyse du jeu de données permet de mettre clairement en évidence l'interaction entre la houle, les populations d'ophiures et le pourcentage de fraction fine contenu dans le sédiment.

Pour les faibles densités, la houle est responsable de l'élimination de la population d'ophiures. A partir d'une densité de 50 oph.m⁻², la population d'ophiures présente une meilleure résistance à l'action de la houle mais celle-ci est cependant responsable d'une intense dispersion à l'interface eau-sédiment. Au delà de 1000 oph.m⁻², la houle ne semble pas agir sur la densité de la population d'ophiures. On note cependant une légère diminution du taux maximal de fraction fine (39 % au lieu de 52 % en situation de crue). Les fortes densités d'ophiures n'empêchent pas une érosion du

sédiment sous-jacent mais la limite fortement. Cette observation rejoint celle de Méar et al. (2006) qui, pour cette région de la baie de Seine orientale, a montré que lorsque les sédiments fortement envasés perdent sous l'action de phénomènes érosifs jusqu'à 50 % de leur fraction fine, les mêmes sédiments recouverts par une forte population d'ophiures, ne perdent que 10 à 15 % de leur fraction fine.

III.3 En période de stabilité

Le jeu de données représentatif d'une période de stabilité (sans crue ni tempête depuis une longue période de temps) présente comme la situation de crue une augmentation du taux de fraction fine avec les densités des populations d'ophiures. Les deux droites de corrélation linéaire sont globalement parallèles avec un enrichissement d'environ 5 % du taux de fraction fine pour la situation de stabilité. Cependant, le coefficient de corrélation linéaire de ce jeu de données n'est que de 0,66 (Fig.41 et Fig. 43). Ce coefficient traduit la dispersion du jeu de données pour des densités d'ophiures supérieures à environ 1500 oph.m⁻².

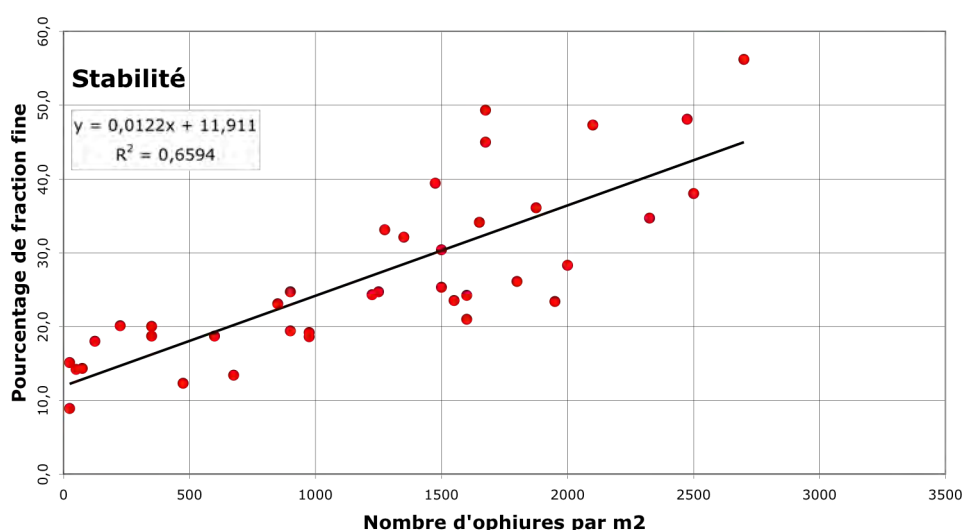


Figure 43 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m² en fonction des forçages environnementaux (Stabilité).

En période de stabilité, l'envasement dépend du nombre d'ophiures à l'interface eau-sédiment. Pour une même densité d'ophiures par m², l'envasement est plus important en période de stabilité qu'en période de crue. La comparaison avec la situation de crue permet donc de conclure que ce n'est pas la quantité de matière amenée sur le site qui est le facteur essentiel quant à l'envasement du sédiment mais plutôt la durée de stabilité des populations d'ophiures.

III.4 Le faciès sédimentaire des « vases noires »

Les vases noires sont fortement indurées, et développent une dégradation de la matière organique par sulfato-réduction bactérienne liée à un phénomène d'anoxie. Aucune densité inférieure à 1000 ophiures par m² n'est retrouvée (Fig. 44). De même, le taux de fraction fine est toujours supérieur à 30 %. Aucune corrélation linéaire ne peut

être mise en évidence ($R^2 = 0,07$). Pour les densités d'ophiures les plus importantes (> 2000), les données sont proches de celles qui sont caractéristiques de la période de crue et de la période de stabilité. Pour les densités d'ophiures plus faibles (de 1000 à 2000 oph.m⁻²), ce faciès de vases noires possède un taux de fraction fine beaucoup plus élevé que dans les autres situations.

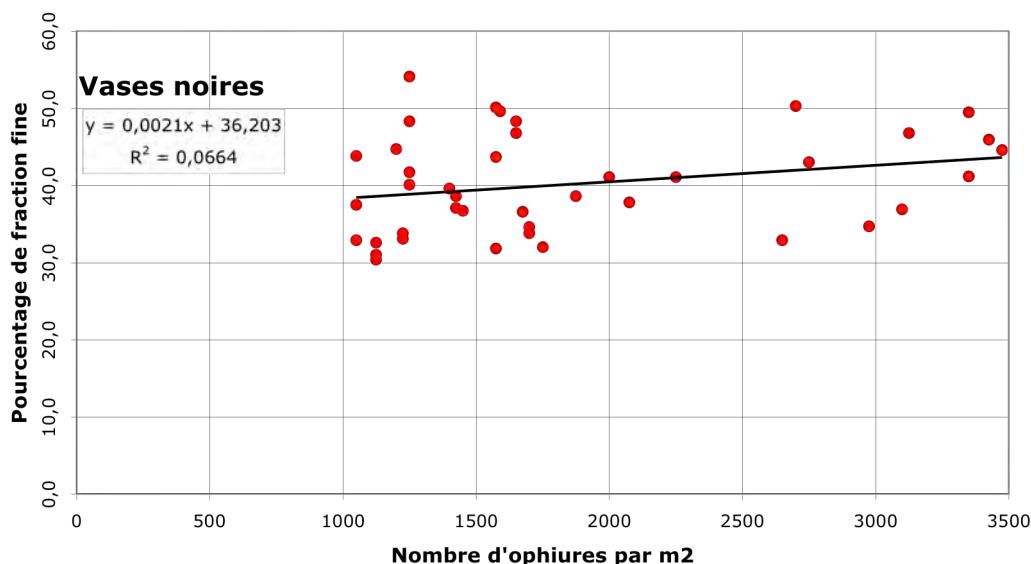


Figure 44 : Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m2 pour le faciès spécifique des vases noires.

Pour les vases noires, ni le taux de fraction fine, ni la densité maximale d'ophiures par m² n'apparaissent comme une spécificité. L'anoxie qui se développe dans ce faciès ne peut donc être seulement imputable à l'envasement et/ou à l'isolement du sédiment de la colonne d'eau par un tapis important d'ophiures. Pour approfondir les raisons de la mise en place et du développement de ce faciès à vases noires, il est nécessaire d'étudier des paramètres géochimiques tels que le Taux de Carbone Organique Total (COT) et le Soufre Total (ST).

IV. Relations entre COT, ST et populations d'ophiures

L'étude des relations entre la densité des populations d'ophiures, la teneur en Carbone Organique Total (COT) et en Soufre Total (ST) a été réalisée pour les 4 jeux de données respectivement caractéristiques d'une période de stabilité environnementale, de forte crue, d'une tempête et des dépôts de « vases noires » (Fig. 45, 46). Les analyses par mesure infrarouge (LECO CS 300) ont porté sur la fraction fine du sédiment, c'est-à-dire sur la fraction inférieure à 63 µm.

Pour les deux situations « Houle » et « Crue », quelle que soit la densité des populations d'ophiures, les gammes de COT et ST sont constantes. Pour la situation de houle, elle varie de 0,7 à 1,7 % pour le COT et de 0,05 % à 0,30 % pour le ST. Pour la situation de crue, elle varie de 1,5 à 2,0 % pour le COT et de 0,10 % à 0,35 % pour le ST.

Les fortes houles ont permis une réoxygénation de la partie supérieure du sédiment et donc une dégradation poussée de la matière organique par des bactéries aérobies d'où des valeurs faibles de COT et de ST quel que soit le nombre d'ophiures. Il n'y a pas de sulfato-réduction.

En période de crue, l'apport important de suspensions comportant de la matière organique peut expliquer l'homogénéité du COT pour la zone étudiée et ceci quel que soit également le nombre d'ophiures. Un début de sulfato-réduction ($ST = 0,35 \%$) ne se développe que pour les très fortes densités d'ophiures ($> 2500 \text{ ind.m}^{-2}$).

Dans ces deux situations, le COT reflète l'événement instantané et le nombre d'ophiures au m^2 ne l'influence pas.

Pour la période de « Stabilité », le COT augmente globalement avec le nombre d'ophiures au m^2 . Dans un premier groupe de points (densité d'ophiures inférieure à 1500 ind.m^{-2}), le ST reste inférieur à $0,35 \%$ et le COT varie entre $1,5 \%$ et $2,0 \%$. A l'intérieur de ce groupe de points, le COT augmente avec le nombre d'ophiures tandis que le ST n'augmente pas mais présente des fluctuations notables entre $0,20 \%$ et $0,35 \%$. Dans le deuxième groupe de points (i.e. $> 1500 \text{ ind.m}^{-2}$), le COT et le ST augmentent avec la densité de la population d'ophiures pour atteindre, au maximum, $2,5 \%$ de COT et $0,50 \%$ de ST.

Dans cette situation de stabilité, le système n'a pas subi de perturbations événementielles (crue, houle) depuis longtemps. Cette stabilité a permis à la population d'ophiures d'influencer son environnement. Quand la densité d'ophiures augmente, le COT et le TF^2 augmentent en parallèle. Cette augmentation du COT pourrait être liée aux rejets des ophiures (augmentation des fèces avec le nombre d'individus), à l'épaisseur de la couche d'ophiures qui limiterait la concentration en oxygène dissous au-dessus du sédiment ou, indirectement, à la diminution de la porosité des dépôts liés à l'envasement qui aurait le même effet. Ces trois processus aboutiraient à une insuffisance de la quantité d'oxygène dissous disponible pour oxyder la matière organique (bactérie aérobie) et au développement de la sulfato-réduction (bactéries sulfato-réductrices), d'où une augmentation du COT et du ST.

Pour le faciès sédimentaire des « vases noires », le COT augmente avec le nombre d'ophiures. Le pourcentage de ST dans le sédiment est indépendant de la densité d'ophiures. Les teneurs varient entre $2,0 \%$ pour 1000 oph/m^2 jusqu'à $3,0 \%$ pour 3500 oph/m^2 . Le pourcentage de Soufre Total varie de $0,45 \%$ à $1,20 \%$. Ce faciès, le plus riche en Soufre Total constitue le faciès où la sulfato-réduction est la plus développée.

En conclusion, les sédiments caractéristiques de la situation de « Crue » sont représentatifs des apports en suspension issus de la Seine. La situation « Houle » modifie ces apports en provoquant une dégradation accélérée de la matière organique. La situation de « Stabilité » reflète l'influence des populations d'ophiures qui se développent à l'interface. Ces populations sont à l'origine d'une augmentation de l'envasement et de la quantité de matière organique transférée au sédiment. Les dépôts de type « vases noires » constituent l'évolution ultime de l'envasement et de l'enrichissement en matière organique à l'interface eau-sédiment en baie de Seine Orientale. Cette situation ne peut résulter que d'une stabilité temporelle importante des populations d'ophiures.

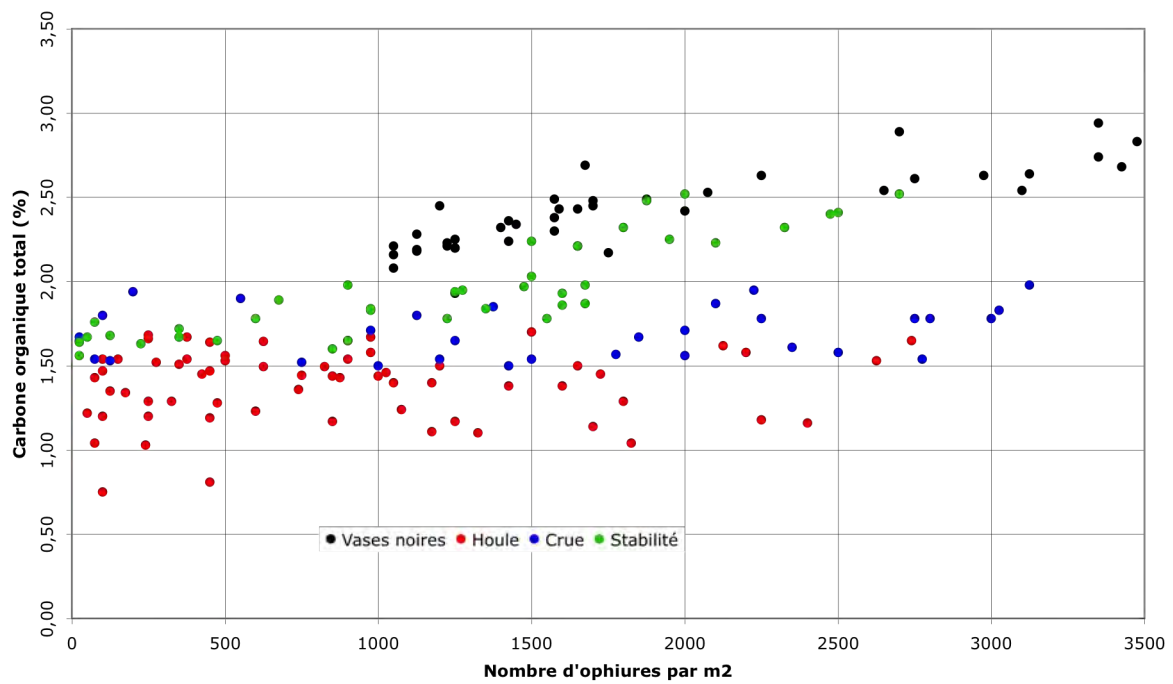


Figure 45 : Relation entre carbone organique total et nombre d'ophiures par m².

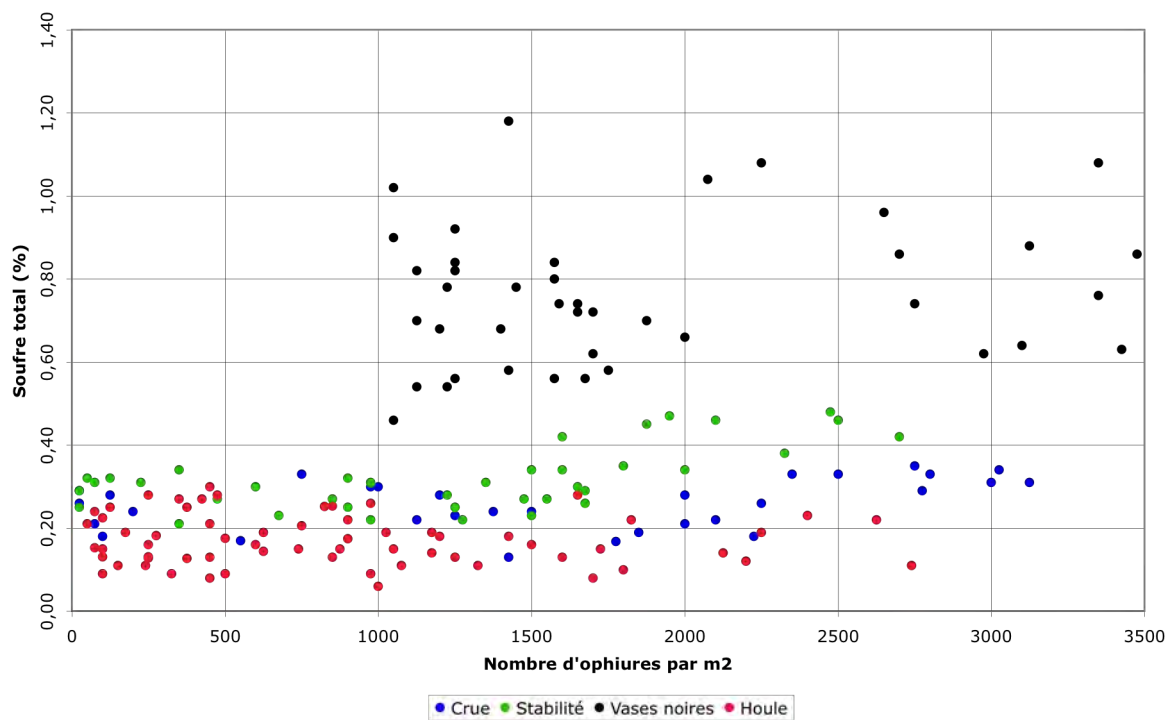


Figure 46 : Relation entre soufre total et nombre d'ophiures par m².

V. Conclusion

Les résultats présentés permettent de dresser un scénario pour l'évolution des fonds marins situés au large du port d'Antifer. Dans cette zone, les sédiments sont essentiellement constitués par des sables fins contenant une fraction plus ou moins importante de graviers voire de galets (Fig. 47).



Figure 47 : Exemple type de sédiments prélevés au large du port d'Antifer.

Sur ces sédiments grossiers, les crues de la Seine sont responsables d'un envasement qui reste majoritairement superficiel. Cependant, sous l'action des agents hydrodynamiques, une partie non négligeable de ces sédiments fins arrive à « percoler » dans la matrice plus grossière.

Lorsque une population d'ophiures s'implante sur ce substrat, l'envasement augmente progressivement (Fig. 48).



Figure 48 : Envasement progressif des fonds marins par les ophiures.

Les agents hydrodynamiques ont alors une moindre emprise sur le sédiment. Les vases apparaissent plus compactées et les ophiures constituent un obstacle très efficace pour empêcher l'érosion des particules sédimentaires. Progressivement le taux de

fraction fine piégée à l'interface eau-sédiment augmente. Cet envasement est accompagné par une accumulation de matières organiques liées aux apports marins, continentaux et à la production locale. Le faciès sédimentaire se caractérise par une profonde couleur noire (Fig. 49).



Figure 49 : En vasement progressif des fonds à ophiures s'accompagne d'un profond changement de couleur (beige -> noire).

Ce n'est que lorsque les agents hydrodynamiques sont très puissants (tempête avec forte houle accompagnée d'une vive eau) que l'ensemble population d'ophiures et couverture sédimentaire superficielle est remaniée (Fig. 50). Dans ce cas, des nodules de vases indurée (de couleur beige et /ou noire) sont pris dans la matrice sédimentaire. Le nombre d'ophiures par m² diminue drastiquement (Fig. 50) et peut même disparaître. La figure 51 présente un prélèvement où les ophiures ont été éliminées et où, sur des vases noires compactes, se sont déposées des vases beiges très liquides. Ces vases se sont déposées après une forte crue et caractérisent donc ce type d'apport. Leur prélèvement par benne Shipek est complexe du fait du contraste de cohésion entre les 2 types de vases.



Figure 50 : Remaniement des fonds à ophiures par une forte houle conjuguée à une vive eau.



Figure 51 : Sédiment fin accumulés dans les zones à ophiures après ablation de la population d'ophiures et dépôt d'une vase liquide oxydée.

L'ensemble de nos observations portant sur l'évolution de la nature et de la qualité des fonds marins situés au large d'Antifer peuvent être résumé par le modèle présenté à la figure 52.

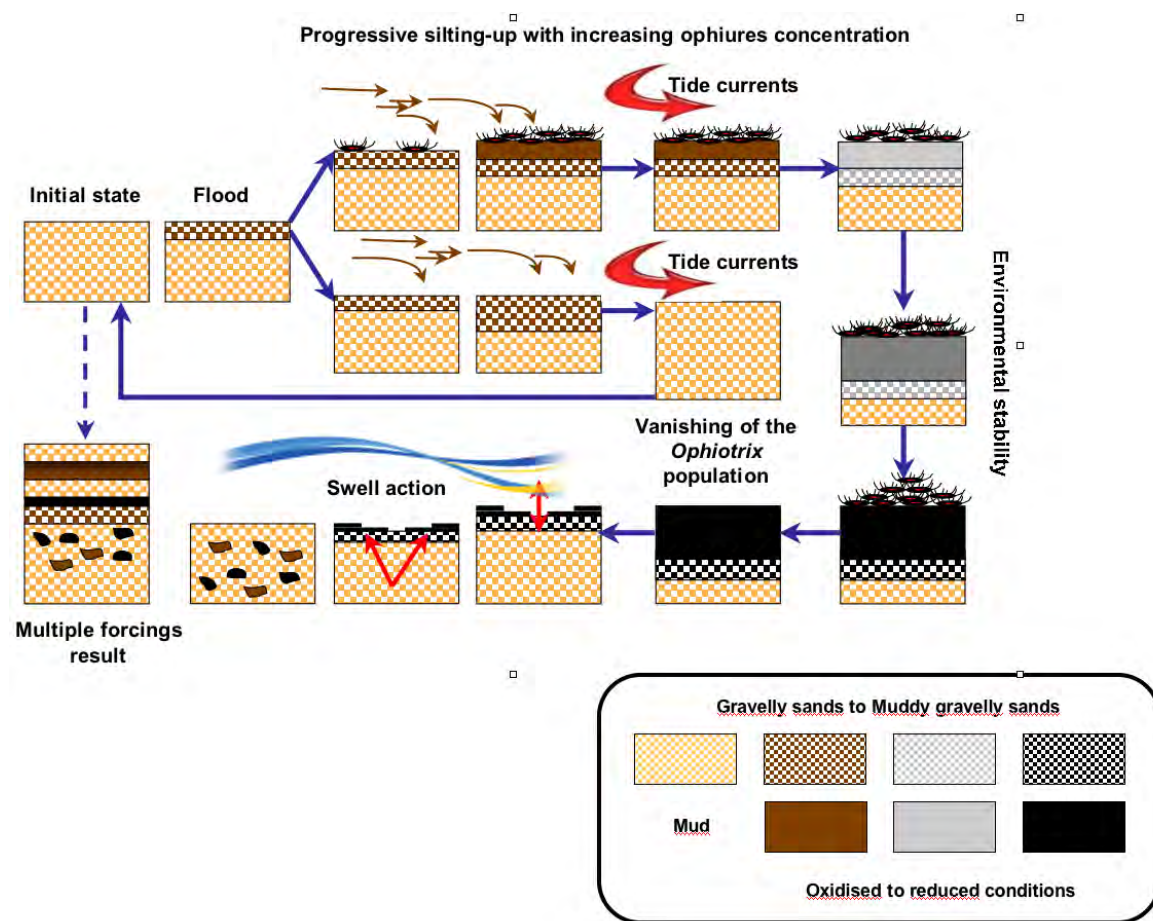


Figure 52 : Modèle d'évolution des fonds de la baie de Seine sous la quadruple action des apports fluviaux de la Seine, des courants de marée, de la houle et d'une forte population d'ophiures .