



## BILAN D'ACTIVITE DU PROJET RIN EMERGENT

# ECUSED

Effets **CU**mulés des activités humaines en mer sur les fonds  
**SED**imentaires : apports de la géochimie et des géostatistiques

(1/12/2021 – 30/11/2023)



UNIVERSITÉ  
CAEN  
NORMANDIE

le cnam  
intechmer



## Sommaire

<b>I.</b>	<b>PRESENTATION DU PROJET .....</b>	<b>9</b>
<b>II.</b>	<b>LABORATOIRES ET PERSONNELS IMPLIQUES DANS LE PROJET .....</b>	<b>9</b>
<b>III.</b>	<b>MISE EN ŒUVRE DU PROJET .....</b>	<b>11</b>
III.1.	ÉTUDE EN MILIEU NATUREL .....	11
III.2.	ÉTUDE EN MILIEU CONTROLE .....	14
<b>IV.</b>	<b>PRINCIPAUX RESULTATS .....</b>	<b>16</b>
IV.1.	ÉTUDE EN MILIEU NATUREL .....	16
IV.2.	ÉTUDE EN MILIEU CONTROLE .....	26
<b>V.</b>	<b>COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES ET AUX PROFESSIONNELS - PROSPECTIVE.....</b>	<b>33</b>
V.1.	COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES ET AUX PROFESSIONNELS .....	33
V.2.	PROSPECTIVE.....	34



UNIVERSITÉ  
CAEN  
NORMANDIE

le cnam  
intechmer



## Liste des figures

Figure 1 : Positions en Baie de Seine, du site d'extraction de granulats GMH, des sites de dépôt de dragage d'Octeville et du Machu et des zones de l'estuaire qui sont dragués soit par le GPMR (Machu) soit par le GPMH (Octeville). Le rectangle rouge est la zone d'étude retenue. ....	11
Figure 2 : Carte bathymétrique de la zone étudiée, position des zones d'activité anthropiques et des stations échantillonnées.....	13
Figure 3 : Plan du canal à courant du laboratoire M2C (vue plan et vue en coupe). ....	14
Figure 4 : Vue en coupe du canal à courant du M2C avec la disposition initiale utilisée pour chaque expérience. ....	16
Figure 5 : Projection des variables/paramètres dans le plan 1-2 de l'ACP. ....	17
Figure 6 : Projection des individus/fractions dans le plan 1-2 de l'ACP. Chaque fraction est représentée dans une couleur spécifique, la légende indique la valeur en microns de la limite inférieure de la fraction granulométrique, F pour $< 50 \mu\text{m}$ .....	18
Figure 7 : Projection des individus/fractions dans le plan 1-2 de l'ACP, les individus n'apparaissent plus, pour chaque fraction est tracé le pourtour du nuage des échantillons. ....	19
Figure 8 : Variabilité de la moyenne granulométrique du site étudié. La moyenne est exprimée en unité phi. Les flèches indiquent la direction de l'affinement granulométrique. La ligne rouge correspond à la zone de divergence des vecteurs.....	20
Figure 9 : Variabilité des concentrations en Ca et Sr, par fraction granulométrique (en $\mu\text{m}$ ). Les origines craies et coquilles sont également représentées.....	21
Figure 10 : Variabilité géographique de la quantité de carbonates (Ca) en ppm et de la qualité de ces carbonates (Sr/Ca*1000) pour la fraction 315-400 microns. ....	21
Figure 11 : Variabilité géographique de la quantité de carbonates (Ca) en ppm et de la qualité de ces carbonates (Sr/Ca*1000) pour la fraction 100-125 microns. ....	22
Figure 12 : Variabilité géographique de la quantité de carbonates (Ca) en ppm et de la qualité de ces carbonates (Sr/Ca*1000) pour la fraction $< 50$ microns. ....	23
Figure 13 : Variabilité géographique de la quantité de matière organique (COT) en % et de la qualité de cette MO (BrOrg/COT) pour la fraction $< 50$ microns. ....	24
Figure 14 : Variabilité géographique de la quantité de glauconite (As) pour les fractions 630-800 microns, 315-400 microns, 250-315 microns et 200-250 microns. ....	25
Figure 15 : Évolution des paramètres granulométriques à travers 4 paramètres statistiques calculés pour chaque jeu de donnée de la série G : moyenne, écart-type, régression linéaire, et coefficient de Spearman. Les valeurs moyennes sont affichées en échelle phi.....	27
Figure 16 : Évolution des paramètres granulométriques à travers 4 paramètres statistiques calculés pour chaque jeu de donnée de la série H : moyenne, écart-type, régression linéaire, et coefficient de Spearman. Les valeurs moyennes sont affichées en échelle phi.....	28
Figure 17 : Évolution du rapport Si/Ca à travers 4 paramètres statistiques calculés pour chaque jeu de donnée de la série H : moyenne, écart-type, régression linéaire, et coefficient de Spearman. Les différentes couleurs de courbe indiquent la durée de l'expérience. ....	29
Figure 18 : Taux de validation pour chaque cas GSTA en fonction de la distance caractéristique dans l'expérience G1 (vitesse du courant = $23 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). CD : distance caractéristique. ....	30
Figure 19 : Taux de validation pour chaque cas GSTA en fonction de la distance caractéristique dans l'expérience H3 (vitesse du courant = $29 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). CD : distance caractéristique. ....	31
Figure 20 : Sorties GSTA du cas FB- pour les expériences de la série G à 4 vitesses de courant différentes. Le fond de carte est un différentiel bathymétrique entre le bathymétrie de début et de fin d'expérience. ....	32
Figure 21 : Sorties GSTA du cas CP- pour les expériences de la série H à 4 vitesses de courant différentes. Le fond de carte est un différentiel bathymétrique entre le bathymétrie de début et de fin d'expérience. ....	32



UNIVERSITÉ  
CAEN  
NORMANDIE

le cnam  
intechmer





## Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Récapitulatif des personnes impliquées dans le projet, permanent(e)s et contractuel(le)s.....</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 2 : Caractéristiques granulométriques et géochimiques des matériaux sédimentaires utilisés lors de l'étude en milieu contrôlé. ....</i>	<i>16</i>



## I. Présentation du projet

Le projet ECUSED a porté sur les effets cumulés des activités humaines en mer sur l'état physique des fonds sédimentaires. Plus particulièrement, nous avons considéré l'impact cumulatif des activités d'extraction de granulats marins (concession Granulats Marins du Havre), et d'immersion de sédiments dragués par les Grands Ports Maritimes pour l'entretien des chenaux de navigation (site du MACHU), qui se concentrent au débouché de l'estuaire de la Seine. Les fonds sédimentaires de la baie de Seine orientale représentent des habitats diversifiés pour les organismes benthiques, maillons essentiels des écosystèmes marins, et constituent un stock sédimentaire étroitement lié à la stabilité du trait de côte.

Afin de définir les zones d'influence de chaque activité sur l'environnement naturel, et les éventuelles connexions entre sites, il est nécessaire de caractériser les sources (naturelles et anthropiques) de sédiments et leurs directions de transport à une échelle de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Pour y arriver, une méthodologie innovante, basée sur l'analyse spatialisée de la composition géochimique et de paramètres granulométriques des sédiments, a été développée et utilisée sur le terrain. Elle a permis et permettra l'obtention de cartes de transport sédimentaire par type ou nature de sédiment. En parallèle, une étude en milieu contrôlé (canal à courant) a été menée afin d'affiner les modèles sous-jacents à la méthode de traitement géostatistique. Cette approche apporte une vérité de terrain complémentaire aux modèles numériques prédictifs qui atteignent leurs limites face à l'hétérogénéité des sédiments et à la complexité des forçages hydrodynamiques, caractéristiques de la baie de Seine.

Le projet s'est déroulé du 01/12/2021 au 30/11/2023. La rédaction de ce rapport d'activité a été une tâche collective dont les principaux auteurs sont A. Murat, P. Weill, L. Pancrazzi, C. Mensens et Y. Méar.

## II. Laboratoires et personnels impliqués dans le projet

Deux laboratoires de l'Université de Caen-Normandie ont collaboré sur ce projet : LUSAC Cnam/Intechmer (Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg) et M2C (Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière). Anne Murat du LUSAC Cnam/Intechmer a coordonné le projet et été la responsable scientifique de l'étude en milieu naturel, Pierre Weill était le responsable scientifique de l'étude en milieu contrôlé. Des experts des laboratoires M2C Rouen (S. Le Bot) et LOMC, Le Havre (F. Marin) ont été associés au projet.

Neuf tâches ont été menées à bien dans le cadre du projet :

- (1) Campagne de prélèvement en mer
- (2) Essais en canal
- (3) Prétraitement des échantillons
- (4) Séparation des fractions granulométriques
- (5) Analyses géochimiques

- (6) Fonctions de transfert
- (7) Traitement des données/Infographies
- (8) Interprétations et communications scientifiques
- (9) Communication aux partenaires industriels

Les tâches 1, 4, et 5 se rapportent à l'étude en milieu naturel, les tâches 2 et 6 à l'étude en milieu contrôlé. Les tâches 3, 7, 8 et 9 sont communes. Le tableau ci-dessous reprend la liste des participants et leur rôle dans les différentes tâches.

Tableau 1 : Récapitulatif des personnes impliquées dans le projet, permanent(e)s et contractuel(le)s

Etablissement porteur	Labo / Unité	Nom	Prénom	Position actuelle	Rôle & responsabilités dans le projet (tâches listées fig. 2)	Implication sur la durée du projet (pers.mois)
Univ. Caen-Normandie	LUSAC	MURAT	Anne	MCF	Coordinateur scientifique Tâches 3, 5, 7, 8, 9 et 10	8
Univ. Caen-Normandie	M2C	WEILL	Pierre	MCF	Responsable scientifique Tâches 2, 6, 8, 9 et 10	6
Univ. Caen-Normandie	LUSAC	GREGOIRE	Gwendoline	MCF	Sédimentologie, géochimie Tâches 1, 3, 5, 7 et 8	5
Univ. Caen-Normandie	LUSAC	MEAR	Yann	PR	Sédimentologie – Tâches 1, 6, 7 et 8	4
Univ. Caen-Normandie	LUSAC	POIZOT	Emmanuel	IE	Géomatique, traitement des données – Tâches 1, 6, 7 et 8	4
Univ. Caen-Normandie	M2C	LESOURD	Sandric	MCF	Sédimentologie – Tâches 1, 4 et 8	4
Univ. Caen-Normandie	M2C	LEGRAIN	Magalie	Tech.	Sédimentologie – Tâche 4	5
Univ. Caen-Normandie	M2C	PEZY	Jean-Philippe	CR CNRS	Écologue – Tâches 1, 8 et 10	1
Univ. Havre-Normandie	LOMC	MARIN	François	PR	Transport sédimentaire – Tâches 2, 8 et 9	2
Univ. Rouen-Normandie	M2C	LE BOT	Sophie	MCF	Sédimentologie – Tâches 8 et 9	2
Univ. Caen-Normandie	M2C	MENSENS	Christoph	IR	Coordinateur GIS ECUME – Tâches 8, 9 et 10	0,5
Univ. Caen-Normandie	LUSAC	Contractuel non identifié		AI	Sédimentologie, géochimie – Tâches 3, et 5	9
Univ. Caen-Normandie	LUSAC / M2C	Contractuel non identifié		IR	Sédimentologie, géochimie – Tâches 5, 6, 7 et 8	12

AI : Assistant Ingénieur, CR : Chargé de Recherche, IE : Ingénieur d'études, IR : Ingénieur de recherche, MCF : Maître de conférences, PR : Professeur, Tech : Technicien de laboratoire.

Valentin Le Goff a été recruté comme Assistant Ingénieur (AI) pour l'étude en milieu naturel (Tâches 2, 3 et 5), il a également participé aux tâches 7 et 8. Il a démissionné un peu plus d'un mois avant la fin de son contrat et Florian Haitz a été recruté pour terminer les analyses géochimiques (Tâche 5). Léo Pancrazzi a été recruté comme Ingénieur de Recherche (IR) pour assurer l'étude en milieu contrôlé (Tâches 2, 3, 6, 7, 8 et 9).

### III. Mise en œuvre du projet

#### III.1. Etude en milieu naturel

L'objectif principal de l'étude en milieu naturel était de démontrer l'intérêt la méthodologie ELSA (ELemental Sediment fractions Analysis) associée à une grille régulière de prélèvement permettant l'application de traitements de données spatialisées, pour identifier les impacts anthropiques.

La zone d'étude a été choisie parce que deux activités anthropiques différentes s'y exerçaient à seulement 4 km de distance, elle se situe en Baie de Seine au large de l'estuaire de la Seine (Fig. 1).

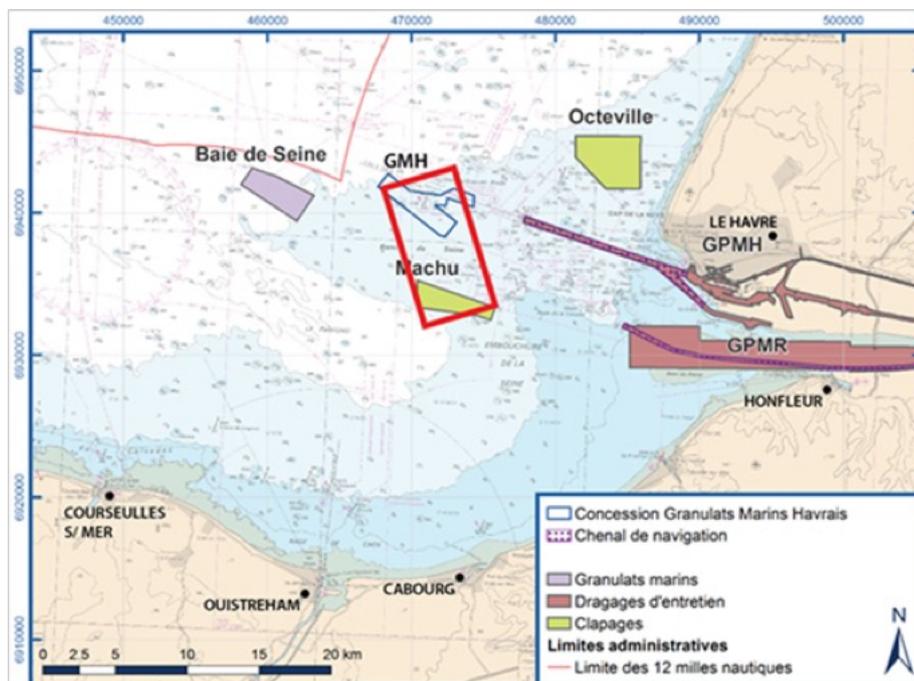


Figure 1 : Positions en Baie de Seine, du site d'extraction de granulats GMH, des sites de dépôt de dragage d'Octeville et du Machu et des zones de l'estuaire qui sont dragués soit par le GPMR (Machu) soit par le GPMH (Octeville). Le rectangle rouge est la zone d'étude retenue.

La superficie de la zone étudiée est de 43 km<sup>2</sup>, la concession de Granulats Marins du Havre (GMH) est située dans la partie nord, leur activité débutait au moment de la mission en avril 2022 (environ 3 mois d'activité). Il est prévu des prélèvements de l'ordre de 10 000 à 50 000 m<sup>3</sup> a<sup>-1</sup>. La zone de dépôt de dragage du Machu occupe le sud de la zone étudiée sur la bordure sud du banc de Seine. Elle est constituée de 6 séries de casiers (A à F) utilisées successivement sur environ 10 ans. Chaque série est utilisée pendant 2 à 3 ans, les dépôts s'accumulent sur plusieurs mètres d'épaisseur et est ensuite abandonnée. Au moment de la mission, la série F avait été employée de 2017 à 2019 puis délaissée. La série de casiers C était en activité depuis 2020. Les sédiments déposés proviennent de dragages opérés par le Grand Port Maritime de Rouen (GPMR) qui gère la navigation maritime de l'estuaire marin de la Seine jusqu'au port de Rouen, les dépôts sont de 5 millions m<sup>3</sup> a<sup>-1</sup>.

Nous avons développé une nouvelle méthodologie qui couple tamisage et géochimie élémentaire, pour l'étude de l'origine, des sources et de la dynamique des particules sédimentaires en milieu côtier : ELSA (Elemental composition of Sediment frActions). Le plus souvent, l'utilisation de la géochimie pour tracer les sources des particules s'effectue sur sédiment total. En milieu côtier, les résultats obtenus peuvent être difficiles à interpréter en termes de sources car ils sont dépendants de la variabilité granulométrique des échantillons qui reflète les conditions d'énergie du milieu. L'analyse des fractions granulométriques permet de s'abstraire de la variabilité granulométrique et d'avoir accès à la variabilité géographique de la composition des grains de même taille, c'est-à-dire aux sources de ces grains. Nous utilisons le terme « origine » pour désigner les conditions de formation des particules : quartz des granites ou carbonates de calcium issus de la production biogène marine actuelle, et le terme « source » pour désigner un lieu précis dans la zone étudiée. Géographiquement comparée, la composition d'une seule fraction informe des sources des différents types de grains et des relations qui existent ou pas entre les différentes zones (gradient de mélange entre deux sources par exemple), on obtient alors des informations sur la dynamique de transport de ces grains. Certains éléments permettent à eux seuls de quantifier une matrice (comme le calcium Ca pour les carbonates ou le silicium Si pour les silicates). Si deux éléments appartiennent à la même matrice, ils sont covariants à travers les différentes classes granulométriques et l'espace géographique. Si la matrice considérée n'a qu'une seule origine, la corrélation sera parfaite ( $r = 1$ ). Si cependant, plusieurs origines de grains de même matrice existent dans l'échantillon, la corrélation sera moins forte, chaque origine aura sa propre valeur du rapport entre les deux éléments et il sera possible de les distinguer par la valeur de ce rapport. Par exemple, pour les carbonates, il est possible d'utiliser le couple Ca – Sr. Le strontium Sr est un élément qui a une géochimie très proche de celle du Ca, il est comme lui un quantificateur potentiel des carbonates, mais est plus lourd et plus rare que lui. Le rapport Sr/Ca, permet l'identification de carbonates d'origines différentes. Il est donc possible d'identifier et de quantifier un type de grain particulier et de tracer l'évolution de ce type de particule à travers le spectre granulométrique et dans l'espace géographique au cours du transport.

Pour l'étude en milieu naturel, une mission de prélèvement de sédiments en mer était nécessaire. Une demande de campagne a été déposée à la FOF (Flotte Océanographique Française) en parallèle à la demande de financement RIN Emergent en janvier 2021. Elle a été bien évaluée par la commission nationale et nous avons obtenu le nombre de jours nécessaires pour sa réalisation. La campagne a eu lieu du 21 au 29 avril 2022 à bord du N/O Côtes de la Manche. Elle a permis de prélever du sédiment en 114 stations (Fig. 2).

Le plan d'échantillonnage est un point important de l'étude, il doit être organisé selon une grille régulière avec une densité de cet échantillonnage adapté à l'objectif de recherche. Pour le site Ecused, 114 stations sur 43 km<sup>2</sup>, la densité d'échantillonnage a été de 2 stations par km<sup>2</sup>. Cette échelle sera celle de l'interprétation.

Pour chaque station, deux types d'échantillons ont été prélevés (1) des échantillons de 10 à 20 g selon la granulométrie, conservés humides à 5 °C, analysés par granulométrie laser ; au moment de l'analyse, le réplikat est agité avec une solution d'héxaméthaphosphate de sodium et soumis aux ultrasons, l'appareil utilisé est un HORIBA LA- 960 ; au moins deux réplikats sont analysés pour chaque échantillon ; la gamme granulométrique analysée est de 0,011 à 3000 µm (2) des échantillons d'environ 2 kg qui sont congelés au retour de mission puis lyophilisés ; ils ont ensuite été séparés en

trois fractions par tamisage humide effectué à l'eau déminéralisée :  $>2$  mm,  $2$  mm –  $50$   $\mu$ m et  $< 50$   $\mu$ m ; puis la fraction  $2$  mm –  $50$   $\mu$ m a été séparée en 16 fractions par tamisage à sec.

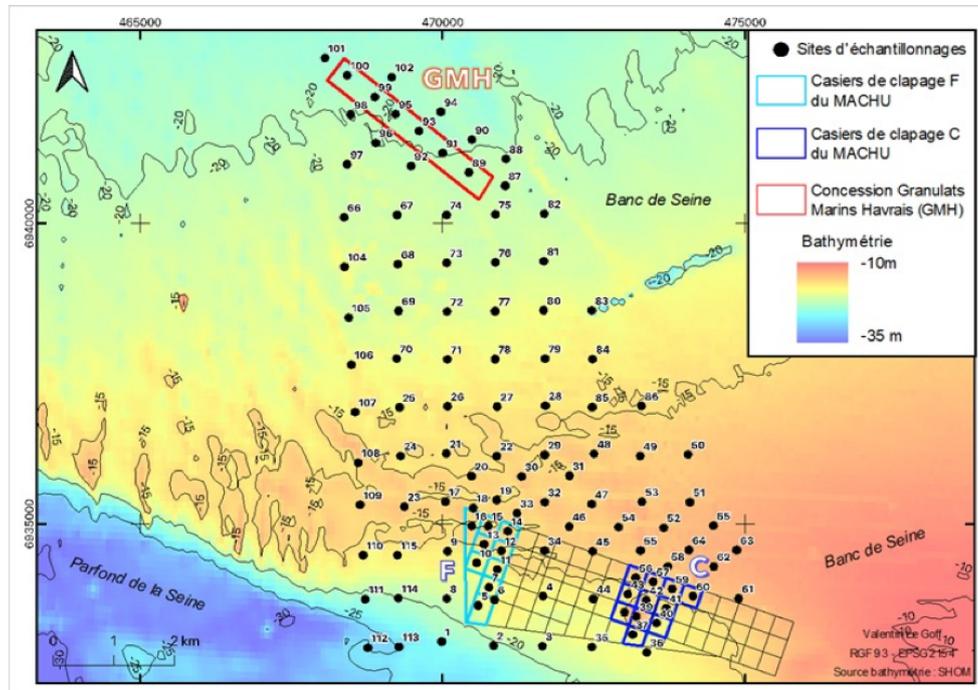


Figure 2 : Carte bathymétrique de la zone étudiée, position des zones d'activité anthropiques et des stations échantillonnées.

La granulométrie laser et le tamisage humide ont été effectués au LUSAC Cnam/Intechmer et la séparation de la fraction  $2$  mm –  $50$   $\mu$ m en sous-fractions à M2C. Chaque fraction  $<2$  mm a été ensuite finement broyée (1 à 5 g, PM400, Retsch, bols et billes en oxyde de zirconium pour broyer efficacement et sans contamination les silicates comme le quartz, matériel existant avant le projet et renouvelé pour les pièces d'usures pendant le projet) et analysée en géochimie au Cnam/Intechmer – LUSAC Cnam/Intechmer. La spectrométrie de fluorescence X permet de doser quantitativement les éléments chimiques (éléments majeurs, mineurs et traces) sur du sédiment sec et finement broyé, elle est performante pour les éléments lourds mais la limite de détection augmente pour les éléments légers. Pour l'appareil que nous avons acquis sur le financement Ecused et utilisé (xSORT, SPECTRO-Ametek), l'élément le plus léger dosable dans les sédiments est l'aluminium Al. La limite de détection pour les éléments les plus lourds (à partir du titane Ti) est de 5 ppm. Le silicium, bien que léger a toujours été dosable dans les sédiments. La masse minimale analysable est de 1 g. La qualité du résultat analytique est dépendant de la matrice. Le constructeur du xSORT le commercialise sous une configuration « geo » avec un traitement de l'information « Enviro-H » qui utilise des échantillons de roche pour sa calibration. Nous avons choisi de compléter cette certification par une calibration post-analyse basée sur une soixantaine d'étalons composés de sédiments prélevés dans les différentes zones dans lesquelles nous avons travaillé en privilégiant la diversité. Ces sédiments ont été analysés par ICP-OES et ICP-MS au SARM (Service d'Analyse des Roches et des Minéraux) de Nancy (non financé par le projet Ecused). Pour l'analyse du carbone organique, effectué uniquement sur la fraction  $<50$   $\mu$ m, le sédiment est décarbonaté avant l'analyse en trois étapes ( $H_3PO_4$ , 1M). L'appareil utilisé pour l'analyse est un LECO CS 744 (existant dans le laboratoire avant le début du

projet Ecused). Un four à induction amène l'échantillon à la fusion sous un flux de dioxygène ultrapur, le C est dosé par spectrométrie infrarouge sous la forme CO<sub>2</sub>. Au minimum deux répliqués de 50 mg sont analysés pour chaque échantillon. L'étalonnage est effectué avec des étalons LECO qui émettent à la combustion la même quantité de CO<sub>2</sub> que les échantillons. L'analyseur est tombé en panne (cellule infrarouge à remplacer, environ 10 k€ à trouver, ce qui a pris plus de 6 mois) et les dernières analyses ont donc été effectuées plus tardivement (septembre 2023) que ne le prévoyait le projet initial.

L'application de la méthodologie ELSA à un site côtier pour lequel plusieurs dizaines d'échantillons sont traités, a abouti à un flux de données très important, pour le site Ecused, 114 stations ont été échantillonnées et les échantillons analysés par fraction soit 1900 fractions pour 23 variables géochimiques retenues (18 éléments et 5 rapports entre éléments), il est nécessaire de traiter 43 700 données. En représentation cartographique cela représente environ 290 cartes différentes. C'est à la fois l'intérêt de la méthode et sa principale difficulté.

### III.2. Étude en milieu contrôlé

L'étude en milieu contrôlé a pour objectif d'analyser les performances de la méthode de traitement géostatistique GSTA (Grain-Size Trend Analysis), mis en place dans l'étude en milieu naturel. Ce type de méthode a initialement été conçu pour estimer des directions de transport sédimentaire résiduel sur des fonds sédimentaires purement sableux, avec un seul mode granulométrique principal. La fiabilité des résultats de cette méthode sur des fonds sédimentaires plus hétérogènes, avec différentes lithologies et plusieurs modes granulométriques, comme ceux de la Baie de Seine, n'a pas été estimée avant cette étude. L'analyse des performances a été réalisée par le biais d'un modèle physique en laboratoire, reconstituant le transport de particules sur un lit sédimentaire soumis à différentes vitesses de courant. Les processus de transport et de ségrégation ont été quantifiés au cours des expériences par des mesures hydro-sédimentaires conventionnelles (vélocimétrie acoustique, mesures bathymétriques), et par des mesures granulométriques et géochimiques à la fin de chaque expérience.

Les expériences de transport sédimentaire ont été menées dans le canal à courant du laboratoire M2C (Université de Caen Normandie). Le canal mesure 16 m de long (section de travail de 12 m), 50 cm de large, et 65 cm de haut (Fig. 3). L'extrémité amont du canal est équipée d'une pompe à eau qui permet de générer un courant transitant en boucle dans un système fermé. Les parois en verre du canal permettent de visualiser les processus en temps réel. Un système d'accroche le long du canal permet de fixer différents outils de mesure, comme ceux utilisés lors de cette étude : ADV Nortek Vectrino+ (pour mesurer la vitesse du courant) et capteur laser SICK DT-500 (pour relever la bathymétrie).

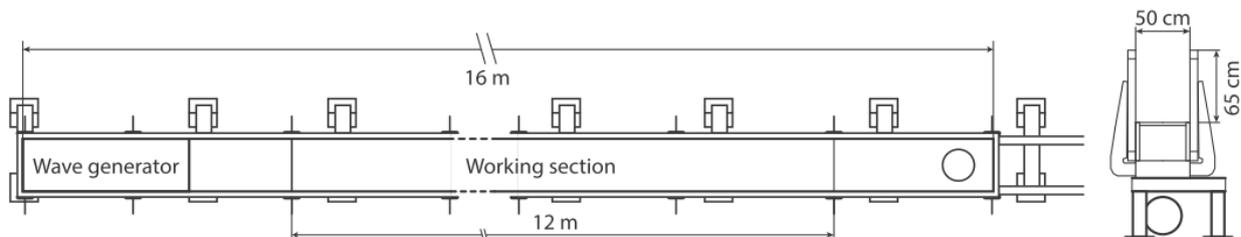


Figure 3 : Plan du canal à courant du laboratoire M2C (vue plan et vue en coupe).

L'extraction d'échantillons sédimentaires du canal a été effectuée manuellement dans l'eau avec une seringue lors des phases d'arrêts des expériences. Un plan régulier d'échantillonnage sur une seule ligne a été mis en place le long du lit sédimentaire. Le poids moyen des échantillons est d'environ 50 grammes. Les analyses granulométriques ont été effectuées au M2C avec un granulomètre laser Fritsch Analysette 22 Next. Ces analyses ont permis de calculer les trois paramètres granulométriques nécessaires dans le traitement géostatistique : moyenne, sorting (écart-type) et skewness (asymétrie). Les analyses géochimiques ont également été effectuées au M2C, sur des échantillons broyés, avec un spectromètre de fluorescence X Niton XL5 Plus. Dans le cadre de cette étude en milieu contrôlé, seuls les paramètres granulométriques ont été utilisés lors du traitement géostatistique. Chaque échantillon est caractérisé par trois paramètres granulométriques, et des coordonnées X et Y représentant leur position le long du canal. Les résultats issus des analyses géochimiques ont été utilisés à titre comparatif dans l'analyse des sorties du traitement géostatistique.

La méthode GSTA a été appliquée à l'ensemble des données granulométriques grâce au plugin QGIS GiSedTrend (version 2.5), développé par le LUSAC Cnam/Intechmer. Ce plugin permet de générer des champs vectoriels pour chaque expérience, représentés par des flèches pointant dans la direction du transport sédimentaire résiduel. Deux paramètres principaux de la méthode GSTA ont été évalués lors de cette étude : la distance caractéristique et le type de tendance granulométrique. La distance caractéristique indique le nombre d'échantillons adjacents pris en compte pour établir des tendances granulométriques, et par conséquent des directions de transport sédimentaire. Pour chaque jeu de données granulométrique, huit cas peuvent être testés en combinant les tendances de la moyenne (plus fin [F] ou plus grossier [C]), le sorting (mieux trié [B] ou moins bien trié [P]), et le skewness (skewness positif [+] ou négatif [-]).

Afin d'évaluer les performances de la méthode GSTA sur des sédiments hétérogènes, deux matériaux sédimentaires ont été utilisés lors de cette étude : 1) SACAB, un sable alluvial modérément bien trié de nature siliceuse, 2) SACAB-sb, un mélange silico-bioclastique issu de la combinaison de SACAB (2/3) et une fraction de coquilles inférieurs à 1 mm (1/3). Les caractéristiques granulométriques et géochimiques de ces deux matériaux sont détaillées dans le tableau 2.

Au total, huit séries d'expériences, nommées de la lettre A à la lettre H, ont été menées entre Février et Août 2023. Chaque série d'expérience se caractérise par une configuration de lit sédimentaire propre. Certaines expériences ont été réalisées avec un courant constant le long du canal, tandis que d'autres ont été réalisées avec un courant irrégulier. La création d'un courant non constant le long du canal, avec des zones d'accélération et de décélération, a été envisagée afin de tester de manière approfondie les performances du traitement géostatistique dans des conditions hydrodynamiques variées. Toutes les séries d'expériences menées se caractérisent en amont par une structure en nid d'abeille pour réduire la turbulence, et d'un lit de galets de 150 cm de long et 5 cm d'épaisseur pour compenser le manque de rugosité du fond du canal (Fig. 4). L'épaisseur du lit sédimentaire sableux a été établie à 5 cm pour toutes les expériences, tandis que la hauteur d'eau au-dessus du fond du canal a été fixée à 30 cm.

Tableau 2 : Caractéristiques granulométriques et géochimiques des matériaux sédimentaires utilisés lors de l'étude en milieu contrôlé.

Grain-size parameters	SACAB		SACAB-sb	
	Microns	Phi	Microns	Phi
Mean	321.26 ± 6.00 μm	1.75 ± 0.02 φ	323.01 ± 26.75 μm	1.77 ± 0.11 φ
Median	296.99 ± 14.71 μm	1.75 ± 0.07 φ	277.24 ± 24.20 μm	1.86 ± 0.13 φ
Mode	307.40 ± 0.00 μm	1.70 ± 0.00 φ	296.99 ± 14.71 μm	1.75 ± 0.07 φ
Sorting	120.23 ± 4.51	0.58 ± 0.01	146.48 ± 25.07	0.64 ± 0.03
Skewness	0.64 ± 0.03	0.65 ± 0.03	1.77 ± 0.78	0.34 ± 0.15
Geochemical composition	Element	%	Element	%
1	Si	29.580 ± 0.034	Si	20.313 ± 0.096
2	Al	0.075 ± 0.014	Ca	10.062 ± 0.015
3	Ca	0.073 ± 0.002	K	0.154 ± 0.003
4	K	0.043 ± 0.002	Al	0.116 ± 0.191
5	Cl	0.041 ± 0.002	Fe	0.111 ± 0.002
-	Bal	70.130 ± 0.076	Bal	69.067 ± 0.096

Bal = Balance value

A titre indicatif, la pompe du canal a tourné lors de cette étude pendant 77 heures, et 265 échantillons ont été prélevés. Pour chaque échantillon, trois répliques de mesures granulométriques ont été effectués au minimum, portant à près de 800 le nombre total de mesures. Les mesures géochimiques sont moins nombreuses, du nombre de 115, car plus chronophages et effectuées uniquement sur une partie des échantillons.

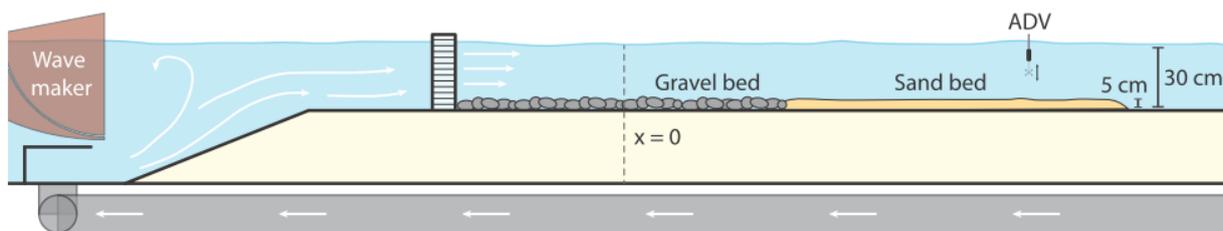


Figure 4 : Vue en coupe du canal à courant du M2C avec la disposition initiale utilisée pour chaque expérience.

## IV. Principaux résultats

### IV.1. Etude en milieu naturel

A la date d'écriture de ce bilan, l'interprétation de ces données n'est pas terminée. Nous avons choisi de présenter (1) le résultat d'une ACP (Analyse en Composantes Principales) effectuée sur l'ensemble des fractions et les 23 variables/paramètres, (2) une sélection de cartes informatives qui permettent de soutenir la discussion.

La figure 5 présente la projection des variables/paramètres dans le plan 1-2 de l'ACP, la figure 6, la projection des individus/fractions dans le même plan. L'organisation des variables montre l'individualisation de trois grands pôles. Les pôles silicates (Si) et carbonates (Ca et Sr) s'opposent selon l'axe 2 (les flèches très proches du cercle des corrélations sont interprétables dans ce plan). L'axe 1 est inféodé à un vaste groupe de variables liées aux minéraux lourds et à la matière organique (BrOrg) donc aux fractions fines. Le potassium K et dans une moindre mesure le rubidium Rb qui tracent les phyllosilicates à 10 Å hésitent entre le groupe Si et celui du fin. Cela pourrait indiquer que deux matrices minérales contenant le couple K-Rb coexistent, par exemple, un mica comme la muscovite ou une argile comme la glauconite (sables moyens) et une autre argile de type illite (fin).

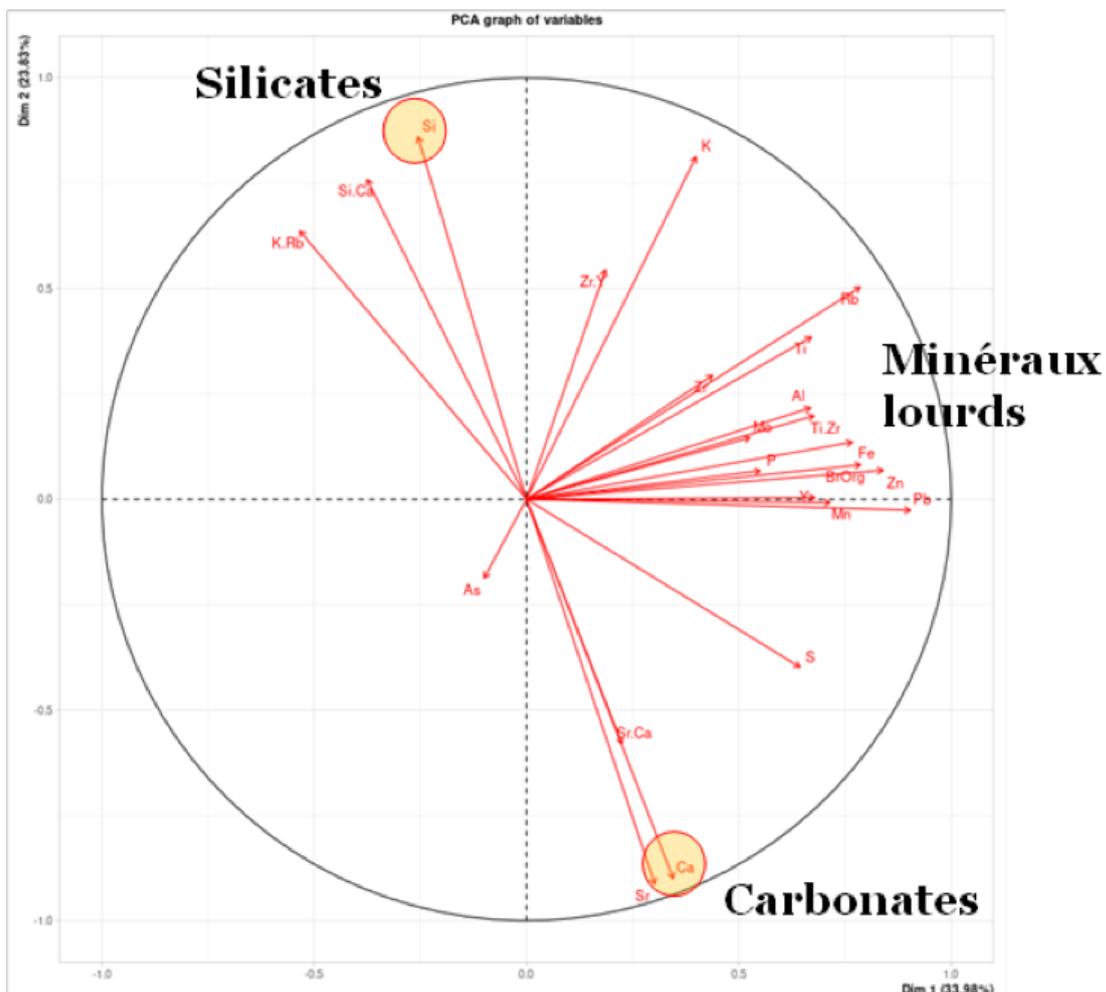


Figure 5 : Projection des variables/paramètres dans le plan 1-2 de l'ACP.

Dans le plan 1-2, les fractions les plus grossières (>160 µm) s'alignent selon l'axe Si-Ca, les plus fines (<160 µm) s'étendent vers le pôle minéraux lourds, il y a une variabilité de composition chimique/minéralogique des fractions.

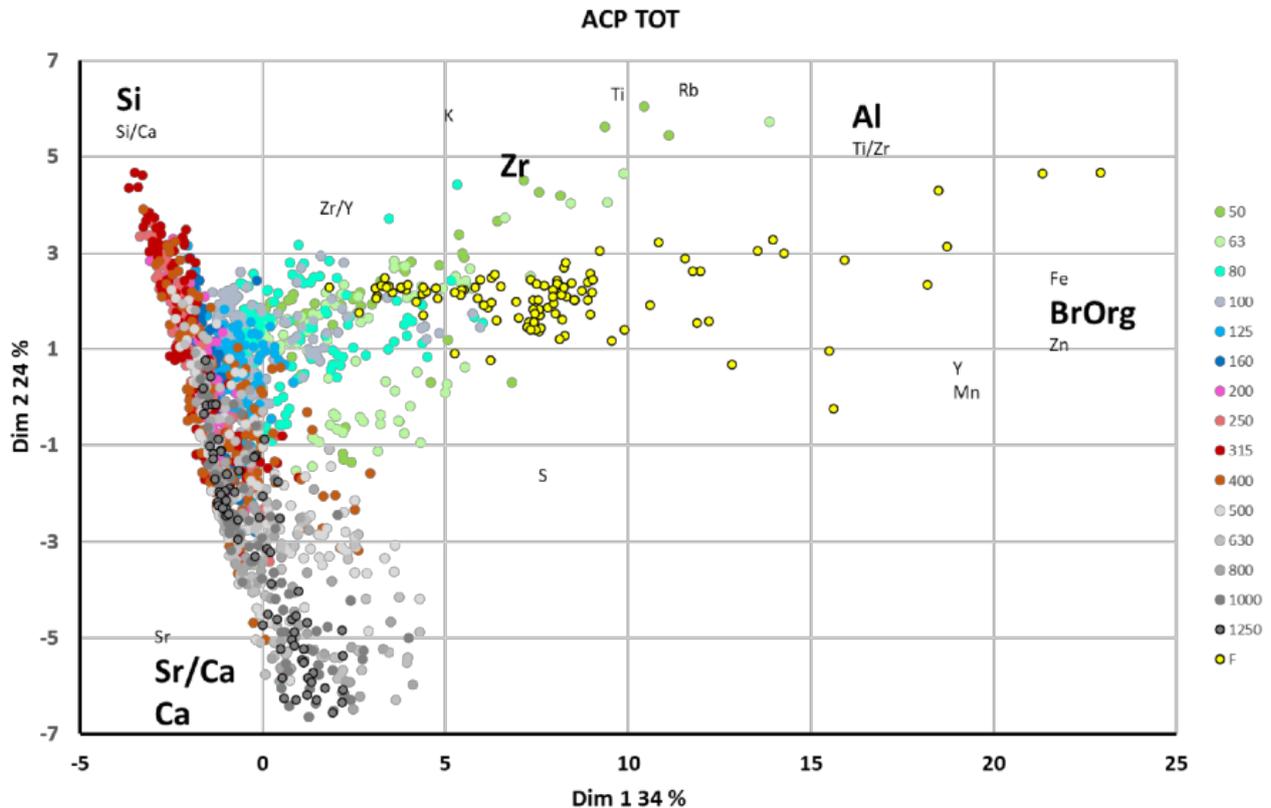


Figure 6 : Projection des individus/fractions dans le plan 1-2 de l'ACP. Chaque fraction est représentée dans une couleur spécifique, la légende indique la valeur en microns de la limite inférieure de la fraction granulométrique, F pour  $< 50 \mu\text{m}$ .

La figure 7 permet une meilleure visibilité du degré de dispersion des échantillons d'une même fraction

La fraction F pour fin ( $< 50 \mu\text{m}$ ) occupe la surface la plus importante qui correspond à la variabilité de composition la plus forte. Cette caractéristique est logique si l'on considère qu'elle correspond en réalité à un ensemble de fractions (regroupement de minéraux lourds, de minéraux argileux et de matière organique au minimum). Les fractions  $50\text{-}63 \mu\text{m}$  à  $100\text{-}125 \mu\text{m}$  présentent d'assez vastes domaines, elles sont donc potentiellement porteuses de variabilité géographique. La fraction  $160\text{-}200 \mu\text{m}$  est la première qui se situe pleinement dans l'alignement Si-Ca, la superficie du nuage de points est avec celle de la fraction  $200\text{-}250 \mu\text{m}$  la plus faible de toutes les fractions, celle qui présente la plus faible variabilité géographique. Les fractions  $250\text{-}315 \mu\text{m}$  et  $315\text{-}400 \mu\text{m}$  correspondent à une légère augmentation de la surface vers les deux pôles Si et Ca. Des fractions  $400\text{-}500 \mu\text{m}$  à  $1000\text{-}1250 \mu\text{m}$  les nuages s'étendent et s'élargissent en direction du pôle Ca. Les nuages des fractions  $1250\text{-}1600 \mu\text{m}$  et  $1600\text{-}2000 \mu\text{m}$  restent décalés vers le pôle Ca mais leur surface diminue.

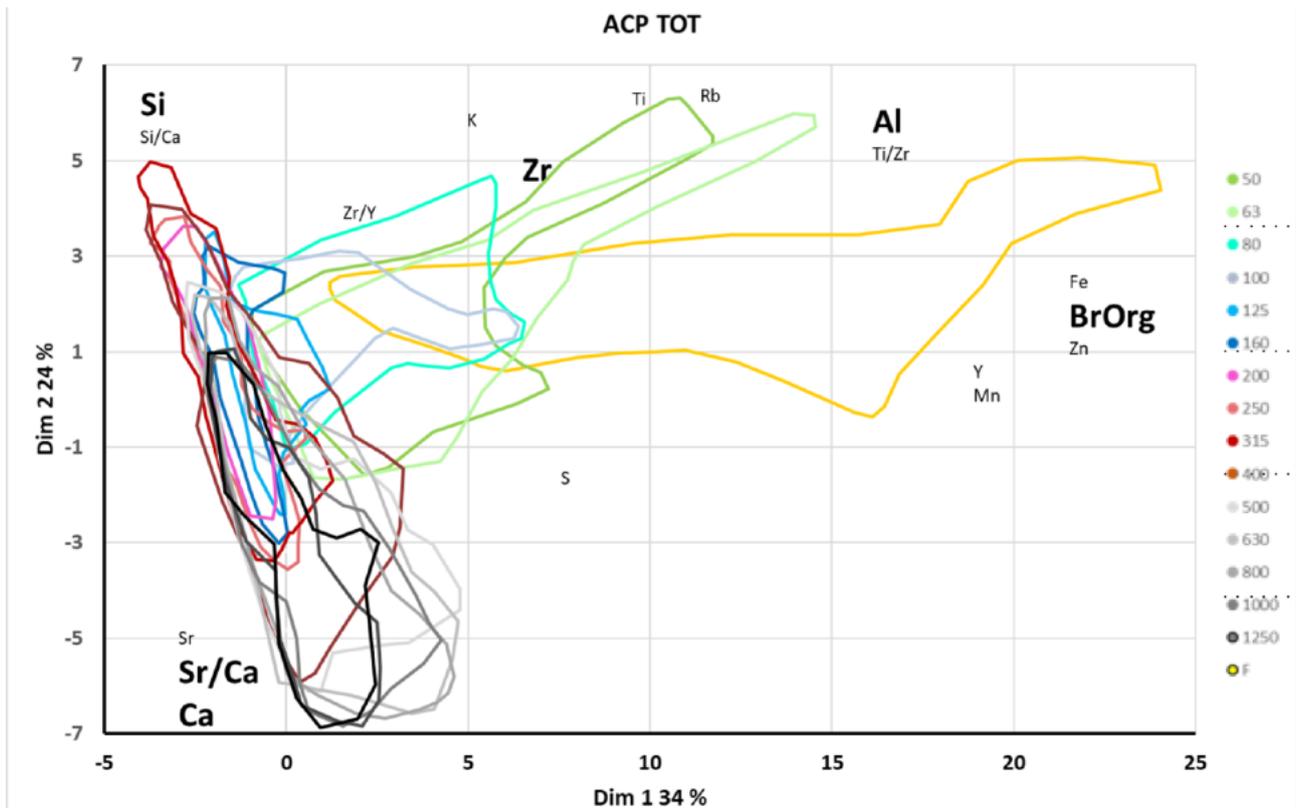


Figure 7 : Projection des individus/fractions dans le plan 1-2 de l'ACP, les individus n'apparaissent plus, pour chaque fraction est tracé le pourtour du nuage des échantillons.

La carte de la figure 8 présente la variabilité granulométrique du site étudié à travers la moyenne exprimée en unité phi sur la base de mesures de granulométrie laser (< 2 mm). Les flèches représentent des gradients d'affinement. Les vecteurs convergent vers le site du Machu au sud, les sédiments les plus fins sont ceux prélevés sur les casiers C en activité. Deux autres zones de convergence existent au sud de la zone d'extraction et au sud-ouest des casiers F.

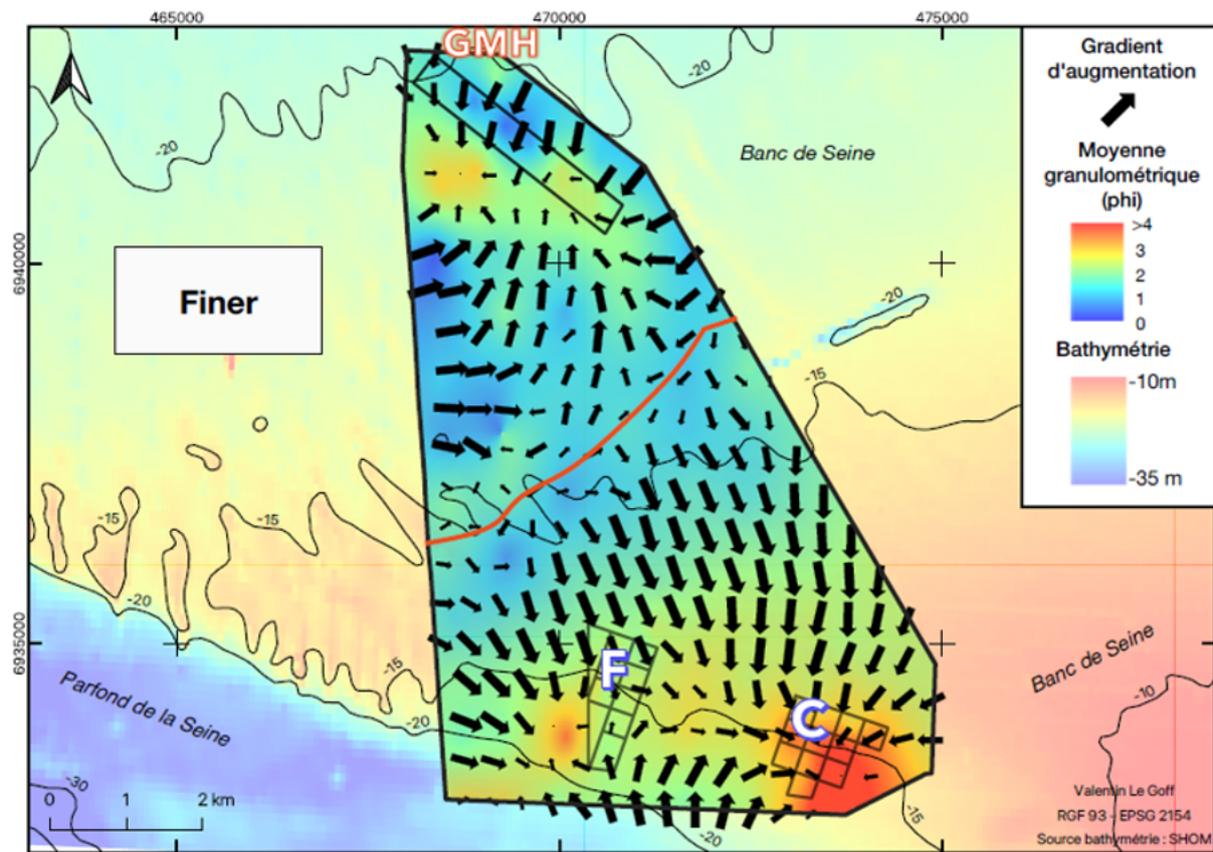


Figure 8 : Variabilité de la moyenne granulométrique du site étudié. La moyenne est exprimée en unité phi. Les flèches indiquent la direction de l'affinement granulométrique. La ligne rouge correspond à la zone de divergence des vecteurs.

La figure 9 présente la variabilité des teneurs en Ca et Sr pour toutes les fractions de chaque échantillon, représentées par fraction. Des échantillons « origines » ont été prélevés dans les falaises littorales de Seine-Maritime et des coquilles littorales. Les coquilles présentent une assez grande variabilité du rapport Sr/Ca fonction de l'espèce. Les échantillons sédimentaires contiennent généralement un mélange de fragments coquilliers non identifiables issus d'espèces variées. Les études menées jusqu'ici en Manche montrent une gamme le plus souvent comprise entre 4 et  $5 \cdot 10^{-3}$ . Pour les craies, la faible valeur du rapport Sr/Ca est liée à une perte de Sr lors de la diagenèse (enfouissement post-dépôt, les craies correspondent à des dépôts sédimentaires qui ont plusieurs dizaines de millions d'années, érodés et retransportés vers le milieu sédimentaire marin actuel).

Il existe des variabilités de qualité des carbonates à la fois entre les fractions et pour une même fraction, géographique. La plupart des fractions présentent des caractéristiques (rapport Sr/Ca) qui correspondent aux coquilles. Mais certaines fractions semblent contenir des craies.

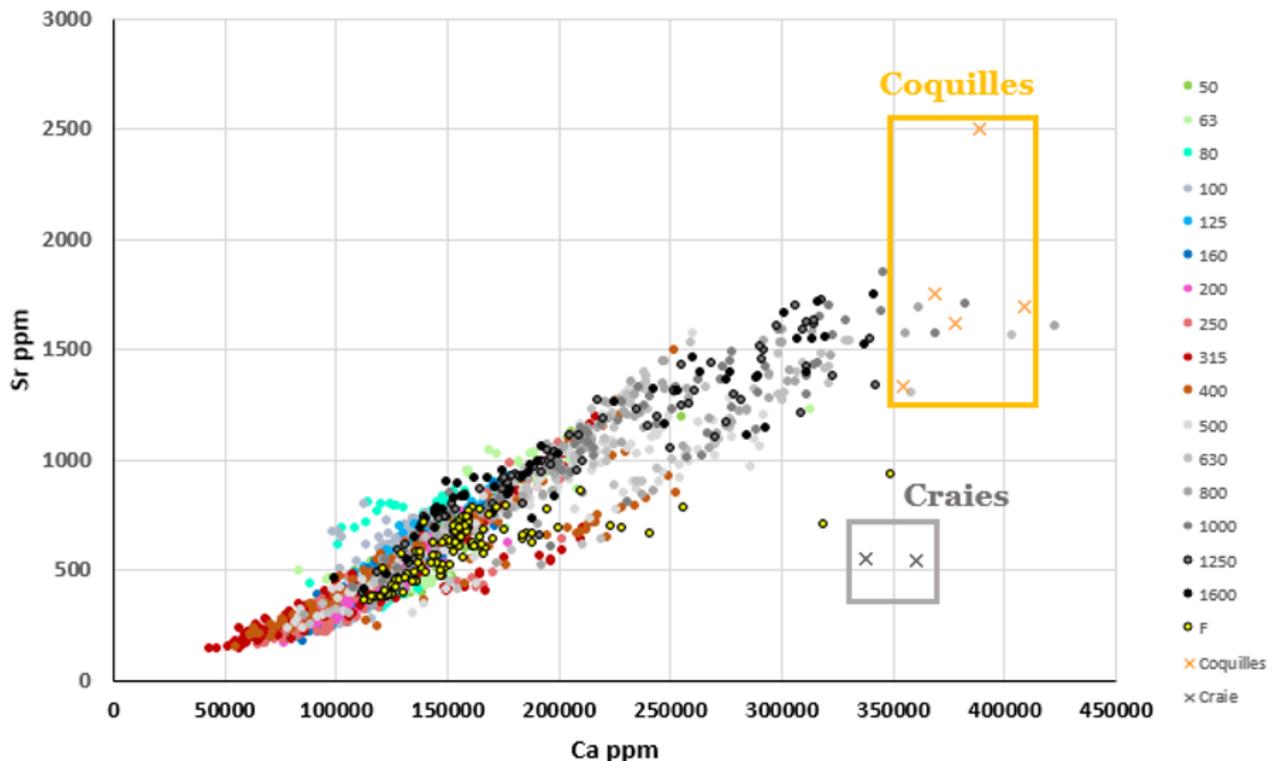
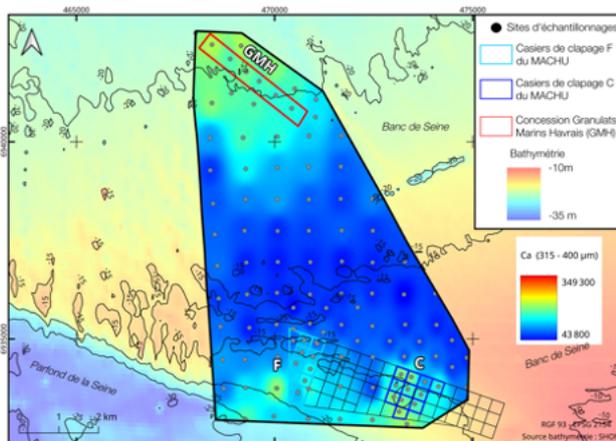


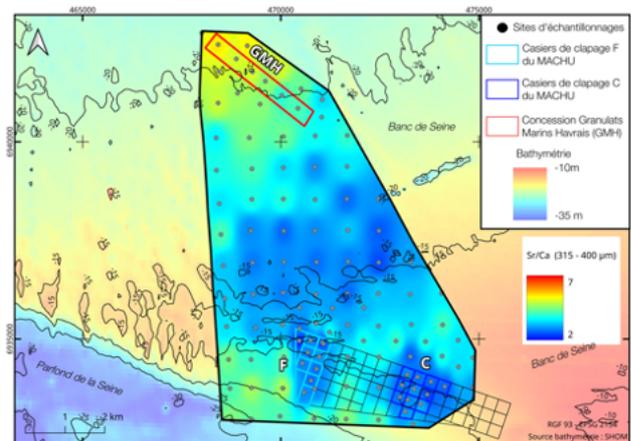
Figure 9 : Variabilité des concentrations en Ca et Sr, par fraction granulométrique (en  $\mu\text{m}$ ). Les origines craies et coquilles sont également représentées.

La représentation cartographique permet une meilleure interprétation (Fig. 10, 11 et 12). La valeur maximale de 35 % de Ca correspond à environ 87% de  $\text{CaCO}_3$  et la valeur minimale de 4 % à 10 % de  $\text{CaCO}_3$  (gamme obtenue sur l'ensemble des fractions).

### 315 – 400 microns



**Ca**



**Sr/Ca\*1000**

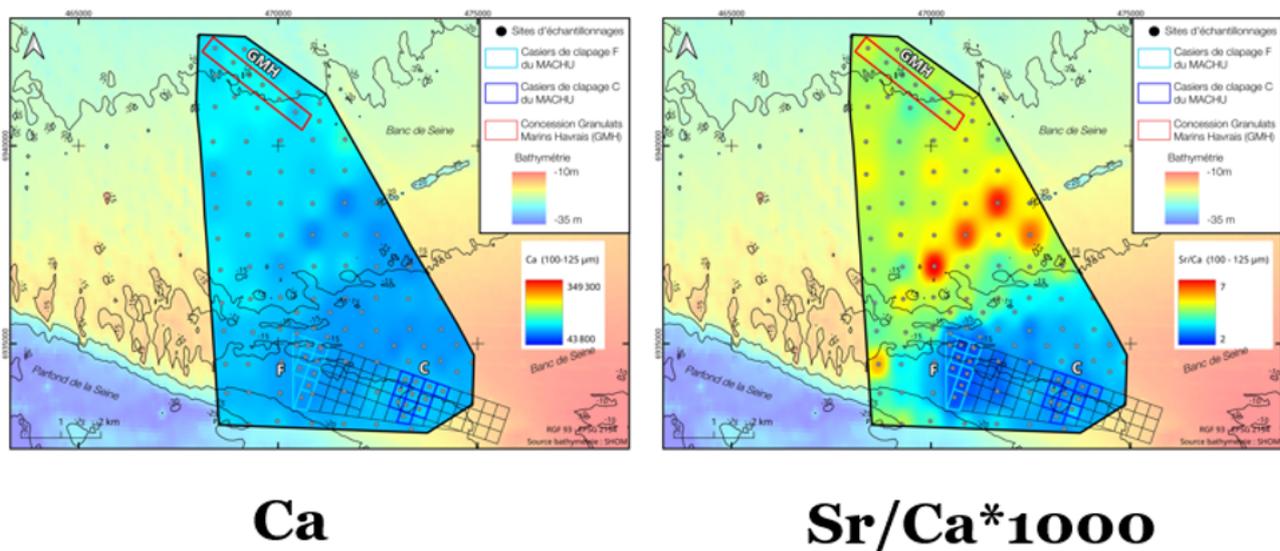
Figure 10 : Variabilité géographique de la quantité de carbonates (Ca) en ppm et de la qualité de ces carbonates ( $\text{Sr}/\text{Ca} \cdot 1000$ ) pour la fraction 315-400 microns.

Pour la fraction 315-400 microns, les deux régions enrichies en carbonates sont les zones nord et sud. Dans la zone nord, ces carbonates présentent un rapport Sr/Ca d'environ 5 ce qui correspond à une origine « coquilles », les deux paramètres évoluent selon un gradient nord-sud d'affaiblissement.

Dans la zone sud, les deux séries de casiers C et F s'individualisent. L'impact du dépôt de dragage est clair pour cette taille. Les sédiments déposés sont à la fois plus carbonatés et contiennent plus de craie (Sr/Ca proche de 2). L'effet est plus marqué pour C que pour F ce qui indique qu'il s'est légèrement atténué en 3 ans. Si nous n'avions eu que le Ca comme traceur, nous aurions pu interpréter l'enrichissement en carbonates au sud des casiers comme un indice de transport des particules déposées. Mais le rapport Sr/Ca indique qu'il s'accompagne d'un enrichissement en coquilles, cette zone extrême sud est donc naturellement enrichie en carbonates. Les dépôts sur C semblent se déplacer légèrement vers le nord. La présence de craie dans les dépôts de dragage est logique car ils correspondent à des sédiments issus de la Seine et de son estuaire, ce fleuve draine un vaste domaine d'affleurements calcaires de type craie.

Les teneurs en Ca de la fraction 100-125 microns sont globalement faibles, cette fraction appartient au mode des quartz donc en relatif la quantité de Ca semble diminuer. La moitié nord de la zone est plus carbonatée que le sud, les casiers sont au sud les plus enrichis. La qualité des carbonates montre que les craies de cette taille déposées sur le site du Machu sont beaucoup plus mobiles et se sont dispersées dans toutes les directions. Dans la moitié nord, les coquilles dominent.

## 100 – 125 microns



**Ca**

**Sr/Ca\*1000**

Figure 11 : Variabilité géographique de la quantité de carbonates (Ca) en ppm et de la qualité de ces carbonates (Sr/Ca\*1000) pour la fraction 100-125 microns.

Les valeurs du rapport Sr/Ca qui atteignent 7 sont encore difficiles à interpréter, une espèce particulière qui produirait par fragmentation des tailles très petites (le maërl atteint ces valeurs de 7 et se fragmente beaucoup mais il n'y en a pas dans ces échantillons), des foraminifères benthiques inféodés à cette zone ou des carbonates coquilliers présents depuis très longtemps dans le milieu en

surface sans recouvrement et qu'une « altération » enrichirait en Sr ? Nous devons poursuivre nos investigations sur ce questionnement.

Les teneurs en Ca de la fraction fine (<50 µm) sont assez homogènes sur l'ensemble de la zone avec une dominance de l'origine « coquilles » (Sr/Ca de 3 à 5). Une zone plus carbonatée se développe sur le banc de Seine le long de l'isobathe – 15 m. Elle correspond à une forte proportion de craie, un élément d'information qu'il faudra intégrer dans l'interprétation de ces sédiments. Ils forment des rides interprétées généralement comme le signe d'une dynamique de transport alors que la présence de craie dans le fin indiquerait que cette dynamique n'est pas actuelle (le fin actuellement en transport est à dominance d'origine « coquilles »). Au niveau de la zone du Machu, les dépôts des casiers C montrent une fraction fine peu carbonatée enrichie en craie, marque de l'origine des sédiments dragués et une dispersion vers le nord. Les sédiments des casiers F présentent une évolution en 3 ans, ils sont plus carbonatés que C, sur ce plan, ils ont retrouvé la « normale naturelle ». Mais la marque craie de leur source (zones draguées) est encore présente même si elle est en diminution. La fraction fine est dominée par des carbonates à signature coquilles probablement en transport actif (F a évolué) et certaines zones localisées conservent leur marque « craie » antérieure.

### <50 microns

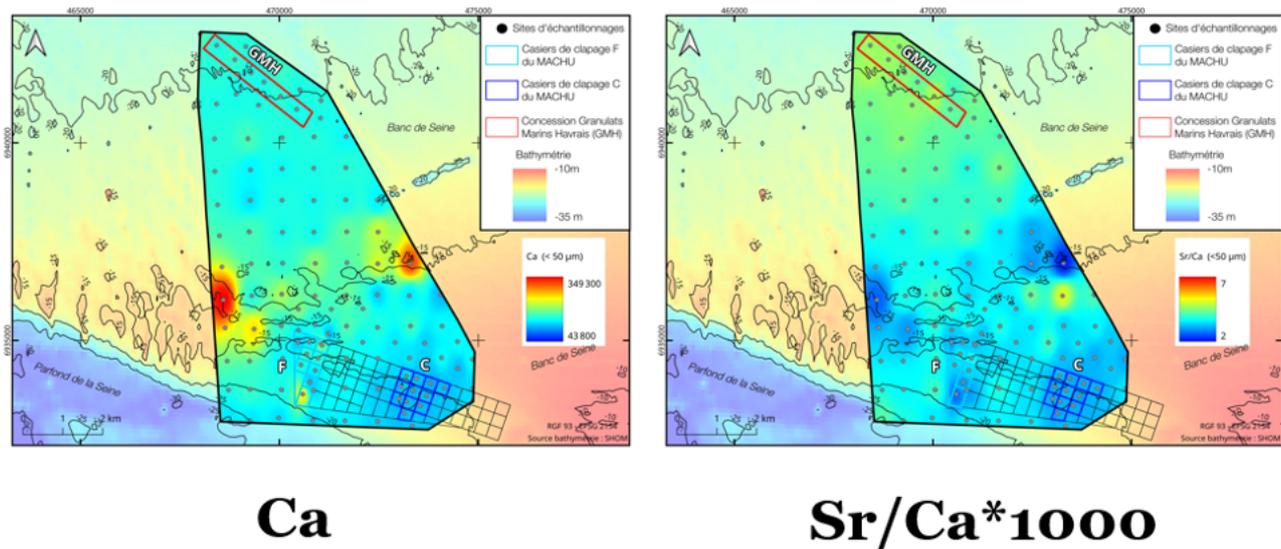


Figure 12 : Variabilité géographique de la quantité de carbonates (Ca) en ppm et de la qualité de ces carbonates (Sr/Ca\*1000) pour la fraction <50 microns.

Pour confirmer cette interprétation de la fraction fine une autre matrice peut être étudiée, la matière organique, en utilisant le COT pour la quantification et le rapport BrOrg/COT pour différencier les origines.

La figure 13 présente la variabilité géographique de la matière organique. Le schéma interprétatif général est assez semblable à celui des carbonates. L'essentiel de la zone présente des teneurs proches en MO (jaune) d'origine marine (bleu-vert). Une zone enrichie en MO se développe sur le banc de Seine le long de l'isobathe – 15 m avec une signature originale de la MO « surmarine », cette MO va demander d'autres investigations pour comprendre la cause de cette signature. Au niveau de la zone du Machu, les dépôts des casiers C montrent une fraction fine pauvre en MO et

d'origine continentale, marque de la provenance des sédiments dragués et une dispersion vers le nord. Les sédiments des casiers F présentent une évolution en 3 ans, ils sont plus riches en MO que C, sur ce plan, ils ont retrouvé la « normale naturelle ». Mais la marque de leur origine continentale (zones draguées) est encore présente même si elle est en diminution.

### <50 microns

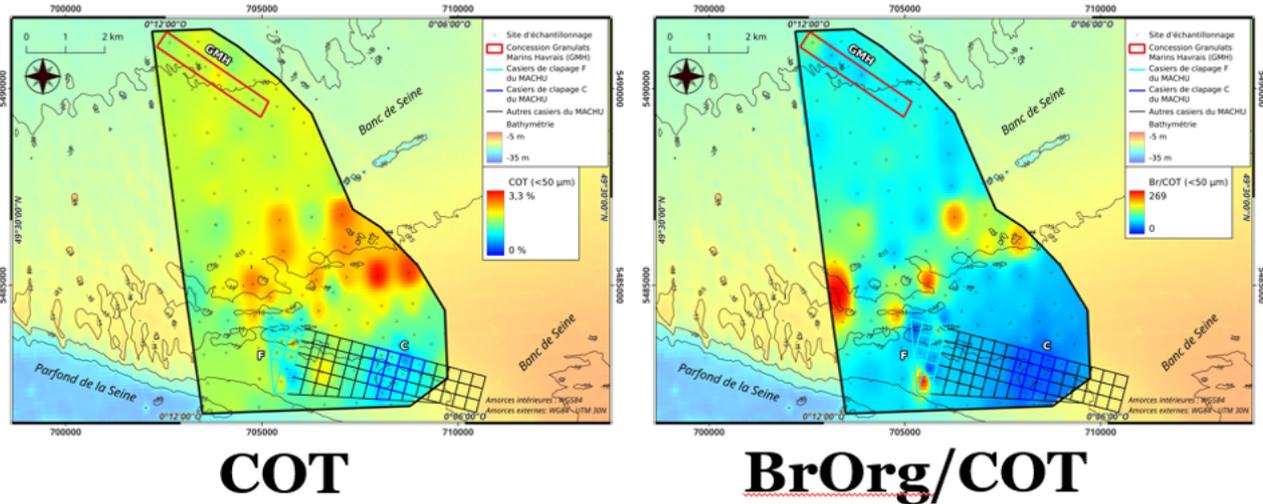


Figure 13 : Variabilité géographique de la quantité de matière organique (COT) en % et de la qualité de cette MO (BrOrg/COT) pour la fraction <50 microns.

Pour compléter les données liées aux carbonates et à la matière organique, nous allons nous intéresser à un minéral qui appartient aux aluminosilicates, la glauconite et à son marqueur géochimique l'arsenic As. Ce minéral est une argile particulière qui se forme à l'interface eau-sédiment en milieu marin et forme des agrégats qui appartiennent au domaine granulométrique des sables, il est ici hérité, érodé des craies et grès glauconieux mésozoïques du Bassin parisien. L'origine marine de la glauconite fait qu'elle reste stable en milieu marin et qu'elle s'enrichit dans les sables actuels. La figure 14 présente la variabilité géographique de la quantité de glauconite pour quatre fractions granulométriques. Chaque fraction a sa propre échelle de concentration.

Pour la fraction 630-800 microns, la zone très riche en glauconite est sur le banc de Seine le long de l'isobathe -15 m. Autour de cette zone, il y a une auréole moins concentrée plus large vers le nord-ouest que vers le sud-est. Les sédiments des extrémités nord et sud de la zone étudiée n'en contiennent pas. Nous pouvons considérer que la partie du banc de Seine riche en glauconite > 630 microns est la source de glauconites plus petites formées par fragmentation et/ou usure.

Pour la fraction 315-400 microns, le maximum de concentration s'est décalé vers le sud (et la valeur maximale d'As a diminué). L'auréole de dispersion est identique vers le nord-ouest et s'est considérablement élargie vers le sud-est, où elle occupe toute la zone étudiée sauf les séries de casiers C et F du Machu. Le marqueur As prouve que les particules de 315-400 microns déposées sur les casiers C et F ne sont pas mobiles vers le nord mais que au moins pour F, elles le sont vers le sud-ouest, elles se déplacent vers le parfond de la Seine encore bien marquée dans la morphologie des fonds.

Pour la fraction 250-315 microns, la migration vers le sud des glauconites s'accroît cette fraction est beaucoup plus mobile que la précédente et les concentrations « naturelles » s'homogénéisent (et diminuent encore un peu). Les séries de casier C et F montrent le même schéma de fonctionnement que pour la fraction 315-400 microns.

Pour la fraction 200-250 microns, l'extension des glauconites se restreint à la moitié sud-est de la zone étudiée. La nouveauté par rapport à la fraction précédente est qu'elles occupent maintenant les casiers F et la partie nord des casiers C. Or les casiers F sont surélevés de plusieurs mètres, l'apparition de glauconites implique qu'à partir de 200-250 microns elles peuvent être transportées en suspension. La persistance au sud-ouest des casiers F d'une zone sans glauconites montre que ces transports sont progressifs, se font sur des courtes distances, prennent du temps.

Ce début de mobilité à environ 200 microns est à rapprocher des résultats de l'ACP (Fig. 6 et Fig. 7), cette taille correspond au minimum de surface du nuage de points, la plus faible variabilité géographique de composition et possiblement à une fraction plus transportée (l'homogénéisation plus importante pourrait être liée à un transport plus actif).

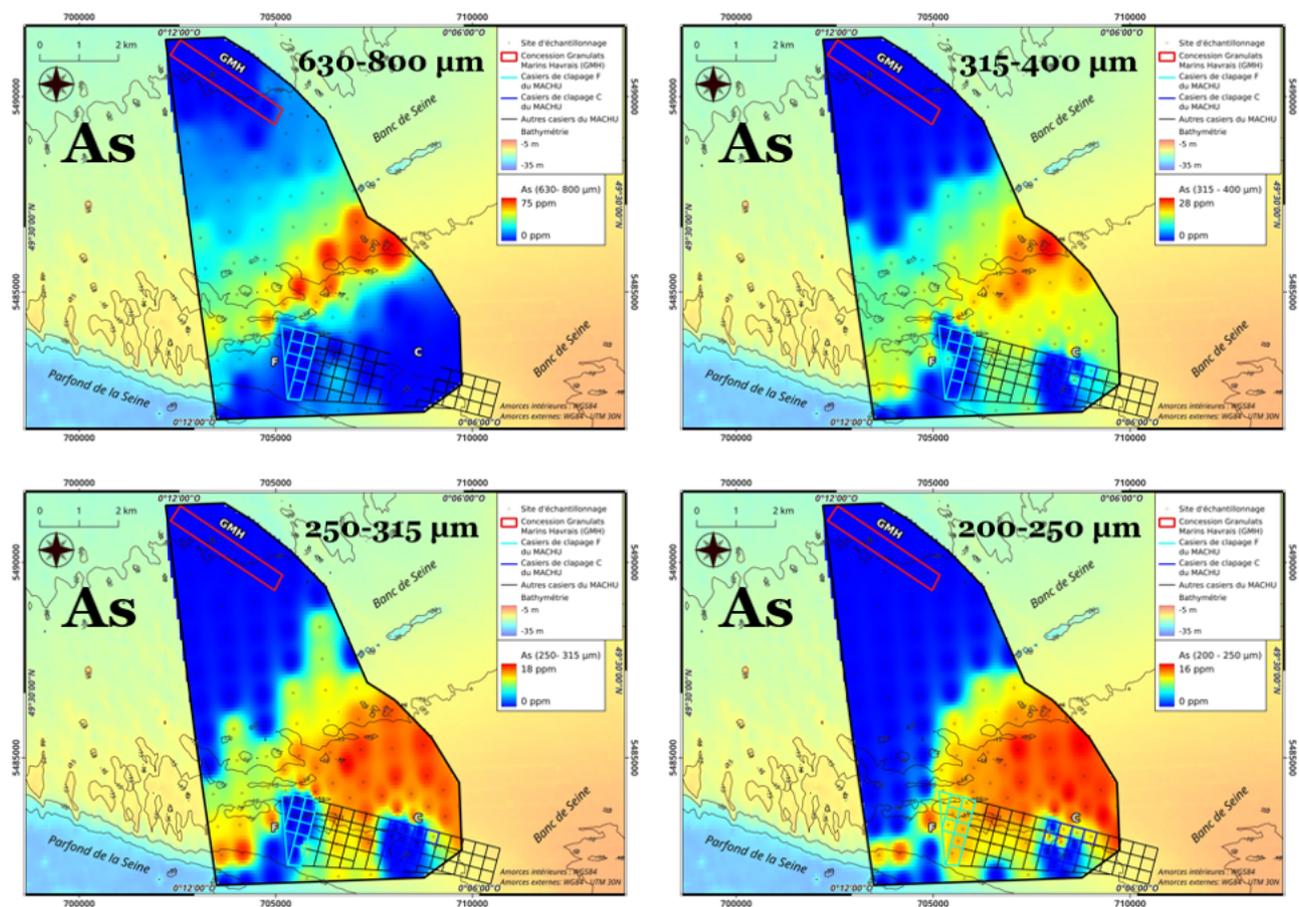


Figure 14 : Variabilité géographique de la quantité de glauconite (As) pour les fractions 630-800 microns, 315-400 microns, 250-315 microns et 200-250 microns.

En conclusion sur l'impact des activités anthropiques, les données dépouillées jusqu'ici ne nous ont pas permis de mettre en évidence un impact de l'activité d'extraction de granulats. Pour les

rejets de dragage, ils sont bien sûr beaucoup plus impactants mais a priori assez peu vers le nord, les sédiments déposés semblent plutôt se déplacer vers le sud-sud-ouest soit le parfond. Il n'y a donc pas d'effets cumulés sur cette zone pour ces deux activités. D'un point de vue scientifique, les dépôts de dragage fournissent des marqueurs très intéressants qui nous permettent d'explorer la dynamique sédimentaire.

La méthodologie ELSA associée à une grille régulière de prélèvement à haute densité prouve son intérêt. Il est possible de déterminer quelles tailles de particules sont mobiles et dans quelles directions elles se déplacent. Ces informations sont essentielles non seulement pour connaître les impacts anthropiques existants mais aussi pour arriver un jour à les prévoir. Les modèles numériques de transport sédimentaire en cours de développement ont un besoin crucial de données de calibration.

## IV.2. Étude en milieu contrôlé

Les données obtenues au cours des huit séries d'expériences en canal ont été analysées au fil de l'eau, et ont permis de converger vers des configurations expérimentales de plus en plus optimales. Pour ce bilan, nous avons décidé de présenter les résultats issus des deux dernières séries d'expériences, les séries G et H. Ces deux séries représentent les expériences réalisées avec le sédiment silicoclastique (SACAB) et le sédiment silico-bioclastique (SACAB-sb), respectivement. Chaque série se subdivise en 4 expériences avec des vitesses de courant constantes allant de 23 à 34  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  (i.e. limite basse de mise en mouvement des particules). La durée minimale des expériences pour ces séries d'expériences est de 3 heures avec un arrêt pour échantillonnage à chaque heure. L'espacement entre chaque échantillon est de 25 cm.

Les résultats sont présentés sous formes de graphiques et cartographies montrant : 1) l'évolution temporelle des paramètres granulométriques et géochimiques avec la vitesse du courant, 2) l'évolution des taux de validation pour chaque cas GSTA, et 3) les champs vectoriels de sorties de la méthode GSTA.

Les figures 15 et 16 présentent la variabilité des valeurs moyennes et des gradients granulométriques le long du lit sédimentaire dans les séries G et H, respectivement. Les valeurs moyennes de chaque paramètre au cours des expériences se différencient de la valeur calculée sur le sédiment brut (avant expérience). Seule la valeur moyenne du sorting dans le cas de la série G (i.e. sédiment silicoclastique) ne semble pas évoluer au cours des expériences (Fig. 15). De manière générale, et quelle que soit la vitesse du courant, le sédiment échantillonné lors des expériences est légèrement plus grossier, moins bien trié, et se caractérise par une valeur de skewness moins élevée. Les différences avec le sédiment brut et les incertitudes sont plus importantes dans la série H (i.e. sédiment silico-bioclastique). Étant donné les valeurs d'écart-type à la moyenne, il est impossible d'établir une relation entre la valeur moyenne de chaque paramètre granulométrique et la vitesse du courant.

Series G - Velocity

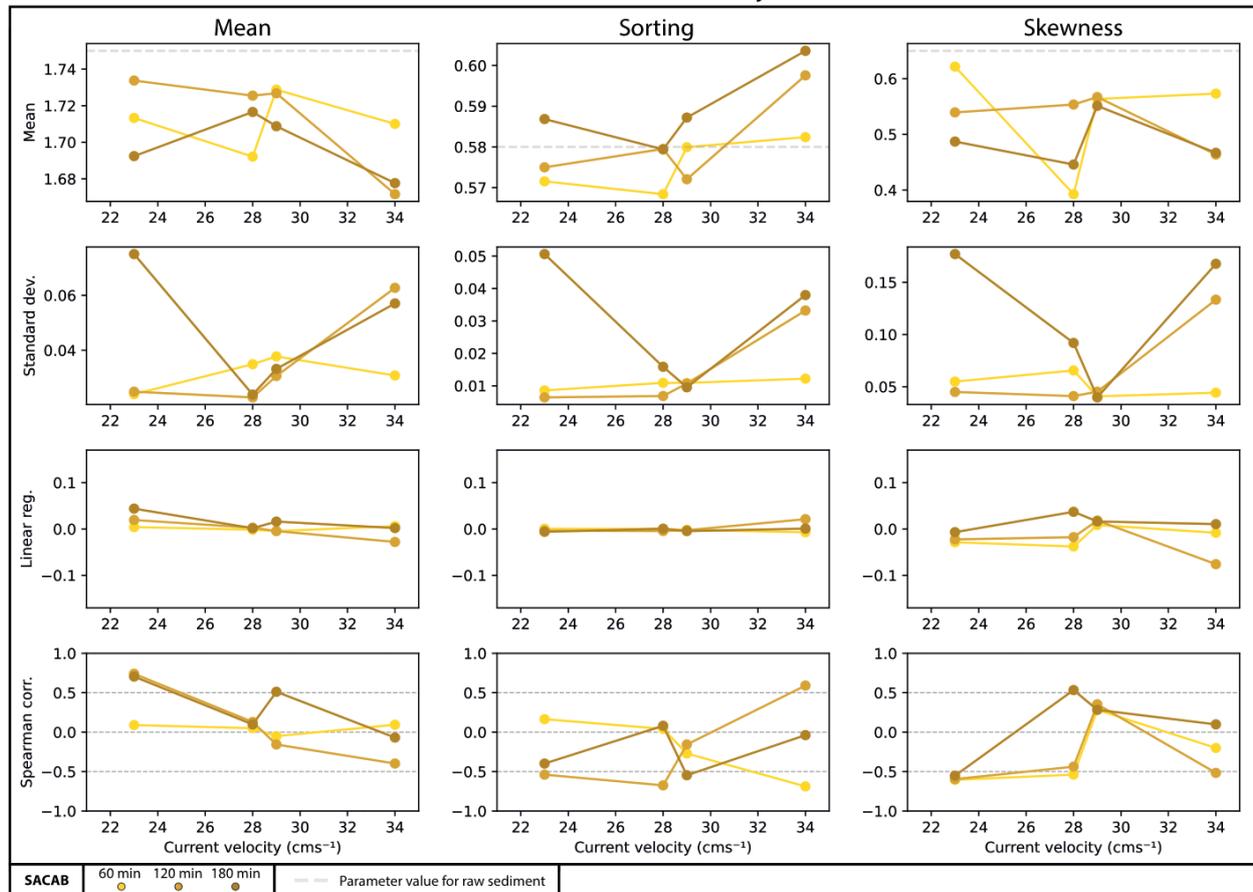


Figure 15 : Évolution des paramètres granulométriques à travers 4 paramètres statistiques calculés pour chaque jeu de donnée de la série G : moyenne, écart-type, régression linéaire, et coefficient de Spearman. Les valeurs moyennes sont affichées en échelle phi.

Les gradients granulométriques générés lors des expériences sont, pour la plupart, extrêmement faibles, avec des valeurs du coefficient de régression linéaire compris entre  $-5 \cdot 10^{-2}$  à  $+5 \cdot 10^{-2}$  pour le sédiment silicoclastique (Fig. 15), et entre -0.1 et +0.1 pour le sédiment silico-bioclastique (Fig. 16). Les faibles valeurs du coefficient de Spearman, également utilisé pour établir des corrélations entre deux variables, corroborent la faible corrélation entre les paramètres granulométriques et la vitesse du courant.

Cependant, le coefficient de Spearman permet d'identifier deux cas où une telle corrélation pourrait exister : avec le sédiment silicoclastique pendant les stades les plus matures de l'expérience à faible vitesse ( $< 25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ), et avec le sédiment silico-bioclastique à haute vitesse ( $> 25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Ces deux cas sont analysés plus en détail par la suite à travers les expériences G1 et H3, respectivement.

### Series H - Velocity

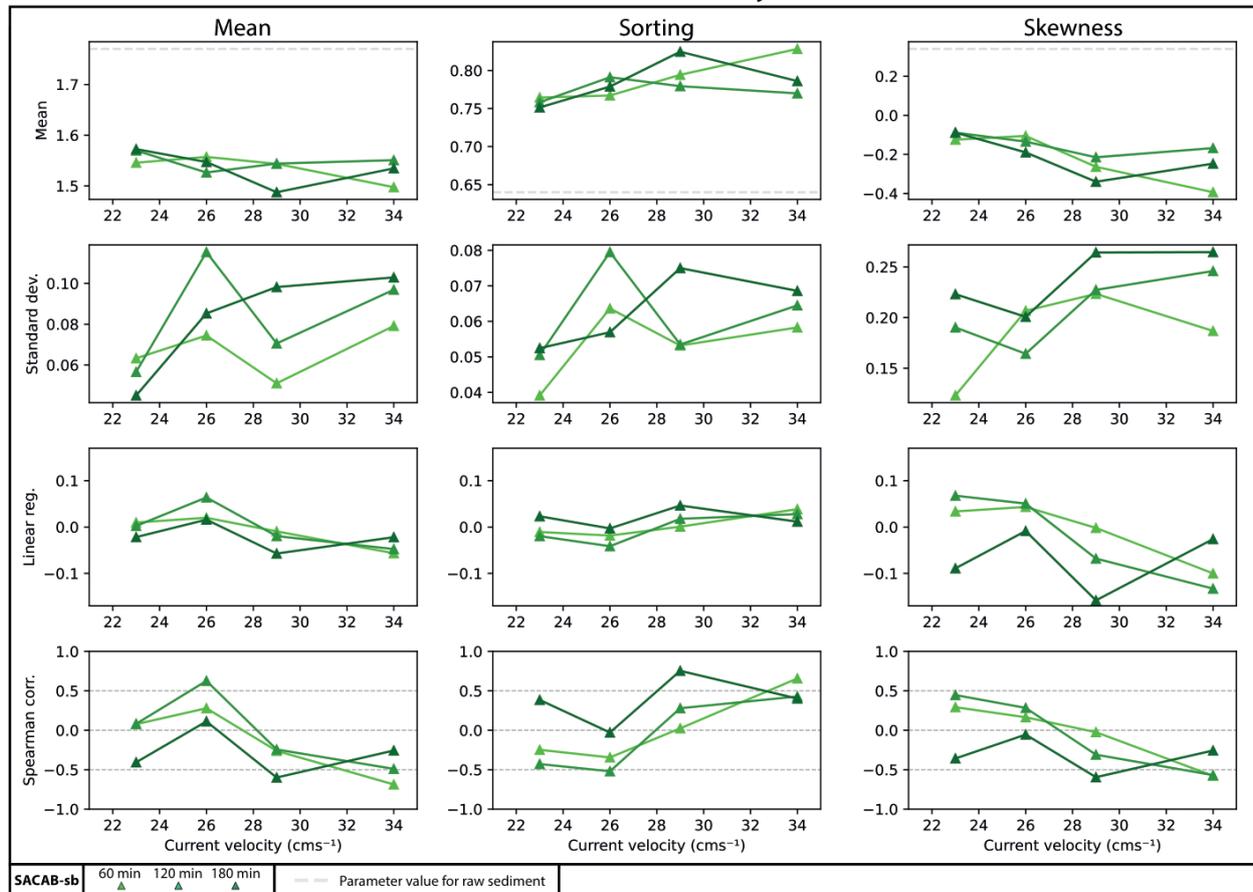


Figure 16 : Évolution des paramètres granulométriques à travers 4 paramètres statistiques calculés pour chaque jeu de donnée de la série H : moyenne, écart-type, régression linéaire, et coefficient de Spearman. Les valeurs moyennes sont affichées en échelle phi.

La figure 17 présente l'évolution des valeurs moyennes et des gradients du rapport Si/Ca le long du lit sédimentaire dans la série H (i.e. sédiment silico-bioclastique). Le rapport Si/Ca est utilisé pour quantifier la présence de particules carbonatées, correspondant à la fraction bioclastique, dans les différents échantillons. Les mêmes paramètres statistiques utilisés précédemment sont calculés pour ce nouveau paramètre sédimentologique. La valeur moyenne du rapport Si/Ca indique une augmentation en accord avec la vitesse du courant. Cette augmentation est associée à une diminution de la quantité de particules bioclastiques, plus facilement transportés par le courant que les particules de quartz. Le coefficient de régression linéaire et de Spearman ne montrent aucune corrélation permettant de lier le rapport Si/Ca et la vitesse du courant. L'absence d'une telle corrélation est pour le moment, interprétée comme une érosion ou un enfouissement rapide des particules bioclastiques, et elle est donc attribuée à une limitation du protocole expérimental.

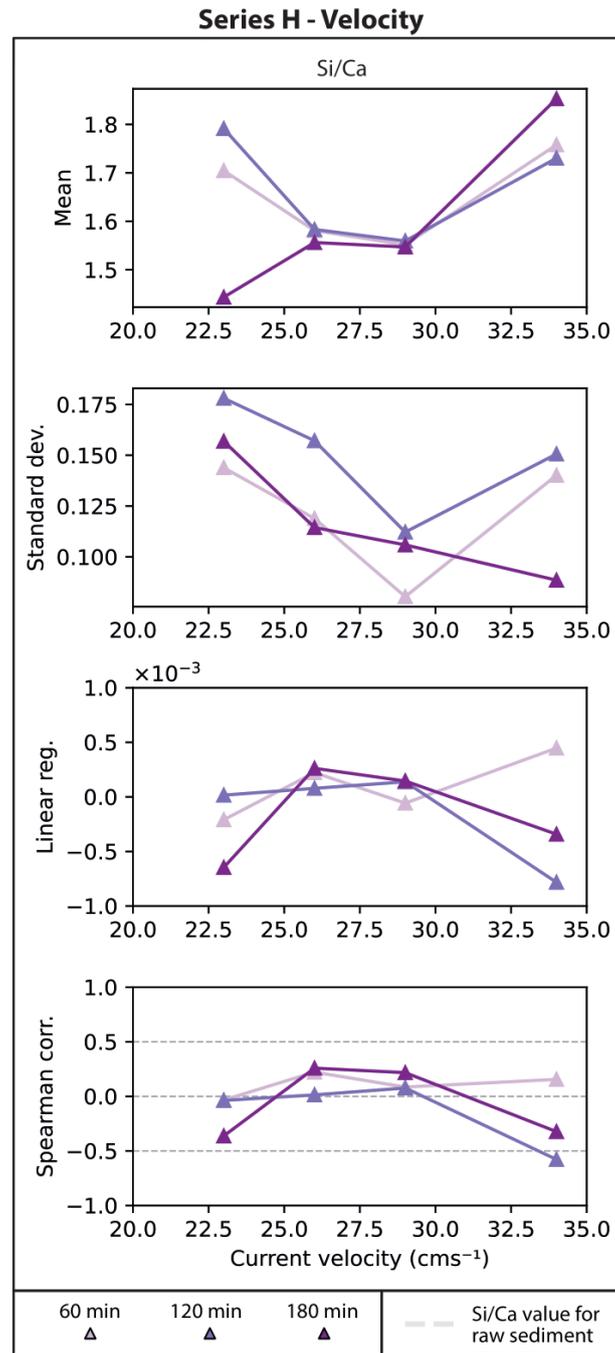


Figure 17 : Évolution du rapport Si/Ca à travers 4 paramètres statistiques calculés pour chaque jeu de donnée de la série H : moyenne, écart-type, régression linéaire, et coefficient de Spearman. Les différentes couleurs de courbe indiquent la durée de l'expérience.

Les figures 18 et 19 présentent les taux de validation de chaque cas GSTA en fonction de la distance caractéristique pour les expériences G1 et H3, respectivement. Pour rappel, la distance caractéristique définit le nombre d'échantillons pris en compte dans le traitement géostatistique. Dans les expériences avec du sédiment silicoclastique, le cas FB- est celui permettant d'atteindre les plus forts taux de validation (i.e. bonne estimation de la direction du transport sédimentaire). Dans les expériences avec du sédiment silico-bioclastique, les plus forts taux de validation sont atteints par le

cas CP-. Les taux de validation pour le cas FB- sont compris entre 20 et 40 %, tandis que le taux d'erreur est généralement inférieur à 10 %. Les taux de validation du cas CP- peuvent atteindre des valeurs de 60%, mais les taux d'erreur sont pour la plupart supérieurs à ceux du cas FB-. Cette analyse par cas GSTA permet de confirmer les tendances observées précédemment sur les paramètres granulométriques (Fig. 15 et Fig. 16). Il est possible de constater que les taux de validation ne peuvent être dissociés des taux d'erreur, pouvant être à l'origine d'une mauvaise estimation de la direction du transport. Les différences dans les taux de validation entre les expériences avec du sédiment silicoclastique et silico-bioclastique montrent la différence comportementale des deux sédiments. La direction du transport pour le sédiment silicoclastique peut être déduite, malgré de faibles gradients granulométriques, grâce au cas FB- (i.e. cas le plus courant pour estimer des directions de transport sédimentaire). Le cas CP-, pour le sédiment silico-bioclastique, est un cas qui n'est jamais ou rarement utilisé pour estimer des directions de transport.

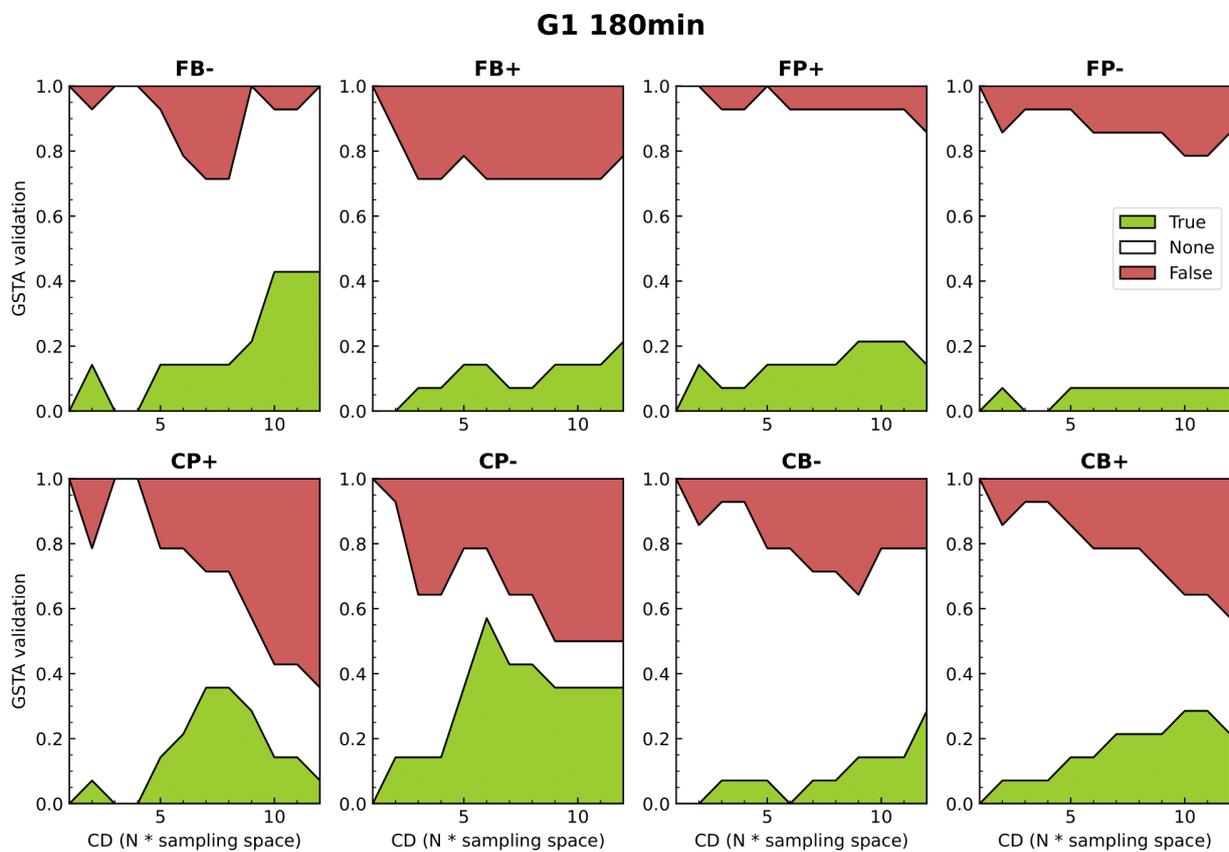


Figure 18 : Taux de validation pour chaque cas GSTA en fonction de la distance caractéristique dans l'expérience G1 (vitesse du courant =  $23 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). CD : distance caractéristique.

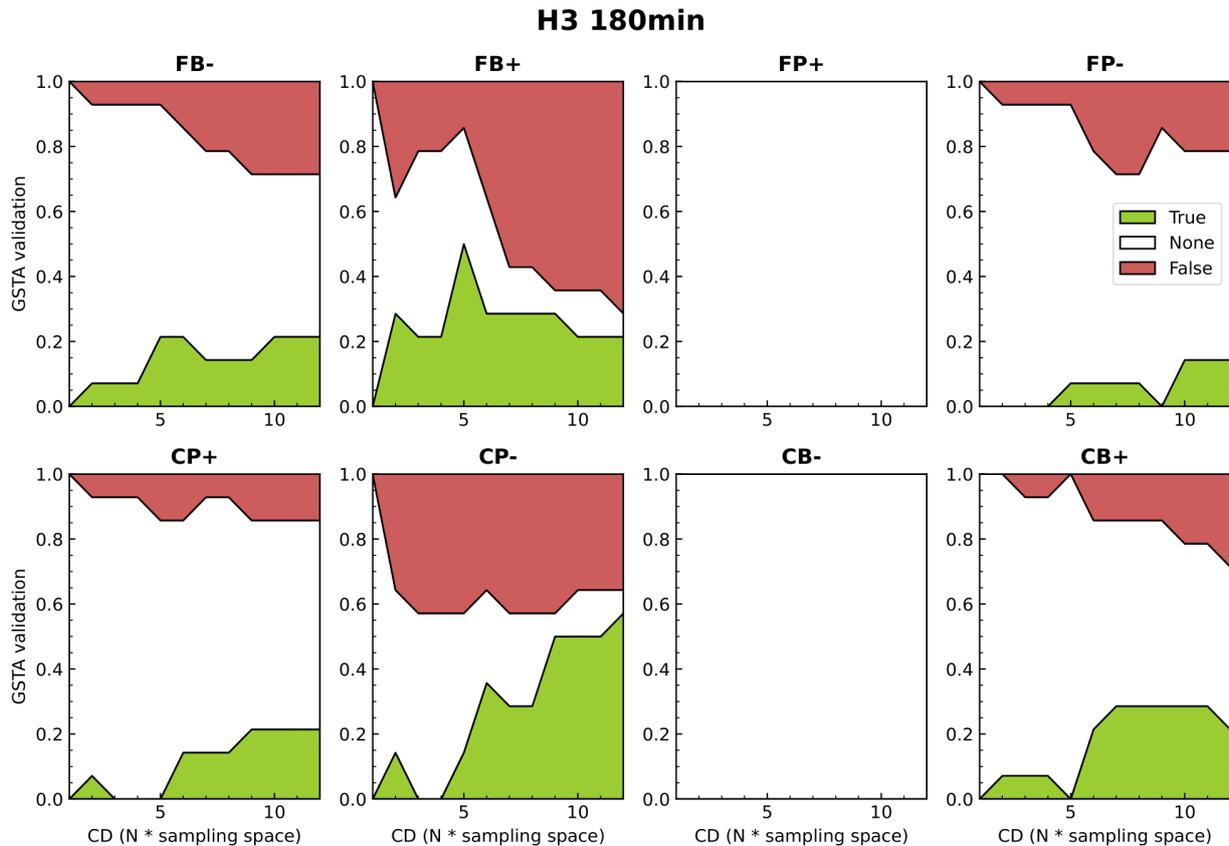


Figure 19 : Taux de validation pour chaque cas GSTA en fonction de la distance caractéristique dans l'expérience H3 (vitesse du courant =  $29 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). CD : distance caractéristique.

Les figures 20 et 21 présentent des sorties GSTA pour les expériences des séries G et H en utilisant les cas GSTA ayant les plus fort taux de validation : FB- pour la série G et CP- pour la série H. Les flèches vertes et rouges indiquent si la direction du transport sédimentaire est correctement estimée ou pas. Cette nouvelle représentation permet de visualiser l'impact d'une variation de la vitesse du courant dans la capacité à la méthode GSTA de prédire la direction du transport sédimentaire. Dans le cas du sédiment silicoclastique, le cas FB- est de moins en moins capable de prédire la direction du transport lorsque la vitesse du courant augmente (Fig. 20). Dans le cas du sédiment silico-bioclastique, les taux de validation sont irréguliers mais non nuls, tandis que les taux d'erreur sont généralement élevés (Fig. 21). La différence comportementale entre les deux sédiments est ici encore une fois mise en lumière.

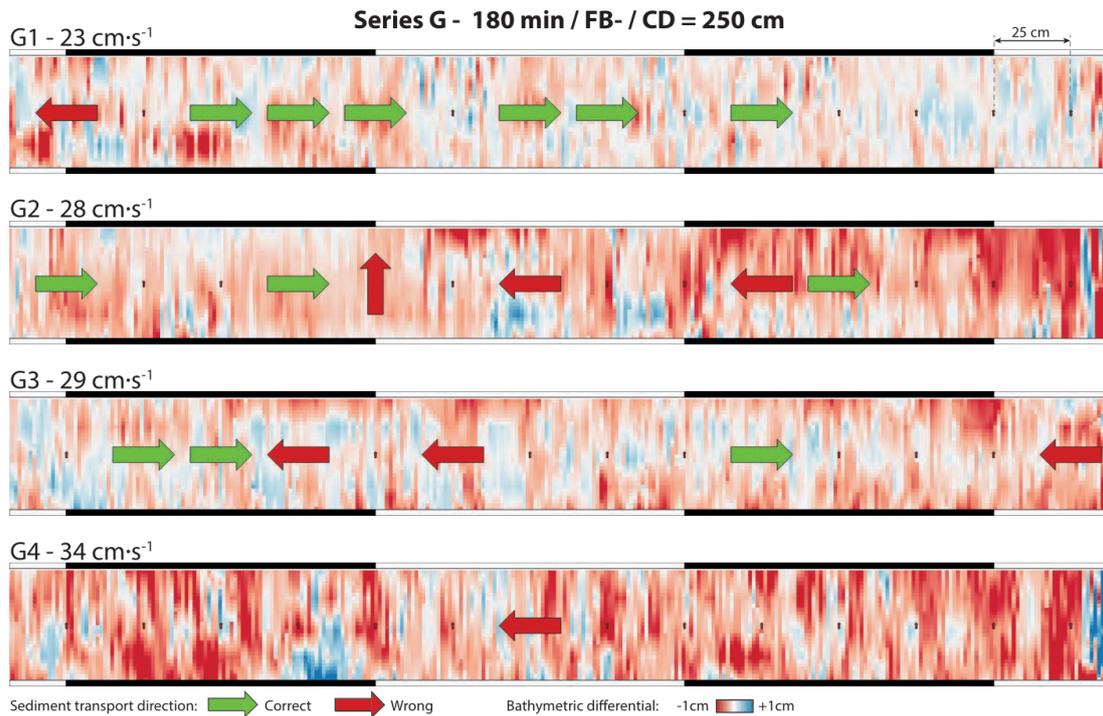


Figure 20 : Sorties GSTA du cas FB- pour les expériences de la série G à 4 vitesses de courant différentes. Le fond de carte est un différentiel bathymétrique entre le bathymétrie de début et de fin d'expérience.

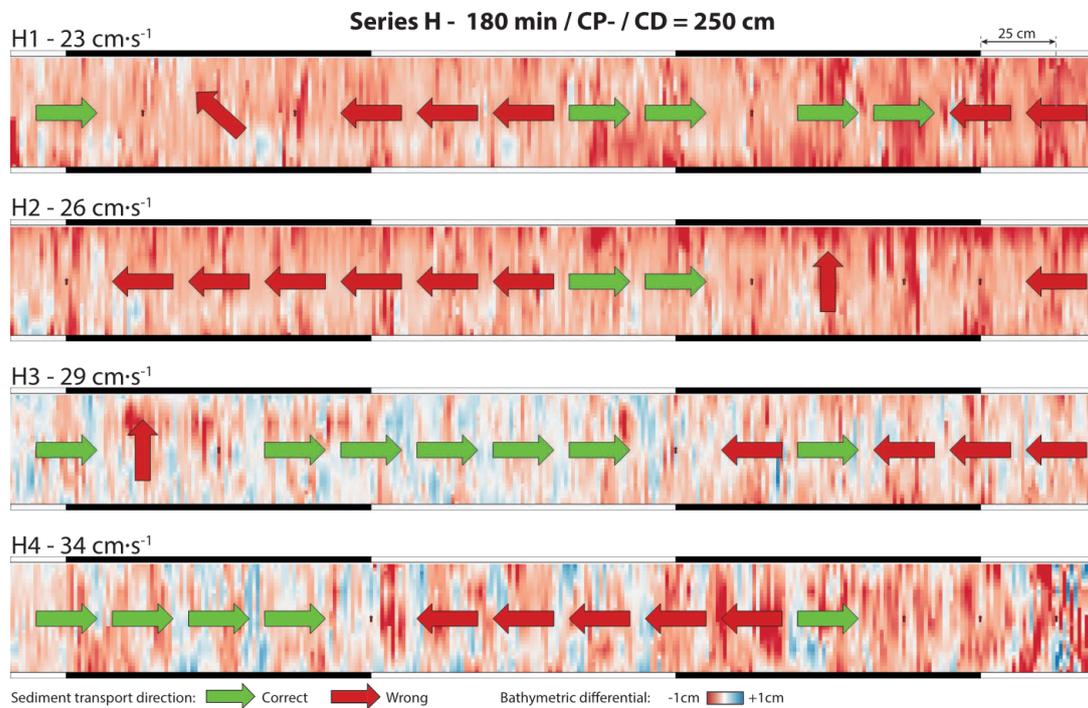


Figure 21 : Sorties GSTA du cas CP- pour les expériences de la série H à 4 vitesses de courant différentes. Le fond de carte est un différentiel bathymétrique entre le bathymétrie de début et de fin d'expérience.

En conclusion, la méthode GSTA a montré une forte capacité à estimer des directions de transport sédimentaire, et ce malgré la présence de gradients granulométriques extrêmement faibles. Les différentes analyses ont démontré qu'il est plus difficile d'estimer la direction du transport lorsque le sédiment est composé d'un mélange silico-bioclastique. À ce jour, il nous est impossible de quantifier l'erreur induite dans la méthode GSTA lorsque que celle-ci est utilisée sur des sédiments hétérogènes. La faible quantité d'échantillons récoltés dans les expériences en canal, en comparaison avec l'étude en milieu naturel, s'avère être une source d'incertitude majeure. Le tri sédimentaire en milieu naturel résulte d'un temps d'action plus long des agents hydrodynamiques de transport, et s'exprime sur des distances plus importantes. Il est donc probable que la méthode GSTA présente des résultats plus robustes sur le terrain que ceux observés en canal, même sur des sédiments hétérogènes comme les sédiments silico-bioclastiques.

La réalisation des différentes séries d'expériences et les résultats présentés dans ce bilan ont permis d'améliorer considérablement la méthodologie à appliquer pour mieux comprendre les processus complexes de transport sédimentaire. Le nombre d'expériences est encore insuffisant pour étudier en profondeur les corrélations entre vitesse du courant et gradients granulométriques et/ou géochimiques, mais permettent néanmoins d'orienter les futures recherches.

## V. Communications scientifiques et aux professionnels - Prospective

### V.1. Communications scientifiques et aux professionnels

Les résultats obtenus dans le cadre du projet ECUSED ont été présentés à la fois dans des congrès scientifiques nationaux (ASF de Brest en 2022 et RST de Rennes en 2023) et aux professionnels (Assemblées générales (AG) du GIS ECUME en 2022 et 2023, voir ci-dessous). Ces présentations se poursuivront en 2024 (ASF de Lille et AG du GIS ECUME 2024).

Le projet ECUSED est soutenu par le GIS ECUME (Groupement d'Intérêt Scientifique pour l'étude des Effets CUMulés en MER). L'objectif du GIS est de proposer une démarche scientifique permettant d'acquérir la connaissance sur les impacts cumulés des activités humaines en mer (exploitation de granulats marins, énergies marines renouvelables, dragages et dépôt de dragages portuaires, câbles sous-marins, activités de pêche). Il associe 10 membres, réunissant, en une approche régionale, les principaux porteurs de projets en mer : UNICEM Normandie (Union des industries de carrières et matériaux de construction), CRPMEM Normandie (Comité régional des pêches maritimes et des élevages marins), RTE (Réseau de transport d'électricité), HAROPA PORT, Ports de Normandie, EOHF (Éoliennes Offshore des Hautes Falaises) et EODC (Éoliennes Offshore du Calvados) et établissements d'enseignement supérieur et de recherche (Universités de Caen, Rouen et Le Havre). En fédérant l'interaction entre ses partenaires scientifiques et professionnels, le GIS agit comme un cluster collaboratif permettant de réaliser des projets communs de recherche au plus proche des enjeux des activités. Les AG annuelles du GIS constituent une plateforme d'échange pour tout ce qui concerne le domaine des effets cumulés des activités maritimes. Elles réunissent à la fois les professionnels de la mer cités ci-dessus, les chercheurs scientifiques, ainsi que les associations environnementales et les représentants des administrations et collectivités (DREAL, DDTM, DIRM,

Région, départements 76, 14, 50). Les présentations du projet ECUSED lors des AG du GIS permettent ainsi de diffuser les connaissances acquises lors du projet et de répondre aux questions des différentes parties prenantes.

Legoff, V., Murat, A., Weill, P., Frigola, C., Gregoire, G., Méar, Y., Pezy, J.-P., Poizot, E., Lesourd, S., Legrain, M., Marin, F., Le Bot, S., Mensens, C. et Pancrazzi, L. (2022) Effets cumulés des activités humaines en mer sur les fonds sédimentaires : apports de la géochimie et des géostatistiques. ASF, Brest, France.

Murat, A., Poizot, E., Méar, Y., Gregoire, G., Legoff, V., Pezy, J.-P., Frigola, C., Weill, Lesourd, S. et Mensens, C. (2023) Impacts anthropiques cumulés sur les fonds sédimentaires : géochimie élémentaire des fractions sédimentaires, une clé du traçage des sources et des transports. Application au projet ECUSED (Effets CUMulés sur le SEDiment). 28<sup>ième</sup> RST, Rennes, France.

Pancrazzi, L., Weill, P., Poizot, E., Murat, A., Méar, Y., Legrain, M. et Lagniel, E. (2023). Étude en milieu contrôlé de la méthode GSTA (Grain Size Trend Analysis) sur sédiments hétérogènes. 28<sup>ième</sup> RST, Rennes, France.

## V.2. Prospective

Les communications scientifiques sur nos travaux ont convaincu la communauté des sédimentologues côtiers français de l'intérêt de l'approche méthodologique ELSA associée à un plan d'échantillonnage régulier et nous avons reçu de multiples demandes de collaboration pour lever des verrous scientifiques. Nous avons pu mobiliser cette communauté autour d'un projet de recherche commun, CDYSCO (la composition Chimique, une clé pour comprendre les origines et la DYNAMIQUE des Sédiments CÔTIERS naturels et anthropisés). Le consortium est constitué de 10 laboratoires expérimentés dans l'étude de la dynamique sédimentaire en milieu côtier (LUSAC Cnam/Intechmer Cherbourg, LOG Lille, M2C Caen/Rouen, IDEES Caen, GEO\_OCEAN Brest/Vannes, Ifremer Brest, LETG Nantes, EPOC Bordeaux, CEFREM Perpignan et Shom Brest). L'association de ces laboratoires dans le projet CDYSCO a pour objectif de mobiliser les compétences françaises pour construire le corpus interprétatif autour des informations réellement nouvelles apportées par la méthodologie proposée. Chaque équipe a une connaissance approfondie de ses sites régionaux et des verrous scientifiques qui limitent les interprétations.

Nous avons trois objectifs scientifiques :

- 1) Identifier les différentes origines des particules sédimentaires, le spectre granulométrique qu'elles occupent et les stocks, disponibles au transport, qu'elles forment.
- 2) Comprendre la dynamique sédimentaire de chaque fraction granulométrique et de chaque type de grain identifié : sur un site délimité, où sont les sources et quelles sont les directions de transport ?
- 3) Evaluer la part de l'impact anthropique dans les origines des particules et la dynamique sédimentaire : l'homme intervient dans les zones côtières depuis très longtemps et y développe ses activités (édifices portuaires, dépôts en mer de sédiments dragués en zone portuaire, extraction de granulats, pêche, aménagements de chenaux de navigation,

aquaculture, champs d'éoliennes...), il est à la fois impossible d'ignorer cet impact qui touche toutes les zones côtières et essentiel de le cerner pour le minimiser à l'avenir.

Les perspectives d'application sont riches : origines des stocks sableux littoraux et sublittoraux, transport littoral longitudinal et cross-shore, limite d'action dominante houle/marée. Dans le contexte de la montée du niveau marin et de la déstabilisation des littoraux sableux qu'elle entraîne, il est essentiel de savoir enfin de quoi sont composés nos sables, d'où ils viennent et quelles sont les possibilités de leur renouvellement. La pression anthropique d'exploitation du milieu est croissante : constructions qui créent des obstacles à la dynamique sédimentaire, rejets en mer de sédiments fins dragués dans les ports, extraction de granulats, développement des champs d'éoliennes, elle interfère avec le milieu naturel avec complexité et crée le risque d'effets cumulés qui doivent être explorés avec des outils performants.

Le projet CDYSCO a été proposé à l'ANR une première fois en octobre 2023 dans le cadre de l'AAPG 2024 – PRC – Axe A.01 – Terre solide et enveloppes fluides – CE01. Le projet n'a pas été retenu en 2024, mais les membres du consortium qui sont mobilisés, ont décidé d'atteindre les objectifs scientifiques soit en réessayant d'obtenir un financement dans le cadre de l'AAPG 2025, soit à travers la recherche d'autres financements.