



Réseau d'Observation du Littoral Normand et Picard

Rapport du projet :

Tri sédimentaire et biologique sur fond sableux en zone côtière

Juin 2013

Rapport du projet : « Tri sédimentaire et biologique sur fond sableux en zone côtière »

Réseau d'Observation du Littoral Normand et Picard

Laboratoires ou structures participants au projet :

- Laboratoire LOMC, UMR 6294 CNRS, Université du Havre, 25 rue P. Lebon, BP 540, 76058 Le Havre Cedex (Porteur du projet : F. Marin)
- Laboratoire M2C, UMR 6143 CNRS, Université de Caen, 2-4 rue des Tilleuls, 14000 Caen
- Laboratoire LEMA, EA 3222, Université du Havre, 25 rue P. Lebon, 76600 Le Havre
- Cellule de Suivi du Littoral Normand, 53 rue de Prony, 76600 Le Havre

Personnel détaillé par laboratoire ou structure associée et fonction dans le projet

Nom Prénom	Grade/ qualité	Laboratoire/ organisme (nom/sigle, ville)	Rôle dans le projet
BERNO Aurélien	Tech. Sup. plongeur cadre biologiste	CSLN, Le Havre	Prélèvements in situ Plongeur
BUTELLE Florence	MCF	LEMA, Le Havre	Etudes biologie
DANCIE Chloé	Ingénieur d'études	CSLN, Le Havre	Prélèvements in situ
EZERSKY Alexander	P.U.	M2C, Caen	Etudes Mécanique des fluides / dynamique sédimentaire / tri
GUYET-GRENET Valérie	Directrice CSLN	CSLN, Le Havre	Prélèvements in situ Administratif
HANIN Camille	Tech. Sup.	CSLN, Le Havre	Prélèvements in situ Pilote
JARNO-DRUAUX Armelle	MCF	LOMC, Le Havre	Etudes Mécanique des fluides / dynamique sédimentaire / tri
LAYOUNE Adel	Stagiaire	LOMC, Le Havre	Etudes Mécanique des fluides / dynamique

			sédimentaire / tri
LE FOLL Frank	P.U.	LEMA, Le Havre	Etudes biologie
LEFRANCOIS Thomas		CSLN, Le Havre	Prélèvements in situ Pilote, sécurité surface
MARIN François	P.U.	LOMC, Le Havre	Responsable du projet ; Etudes Mécanique des fluides / dynamique sédimentaire / tri
REY Mélanie	Stagiaire	LEMA, Le Havre	Etudes biologie
TIGUERCHA Djillali	Stagiaire	M2C, Caen	Etudes Mécanique des fluides / dynamique sédimentaire / tri

Contexte des travaux

Ce projet sur le tri sédimentaire et biologique sur fond sableux en zone côtière s'inscrit sur les axes dynamique côtière et biodiversité du ROLNP, dans la continuité des stages de Master 2 effectués dans le cadre de ce réseau. Les stages réalisés en 2010/2011 ont montré en particulier la nécessité d'études pluridisciplinaires impliquant la mécanique des fluides, la dynamique sédimentaire, et la biologie pour améliorer la compréhension des processus impliqués dans le fonctionnement des petits fonds et de leur implication dans les activités humaines. Par ailleurs, les petits fonds sableux sont très souvent caractérisés par la présence de structures sédimentaires de petite échelle, de longueur d'onde typiquement de quelques dizaines de centimètres, appelées rides. Ces structures qui peuvent être générées sous l'action d'une houle, d'un courant, ou d'un écoulement combiné houle-courant, affectent significativement le transport sédimentaire, la dissipation d'énergie de la houle par frottement au fond, les courants de dérive. Elles ont un impact direct sur les transferts sédimentaires entre les zones subtidales et intertidales, et ainsi sur l'évolution du littoral en termes d'érosion et d'engraissement. La réponse des communautés du méiobenthos, voire leur rôle, vis-à-vis du transport sédimentaire reste mal connu. Ces organismes, dont certains transitent par la méiofaune alors que d'autre s'établissent dans ce compartiment, ont une taille (40 à 500 μm) parfois comparable aux grains de sable (Lampadariou *et al.*, 2005). La répartition des organismes verticalement, en couches, ou horizontalement, dans les crêtes, flanc ou creux des rides pourraient dépendre de leur forme (Escobar-Briones *et al.*, 2008). Certains ont une forme globalement ronde et une coquille carbonée (i.e. les

Foraminifères et les Ostracodes), d'autres sont de grande taille (i.e. Hydrozoaires et larves de Polychètes) alors que les plus nombreux sont tubulaires (Nématodes).

L'étude effectuée dans le cadre de ce projet sur le tri sédimentaire et biologique s'est basée sur trois approches :

- *In situ* (prélèvements par plongeurs et prélèvements en zone intertidale)
- Expérimentale en laboratoire (tri sédimentaire)
- Théorique (Modélisation des processus mis en jeu)

Prélèvements *in situ*

Des prélèvements ont été effectués en zone subtidale et en zone intertidale. Les sites ont été choisis afin d'être en présence de structures sédimentaires de type ride et de fonds sableux. Les prélèvements subtidaux ont été effectués par 7,6 m de hauteur d'eau au Nord Ouest de Ouistreham, et les prélèvements intertidaux sur la plage de Merville-Franceville. La localisation des sites est présentée sur la Figure 1. La campagne d'échantillonnage s'est déroulée pendant la journée du 23 octobre 2012 ; les conditions marégraphiques sont précisées en annexe 1.

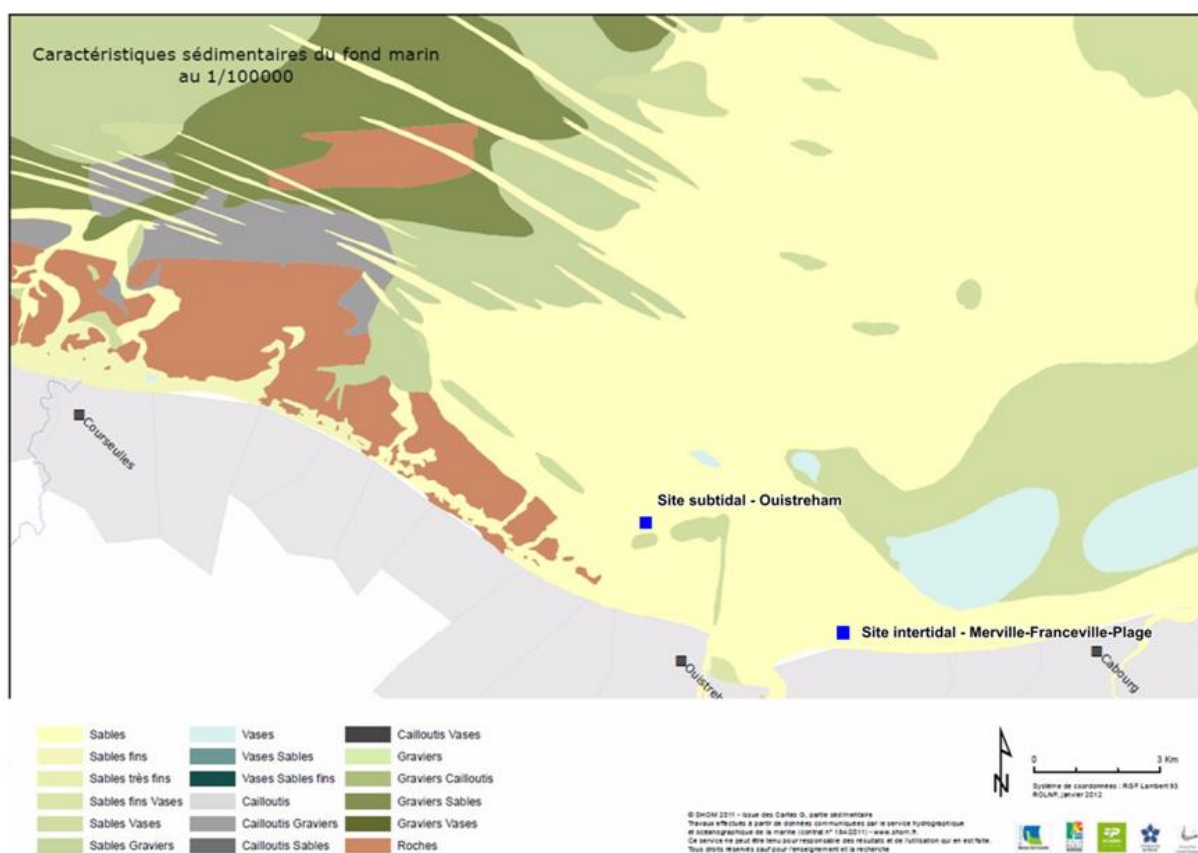


Fig.1. Localisation des sites de prélèvement (carrés bleus)

Concernant le domaine subtidal, une benne Van Veen a été utilisée pour vérification avant plongée du type de couverture sédimentaire. Les longueurs d'onde et hauteurs typiques des rides présentes sur le site étaient respectivement de 18 cm et 3 cm. Leur orientation était WNW-ESE. Des carottes de différentes profondeurs ont été prélevées au niveau des crêtes, des flancs, et du creux de la ride. Des prélèvements par raclage ont également été effectués. Le détail des échantillonnages est donné dans l'annexe 1. Les positions GPS ont été relevées et des prises de vue effectuées. Les échantillons ont été conditionnés en seau et fixés à bord par une solution de formaldéhyde neutralisée, diluée à 10% avec de l'eau de mer.

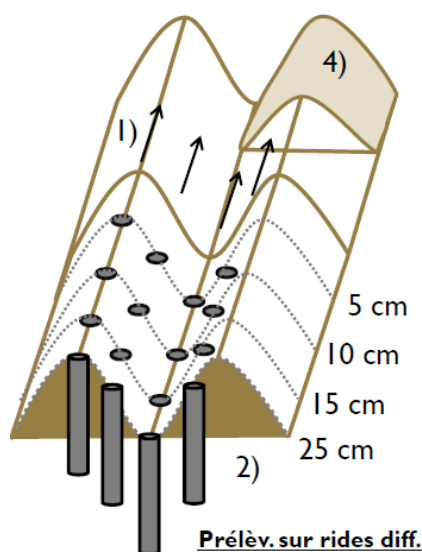


Fig.2. Schématisation des prélèvements par carotte

Pour le domaine intertidal, les échantillonnages ont été réalisés à marée basse sur l'estran. Les caractéristiques des carottes et raclages prélevés sont données dans l'annexe 1.

Le protocole d'extraction de la méiofaune, et l'analyse des résultats sont précisés ci-dessous.

Extraction de la méiofaune et analyse des résultats

A – Matériel et méthodes

1. Reprise des échantillons

L'eau de mer formolée est filtrée sur tamis de 63µm. Le refus est récupéré dans un minimum d'eau distillée. Avec une petite cuillère, les sédiments sont récupérés et répartis dans des tubes de 50 mL. Le tout est ensuite centrifugé à 300 x g, 3 minutes (**Figure 3**).

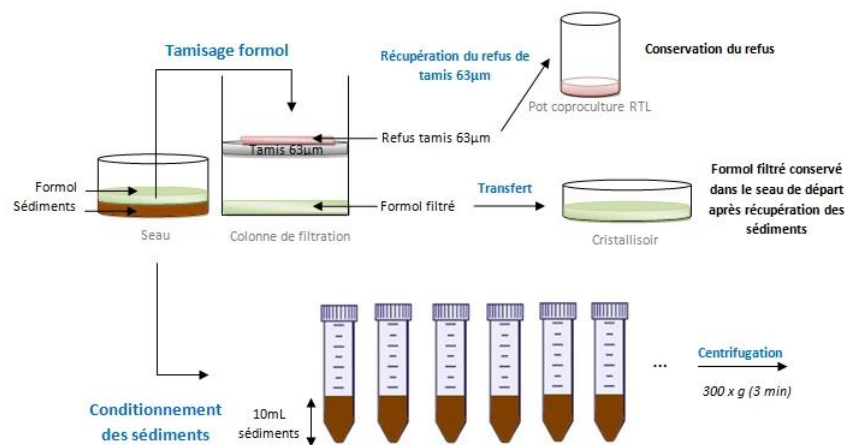


Fig. 3: Elimination du formol et conditionnement des sédiments

Il est nécessaire d'éliminer l'eau de mer contenue dans les échantillons car les sels marins provoquent la cristallisation du Ludox HS 40 utilisé pour extraire la méiofaune (Xu *et al*, 2010). Les culots sont donc resuspendus dans de l'eau distillée (eau milliQ) en ajustant le volume de chaque tube à 30mL et vortexés 30 secondes. Une nouvelle centrifugation (300 x g, 3 min) est réalisée (**Figure 4**). Les surnageants sont tamisés sur tamis de 63µm. Le refus de tamis est récupéré.

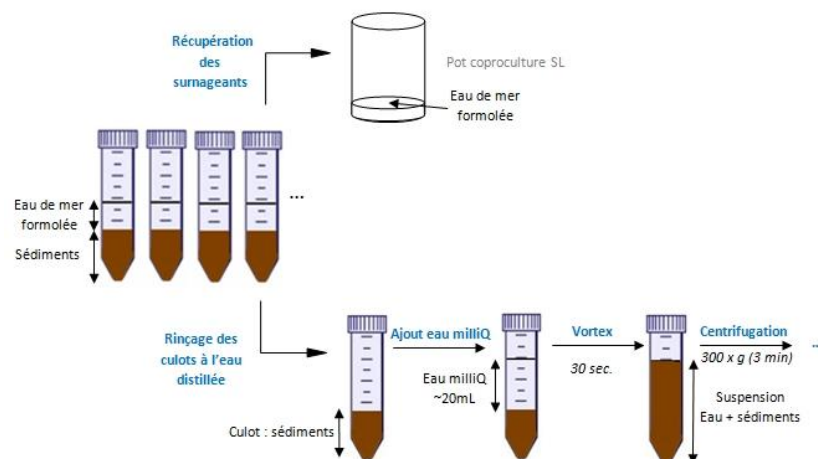


Fig. 4: Elimination eau de mer et rinçage à l'eau distillée

2. Extraction par centrifugation isopycnique dans le Ludox HS 40 et coloration

Les culots de sédiments sont resuspendus dans deux volumes de Ludox HS 40 de densité 1,3. La suspension est vortexée 30 secondes à vitesse élevée et placée dans un agitateur rotatif pendant 4 minutes. Les tubes sont centrifugés (900 x g, 15 minutes, **Figure 5**). Les individus composants la méiofaune présentent une densité située autour de 1,15 tandis que les minéraux ont une densité généralement comprise entre 2,5 et 2,8. Lors de la centrifugation les sédiments sont entraînés vers le fond alors que la méiofaune, moins dense, est arrachée aux grains et flotte en surface du Ludox (Burgess, 2001). La méiofaune dans le surnageant de centrifugation isopycnique est récupérée par tamisage à 63 µm.

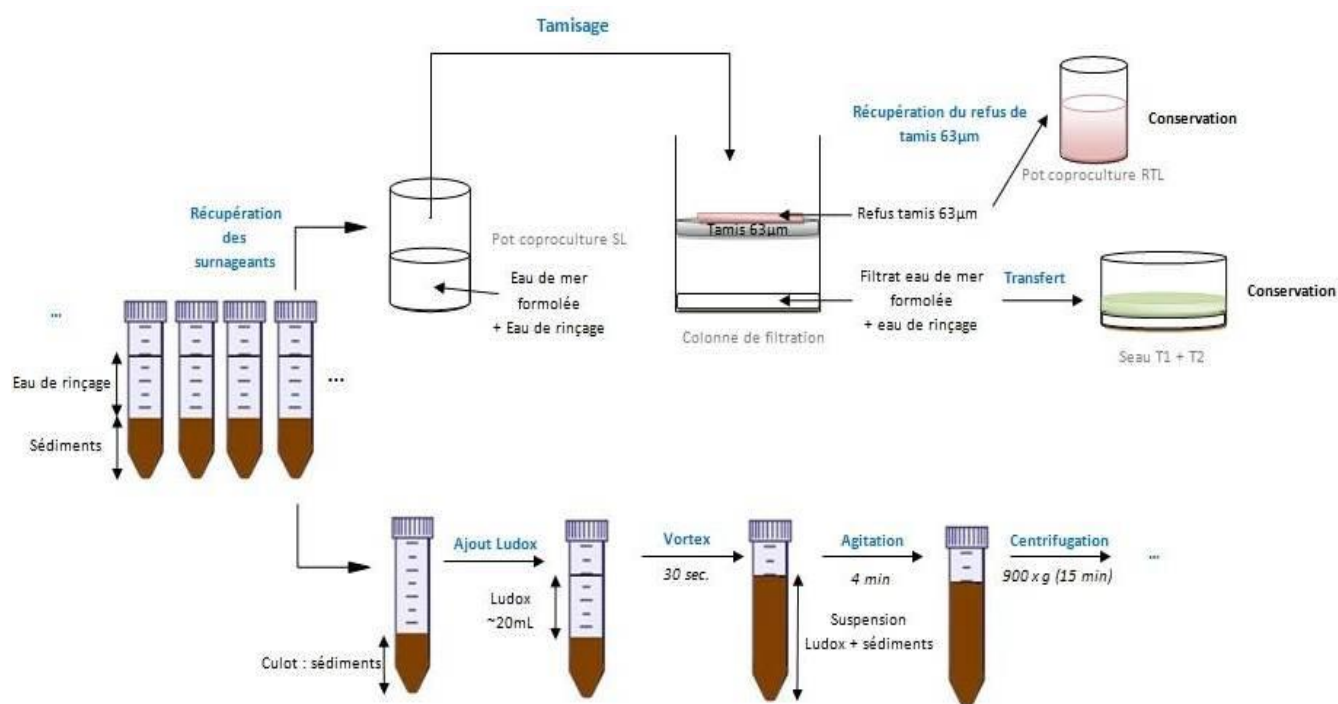


Fig. 5 : Tamisage des surnageants et ajout de la solution de Ludox HS40

Le refus de tamis est récupéré dans un minimum d'eau distillée. L'ensemble des tubes contenant les culots de sédiments est conservé sur support en polystyrène puis transmis au LOMC pour pesée des sédiments et analyse granulométrique (**Figure 6**).

Après centrifugation (900 x g, 3 min), l'extrait méiofaunique est coloré à la phloxine B 1 % m/v pendant 20 minutes. Après une dernière centrifugation (900 x g, 3 min) le culot est repris dans 15.6 mL d'eau distillée. Ce volume est réparti dans une plaque 24 puits (650 µL/puits) pour l'imagerie.

3. Détermination, comptage et analyse des données

Chaque puits est imagé en 4 parties à la loupe binoculaire (Leica MZ 10F) par une camera CCD (Leica DCF 425C). Les individus sont identifiés et comptés offline à partir des photos réalisées. Les abondances absolues sont ainsi obtenues pour chaque taxon. Les abondances relatives en pourcentage du total sont également calculées de la manière suivante :

$$fiz = \frac{Az}{N} \times 100$$

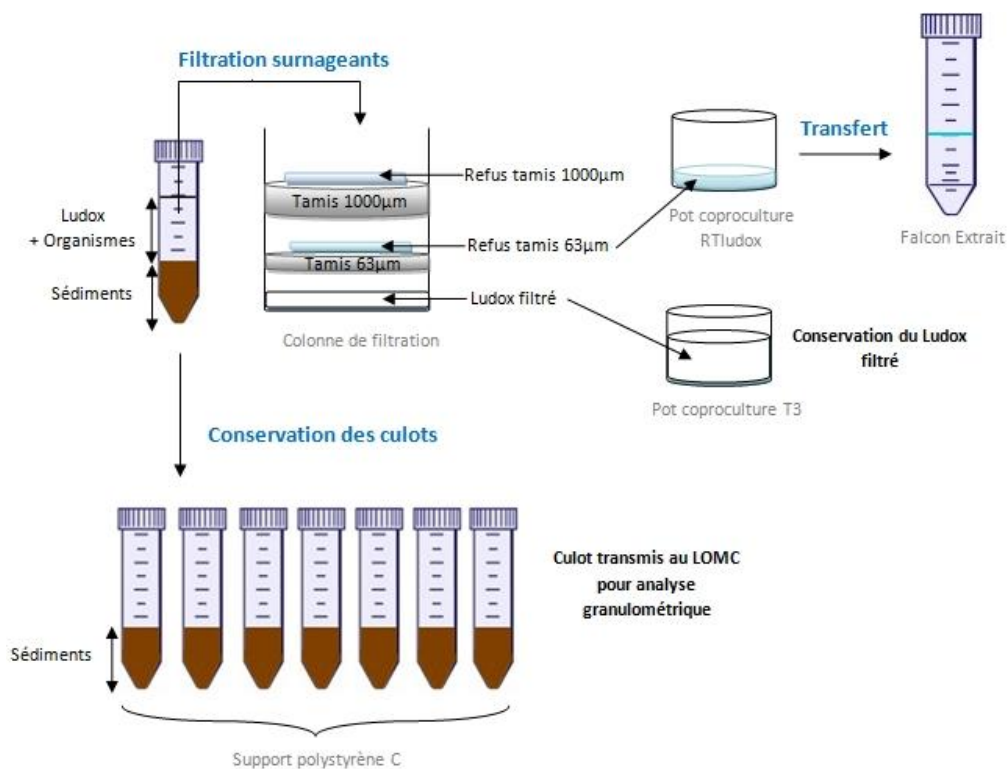


Fig. 6: Tamisage du Ludox et récupération des organismes d'intérêt

avec :

- fiz : abondance relative du taxon z
- Az : abondance absolue du taxon z (= nombre d'individus appartenant au taxon z)
- N : nombre total d'individus dans le seau

L'Indice de Shannon – Weaver (H') est calculé de manière suivante :

$$H' = - \sum_{i=1}^{i=S} f_i \times \log_2 f_i$$

- f_i représentant la fréquence des individus est défini par la formule : $f_i = \frac{Ni}{N}$
- Ni représentant le nombre d'individus du taxon i et N le nombre total d'individus présent dans l'échantillon considéré.

L'indice de Shannon correspond à une entropie définie sur une collection d'organismes et permet d'estimer la diversité.

La régularité de distribution des espèces est un élément important de la notion de diversité et peut être calculée à partir de l'indice de Shannon de la manière suivante :

$$R = \frac{H'}{H'_{max}} = \frac{H'}{\log_2(S)}$$

- H' étant l'indice de Shannon et H'_{max} l'entropie maximale obtenue lorsque les taxons « S » ont une équiréquence avec $H'_{max} = \log_2(S)$.

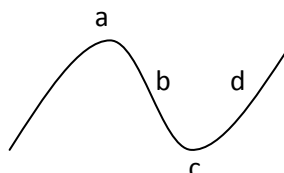
B – Résultats et discussion

1. Echantillons collectés et échantillons analysés

La campagne de prélèvement s'est déroulée le 23 octobre 2012 sur le littoral de Ouistreham en deux opérations permettant de collecter des échantillons de sédiments radialement à des rides de faible hauteur (3 cm) et de longueur d'onde relativement courte, 18 et 35 cm pour les domaines subtidaux et intertidaux, respectivement. A chaque fois (**Figure 7A**), des sédiments ont été collectés sur la crête (notés a), sur le flanc (b), dans le creux (c) ou sur le flanc de la ride opposée (d). Les prélèvements subtidaux, en plongée à 7,6 m de profondeur, ont pris la forme de raclages, avec une masse sèche de sédiment collectée comprise entre 33 et 49 g, ou de carottage enfoncés de 5 à 25 cm dans le sédiment (**Figure 7B**). Les carottes ont été vidées dans des sachets plastiques pendant la plongée, puis fixées au paraformaldéhyde 10 % dans l'eau de mer sur le bateau. Les différents horizons ne sont pas préservés et il n'y a pas de réplcats. Les prélèvements intertidaux sur l'estran ont aussi pris la forme de raclages, avec une masse sèche de sédiment collectée comprise entre 16 et 34 g, ou de carottage enfoncés 25 cm dans le sédiment (**Figure 7C**). Les raclages et les carottes ont été congelés à -80 °C au retour au

laboratoire. Deux réplicats sont disponibles et les carottes conservent la structuration verticale. L'ensemble des raclages ainsi que les prélèvements subtidaux de 5 et 10 cm ont été analysés, ce qui implique l'extraction de la méiofaune, la photographie des organismes, la détermination et le comptage des individus (en jaune, **Figure 7BC**).

A



B

Références seaux (zone subtidale)

	a : crête	b : flanc	c : creux	d : flanc
Raclages/masse (g)	ROLNP A/33,42	ROLNP H/34,6	ROLNP B/34,81	ROLNP E/49,39
5 cm	ROLNP 16/197,07	ROLNP 4/196,5	ROLNP 15/120,27	ROLNP 17/213,91
10 cm	ROLNP 29/237,55	ROLNP 20/248,45	ROLNP 10/208,85	ROLNP 11/233,71
15 cm	ROLNP 31	ROLNP 6	ROLNP 23	ROLNP 24
25 cm	ROLNP 18	ROLNP 22	ROLNP 30	ROLNP 7

C

Références carottes (zone intertidale)

		a : crête	b : flanc	c : creux	d : flanc
Réplicat 1	Raclages/masse (g)	RA a rep1 s2/34.8	RA b rep1 s2/16.4	RA c rep1 s2/28.8	RA d rep1 s2/23.4
	Carottes	CA a rep1 s2	CA b rep1 s2	CA c rep1 s2	CA d rep1 s2
Réplicat 2	Raclages	RA a rep2 s2/13.1	RA b rep2 s2/15.3	RA c rep2 s2/24.1	RA d rep2 s2/20.4
	Carottes	CA a rep2 s2	CA b rep2 s2	CA c rep2 s2	CA d rep2 s2

Fig. 7: Nomenclature utilisée et liste des échantillons analysés.

Les échantillons analysés sont surlignés en jaune.

2. Analyse méiofaunique globale

2.1. Prélèvements subtidaux

2.1.1. Structure et composition

La densité moyenne de la méiofaune totale est de 437 ± 59 individus pour 100g de sédiment (moyenne $\pm$ erreur standard, $n=12$). La densité est plus élevée dans la première strate analysée (626 ± 54 individus pour 100g à 5 cm, $n=4$) qu'en surface (195 ± 16 , $n=4$) et, dans une moindre mesure, qu'en profondeur (491 ± 27 à 10 cm, $n=27$, **Figure 8**). Les différences entre les localisations a, b, c et d ne sont pas manifestes.

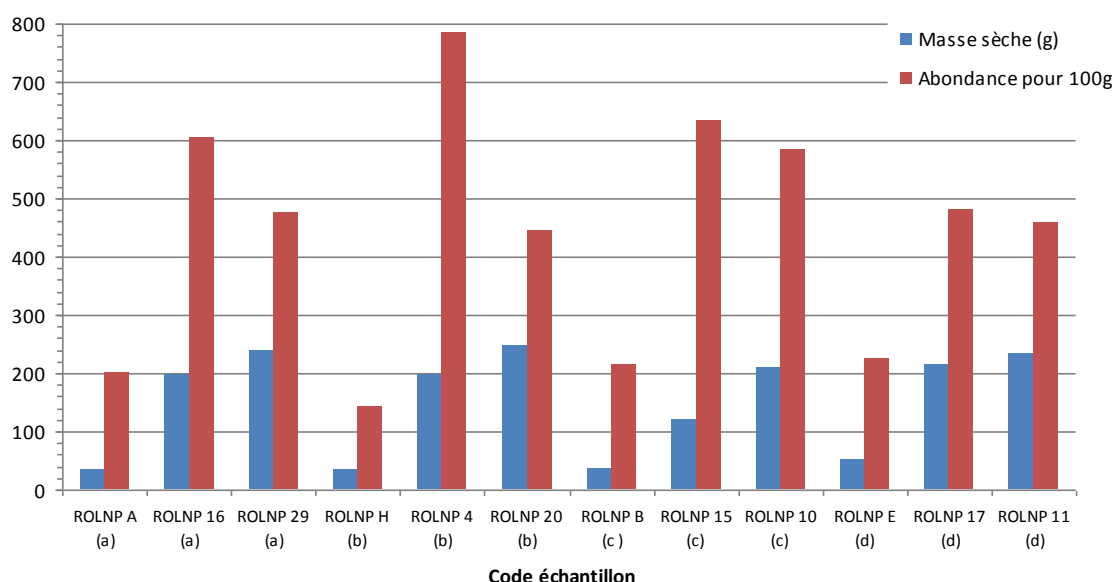


Fig. 8: Masses sèches des échantillons et abondances totales pour 100 g en zone subtidale.

Parmi 20 phyla possibles, la méiofaune identifiée dans les rides subtidales couvre 15 groupes : Nématodes, Copépodes, Polychètes, Halacariens, Foraminifères, Oligochètes, Plathelminthes, Cnidaires, Amphipodes, **Gnathostomulidés**, **Kinorhynques**, Rotifères, **Loricifères**, **Gastrotriches** et Ostracodes. Quatre des cinq phyla spécifiques de la méiofaune (à l'exclusion des Tardigrades) sont présents (en gras dans la liste précédente).

Conformément à la pratique des études sur la méiofaune, les nauplii des copépodes benthiques ont été considérés ici comme étant un groupe fonctionnel distinct des copépodes adultes. Ils se trouvent donc représentés séparément. De façon similaire, les larves véligères issues du développement des trochophores de mollusques marins sont comptées séparément.

Les nématodes sont le groupe dominant (78.9 %), suivi des Copépodes (8.4 %) et des Foraminifères (2.2 %). Le total des individus non identifiés (notés UN) forme 6.7 % des 12

échantillons (**Figure 9**). L'échantillon ROLNP B, correspondant à un raclage dans un creux, présente un taux de Nématodes plus faible (55.7 %), à cause notamment de la présence de 17 individus appartenant au même groupe non identifié (24.3 %). L'absence de réplicats rend difficile l'interprétation de la significativité de ces différences.

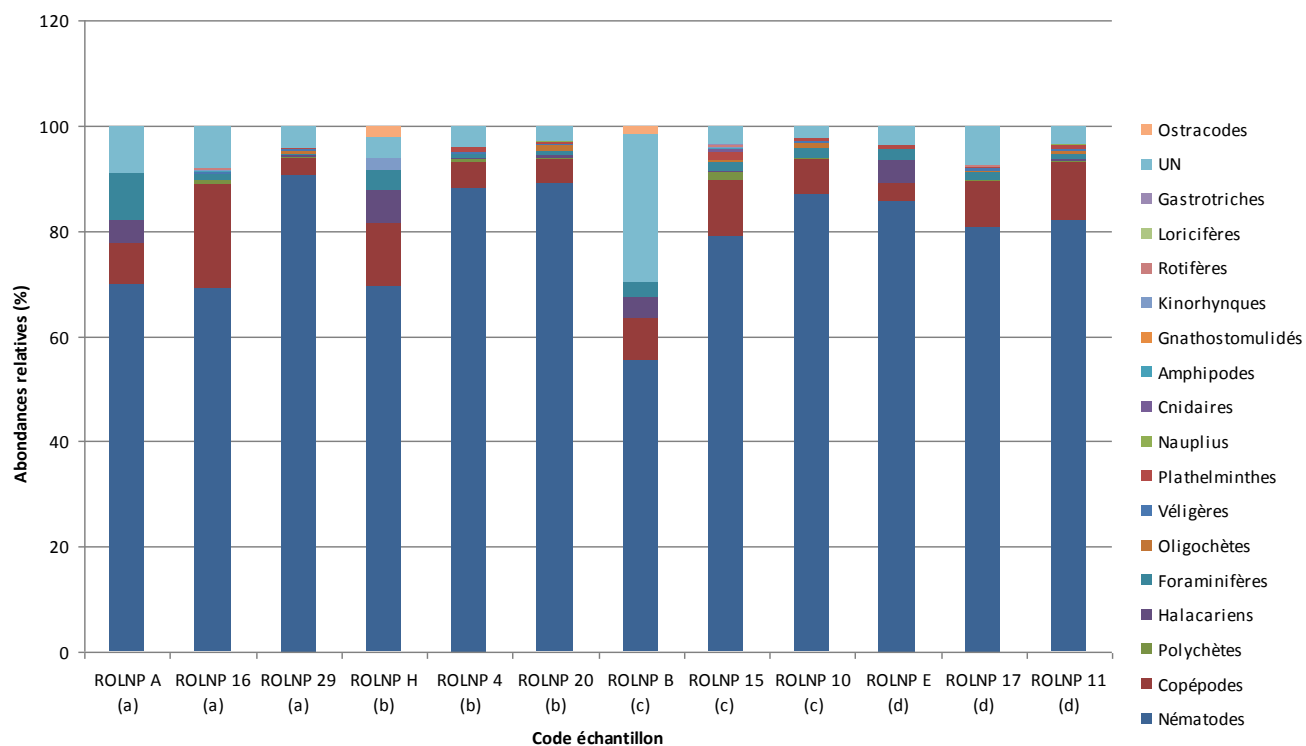


Fig. 9: Composition et abondance relative (%) de la méiofaune dans les 12 échantillons subtidaux analysés.

2.1.2. Diversité et richesse taxonomique

Les indices de diversité en phyla (Indice de richesse de Shannon-Weaver, H') et de régularité (répartition des individus dans les groupes identifiés) sont donnés **Figure 10**.

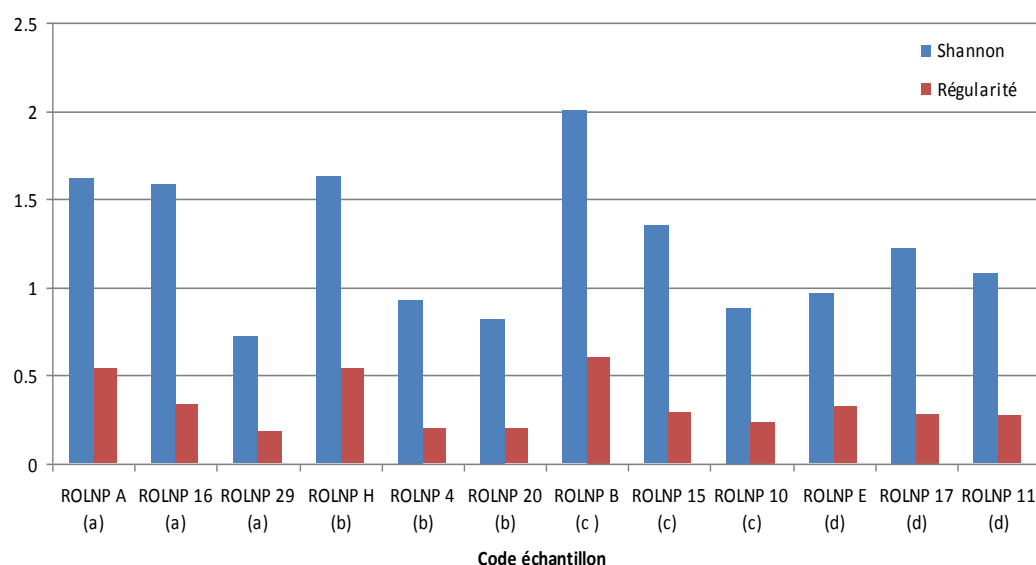


Fig. 10 : Indices de diversité et de régularité dans les échantillons subtidaux.

De manière générale et avec une détermination des groupes d'appartenance au niveau des phyla, la diversité apparaît faible ($H' < 2$). Ceci s'explique par la forte dominance des nématodes. Dans les échantillons où moins de nématodes sont comptés, la diversité augmente (pour ROLNP B, par exemple). La diversité tend à diminuer dans les échantillons incluant des couches plus profondes (typiquement à 10 cm, $H' < 1.5$). La régularité a tendance à augmenter avec la richesse.

2.2. Prélèvements intertidaux

2.2.1. Structure et composition

Seuls les raclages ont été analysés. Deux répliquats sont disponibles. La densité moyenne de la méiofaune totale y est de 583 ± 24 individus pour 100g de sédiment (moyenne $\pm$ erreur standard, $n=2$). L'abondance varie toutefois avec la localisation ; un nombre plus grand d'organismes est compté sur le flanc b, avec une bonne reproductibilité dans les deux répliquats (**Figure 11**).

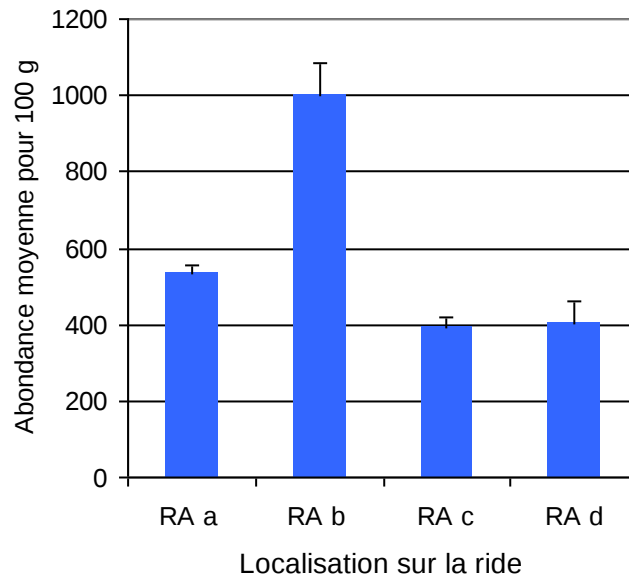


Fig. 11 : Abondances moyennes pour 100 g dans les répliquats intertidaux.

Dans les raclages intertidaux, le phylum spécifique de la méiofaune et absent des analyses subtidales, les Tardigrades, est trouvé avec une abondance relative de 1.2 %, ce qui fait de lui le troisième groupe par ordre d'importance. Les Nématodes (**Figure 12**) restent le groupe dominant (67.2 %), suivi des Copépodes, largement représentés (29.9 %).

2.2.2. Diversité et richesse taxonomique

Les indices de diversité en phyla (Indice de richesse de Shannon-Weaver, H') et de régularité (répartition des individus dans les groupes identifiés) sont donnés **Figure 13**. La part importante des nématodes et des copépodes donnent des diversités plutôt faibles ($H' < 1.2$).

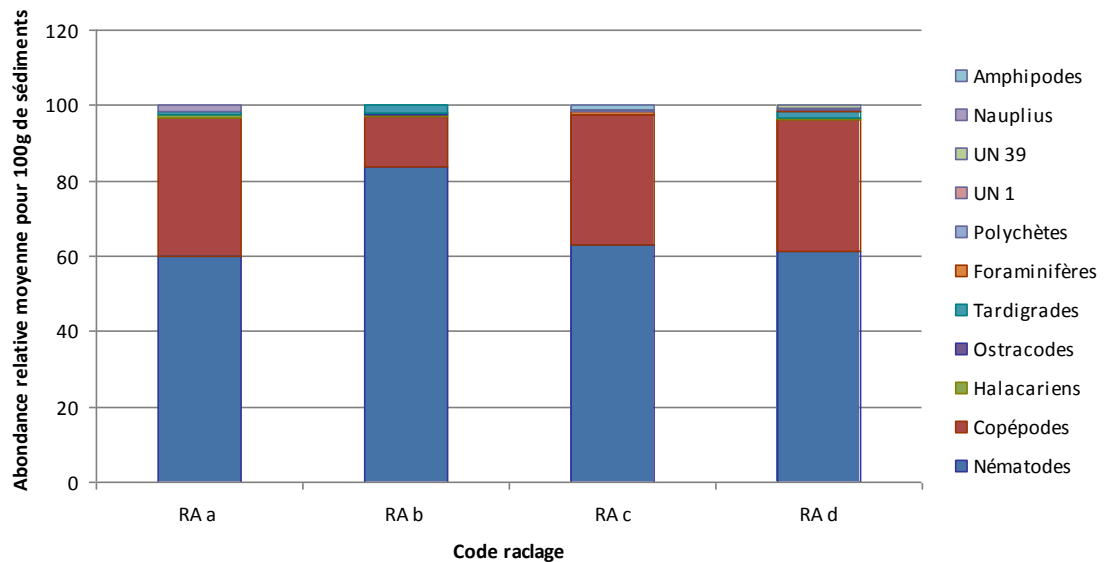


Fig. 12 : Composition et abondance relative (%) de la méiofaune dans les raclages intertidaux.

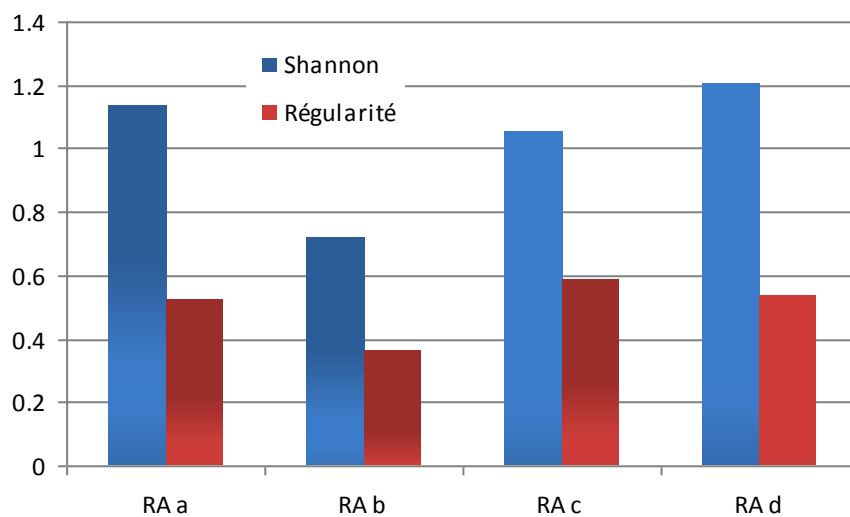


Fig. 13 : Indices de diversité et de régularité dans les raclages intertidaux.

3. Comparaison entre les raclages subtidaux et intertidaux

L'analyse comparée de la composition et de l'abondance relative en phyla des raclages (Figure 14), indique une surreprésentation des copépodes dans le domaine intertidal. Par ailleurs, leur

composition est relativement différente, avec seulement cinq groupes communs (Nématodes, Copépodes, Halacariens, Ostracodes et Foraminifères).

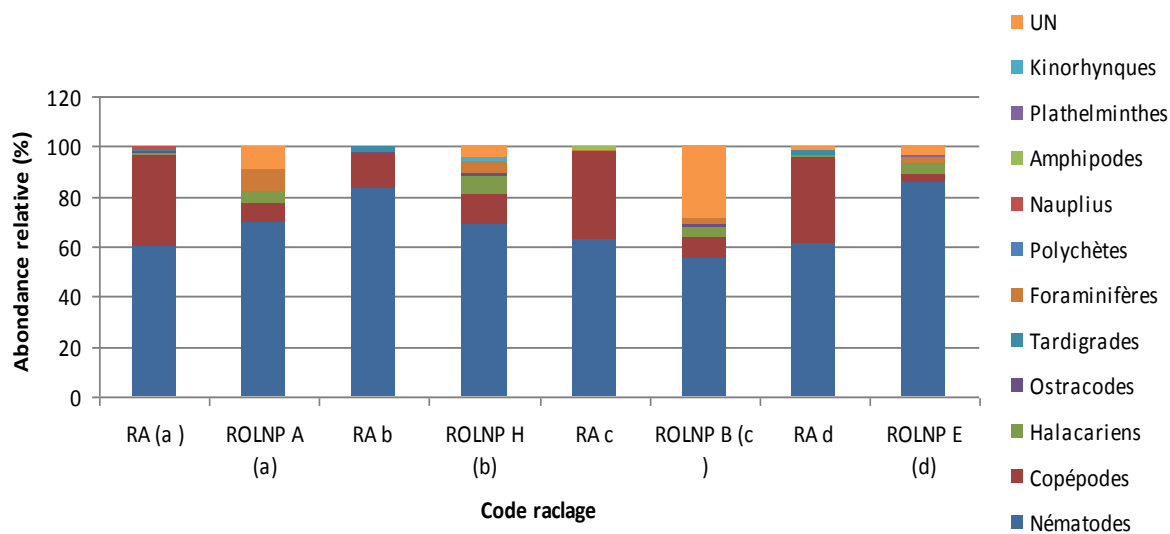
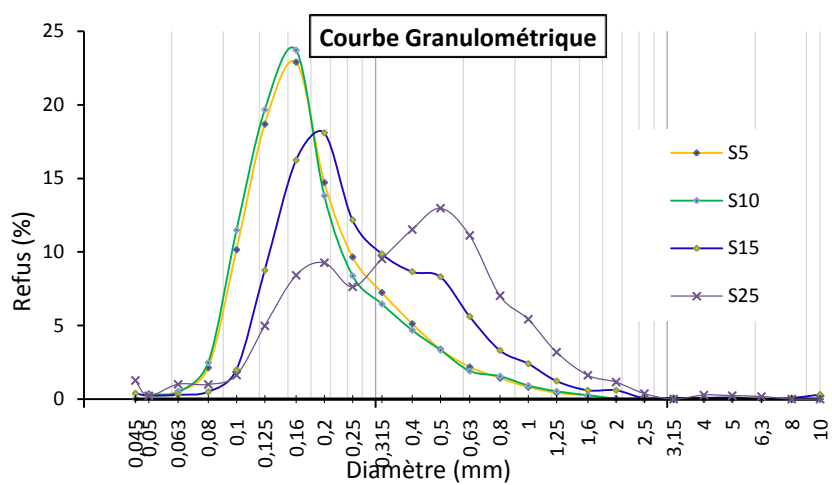


Fig. 14 : comparaison des abondances pour 100 g dans les racleages subtidaux et intertidaux.

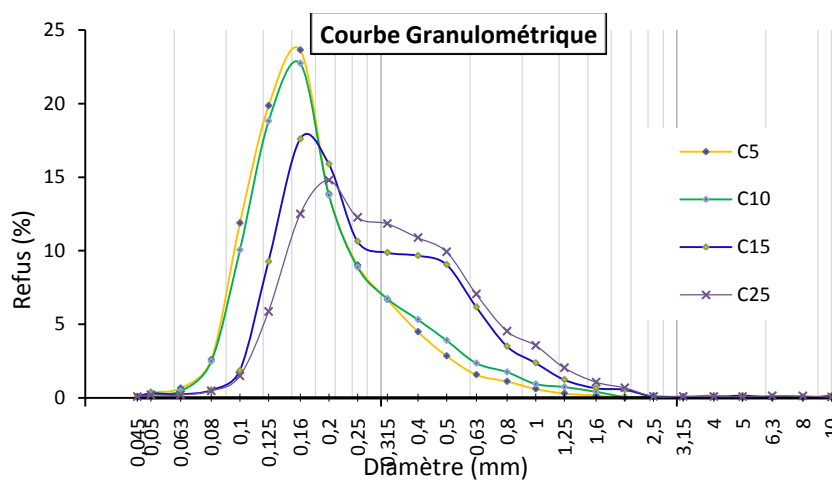
Distributions granulométriques des prélèvements subtidaux *in situ*

Les échantillons de sédiments prélevés ont été placés dans une étuve pour séchage avant d'être tamisés à l'aide d'une colonne de tamis. Les distributions granulométriques obtenues au niveau du sommet de ride, du creux, et des flancs sont données Figure 15 pour les carottes de 5, 10, 15, et 25 cm. Les termes « amont » et « aval » pour les flancs de ride sont relatifs à la direction de propagation de la houle (mer de vent).

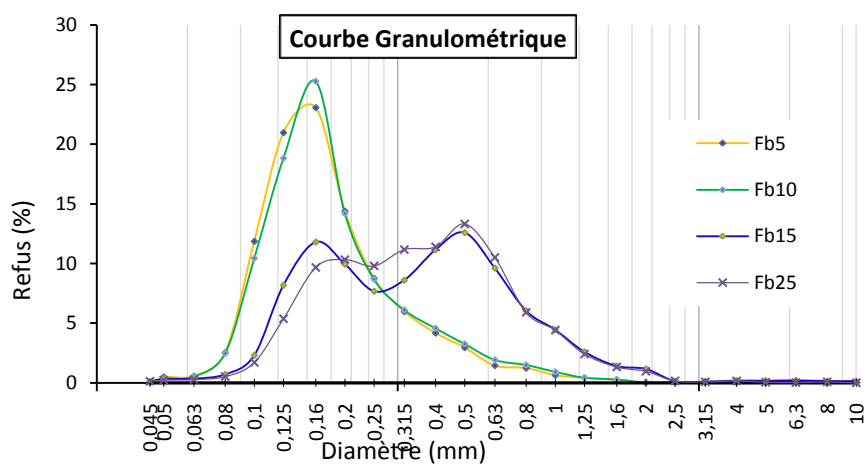
(a)



(b)



(c)



(d)

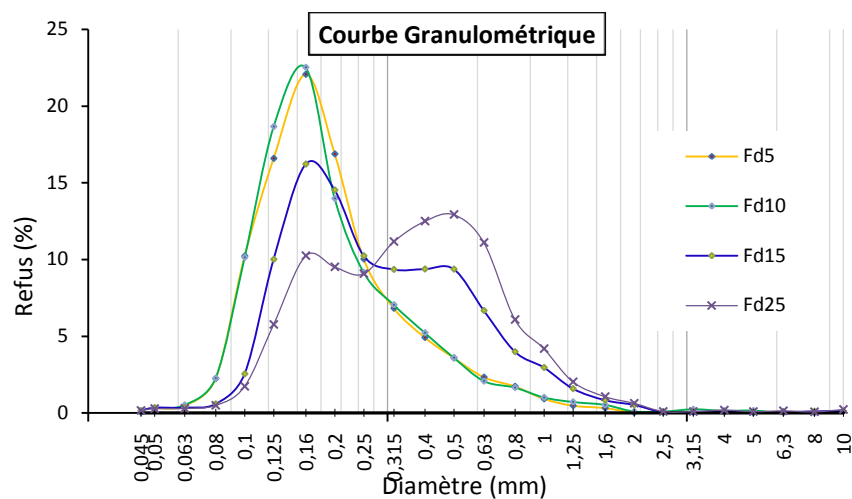
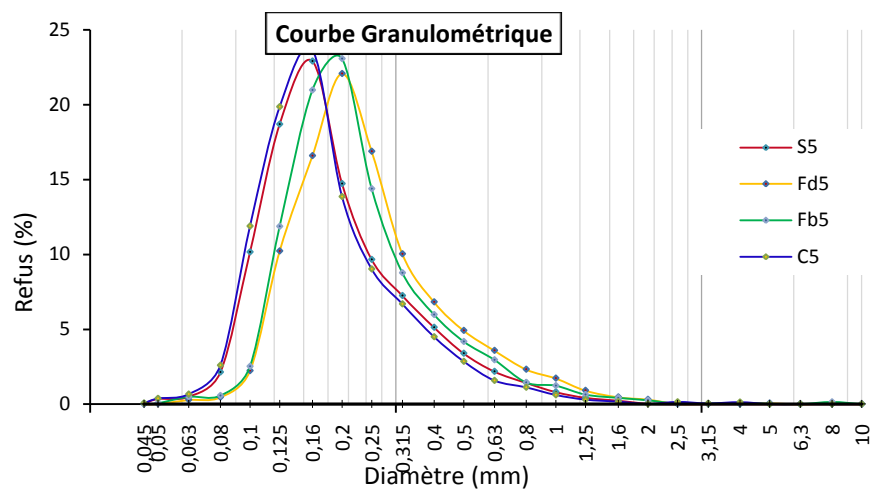


Fig. 15. Distributions granulométriques pour les carottes subtidales de 5, 10, 15, et 25 cm ; sommet de ride (a), creux (b), flanc amont (c), flanc aval (d).

Les distributions granulométriques mettent en évidence une augmentation de la taille des sédiments avec la profondeur des prélèvements. La Figure 16 présente les distributions granulométriques le long d'une ride pour les carottes de 5 et 10 cm.

(a)



(b)

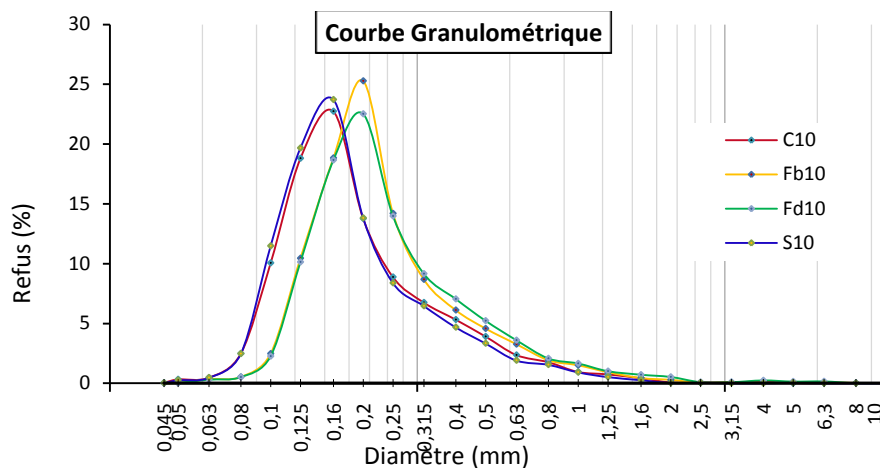


Fig. 16. Comparaison des distributions granulométriques entre les sommets, creux, et flancs de ride ; carottes de 5 cm (a) ; carottes de 10 cm (b).

Les pics de distribution correspondent à des sédiments plus fins aux sommets et creux de ride qu'aux flancs.

Etude expérimentale en laboratoire du tri sédimentaire

Des tests préliminaires ont été effectués en canal à houle dans le cas d'une houle régulière se propageant au-dessus d'un fond ridé. Les essais effectués avec deux classes de taille (sable fin et sable moyen) ont montré une accumulation superficielle de grains fins aux sommets et creux de rides ainsi qu'un dépôt de sable moyen de façon plus uniforme le long de la ride lors de l'amortissement de l'écoulement. Afin de considérer le tri en volume sous l'action d'un écoulement oscillant, un dispositif expérimental simple a été conçu. Il s'agit d'une cellule remplie d'eau dans laquelle on peut mettre des sédiments (Fig. 17). La cellule est montée sur un plateau dont la fréquence et l'amplitude des oscillations peuvent être réglées.

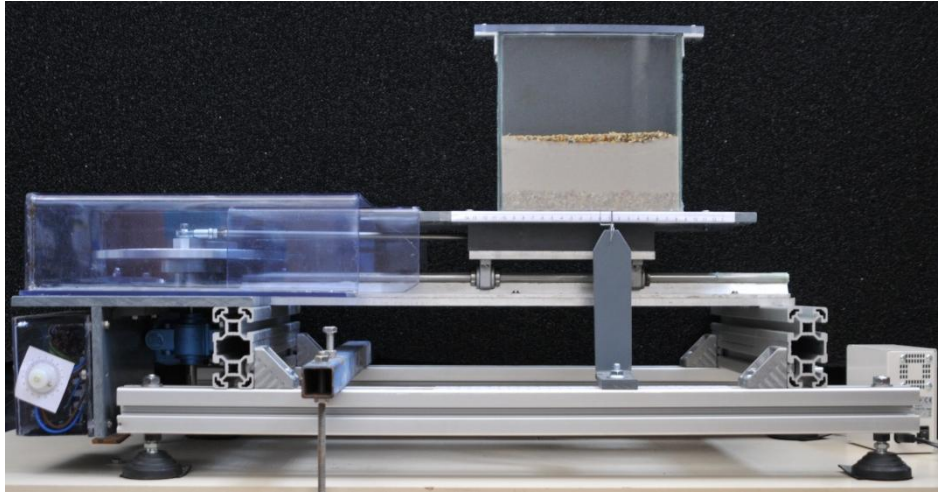


Fig. 17. Dispositif expérimental de cellule oscillante

Des essais avec ce dispositif ont été effectués dans un premier temps avec des sédiments homogènes en taille. Pour l'étude du tri en fonction de la taille des sédiments, un tamisage (colonne de tamis) de matériaux a été effectué afin de garder les tailles suivantes :

$2 < D < 2,5 \text{ mm}$ (S1)

$1,25 < D < 1,6 \text{ mm}$ (S2)

$0,8 < D < 1 \text{ mm}$ (S3)

Des rides se forment rapidement lors des oscillations de la cellule, à l'interface eau-sédiments initialement plane pour les différents tests effectués (Fig.18). Le tri des sédiments atteint un équilibre après environ 30 minutes.

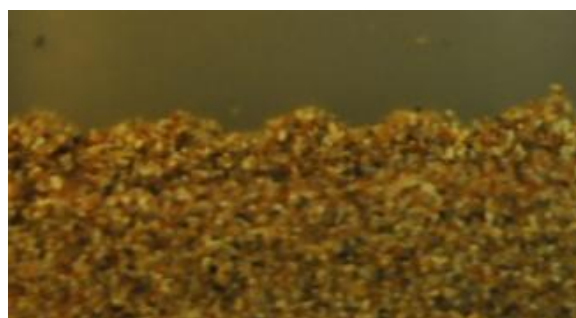


Fig. 18. Rides typiques observées dans le dispositif expérimental

La Figure 19 montre le tri obtenu dans le cas d'un mélange initialement homogène de sédiments S1 (60%) et S3 (40%), à la fin du test.

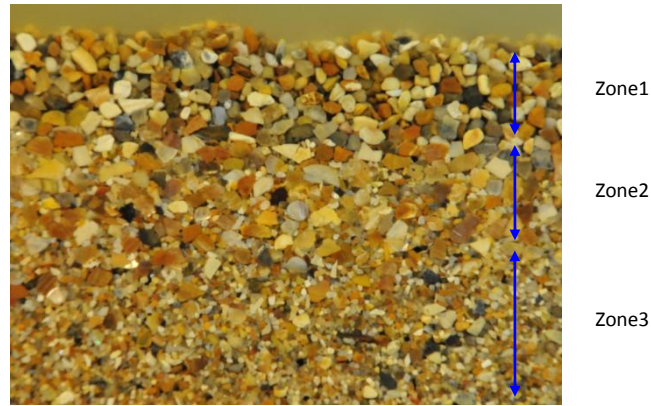


Fig. 19. Tri final obtenu pour un mélange de sédiments S1 (60%) et S3 (40%)

Un tri vertical apparaît clairement mettant en évidence successivement de bas en haut : des sédiments correspondant au mélange initial (zone 3), les plus gros sédiments (zone 2 ; $D \approx 2,5$ mm), les sédiments les plus fins de S1 (zone 1 ; $D \approx 2$ mm). Le même résultat est obtenu pour un mélange initialement homogène de sédiments S1 (60%) et S2 (40%) (Fig. 20).

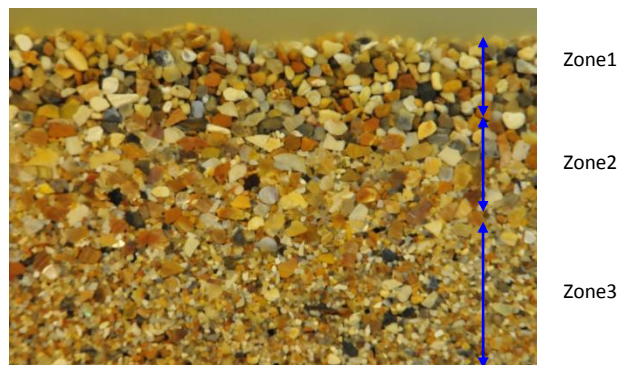


Fig. 20. Tri final obtenu pour un mélange de sédiments S1 (60%) et S2 (40%)

Les résultats issus des prélèvements *in situ* et ceux obtenus en laboratoire montrent en particulier un tri vertical des sédiments avec une couche superficielle au-dessus de sédiments plus grossiers. Nous avons effectué une étude numérique afin de modéliser le tri sédimentaire.

Etude théorique du tri sédimentaire

Pour la simulation numérique du tri sédimentaire dans les rides sableuses, nous avons utilisé l'équation de diffusion non linéaire. Le détail de la formulation mathématique est donné en annexe 2.

1. Principe de comparaison

Dans nos simulations, on a essayé de s'approcher des conditions *in situ* et de prendre en considération la procédure de prélèvement où des carottes de sédiment sont prises, en allant de l'interface eau-sédiment jusqu'à des profondeurs de 5, 10, 15 et 25 cm, au niveau du creux « C », du flanc abrité « FB », du flanc exposé « FD » et de la crête « S ». Dans le modèle, il n'y a pas de rupture brute des concentrations de sédiments en raison de la présence de suspensions. Pour dépasser cette contrainte, on a fixé une valeur de concentration minimum « $C_{\min}$ » qui nous sert à calculer les hauteurs de l'interface « *numérique* » pour différentes coordonnées horizontales (« C_{num} » pour le creux, « FB_{num} » pour les flancs, et « S_{num} » pour la crête).

En se servant de ces hauteurs comme base (interface eau-sédiment), on peut calculer les rapports des concentrations cumulées de deux types de particules (sédiments) caractérisés par des tailles différentes pour différentes profondeurs (5, 10, 15 et 25 cm). Le choix de ces tailles est considéré ci-dessous.

2. Le choix des conditions initiales

Représenter un échantillon hétérogène par un mélange de deux classes de taille s'avère une tâche très difficile. Pour trouver les deux tailles de grains et leurs concentrations les plus représentatives, on a analysé les données granulométriques des carottes rassemblées de 25 cm (Fig. 21). A partir de ces données, on a choisi de prendre les deux modes suivants : $d_1=0,5 \text{ mm}$ et $d_2=0,2 \text{ mm}$. Le diamètre le moins présent entre ces deux modes est $d=0,25 \text{ mm}$ (Fig. 21). Sa valeur nous sert de frontière entre les deux types de particules ; la concentration initiale des particules fines (0,2 mm) est représentée par le cumul des grains dont le diamètre est inférieur ou égal à 0.25 mm . Le reste correspond à la concentration des particules de diamètre 0,5 mm.

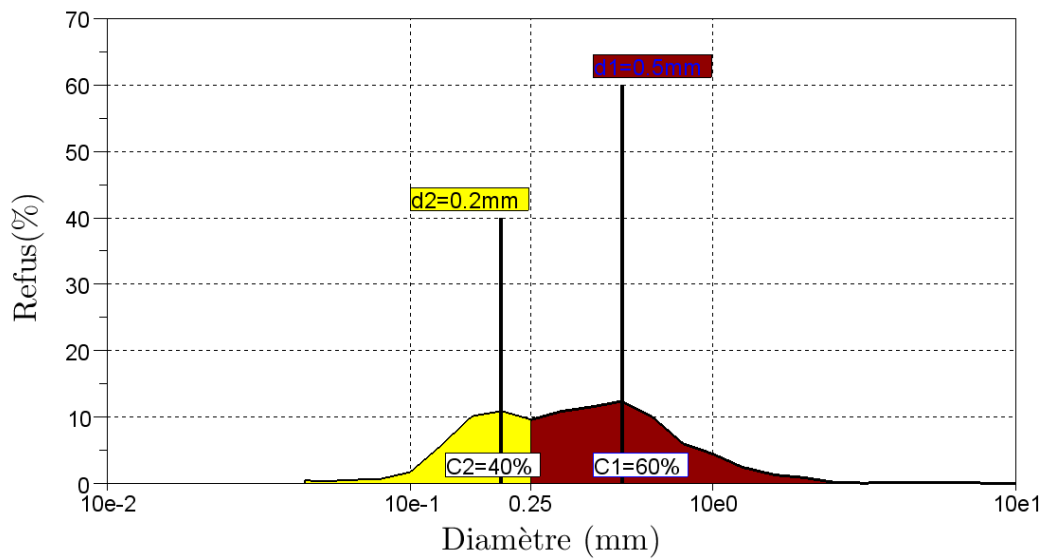


Fig. 21. Courbe granulométrique des carottes rassemblées de 25 cm, et paramètres de modélisation choisis (les barres représentent la taille et les concentrations initiales choisies, les surfaces jaune et marron illustrent la méthode de calcul des concentrations initiales)

3. Résultats et discussion

Les résultats des simulations numériques montrent l'évolution spatio-temporelle des concentrations des deux types de particules. Cette évolution est sensiblement différente pour les particules fines ($d=0,2$ mm) et les « grosses » ($d=0,5$ mm) particules (Fig. 22 et 23). La concentration des particules fines est la plus élevée près de l'interface eau-sédiments, alors que la concentration des grosses particules augmente avec la profondeur (Fig. 24). Le tri des sédiments en fonction de leur position le long de la ride (sommet, creux, flancs) est faible ; on peut cependant noter des concentrations de particules fines plus fortes au sommet et au creux de ride qu'aux flancs, au niveau de la couche superficielle (Fig.24). Les résultats théoriques sont en accord qualitatif avec les résultats *in situ*.

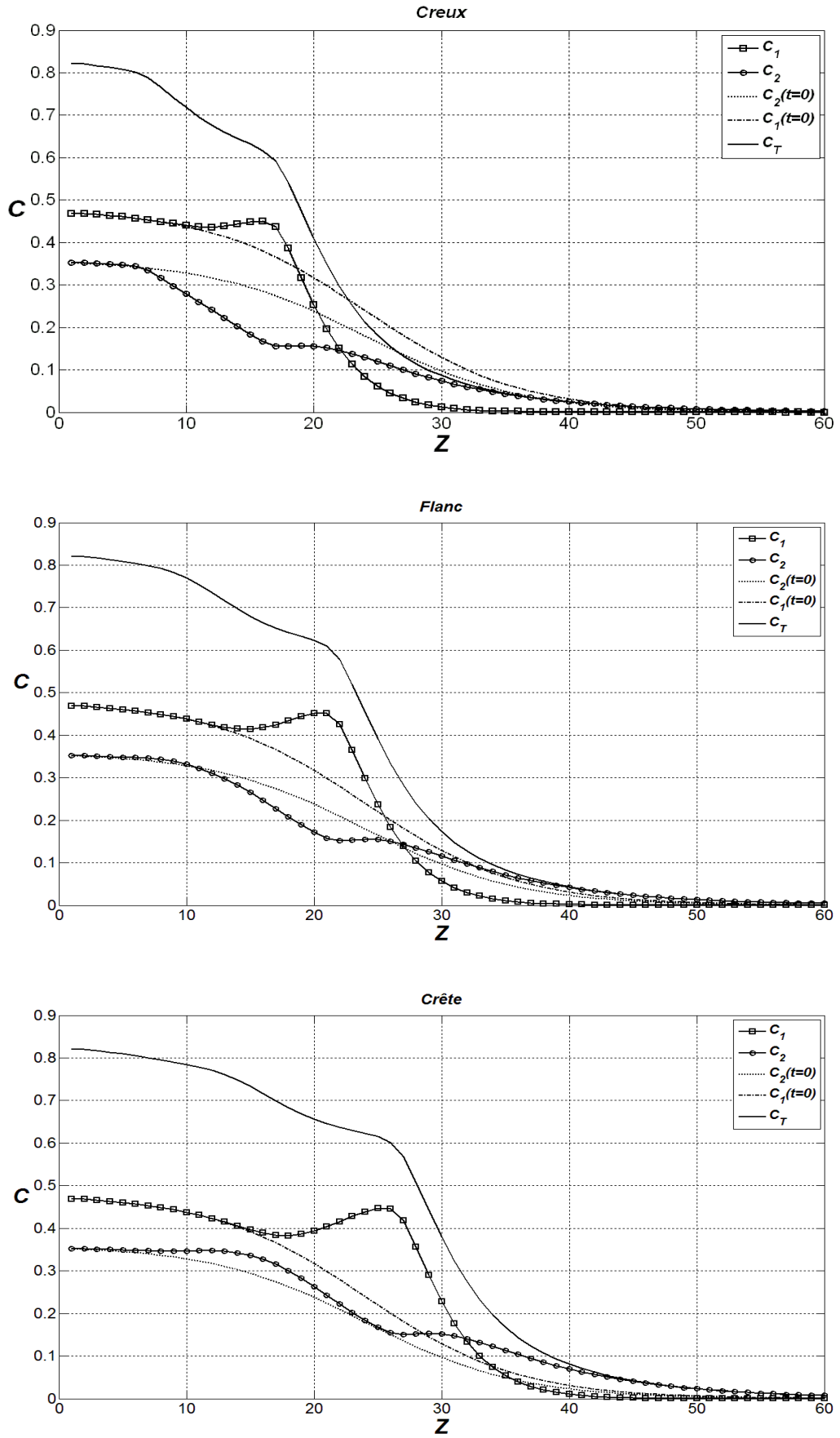


Fig. 22 : Profils de l'évolution des concentrations des particules 1 et 2 en fonction de la profondeur et à différentes positions de la ride ($\gamma_1=21$, $\gamma_2=7$, $\phi_1=4$, $\phi_2=3$, $C_{t_{\min}}=6\%$).

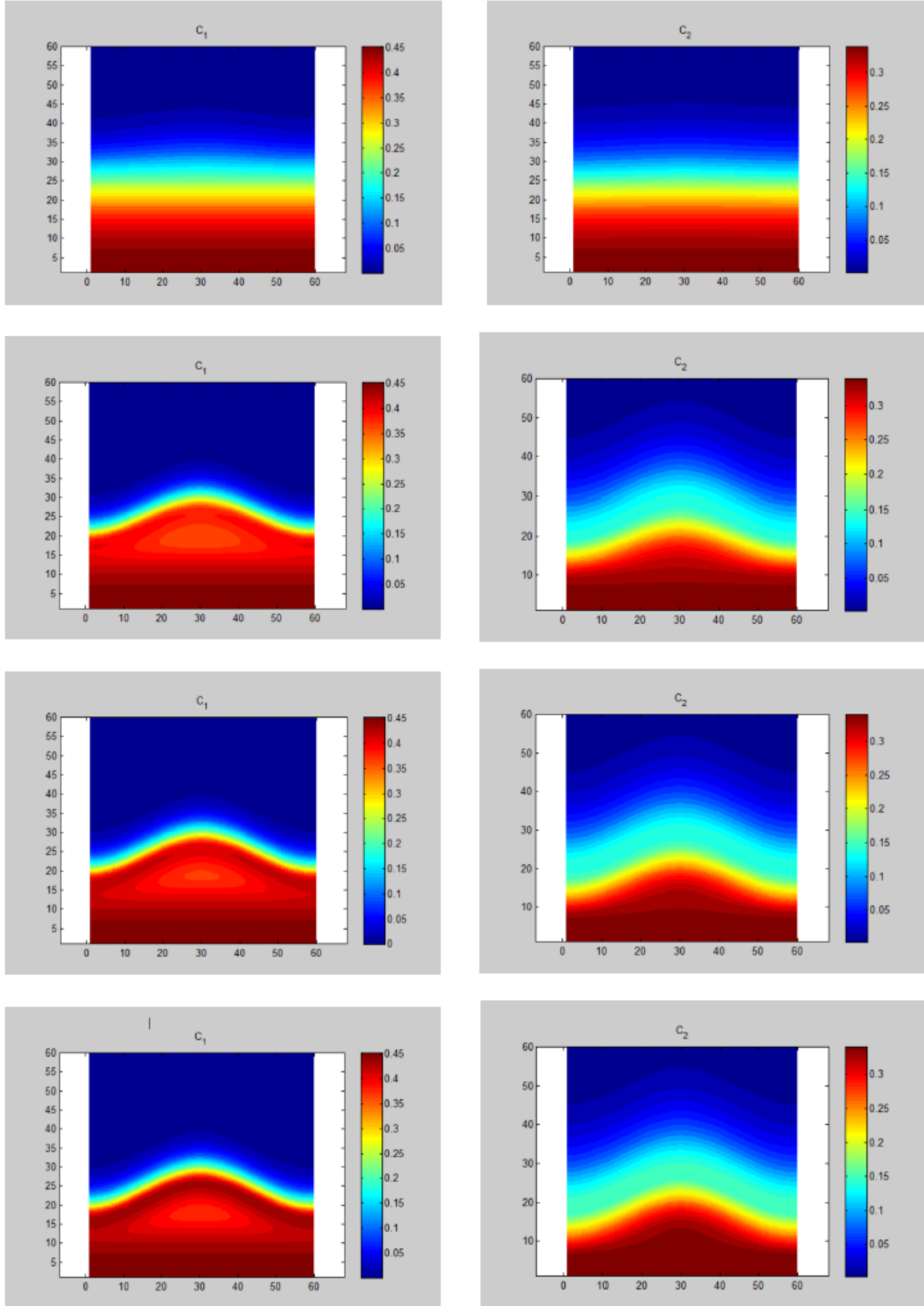


Fig. 23: Séquences de l'évolution des concentrations des particules 1 à gauche et 2 à droite en fonction des coordonnées x et z ($\gamma_1=21$, $\gamma_2=7$, $\Phi_1=4$, $\Phi_2=3$).

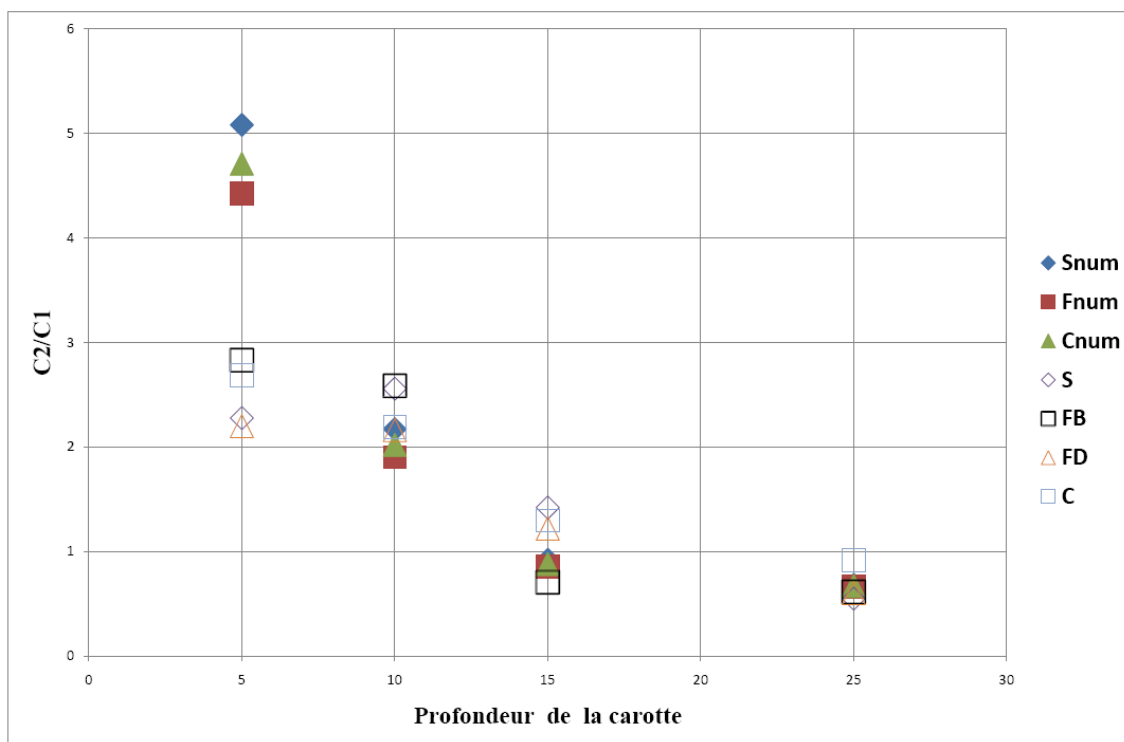


Fig. 24. Comparaison entre les résultats numériques et les résultats in situ des rapports de concentrations des particules.

Conclusions et perspectives

Ce projet a permis d'effectuer une étude préliminaire sur le tri sédimentaire et biologique à l'échelle des rides sableuses, en combinant des approches de terrain, expérimentales en laboratoire, et théoriques. Les résultats obtenus ont montré un tri des sédiments en fonction de leur taille, essentiellement suivant la verticale, avec une augmentation de la taille des sédiments avec la profondeur. Le tri horizontal est nettement moins marqué ; on peut cependant noter des concentrations de particules fines plus fortes au sommet et au creux de ride qu'aux flancs, au niveau de la couche superficielle. Les résultats obtenus en composition et en abondance sont conformes aux peuplements méiobenthiques où les nématodes dominent largement. Cette prépondérance des nématodes est encore accentuée dans les vasières alors que dans les sables, nématodes et copépodes sont présent de manière plus équilibrée (Bodin *et al.*, 1997). Ce constat pourrait signifier que les sédiments subtidaux ont une constitution plus riche en vase que le sable de l'estran. L'étude de répartition verticale du méiobenthos, effectuée uniquement dans le domaine subtidal, suggère une plus forte abondance dans la première épaisseur de sédiment (5 cm) par rapport à la surface et aux niveaux plus profonds (10 cm). Ces données doivent cependant être considérées avec prudence du fait de l'absence de réplicats. Alors qu'au niveau subtidal aucune répartition préférentielle n'apparaît sur un axe radial aux rides (crête,

flanc, creux, flanc), le premier flanc analysé est beaucoup plus riche en méiofaune dans les deux répliqués de raclages intertidaux.

Ce projet doit se continuer avec en particulier l'analyse des carottes congelées du domaine intertidal. Ces échantillons présentent l'avantage de conserver la stratification horizontale. Nous souhaitons poursuivre ces travaux, avec notamment des nouvelles campagnes de mesure *in situ*.

Références

- Bodin P., Boucher G. & Goubault N., 1997. Méiofaune. in: Les biocénoses marines et littorales française des côtes Atlantique, Manche et Mer du Nord. Synthèse, menaces et perspectives, J.C. Dauvin (Ed), MNHN/IEGB/SPN, Paris, Patrimoines Naturels, 28, 96-103.
- Burgess R., 2001. An improved protocol for separating meiofauna from sediments using colloidal silica sols. Marine Ecology Progress Series, 214, 161-165.
- Escobar-Briones E.G., Diaz C. & Lengendre P., 2008. Meiofaunal community structure of the deep-sea Gulf of Mexico: variability due to the sorting methods. Deep Sea Research II, 55, 2627-2633.
- Lampadariou N., Karakassis I., Teraschke S. & Arlt G., 2005. Changes in benthic meiofaunal assemblages in the vicinity of fish farms in the eastern Mediterranean. Vie et Milieu, 55, 61-69.
- Xu K., Du Y., Lei Y. & Dai R., 2010. A practical method of Ludox density gradient centrifugation combined with protargol staining for extracting and estimating ciliates in marine sediments. *European Journal of Protistology*, 46, 263-270.

ANNEXE 1: Compte-rendu prélèvements *in situ*

Appel à projet 2012 – ROLNP

Tri sédimentaire et biologique sur fond sableux en zone côtière

Compte-rendu de la campagne d'Automne 2012

Prélèvements intertidaux et subtidaux

Par
Chloé DANCIE

Avec la collaboration de :

Aurélien BERNÉ : Plongeur scientifique CAH 1B (prélèvements subtidaux)
Camille HANIN : Pilote et sécurité surface, responsable moyens nautiques
Thomas LEFRANÇOIS : Pilote et sécurité surface
Séverine DUBUT : Prélèvements intertidaux

Juin 2013

CONTEXTE DE L'ETUDE

Les travaux récents effectués par les laboratoires LOMC (UMR 6294 CNRS) et M2C (UMR 6143 CNRS) au Havre et à Caen ont notamment montré qu'un tri des sédiments s'effectue en fonction de leur taille au niveau des fonds sableux subtidaux. Le forçage hydrodynamique peut également affecter significativement le transport de micro et de méiofaune au niveau du fond.

L'objectif de ce projet est d'effectuer une étude sur le tri sédimentaire et biologique dans les petits fonds à partir d'une approche interdisciplinaire combinant la mécanique des fluides, la dynamique sédimentaire, et la biologie. Pour cela, des travaux *in situ* avec prélèvements et analyse biologique, une étude expérimentale, et une étude théorique ont été réalisées. Ce projet a des applications directes sur l'évolution du littoral en termes d'érosion, d'engraissement, et de biodiversité. La Cellule de suivi du Littoral Normand (CSLN) a donc été missionnée pour réaliser les prélèvements intertidaux et subtidaux.

Le présent rapport présente, après quelques rappels méthodologiques, les conditions de réalisation de la campagne de prélèvements intertidaux et subtidaux d'automne 2012.

RAPPELS METHODOLOGIQUES

Le tri sédimentaire et biologique à l'échelle des petites structures sédimentaires de type ride a été étudié par une approche *in situ* avec des prélèvements subtidaux (plongeur en scaphandre autonome) et intertidaux. Pour l'approche *in situ*, le site a été choisi en fonction de ses caractéristiques sédimentaires, fonds sableux, en zone subtidale (petits fonds) et dans la zone intertidale et de ces structures sédimentaires de type ride.

La localisation réelle des stations est visible sur la Figure 1.

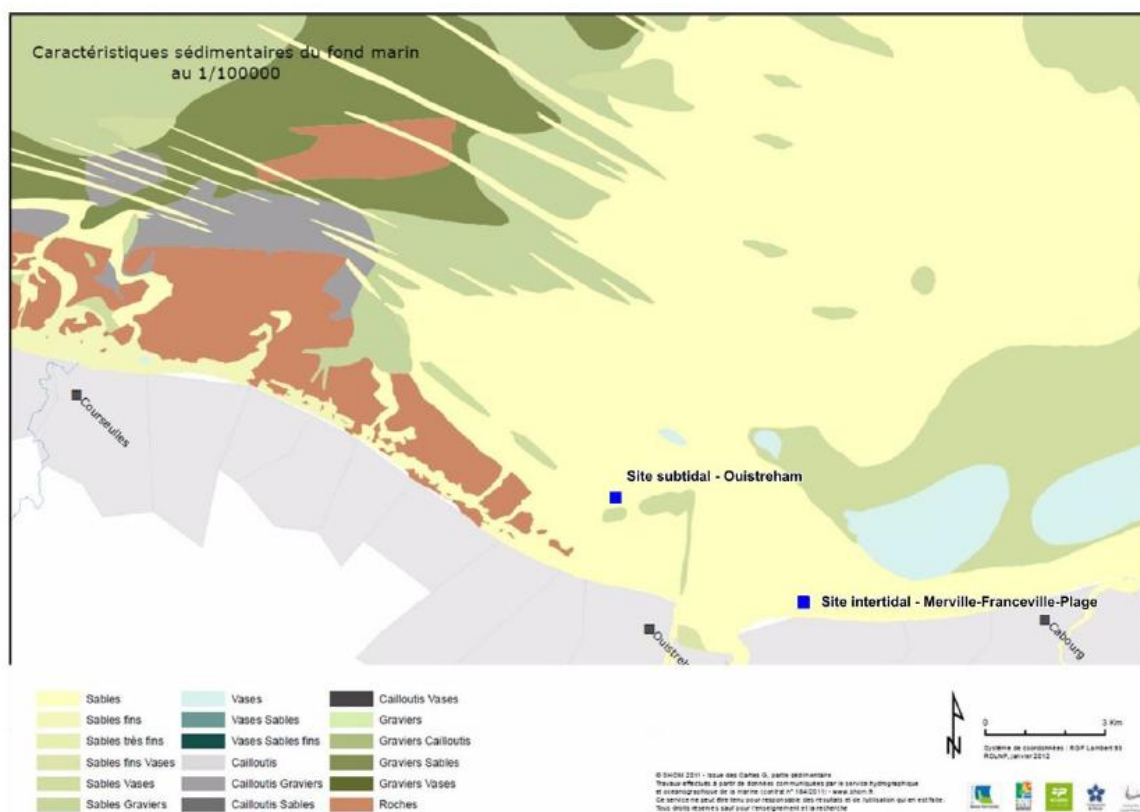


FIGURE 1 : Carte de localisation réelle des stations en automne 2012.

ENGINS DE PRELEVEMENTS ET MOYENS A LA MER

DOMAINE SUBTIDAL

Le choix du site d'étude s'est fait au moyen de prélèvements de sédiments à l'aide d'une benne Van Veen (Laboratoire M2C) afin de positionner les plongeurs au droit d'une zone de fonds sableux.

Les échantillonnages ont été réalisés en scaphandre autonome par :

- Carottage sur ride : 4 carottes de 5 cm ; 4 carottes de 10 cm ; 4 carottes de 15 cm ; 4 carottes de 20 cm au niveau des crêtes, des flancs et du creux de la ride
- Raclages : 4 raclages du sédiment de surface sur 30 cm au niveau des crêtes, des flancs et du creux de la ride
- Prélèvement d'une longueur d'onde (H 30 cm)

Les caractéristiques des rides échantillonnées ont été notées (longueur d'onde, hauteur, orientation) et les positions GPS relevées à bord du navire. Ces données ont été complétées par des prises de vue sous-marines.

Les échantillons ont été conditionnés en seau et fixés à bord par une solution de formaldéhyde neutralisée, diluée à 10% avec de l'eau de mer.

DOMAINE INTERTIDAL

Les échantillonnages ont été réalisés à marée basse sur l'estran par :

- Carottage sur ride : 4 carottes de 30 cm au niveau des crêtes, des flancs et du creux de la ride x 2 réplicats
Carottage sur zone lisse : 1 carotte de 30 cm
- Raclages : 4 raclages du sédiment de surface sur 30 cm au niveau des crêtes, des flancs et du creux de la ride x 2 réplicats
- Prélèvement d'une longueur d'onde (H 30 cm)

Les caractéristiques des rides échantillonnées ont été notées (longueur d'onde, hauteur, orientation) et les positions GPS relevées. Ces données ont été complétées par des prises de vue.

Les échantillons ont été transmis dans les meilleurs délais aux équipes associées.

CONDITIONS DE REALISATION DE LA CAMPAGNE 2012

La campagne d'échantillonnage s'est déroulée pendant la journée du 23 octobre 2012 par voie terrestre pour les prélèvements intertidaux (12h11) et par voie nautique à bord de la vedette de la CSLN, *L'Eclat* pour les prélèvements subtidaux (12h22).

Les conditions marégraphiques figurent dans le tableau 1 ci-après.

TABLEAU 1 : Conditions marégraphiques lors de la campagne.

Ouistreham	h. PM matin	Hauteur m	Coeff.	h. BM matin	Hauteur m	h. PM soir	Hauteur m	Coeff.	Marnage
23/10/2012	05h41	6,40m	49	12h31	2,70m	18h09	6,40m	48	3,70m

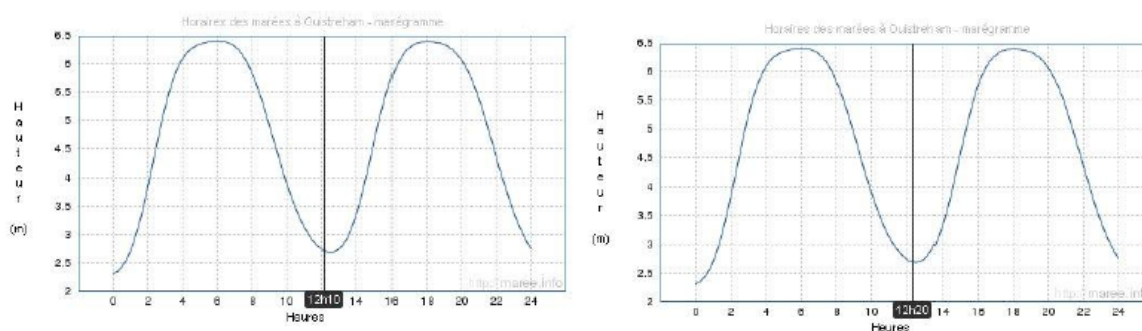


FIGURE 2 : Marégrammes à Ouistreham pour le 23 octobre 2012 aux horaires des prélèvements intertidaux (gauche) et subtidaux (droite).

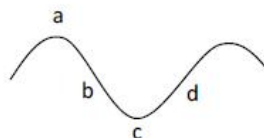
La présence de graviers, galets et cailloutis au niveau des horizons inférieurs de sédiment a limité dans certain cas, la profondeur des carottes en domaine intertidal (<30 cm).

De plus, la profondeur maximale des carottes en domaine subtidal découle également d'un obstacle : la présence d'un horizon inférieur composé de dalle de vase fossile indurée.

Les coordonnées et les observations de terrain figurent ci-après.

Prélèvements subtidauxROLNP - Site 1 Ouistreham

Date 23/10/2012
Heure 12h22
WGS 84 (degrés, minutes décimales)
49°18'678 N
00°16'143 W
Longueur onde 18 cm
Hauteur 3 cm
Orientation WNW-ESE
Heure immersion 12h22 / Heure sortie 13h17
Prof 7,6m
Horizon inférieur composé de dalle de vase fossile indurée (prélevé)

Raclages

Codes seau :
a : ROLNP A
b : ROLNP H
c : ROLNP B
d : ROLNP E

Carottes

sur crête (a)	dans creux (c)
Codes seau :	Codes seau :
5 cm : ROLNP 16	5 cm : ROLNP 15
10 cm : ROLNP 29	10 cm : ROLNP 10
15 cm : ROLNP 31	15 cm : ROLNP 23
20 cm : ROLNP 18	20 cm : ROLNP 30
sur flanc (b)	dans flanc (d)
Codes seau :	Codes seau :
5 cm : ROLNP 4	5 cm : ROLNP 17
10 cm : ROLNP 20	10 cm : ROLNP 11
15 cm : ROLNP 6	15 cm : ROLNP 24
20 cm : ROLNP 22	20 cm : ROLNP 7

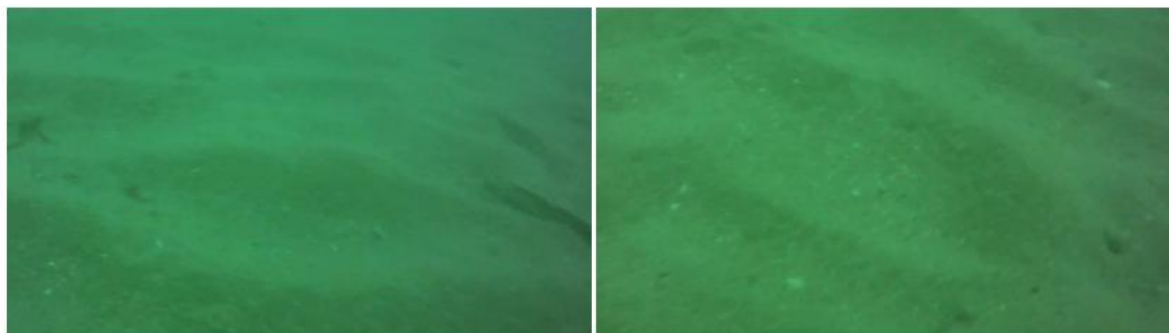
Longueur d'onde

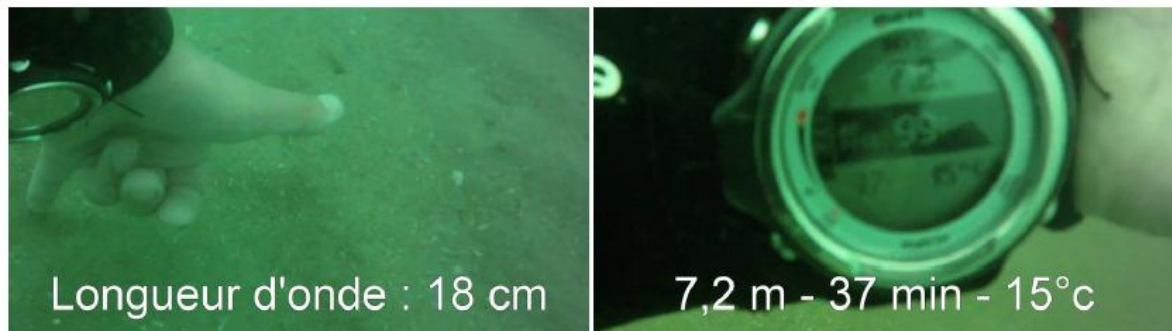
Code seau : ROLNP 25

Carottes Supplémentaires dans une zone lisse à proximité

Pas de zone correspondante

Site et caractéristiques des rides





Carottage sur ride



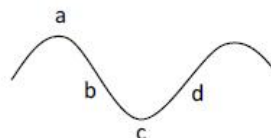
Raclage du film superficiel



Prélèvements intertidauxROLNP - Site 2 Merville-Franceville-Plage

Date 23/10/2012
Heure 12h11
WGS 84 (degrés, minutes décimales)
49°17'300 N
00°12'240 W

Longueur onde 35 cm
Hauteur 3 cm
Orientation W-E
Sables moyens propres, nombreux débris coquilliers
Profondeur des carottes < 30 cm en raison d'un horizon inférieur de galets et de débris coquilliers

Raclages

Réplicat 1	Réplicat 2
<u>Codes sacs :</u>	<u>Codes sacs :</u>
RA a rep1 s2	RA a rep2 s2
RA b rep1 s2	RA b rep2 s2
RA c rep1 s2	RA c rep2 s2
RA d rep1 s2	RA d rep2 s2
N 49°17.300	N 49°17.300
W 00°12.238	W 00°12.236

Carottes

Réplicat 1	Réplicat 2
<u>Codes carottes :</u>	<u>Codes carottes :</u>
CA a rep1 s2	CA a rep2 s2
CA b rep1 s2	CA b rep2 s2
CA c rep1 s2	CA c rep2 s2
CA d rep1 s2	CA d rep2 s2
N 49°17.300	N 49°17.298
W 00°12.239	W 00°12.228

Longueur d'onde

<u>Code sac :</u>	N 49°17.300
LO s2	W 00°12.235

Carottes Supplémentaires dans une zone lisse à proximité

<u>Code carotte :</u>
CA l rep1 s2
N 49°17.318
W 00°12.238

Site

Vue NNE



Vue S



Vue E



Vue SE



Caractéristiques des rides



Carottage sur ride



Raclage du film superficiel



Longueur d'onde



ANNEXE 2 : Le modèle mathématique

Les équations de diffusion non linéaires ont été utilisées précédemment pour décrire la ségrégation des particules dans un système uni-dimensionnel. Pour un mélange de deux types de particules (sédiments) 1 et 2, ces équations ont la forme suivant:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\Gamma_1 \left(\frac{1}{C_1} \frac{\partial C_1}{\partial z} + \frac{1}{1-C_1-C_2} \left(\frac{\partial C_1}{\partial z} + \frac{\partial C_2}{\partial z} \right) + \gamma_z^1 \right) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\Gamma_2 \left(\frac{1}{C_2} \frac{\partial C_2}{\partial z} + \frac{1}{1-C_1-C_2} \left(\frac{\partial C_1}{\partial z} + \frac{\partial C_2}{\partial z} \right) + \gamma_z^2 \right) \right] \quad (2)$$

$$\gamma_z^{1,2} = \frac{g V_{1,2} \rho_{1,2}}{k_B T} \quad (3)$$

avec $C_1 = C_1(t, z)$, $C_2 = C_2(t, z)$ les pourcentages par unité de volume des particules de type 1 et de type 2, $V_{1,2}$ le volume des particules, $\rho_{1,2}$ la masse volumique des particules, g l'accélération de la gravité, k_B la constante de Boltzmann, T une température effective déterminée par la moyenne de la vitesse carrée des particules. La température effective est analogue à la température d'un gaz où elle est définie par l'énergie cinétique moyenne des molécules. $\Gamma_{1,2}$ est le coefficient de diffusion, qui dépend de la concentration de particules:

$$\Gamma_{1,2}(C_1, C_2) = \Theta(C_{cr} - (C_1 + C_2)) C_{1,2} \left(1 - \frac{C_1 + C_2}{C_{cr}} \right)^{-\Phi_{1,2}}, \quad (4)$$

$\Theta = \Theta(C)$ est la fonction thêta telle que: $\Theta = 0$ si $C < 0$, $\Theta = 1$ si $C \geq 0$.

Les caractéristiques principales de l'équation (4) est que le coefficient de diffusion dépend de la concentration et que le flux de particules est nul si le coefficient de diffusion est zéro. Le coefficient

$\Gamma_{1,2}$ est égale à zéro si les concentrations des particules sont supérieures à la valeur critique.

Les paramètres $\Phi_{1,2}$ tiennent compte des dimensions des grains. Si ce paramètre augmente, le coefficient de diffusion diminue. La réduction du coefficient de diffusion est équivalente à une augmentation de la taille des particules.

Par ailleurs, nous avons :

$$\frac{\partial C_{1,2}}{\partial t} + \text{div} J_{1,2} = 0, \text{ où } J_{1,2} = -\Gamma_{1,2} \nabla \mu_{1,2}, \text{ avec } \mu_{1,2} \text{ le potentiel chimique exprimé en}$$

utilisant la dérivée variationnelle de la fonctionnelle de l'énergie libre de Helmholtz F :

$$\mu_{1,2} = -\frac{\delta F}{\delta C_{1,2}}, \quad F = U - TS, \quad S \text{ est l'entropie, } U \text{ est énergie des particules.}$$

L'énergie libre de Helmholtz peut s'écrire de la façon suivante :

$$F = \int_0^H ((C_1 V_1 (\rho_1 - \rho_{eau}) + C_2 V_2 (\rho_2 - \rho_{eau})) z g + k_B T (C_1 \ln C_1 + C_2 \ln C_2 + (1 - C_1) \ln(1 - C_1) + (1 - C_2) \ln(1 - C_2))) dz \quad (6)$$

Pour décrire la formation de rides sableuses et pour décrire la ségrégation des particules, nous avons ajouté un terme supplémentaire dans l'équation (6) ; nous obtenons alors :

$$F = \int_0^L \int_0^H ((C_1 V_1 (\rho_1 - \rho_{eau}) + C_2 V_2 (\rho_2 - \rho_{eau})) z g + (C_1 V_1 \rho_1 + C_2 V_2 \rho_2) \beta \cos(\frac{2\pi}{L} x) + k_B T (C_1 \ln C_1 + C_2 \ln C_2 + (1 - C_1) \ln(1 - C_1) + (1 - C_2) \ln(1 - C_2))) dx dz \quad (7)$$

où L est longueur horizontale de région occupée par mixture de particules.

Les équations de diffusion non linéaire prennent alors la forme suivante:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\Gamma_1 \left(\frac{1}{C_1} \frac{\partial C_1}{\partial z} + \frac{1}{1 - C_1 - C_2} \left(\frac{\partial C_1}{\partial z} + \frac{\partial C_2}{\partial z} \right) + \gamma_z^1 \right) \right] +$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}\left[\Gamma_1\left(\frac{1}{C_1}\frac{\partial C_1}{\partial x}+\frac{1}{1-C_1-C_2}\left(\frac{\partial C_1}{\partial x}+\frac{\partial C_2}{\partial x}\right)+\gamma_x^1\right)\right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[\Gamma_2\left(\frac{1}{C_2}\frac{\partial C_2}{\partial z}+\frac{1}{1-C_1-C_2}\left(\frac{\partial C_1}{\partial z}+\frac{\partial C_2}{\partial z}\right)+\gamma_z^2\right)\right]+$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}\left[\Gamma_2\left(\frac{1}{C_2}\frac{\partial C_2}{\partial x}+\frac{1}{1-C_1-C_2}\left(\frac{\partial C_1}{\partial x}+\frac{\partial C_2}{\partial x}\right)+\gamma_x^2\right)\right] \quad (9)$$

$$\gamma_z^{1,2} = \frac{V_{1,2}(\rho_{1,2}-\rho_{eau})}{k_B T} g$$

$$\gamma_x^{1,2} = -\frac{V_{1,2}\rho_{1,2}}{k_B T} \frac{2\pi}{L} \beta \sin\left(\frac{2\pi}{L} x\right)$$

Nous utilisons les conditions limites suivantes :

$$\frac{\partial C_{1,2}(t, 0, z)}{\partial x} = \frac{\partial C_{1,2}(t, L, z)}{\partial x} = 0 \quad (10).$$

$$\frac{\partial C_{1,2}(t, x, 0)}{\partial z} = \frac{\partial C_{1,2}(t, x, H)}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

Pour effectuer les simulations numériques, nous avons choisi deux types de particules: des petites particules et des particules plus grosses de même densité. Le rapport des diamètres de particules est

$$d_2/d_1 \approx 1,7, \text{ et on a : } \frac{\gamma_z^2}{\gamma_z^1} = 5.$$