

## BARBES:

Biological Association in Relation with sediment transport: Development of a new model of Bioturbation caused by ecosystem Engineers in Seine estuary

*Coordinateur:*

*Francis Orvain, UMR BOREA*

*Participants:*

*Pierre Le Hir, Chloé Dancie, Vona Méléder, Steeven Israël, Jérôme Morelle, Sandric Lesourd, Bastien Chouquet, Thomas Lecarpentier, Guillaume Meynard, Brenda Hervieux, Marine Paris, Florent Grasso, Esam Awad, Christiane Rakotomalala, Bruno Jesus, Laurent Barillé, Pierre Gernez*

# Projet BARBES: équipes impliquées

## **Equipe 1: UMR BOREA – Université de Caen**

*Responsable scientifique:* Francis Orvain

*Chercheur permanent:* Pascal Claquin

*Doctorant:* Jérôme Morelle

*Post-doctorant:* Christiane Rakotomalala, Esam Awad

*Stagiaires: / CDD :* Steeven Israël, Brenda Hervieux,

Guillaume Meynard, Mélanie Le poittevin

*Techniciens:* Christophe Roger; Sandra Sritharan; Myriam Tayou

## **Equipe 2: IFREMER DYNECO**

*Responsable scientifique:* Florent Grasso

*Chercheurs permanents:* Pierre Le Hir

*Ingénieur de recherche:* Bénédicte Thouvenin

## **Equipe 3: UMR M2C – Université de Caen**

*Responsable scientifique:* Sandric Lesourd

*Ingénieur de recherche:* Carole Bruneau

## **Equipe 4: EA MMS – Université de Nantes**

*Responsable scientifique:* Laurent Barillé

*Chercheurs permanents:* Vona Méléder, Bruno Jesus, Pierre Gernez

## **Equipe 5: Cellule de Suivi du Littoral Normand**

*Responsable scientifique:* Chloé Dancie

*Chercheurs permanents:* Bastien Chouquet

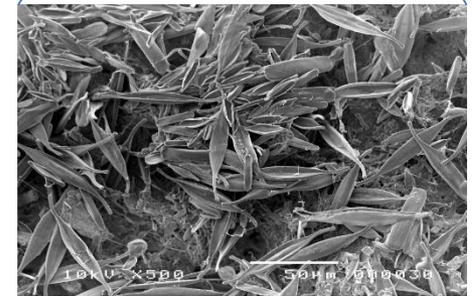
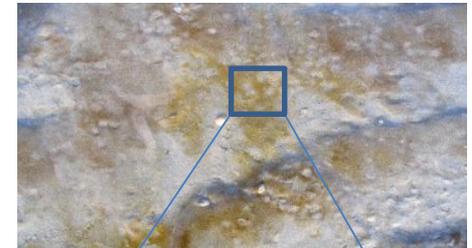
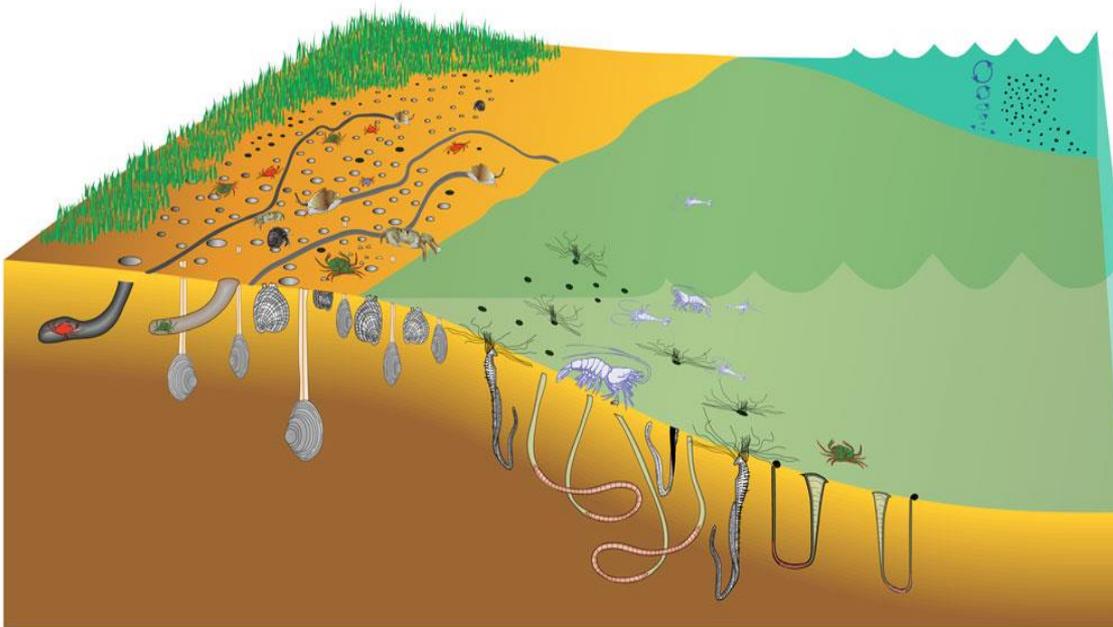
## **Equipe 6: Maison de l'Estuaire**

*Responsable scientifique:* Thomas Lecarpentier

# Contexte

- Les ingénieurs d'écosystèmes contribuent à la stabilité et l'équilibre de l'habitat **sédimentaire** par des fonctions de bioturbation (contrôle de l'Erodabilité/dépôt, rôle biogéochimique, rôle trophique régulateur ... autres interactions entre populations)

Communauté macrozoobenthique : partage des niches spatiales et contrôle partiel de l'évolution de la matrice sédimentaire



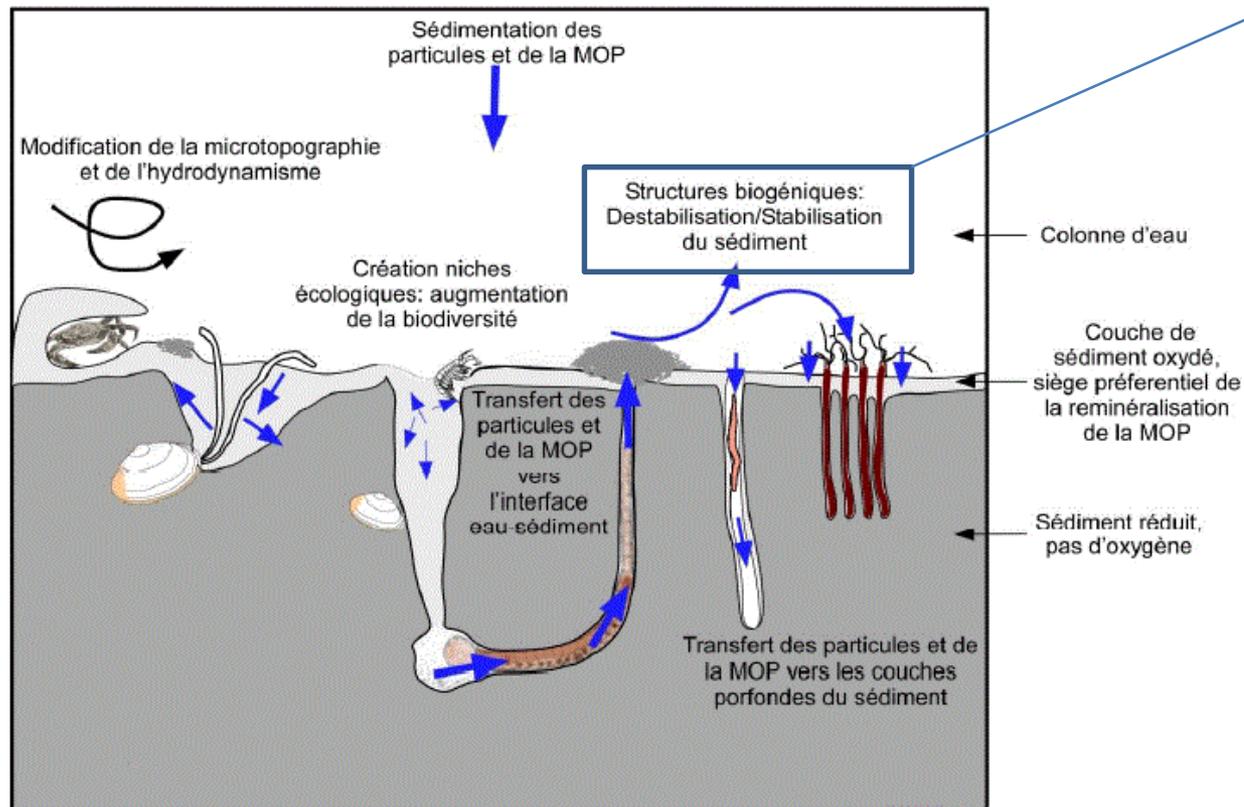
Biofilm microphytobenthique

→ **Modélisation des flux et différents processus se déroulant au sein des vasières**

# Interaction à petite échelle

- Diversité des processus de bioturbation par la macrofaune
- Complexité des mécanismes à micro-échelle

OBJECTIF :  
Modélisation  
(0D, MARS 2DH/3D)



# Etapes du projet

---

## Etape 1

**Obtenir des données relatives aux structures spatiales des ingénieurs d'écosystème majeurs de l'estuaire de la Seine (macrozoobenthos et microphytobenthos) dans les zones intertidales non recouvertes par des végétaux**

## Etape 2

**Développer des nouvelles lois d'érosion en masse intégrant les effets de la bioturbation et biostabilisation par les organismes benthiques : Erodimétrie *in situ***

## Etape 3

**Modélisation générique de ces effets biologiques avec un formalisme 0D qui peut fonctionner de manière indépendante pour faire des simulations d'évolution sédimentaire sur plusieurs sites d'intérêt de l'estuaire : Calibration en laboratoire et validation du modèle à partir d'observations *in situ***

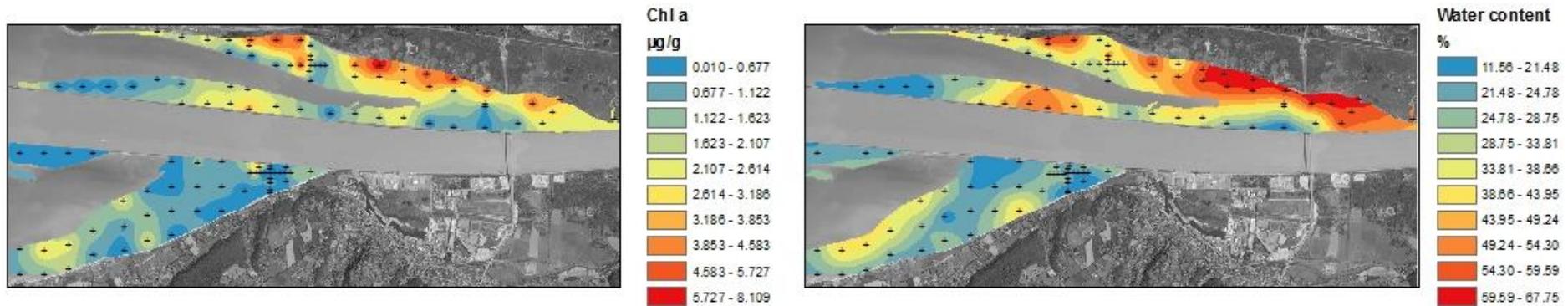
# Etape 1: Cartographie des ingénieurs d'écosystème

---

## Prélèvement sur le terrain et interpolation par krigeage

- Campagne d'avril 2015
- Variables mesurées (Centimètre supérieure):
  - Biomasse microphytobenthique (Chl  $a$  en  $\mu\text{g/gPS}$ )
  - % de phéopigments (indice de « grazing » : broutage/herbivorie)
  - Paramètres sédimentaires (granulométrie)
  - Exopolymères sécrétés (Colloïdaux et liées / teneurs en carbohydrates – protéines)
- Krigeage (ordinaire indépendant par secteur avec logiciel R et transfert dans ARCGIS)

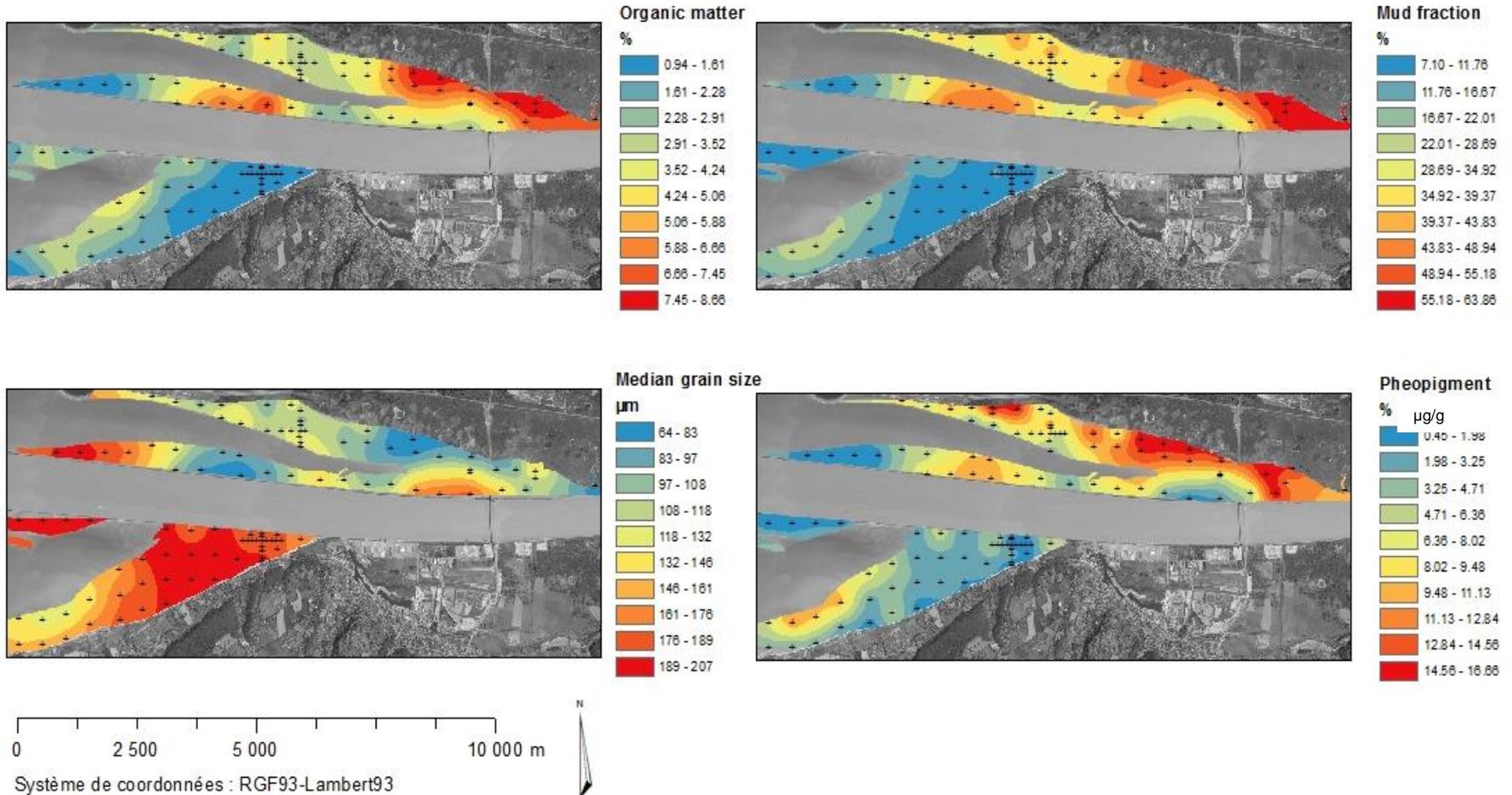
# Résultats (Biomasse microphytobenthique)



- Biomasse faible en avril 2015 (minimum saisonnier) – Maxima sur la slikke supérieure de la rive Nord
- 4 spots en haut de vasière sur zone nord : Effet bathymétrique lié à quantité de la lumière reçue
- Corrélation forte avec teneur en eau : Sédiment cohésif colonisé
- Modèle explicatif de Chl  $\alpha$  (régression multiple) : Rôle positif de la présence de vases fines et rôle négatif du grazing par macrofaune benthique

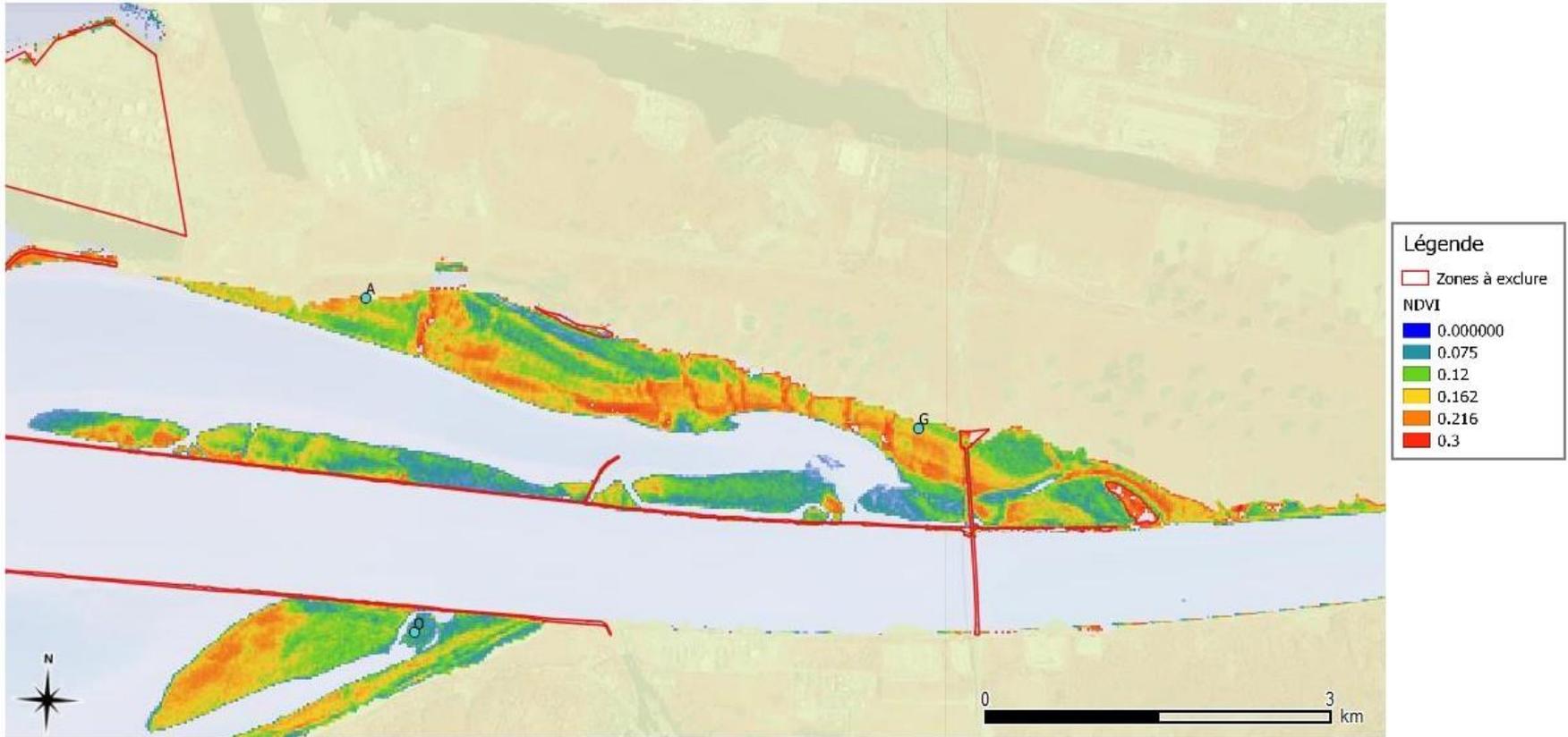
Variables explicatives	Coefficient	P-value
Médiane	-0.0008515	$2.3 \cdot 10^{-6}$ ***
Phéopigment (%)	-1.0358340	$< 2 \cdot 10^{-16}$ ***
Teneur en eau (%)	0.0090353	$< 2 \cdot 10^{-16}$ ***

# Résultats (habitat benthique)



- Zones envasées + zone de transition à mélange sablo-vaseux = colonisées par le microphytobenthos (gradient amont-aval très net pour % fine, médiane et % de MO)
- Deux fois plus de phéopigment que de chl *a* : % indicateur de grazing intense sur slikke supérieure (grande crique), rôle majeur de la macrofaune benthique vis-à-vis du microphytobenthos : gradient bathymétrique

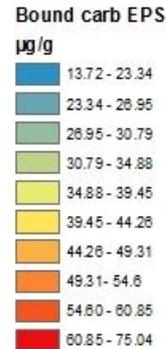
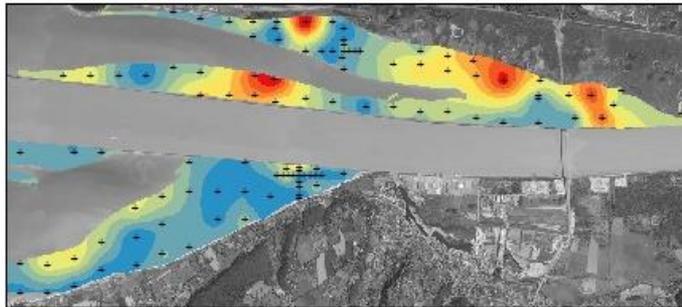
# Résultats: Couplage aux données satellitales



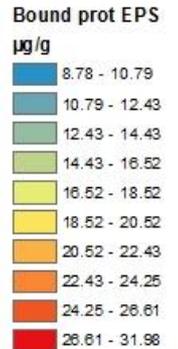
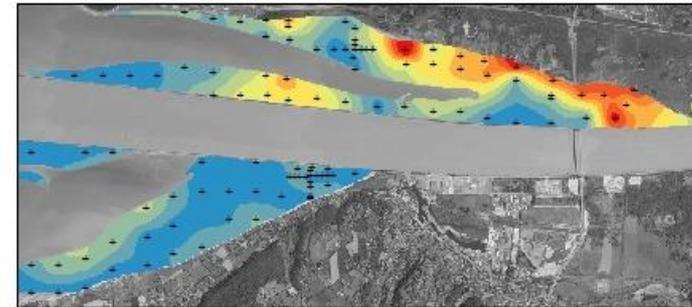
- Indice de végétation NDVI (sur la base d'une analyse multispectrale)
- Indicateur de la présence du biofilm en surface (biomasse dans la couche photique du sédiment ou encore photosynthétiquement active)
- Ensemble des estrans montre la présence de biofilm
- Rôle apparent des microstructures (filandres)

# Résultats : Exopolymères (EPS)

## CARBOHYDRATE

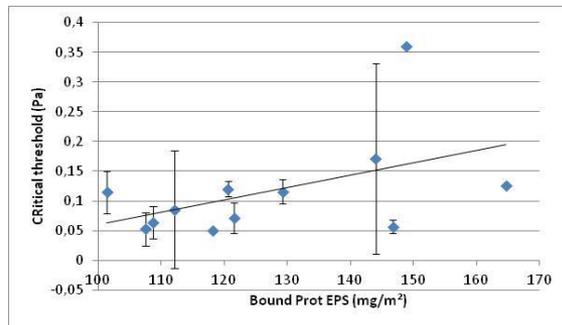


## PROTEINES



Système de coordonnées : RGF93-Lambert93  
0 2500 5000 10000 m

- Quantité élevée de carbohydrates (constitutifs des biofilms microphytobenthiques).
- Protéines avec concentrations très élevées avec structure spatiale plus étalée (mucus sécrété par annélides)



Mesures de seuils critiques d'érosion (n = 15 \* 3)

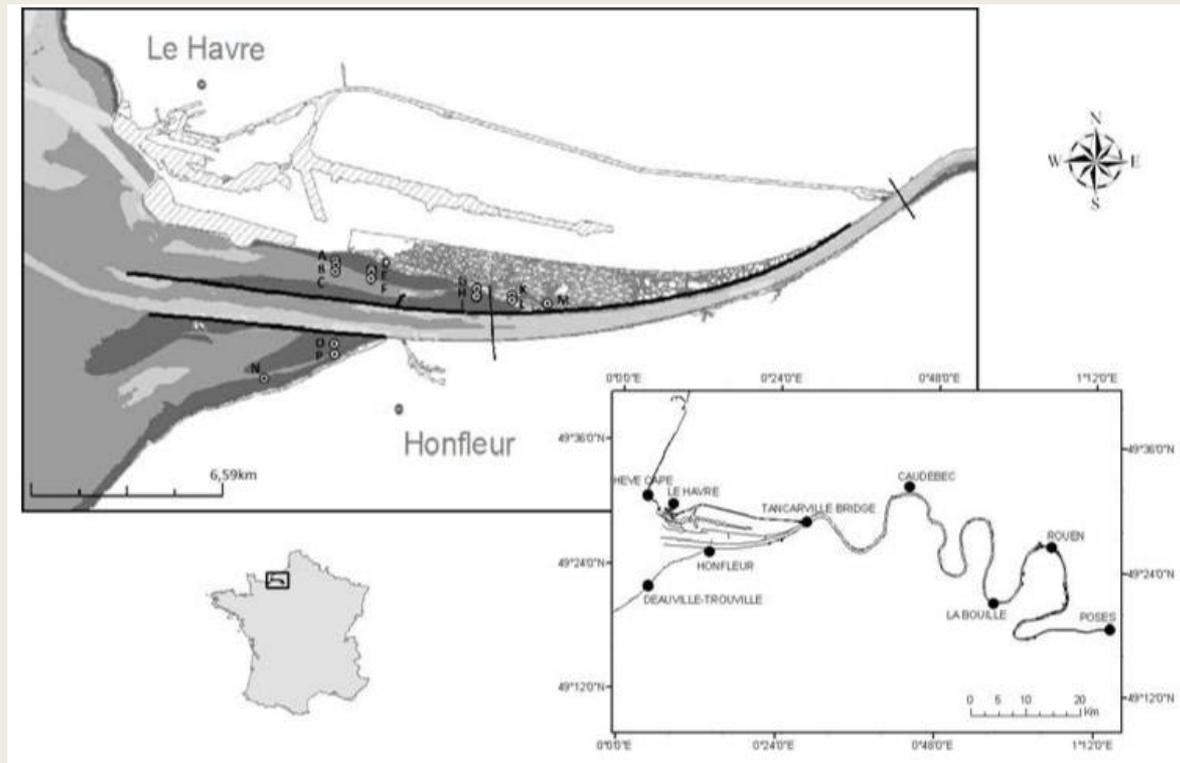
Parmi toutes les variables : meilleure corrélation avec % de phéopigment et EPS liés protéiques => Rôle biostabilisateur de la faune endogée

$$\text{SEUIL CRITIQUE} = 0,0021 * [\text{EPSprot-liés}] - 0,1478$$

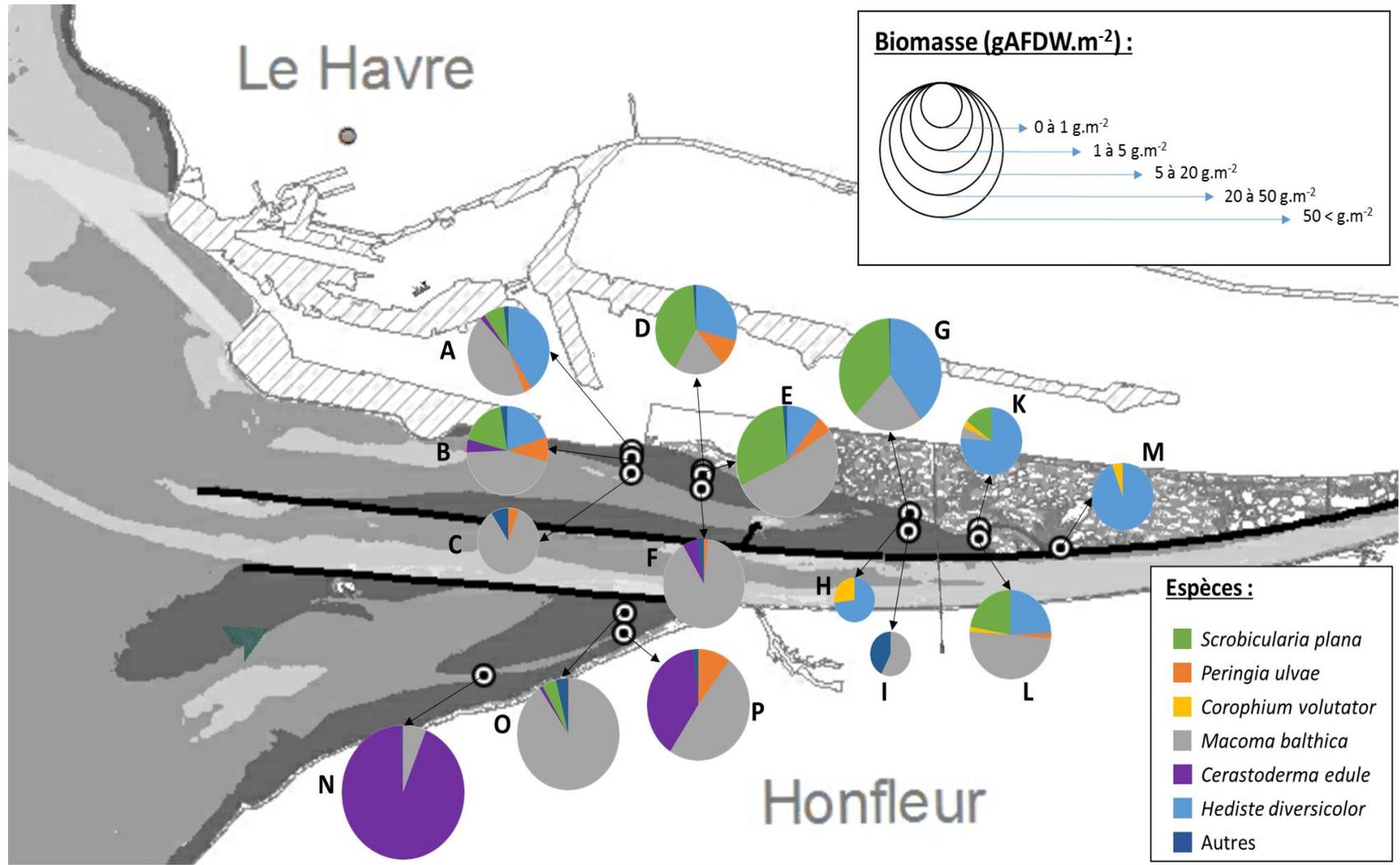
$$R = 0,49$$

## Etape 2: Campagne d'érodimétrie *in situ* – Macrofaune (Septembre 2014)

- 15 stations: gradient amont-aval + gradient bathymétrique
- Evaluation des variables granulométriques, macrofaune, microphytobenthos et EPS



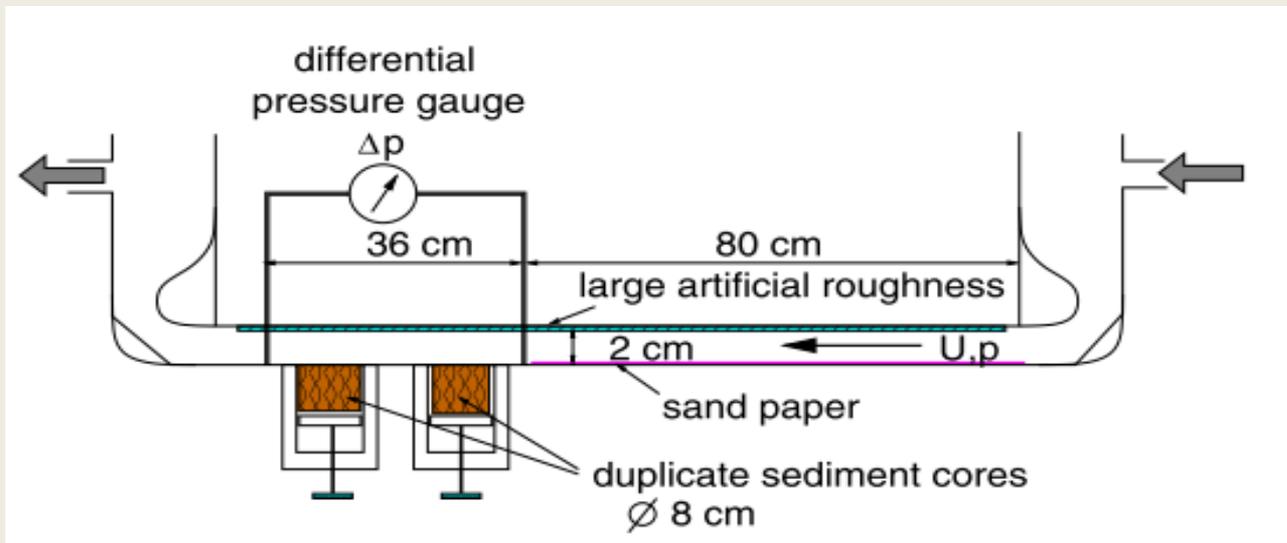
# Résultats: Dynamique spatiale de la communauté macrozoobenthique (septembre 2014)



Six bioturbateurs majeurs: Plus de 95 % des biomasses macrozoobenthiques (également de 2000 à 2014)

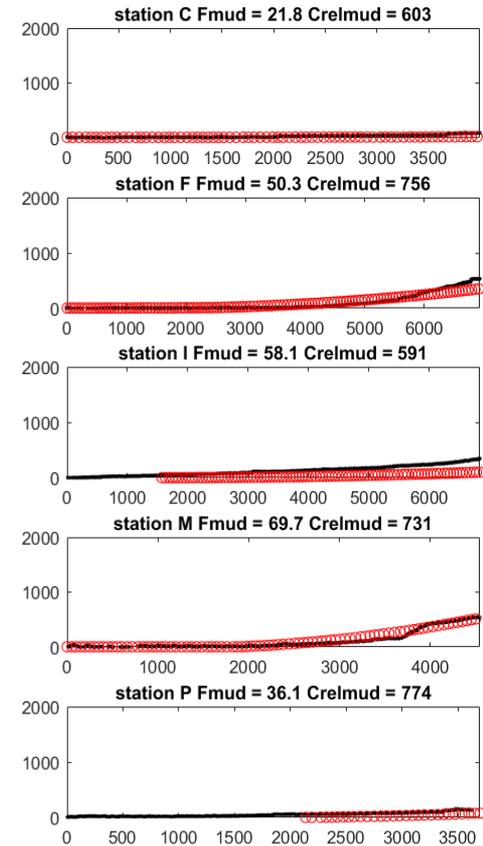
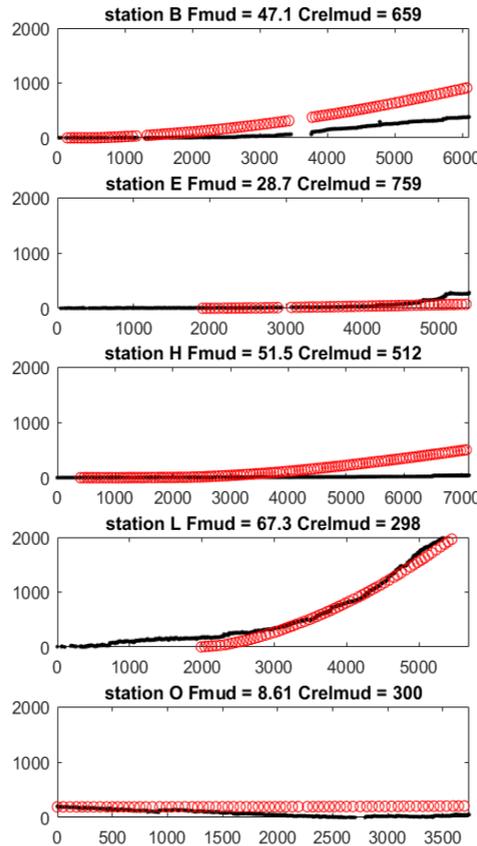
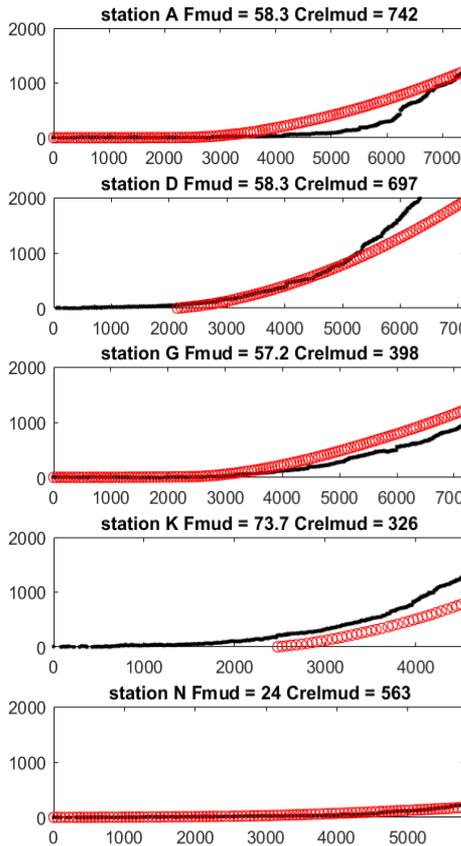
## Etape 2: Campagne d'érodimétrie *in situ* – Macrofaune (Septembre 2014)

- 15 stations: gradient amont-aval + gradient bathymétrique
- Evaluation des variables granulométriques, macrofaune, microphytobenthos et EPS
- **Erodabilité + courantomètre (ADV): Flux d'érosion et seuils critique en érodimétrie**
- **Mise en place modèle d'érosion en masse**



# Etape 3: Calibration de la loi d'érosion en masse dans le modèle hydrosédimentaire

Masse érodée (g/m<sup>2</sup>)



Temps (Secondes)

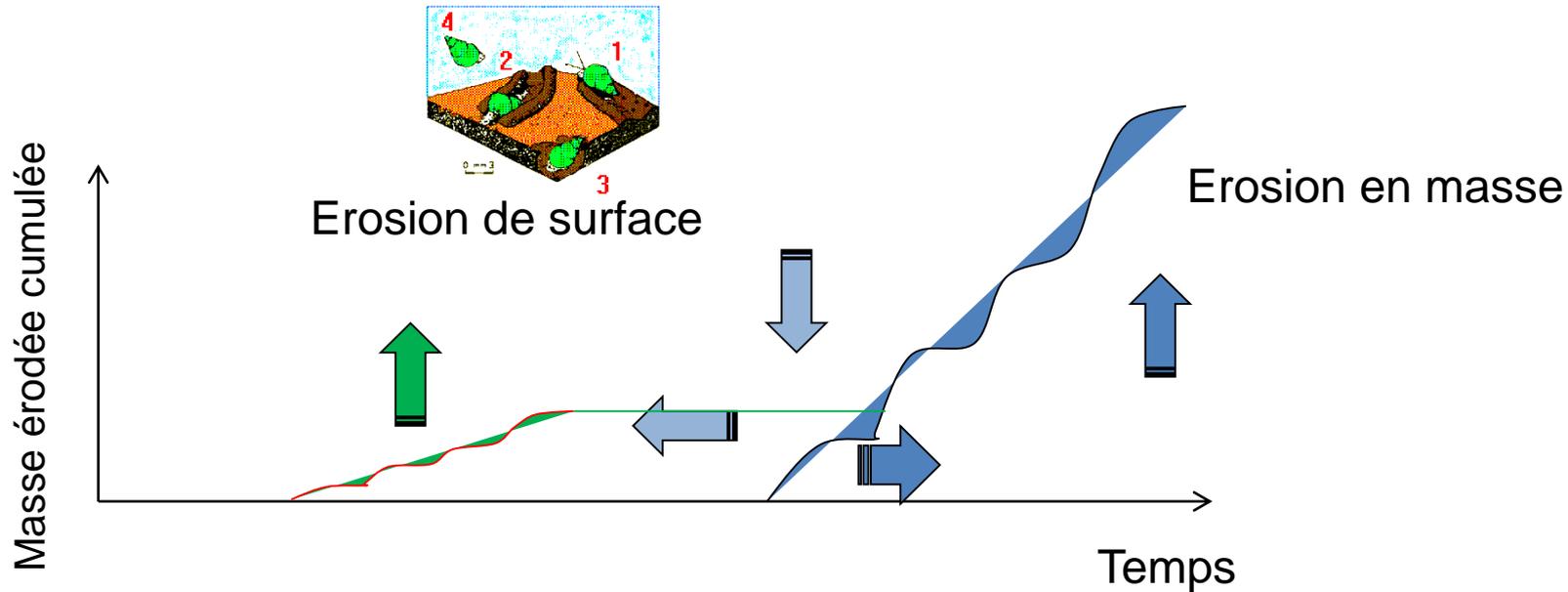
$$E = (0.0059 \times EPScarb + 6.2 \cdot 10^{-5}) \times \left( \frac{\tau_f}{\tau_{crit}} - 1 \right)^{0.5}$$

**R<sup>2</sup> = 0.79**

$$\tau_{crit} = 0.0084 \times EPSprotlié + 1.5 \cdot 10^{-4} \times CrelMud$$

# Etape 3: Calibration des lois d'érosion de surface du modèle hydrosédimentaire

Erosion séquentielle: Erosion de surface (biodépôts) suivis d'érosion en masse



Erosion en masse: Erodabilité dépend de l'état de consolidation et de la fraction en vase. Les facteurs biologiques peuvent affecter les seuils critiques et flux d'érosion en profondeur (EPS)

Couche granulaire de surface: Propriétés d'Erodabilité spécifiques et dépendantes de la bioturbation (Seuil critique faible et constant + Flux d'érosion augmentant avec densité de bioturbateurs et/ou durée de phase d'activité)

# Etape 3: Calibration des lois d'érosion de surface du modèle hydrosédimentaire

$$E_{fluff} = \alpha \times Q_t \times \left( \frac{\tau_f}{\tau_{crit}} - 1 \right)$$

$$E_{fluff} = 0 \quad \tau_f \leq \tau_{crit}$$

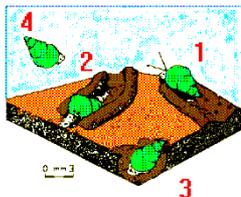
$$\frac{dQ_t}{dt} = - E_{fluff}$$

$$Q_0 = \beta \times \left[ 1 - \exp^{-n \cdot T_{btb} \times \gamma} \right] + Q_{agg}$$

$n$  = Densité de bioturbateur

$T_{btb}$  = Durée de la phase active de bioturbation (ex : Basse mer pour *Hydrobia*)

$$\frac{dM}{dt} = + E_{fluff}$$

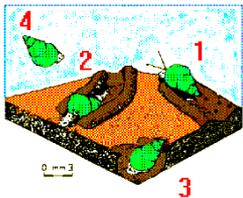


$E_{fluff}$	Flux d'érosion ( $\frac{dM}{dt}$ ) de la matrice biogène vers la colonne d'eau ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$\alpha$	Coefficient d'érosion spécifique des biodépôts ( $\text{s}^{-1}$ )
$Q_t$	Quantité de biodépôts (en $\text{g}/\text{m}^2$ )
$Q_0$	Quantité de sédiments de la matrice biogène en surface (=biodépôts) avant érosion : dépendant de la densité de bioturbateur et de la durée de la phase de bioturbation (entre deux phases d'érosion) + quelques agrégats $Q_{agg}$ ( $\text{g}/\text{m}^2$ )
$\tau_{crit}$	Seuil critique d'érosion des biodépôts (cst)
$\gamma$	Taux individuel de bioturbation (ex: vitesse de reptation pour <i>Hydrobie</i> )
$\beta$	Quantité maximale de biodépôts si $n \rightarrow +\infty$ Ou $T_{btb} \rightarrow +\infty$

# Etape 3: Calibration des lois d'érosion de surface du modèle hydrosédimentaire

- Jeux de donnée de la littérature pour modèle reparamétré (pour simplification / harmonisation): *Peringia ulvae* (Orvain et al. 2003), *Scrobicularia plana* (Orvain 2005) and *Cerastoderma edule* (Rakotomalala et al. 2015)
- Nouvelles expérimentations en érodintrie pour l'amphipode *Corophium volutator* et le ver annélide *Hediste diversicolor*
- Ajustement du même modèle sur un jeu de donnée issu de la littérature *Macoma balthica* (Willows et al. 1998).

*Peringia ulvae*



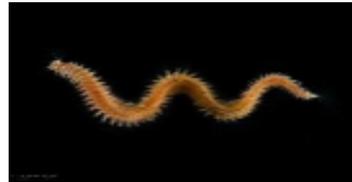
*Scrobicularia plana*



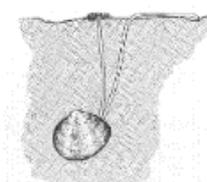
*Cerastoderma edule*



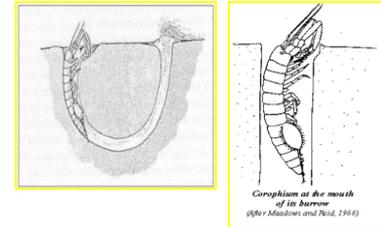
*Hediste diversicolor*



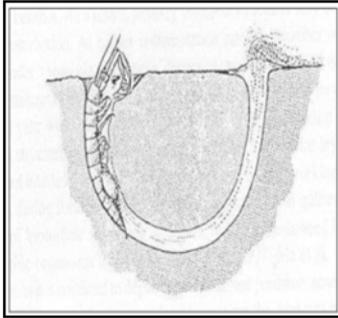
*Macoma balthica*



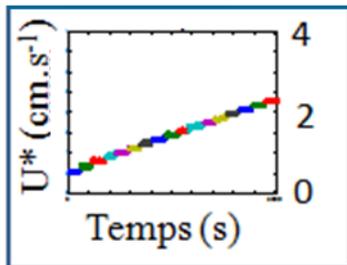
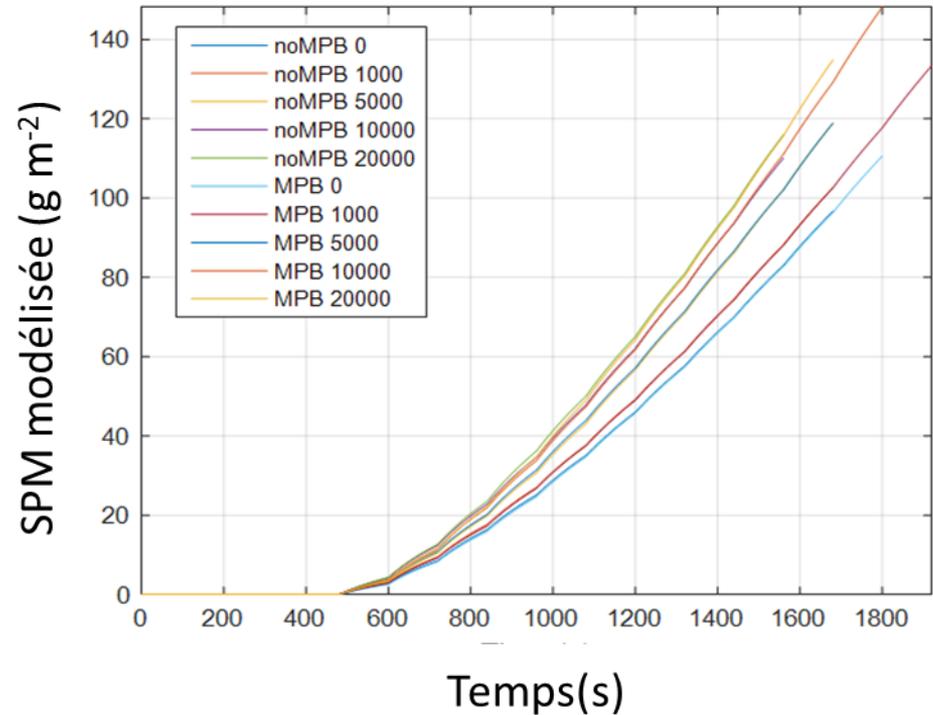
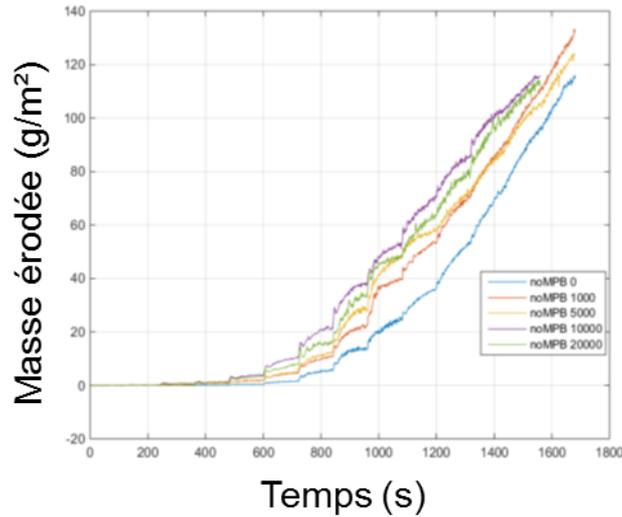
*Corophium volutator*



# Résultats : Effet densité-dépendant sur les flux d'érosion pour *Corophium volutator*



Comparaison résultats expérimentaux – modèle

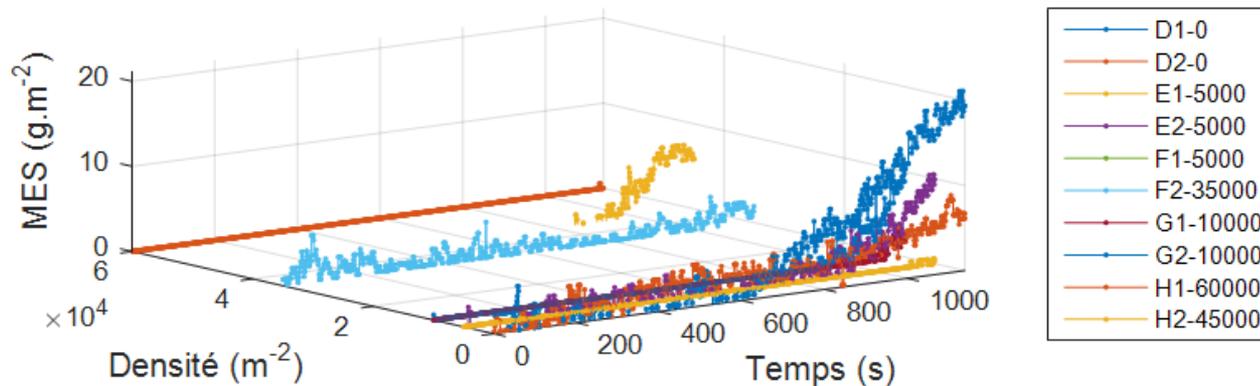
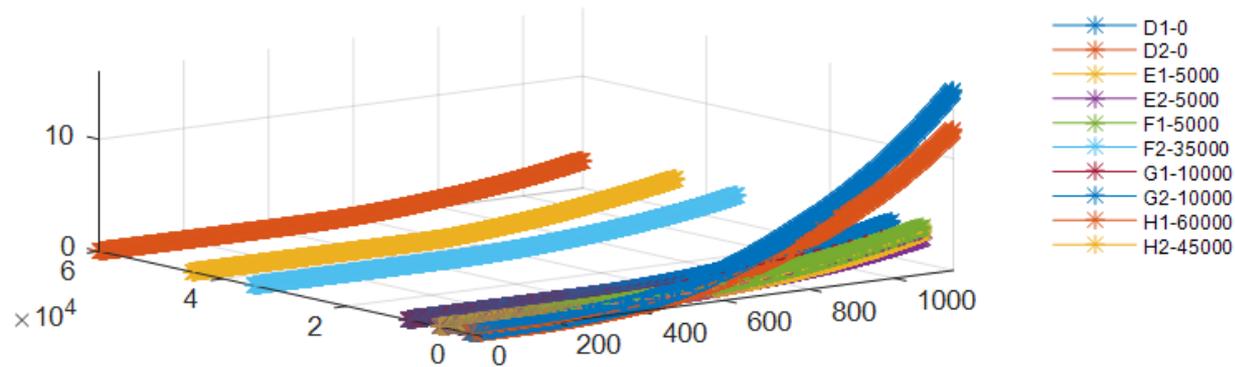


Violet : 20.000 ind. m<sup>-2</sup>  
 Green : 10.000 ind. m<sup>-2</sup>  
 Red : 5.000 ind. m<sup>-2</sup>  
 Orange : 1000 ind. m<sup>-2</sup>  
 Blue : 0 ind. m<sup>-2</sup>

**R<sup>2</sup> = 0.90**

# Résultats: Bioturbation de *Hediste diversicolor*

Autre exemple : Effet biostabilisateur du ver *Hediste diversicolor*



**$R^2 = 0.63$**

# Conclusion

---

## Etape 1

- Le grazing par la faune, le gradient bathymétrique et la proportion de vase coïncident avec la variabilité spatiale de la biomasse microphytobenthique
- Le rôle stabilisateur induit par la bioturbation des vers annélides est clairement identifié dans les zones intertidales de l'estuaire.

## Etape 2

Les résultats d'érodimétrie *in situ* montrent les effets biostabilisateurs des EPS protéiques (mucus sécrété par la faune) et le rôle des EPS microphytobenthiques positifs sur les flux d'érosion en masse.

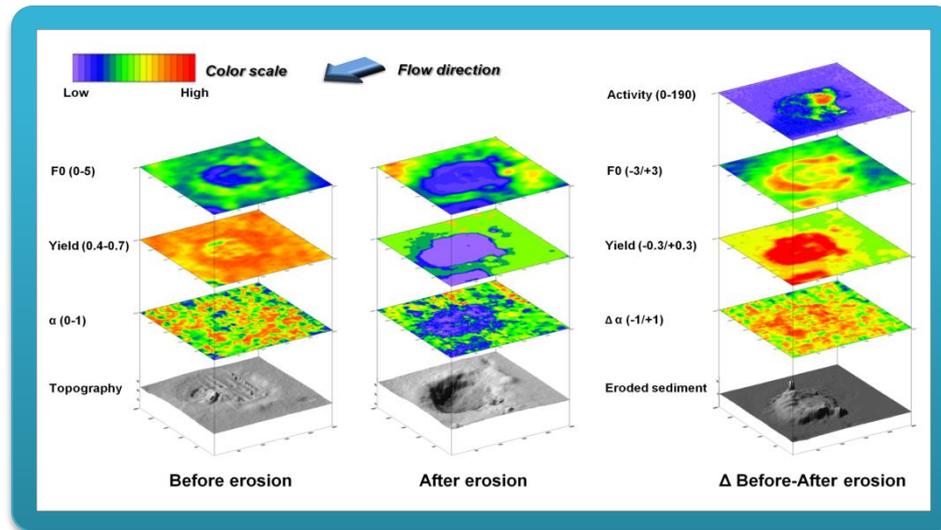
=> Ce sont les espèces à effet stabilisateur qui prédominent en Seine aux deux saisons (*Hediste diversicolor*)

## Etape 3

- Six modèles d'érosion de surface ont été paramétrés (base de données: laboratoire + littérature) et ont été insérées dans le modèle hydrosédimentaire MARS2DH/3D.
- Les simulations à l'échelle de l'estuaire sont en cours de finalisation. Le rôle majeur de *H. Diversicolor* en synergie avec le microphytobenthos a été analysé en laboratoire, confirmant les résultats *in situ*.

**Merci pour votre attention!**

- Complexité des mécanismes à microéchelle : interactions (Ecoulement+ érodabilité) ~ (interaction Macrozoobenthos – microphytobenthos) : *Cerastoderma edule*



BIOTURBATION

BIOMASSE CHL A (MPB)

RENDEMENT Photosynthèse

MICROTOPOGRAPHIE  
(UMR EPOC)

# Résultats: Dynamique spatiale de la communauté macrozoobenthique (septembre 2014)

