

# Séminaire

du GIP Seine-Aval

08 avril 2021

## Trajectoires d'évolution hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire

Jean-Philippe Lemoine & Florent Grasso



Les financeurs du GIP Seine-Aval sont :



# Contributions

Eliott Bismuth, Baptiste Mengual, Pierre Le Hir, Régis Walther, Romaric Verney, Benoit Laignel



Projets ARES + MEANDRES + MORPHOSEINE (*Seine Aval 6*)

# Sommaire

- Quelles sont les conséquences hydrologiques et sédimentaires des modifications de l'estuaire ?
  - Projet ARES (Florent Grasso, 5')
  
- Comment les dragages d'entretien influencent le fonctionnement de l'estuaire ?
  - Projet MEANDRES (Jean-Philippe Lemoine, 10')
  
- Comment pourrait évoluer l'estuaire en contexte d'élévation du niveau marin ?
  - Projet MORPHOSEINE (Florent Grasso, 10')

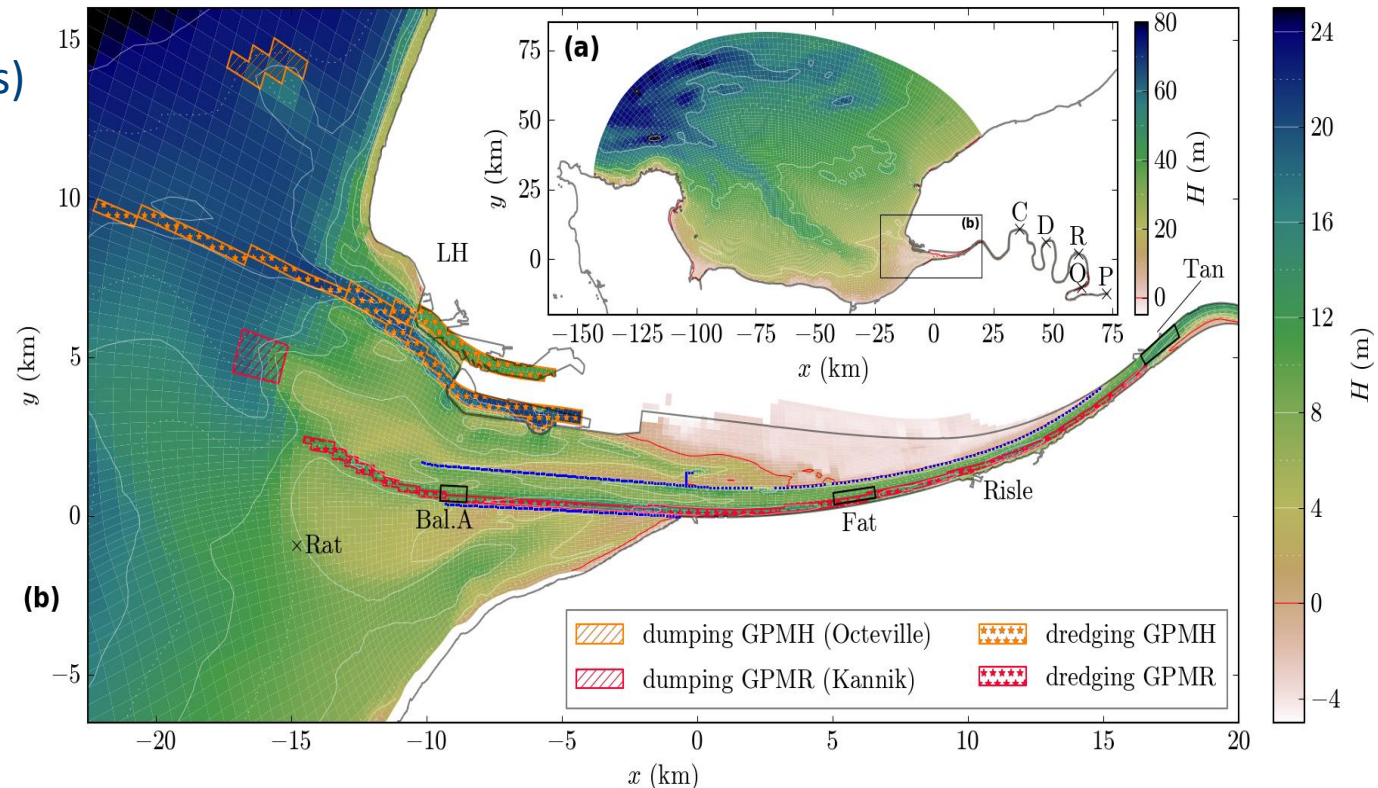
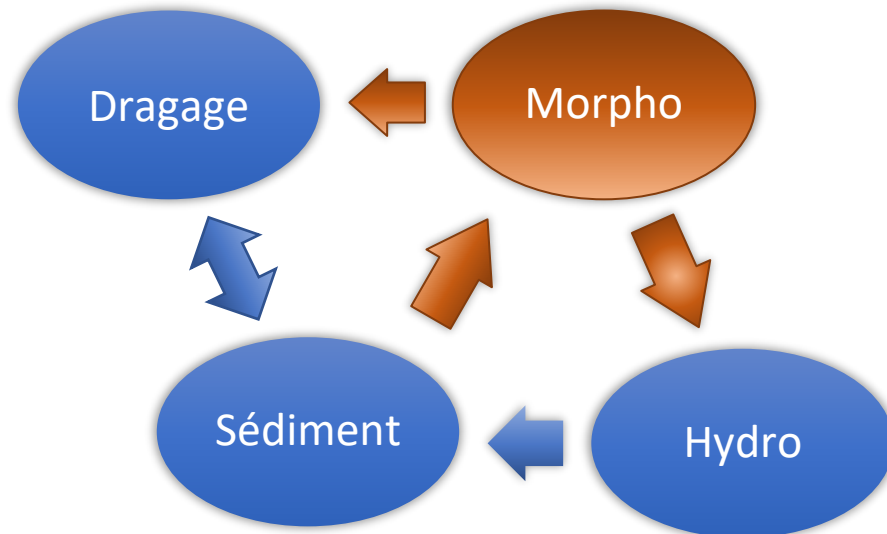


# Modèle numérique *CurviSeine*

## ■ Modélisation hydro-morpho-sédimentaire MARS3D-MUSTANG (Ifremer)



- Programmes Seine-Aval 4-5-6
- Configuration réaliste (vent, vagues, marée, apports amont)
- Sédiments mixtes (1 gravier, 3 sables, 1 vase), multicouches
- Simulation dragages/clapages
- Morphostatique (bathy fixe, < 5-10 ans)  
Morphodynamique (bathy variable)



Grasso et al. [2018], Schulz et al. [2018], Grasso & Le Hir [2019]



# Rejeux hydro-sédimentaires ARES

- Simulations morphostatiques validées (ex. HYMOSED, ANPHYECO : SA5)

- 1990 – 2000 (bathy 1995)
- 2005 – 2018 (bathy 2010 et 2016)

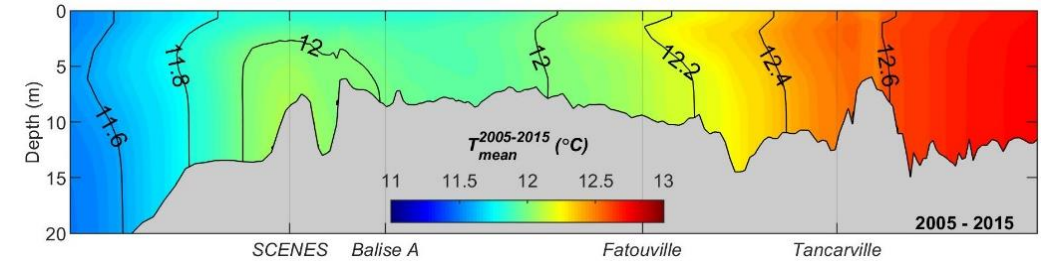
- Référentiel de données environnementales

- Ex. température, salinité, hauteur d'eau, courant, MES, substrat
- Haute résolution (~100 m), haute fréquence (30')
- Stratégie d'actualisation annuelle

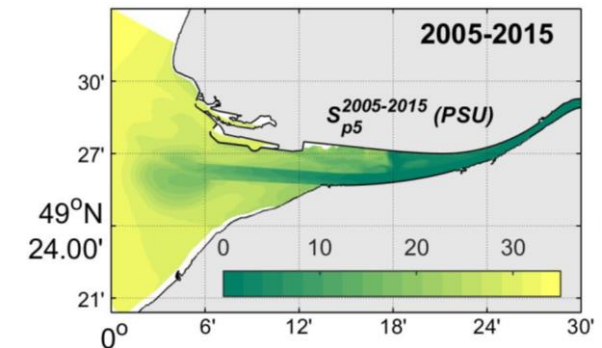
- Réponses du fonctionnement hydrologique, hydrodynamique et sédimentaire

- Aux perturbations anthropiques (ex. configurations pré/post Port 2000)
- Aux perturbations climatiques (ex. évènements extrêmes, variabilités interannuelles, changement climatique)

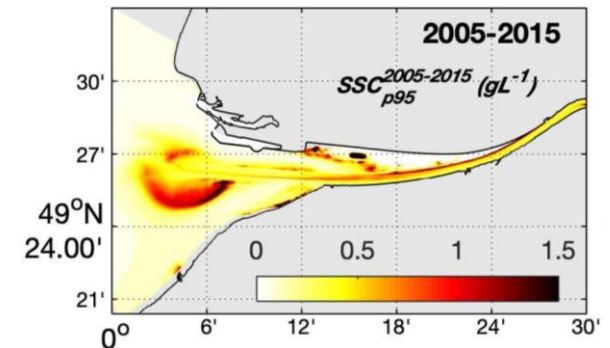
Coupe verticale de la température le long du chenal



Minimum de salinité



Maximum de Matières En Suspension (MES)





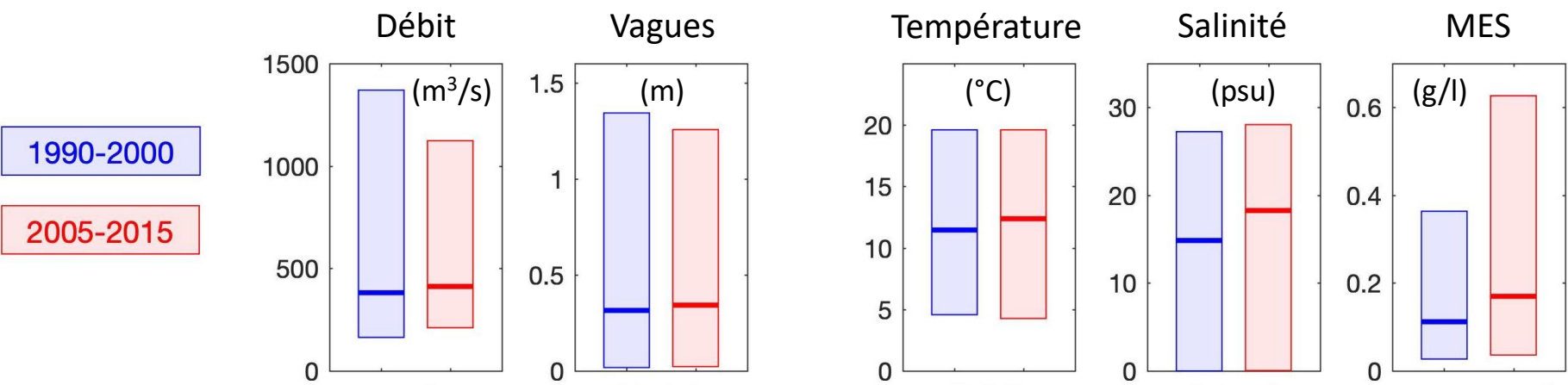
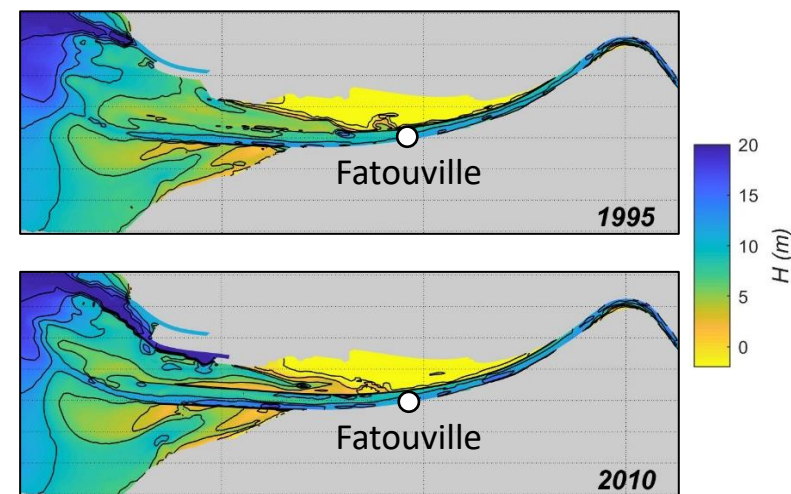
# Comparaison 1990-2000 vs 2005-2015

## ■ Evolution des forçages

- ↗ du débit ( $P_{50}$  : +8%), ↘ des extrêmes ( $P_{95}$  : -18%)
- ↗ des vagues ( $P_{50}$  : +9%), ↘ des extrêmes ( $P_{95}$  : -6%)

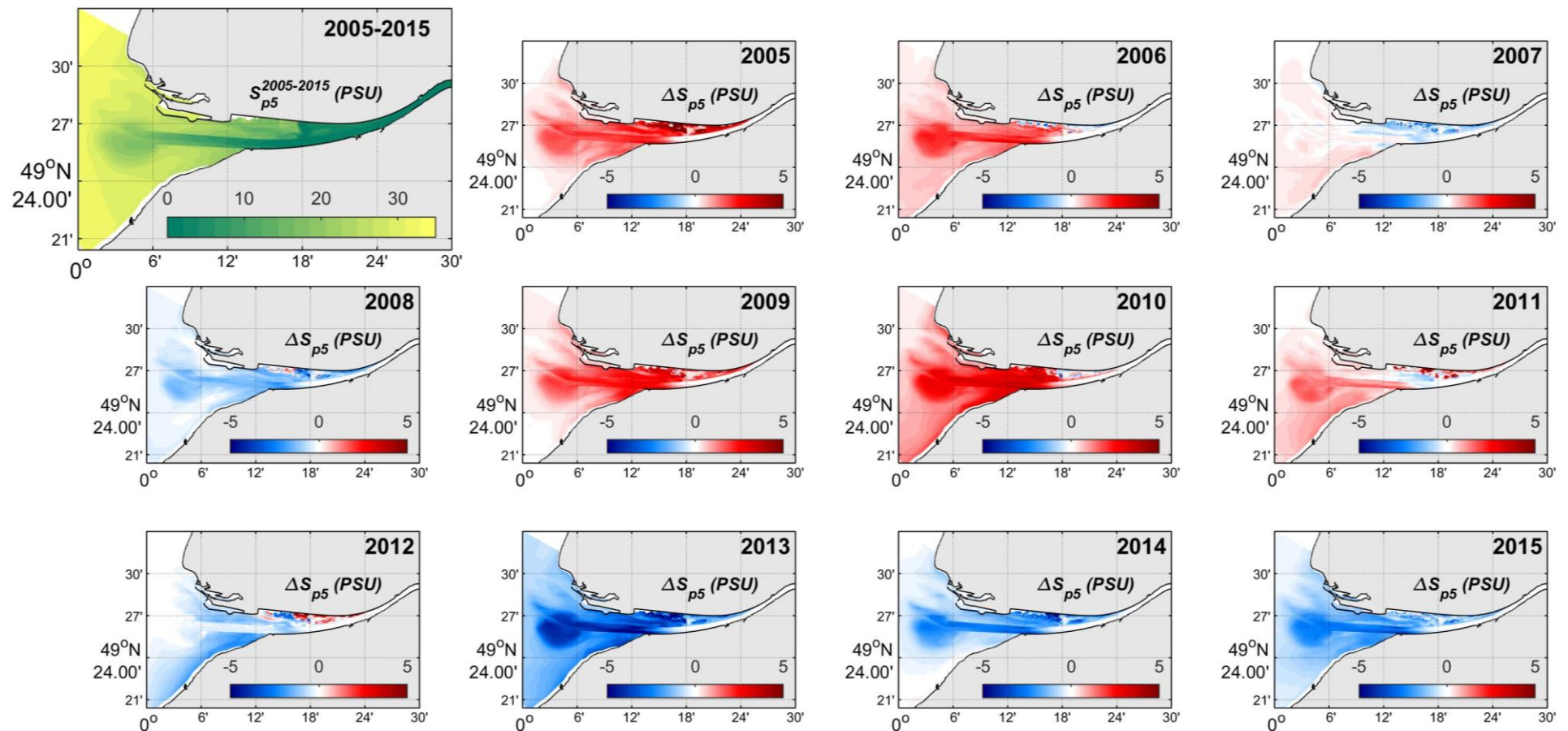
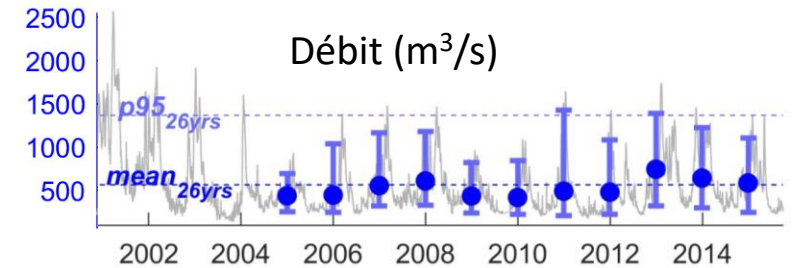
## ■ Evolution des paramètres hydro-séd. (à Fatouville au fond)

- ↗ de la température ( $P_{50}$  : +1 °C)
- ↗ de la salinité ( $P_{50}$  : +3,4 psu)
- ↗ des MES ( $P_{50}$  : +60 mg/l, +52%), ↗ des extrêmes ( $P_{95}$  : +260 mg/l, +72%)



# Variabilités interannuelles

- Anomalies de salinité sur la période 2005-2015
  - Influence du débit
  - Variabilité de  $\pm 5$  psu dans l'estuaire



# A vous de jouer !

- Jeu de données disponible et accessible
  - Via GIPSA
  - Via ftp ([ftp://ftp.ifremer.fr//ifremer/dataref/ocean-coastal-model/SEINE/curviseine\\_ares\\_hindcast/](ftp://ftp.ifremer.fr//ifremer/dataref/ocean-coastal-model/SEINE/curviseine_ares_hindcast/))
- De nombreuses analyses & exploitations possibles
  - Projets Seine-Aval (ex. CAPES, CHOPIN, SENTINELLES, PHARESEE,...)

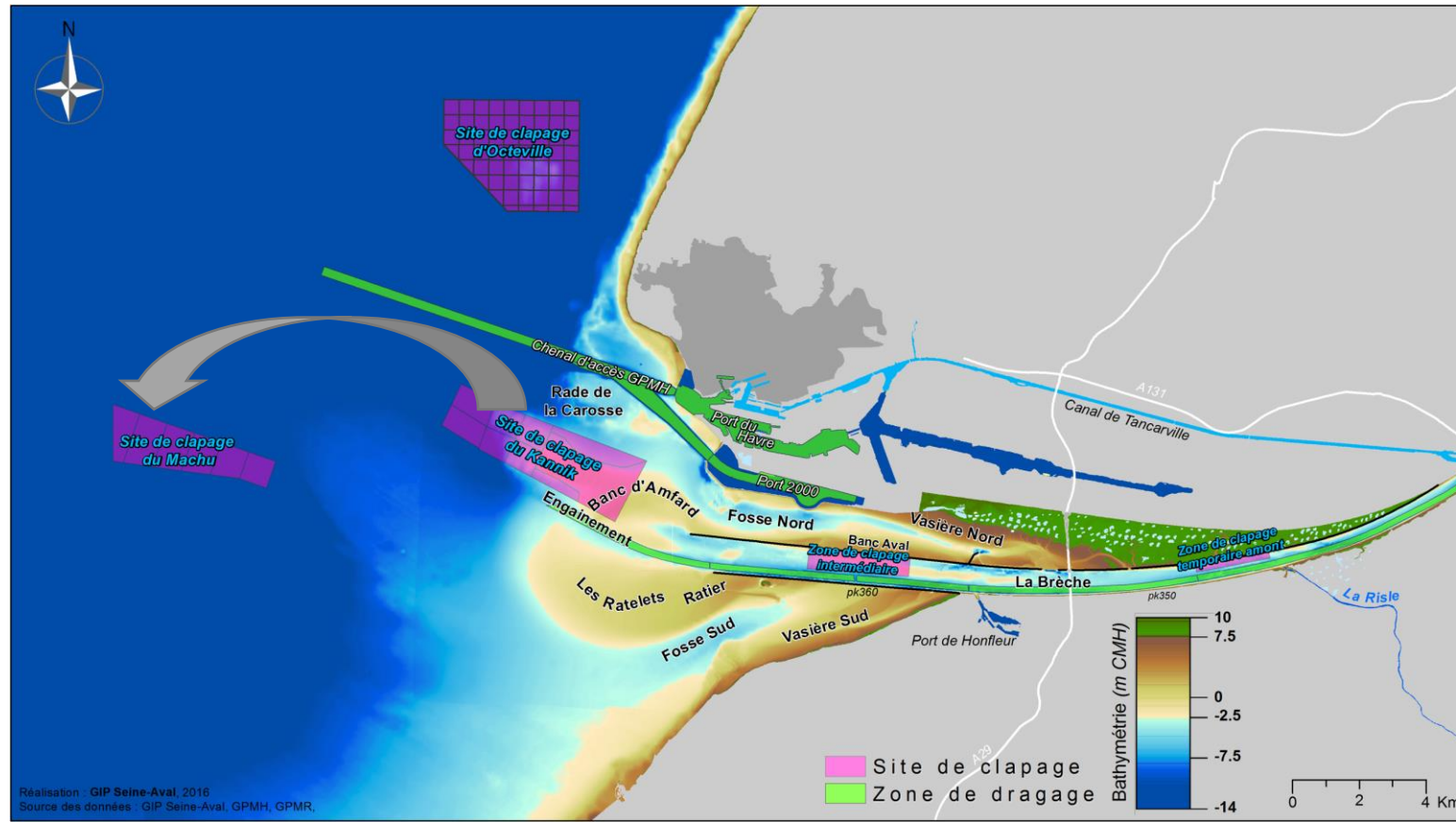




# Projet MEANDRES

## Les dragages d'entretien dans l'estuaire de la Seine

- 7 Mt de sédiments dragués annuellement
  - Apports sédimentaires de la Seine à Poses 0.7Mt/an
  - Comparables aux flux entrants depuis la baie



**Nouveau record : ce céréalier a quitté le port de Rouen avec un tirant d'eau de plus de 11 mètres**

Le céréalier Andros est parti du port de Rouen (Seine-Maritime) ce vendredi 29 janvier 2021 pour rejoindre la Chine avec près de 57 000 tonnes d'orge à son bord.







Octeville

Cap de la Hève

Le Havre

Kannik

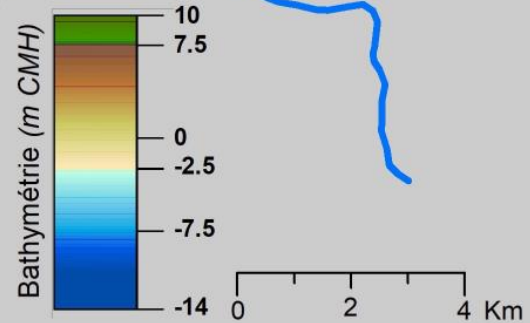
Le Port du Havre

Machu

L'Engainement

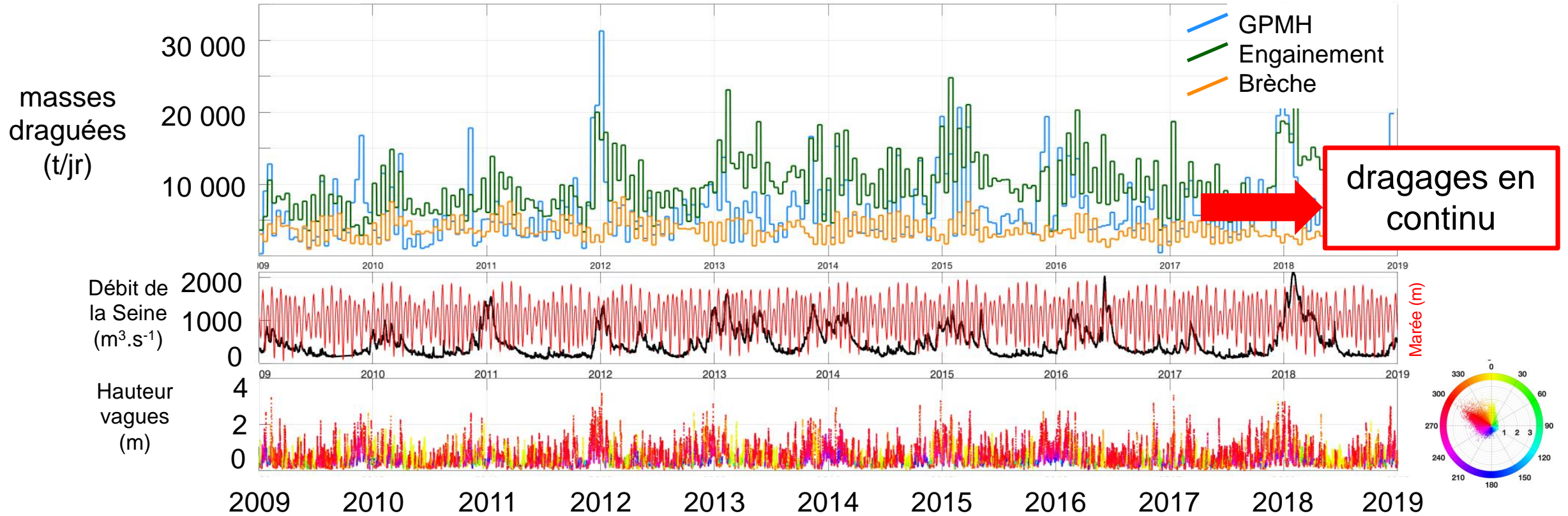
La Brèche

Port de Rouen





# Simulation des dragages



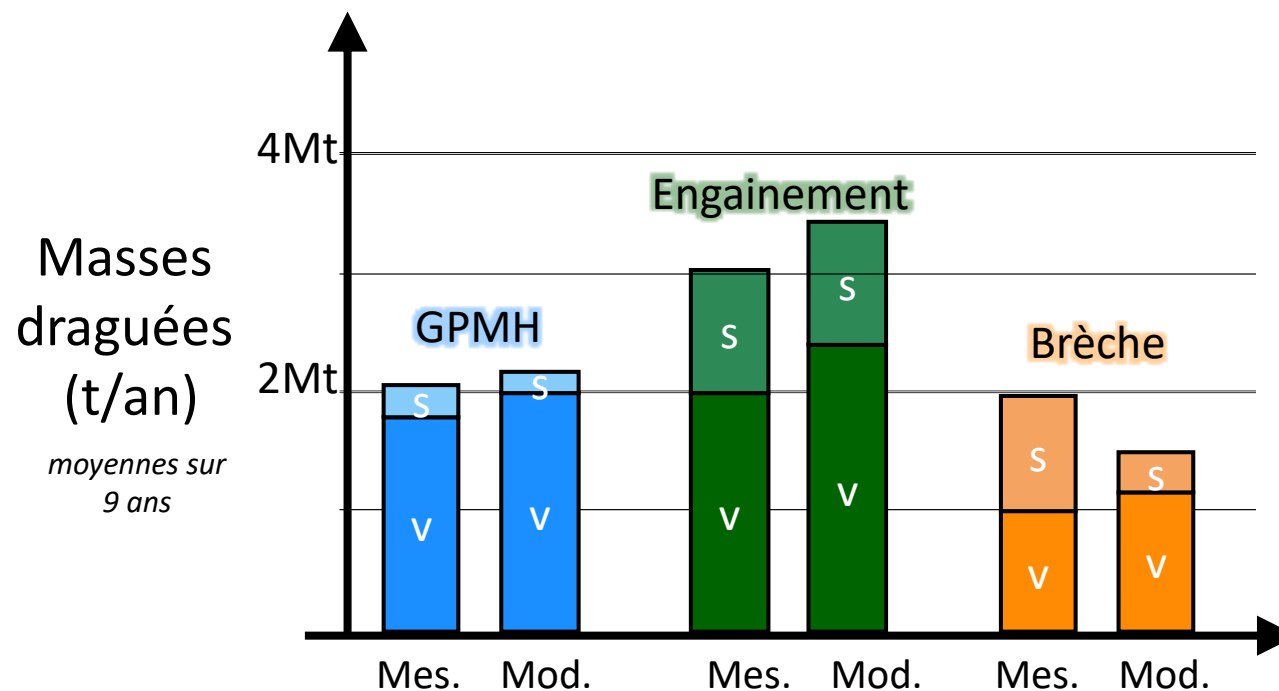
Dragages permanents → mais pas constants !

# Validation des quantités draguées



- **Variabilité in-situ : dispo. des dragues**

→ validation “en moyenne” sur la période



Stabilité des sites d’immersion : En accord avec les observations :

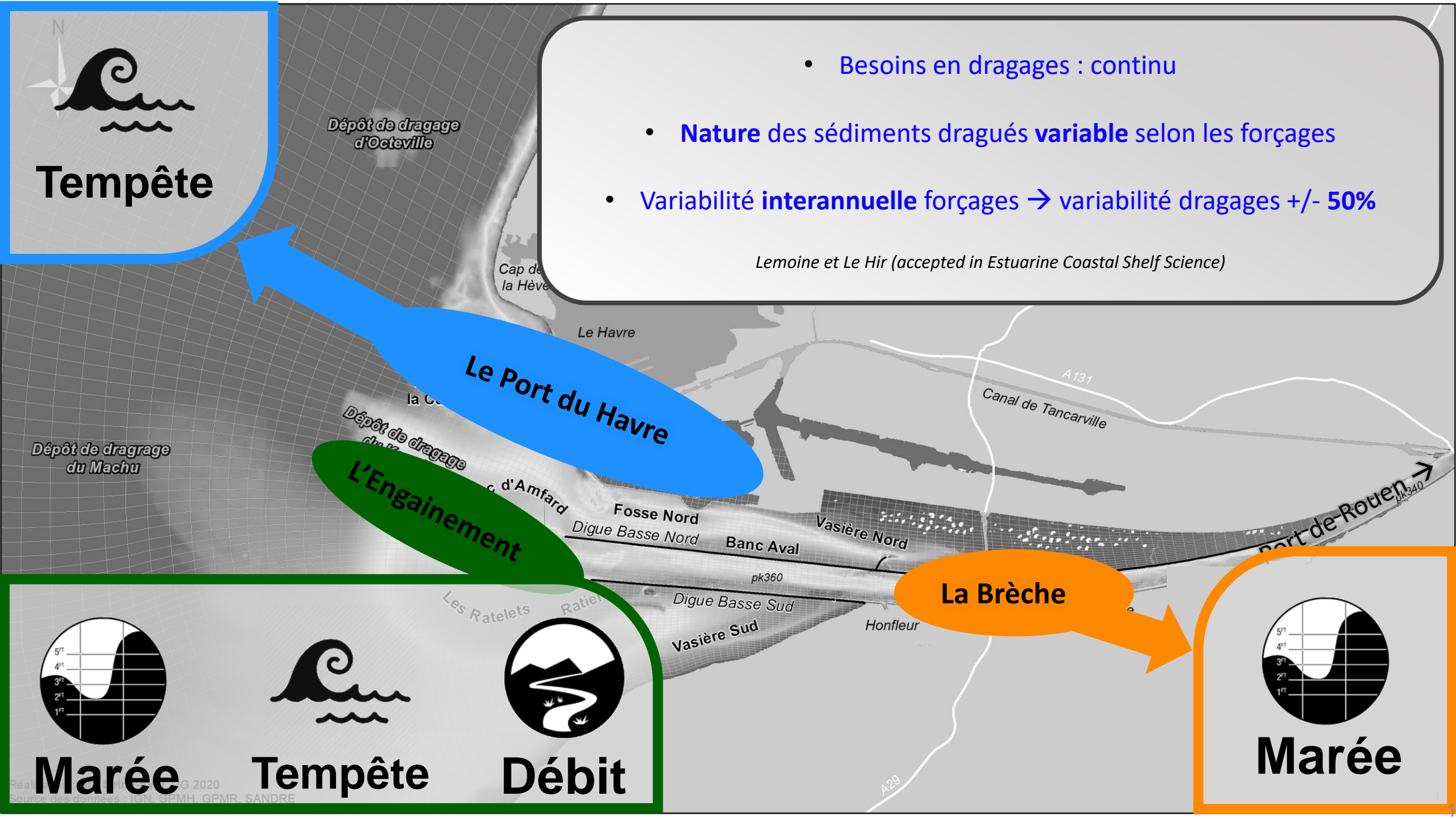
- 62% pour le Kannik et 11% pour Octeville (*dispersif*)



**Tempête**

- Besoins en dragages : continu
- **Nature** des sédiments dragués **variable** selon les forçages
- Variabilité **interannuelle** forçages → variabilité dragages +/- 50%

Lemoine et Le Hir (accepted in Estuarine Coastal Shelf Science)



**Le Port du Havre**

**L'Engainement**

**La Brèche**



**Marée**



**Tempête**



**Débit**



**Marée**



Quels effets des dragages sur la dynamique sédimentaire de l'estuaire ?



# Comment identifier les effets des dragages ? des clapages ?

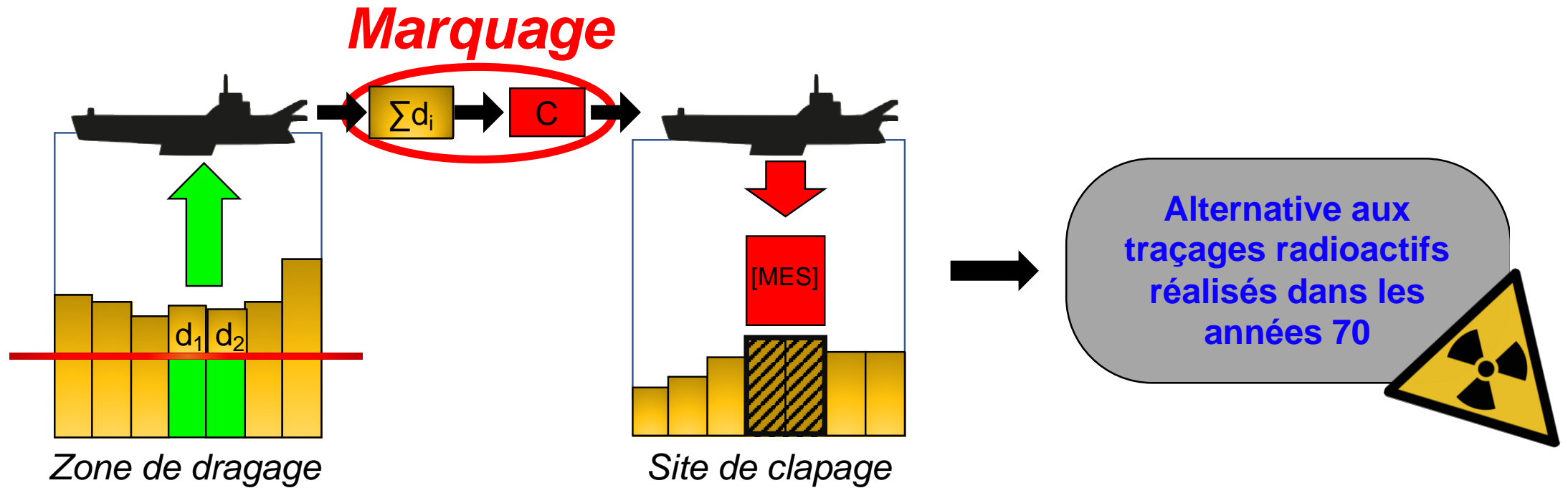
- Modélisation de scénarios sans dragage, sans clapage

	<del>Dragages/Clapages</del>	<del>Dragages/Clapages</del>
Réf. →	Dragages/Clapages	Dragages+Clapages
	<del>Dragages/Clapages</del>	Dragages

→ Comparaisons !

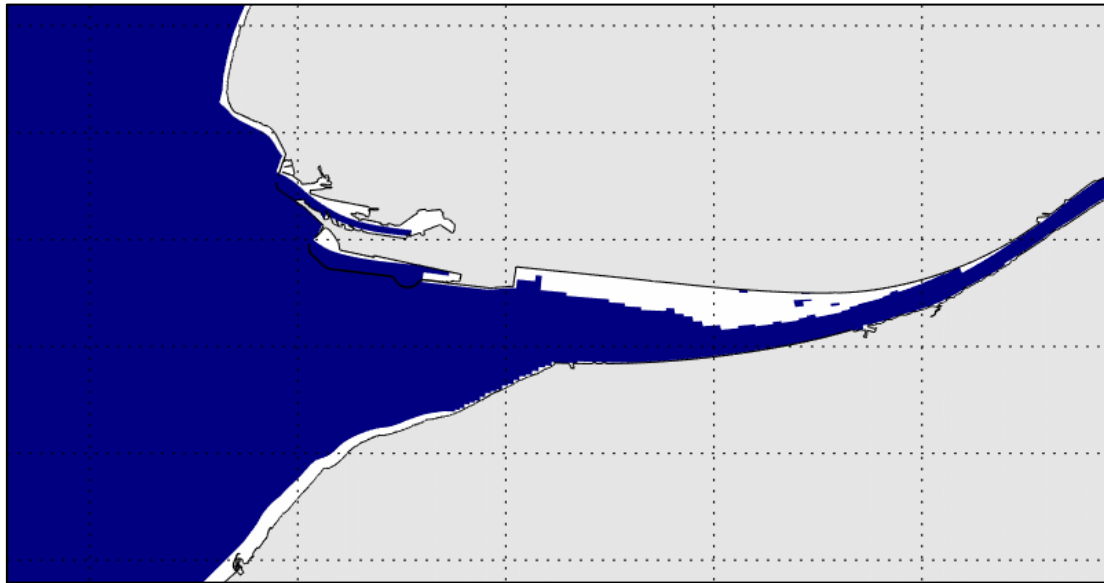
# Comment identifier les effets des dragages ? des clapages ?

- Marquage sédimentaire :
  - Suivi de la dynamique des sédiments immergés en mer



# Comment identifier les effets des dragages ? des clapages ?

- Marquage sédimentaire :
  - Suivi de la dynamique des sédiments immergés en mer



Alternative aux  
traçages radioactifs  
réalisés dans les  
années 70

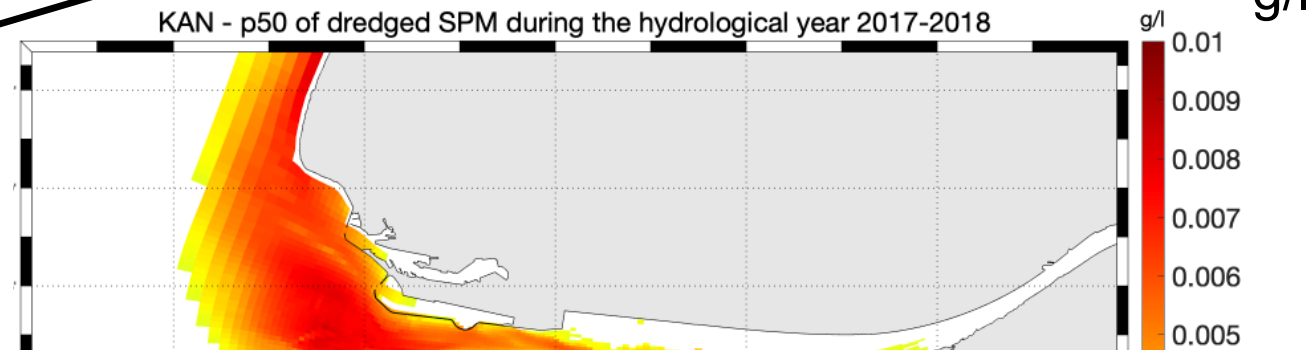


# Effets des immersions de sédiments dragués sur la turbidité

**Turbidité induite par les immersions**  
médiane **MES issues des clapages** – année 2017/2018

Médiane [MES\_clapée]  
**~ 5 mg/l**

↗ des MES  
localisées à  
proximité du  
Kannik



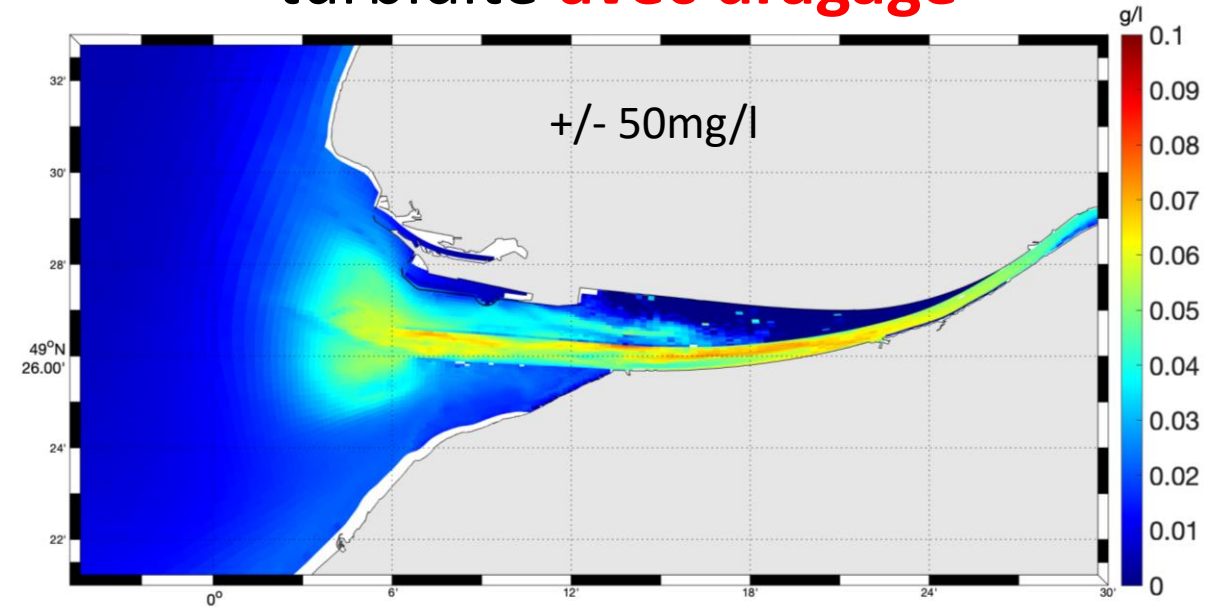
- Contribution des **sédiments clapés** à la turbidité non négligeable



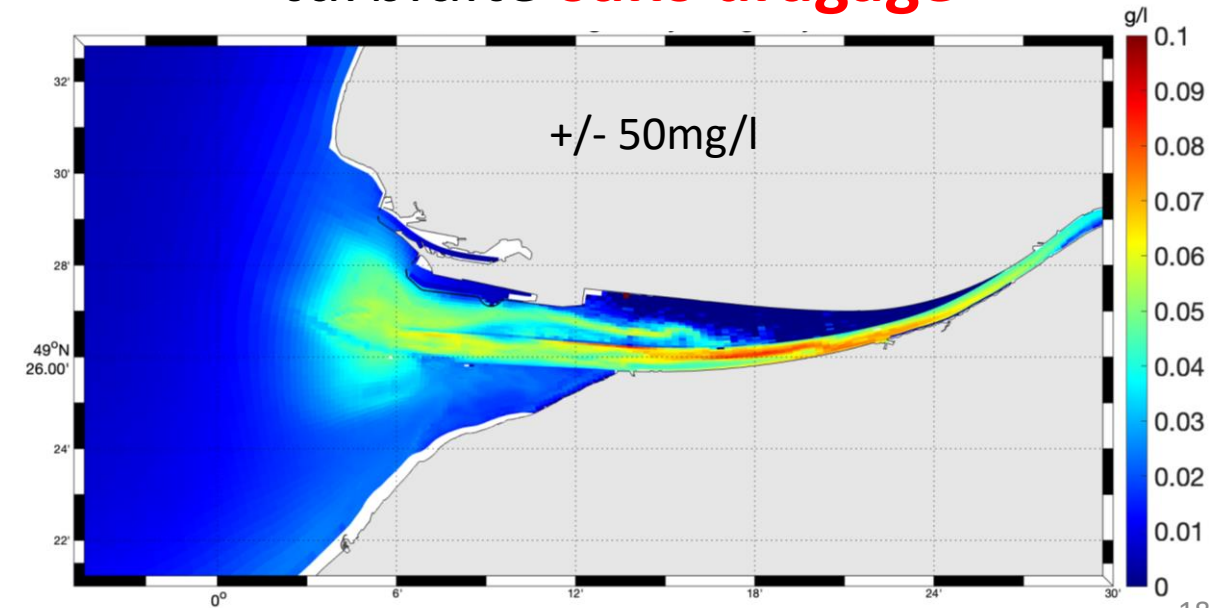
# Effets sur la turbidité

- Turbidités similaires avec et sans dragage !
  - +/- 50mg/l

## turbidité **avec dragage**



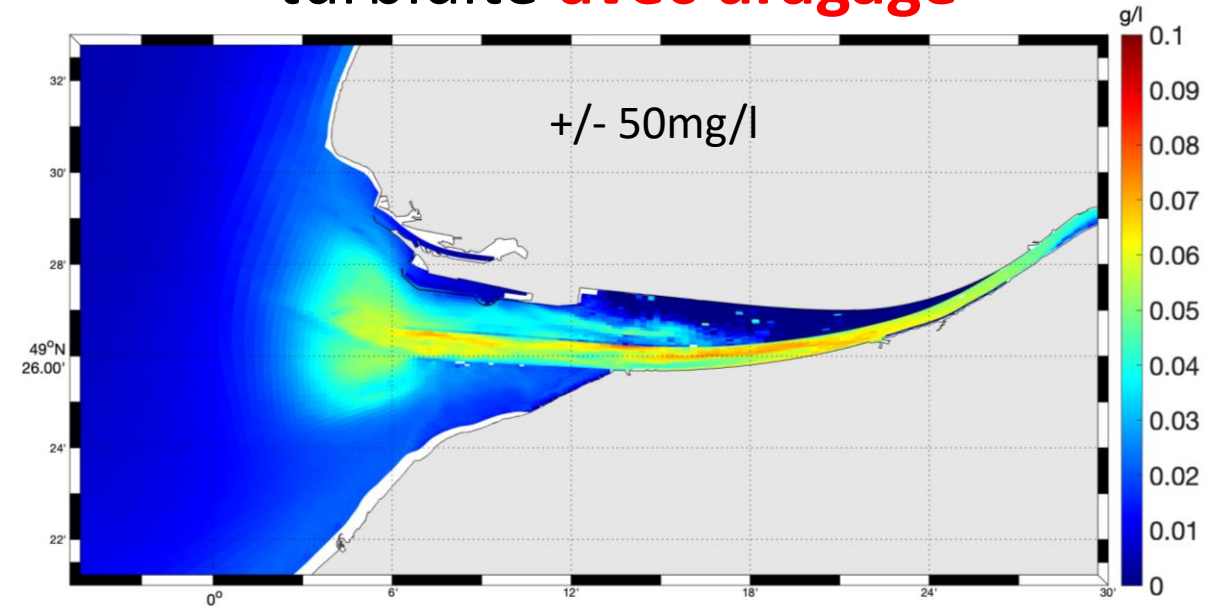
## turbidité **sans dragage**



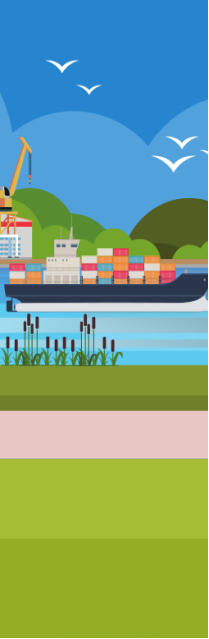
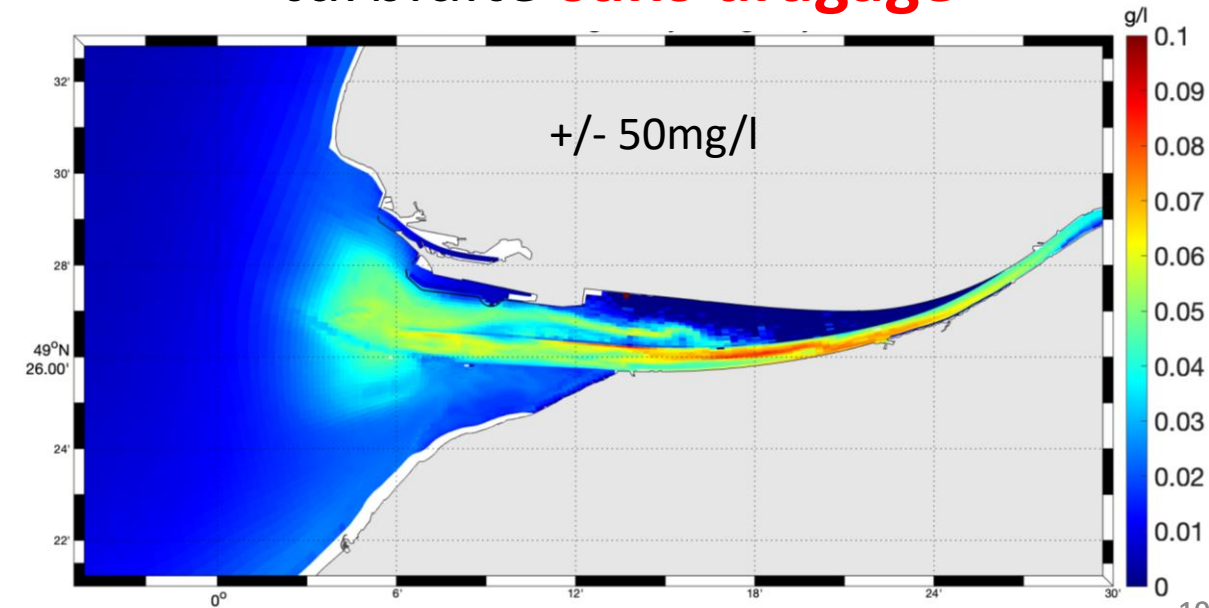
## Effets sur la turbidité

- Turbidités similaires avec et sans dragage !
  - +/- 50mg/l
- Remises en suspension non impactées par les dragages
  - 10 000 x plus important

### turbidité **avec dragage**



### turbidité **sans dragage**



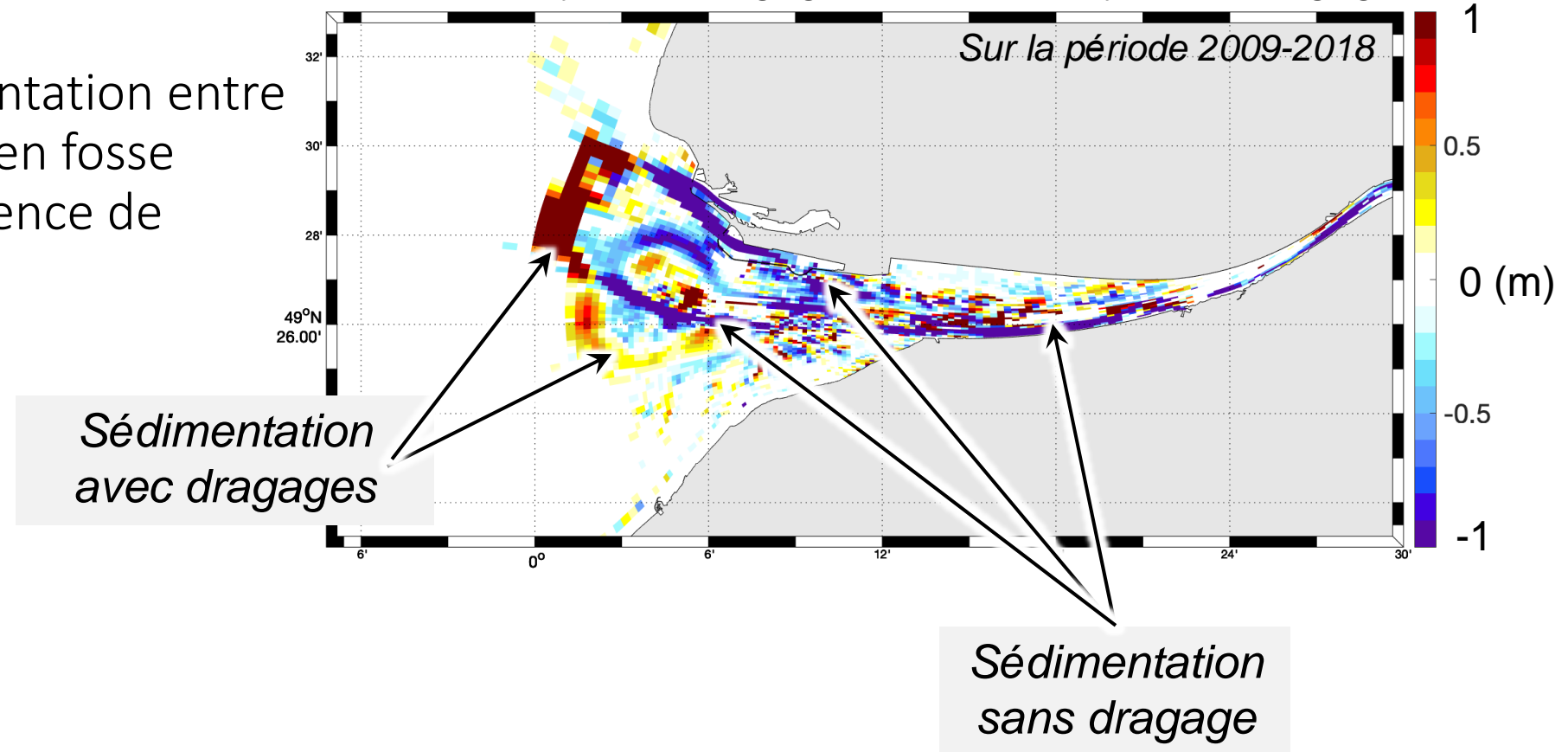
## Effets sur les fonds

- Effets prononcés :  $\sim 1\text{m}$

→ à l'échelle de toute l'embouchure

- Forte sédimentation entre les digues et en fosse nord en l'absence de dragage

Evol° bathy **avec** dragage – Evol° bathy **sans** dragage



## Effets sur les fonds

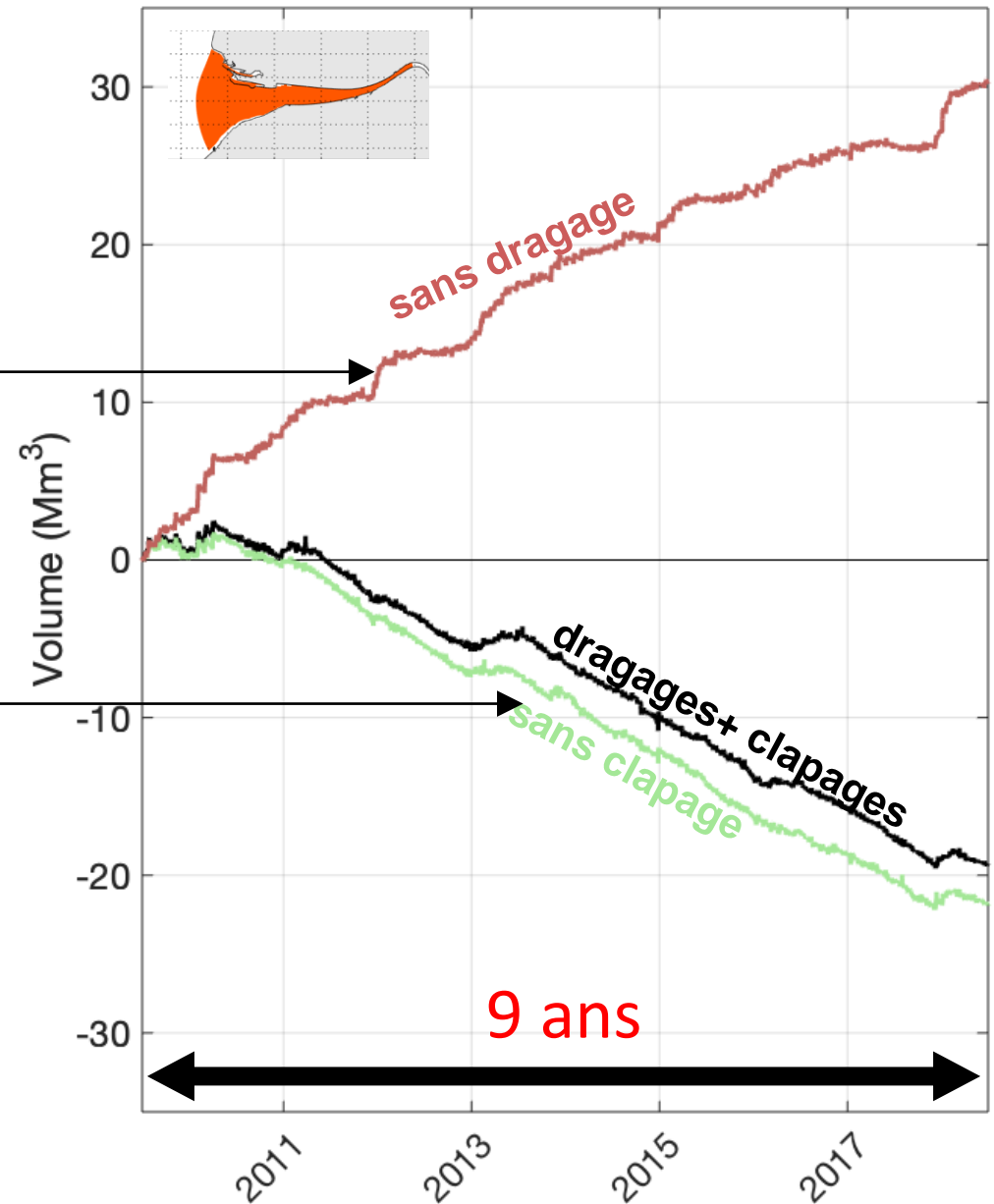
- Comblement sans dragages

- 30 Mm<sup>3</sup> / 9ans
- tendance naturelle !

- Estuaire en érosion avec dragages

- 20 Mm<sup>3</sup> / 9ans
- renforcée sans clapages...

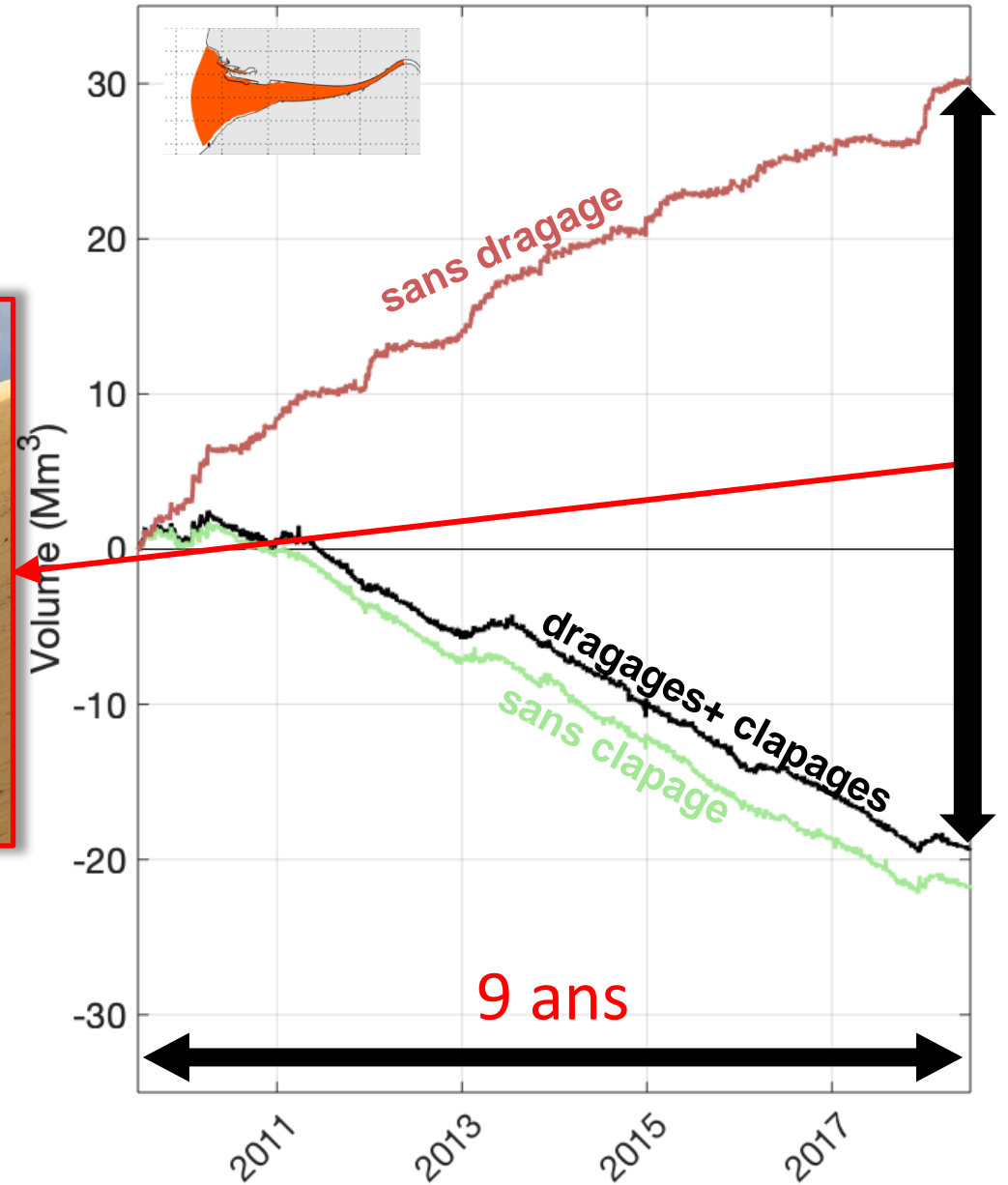
## Evolution du stock sédimentaire



# Effets sur les fonds

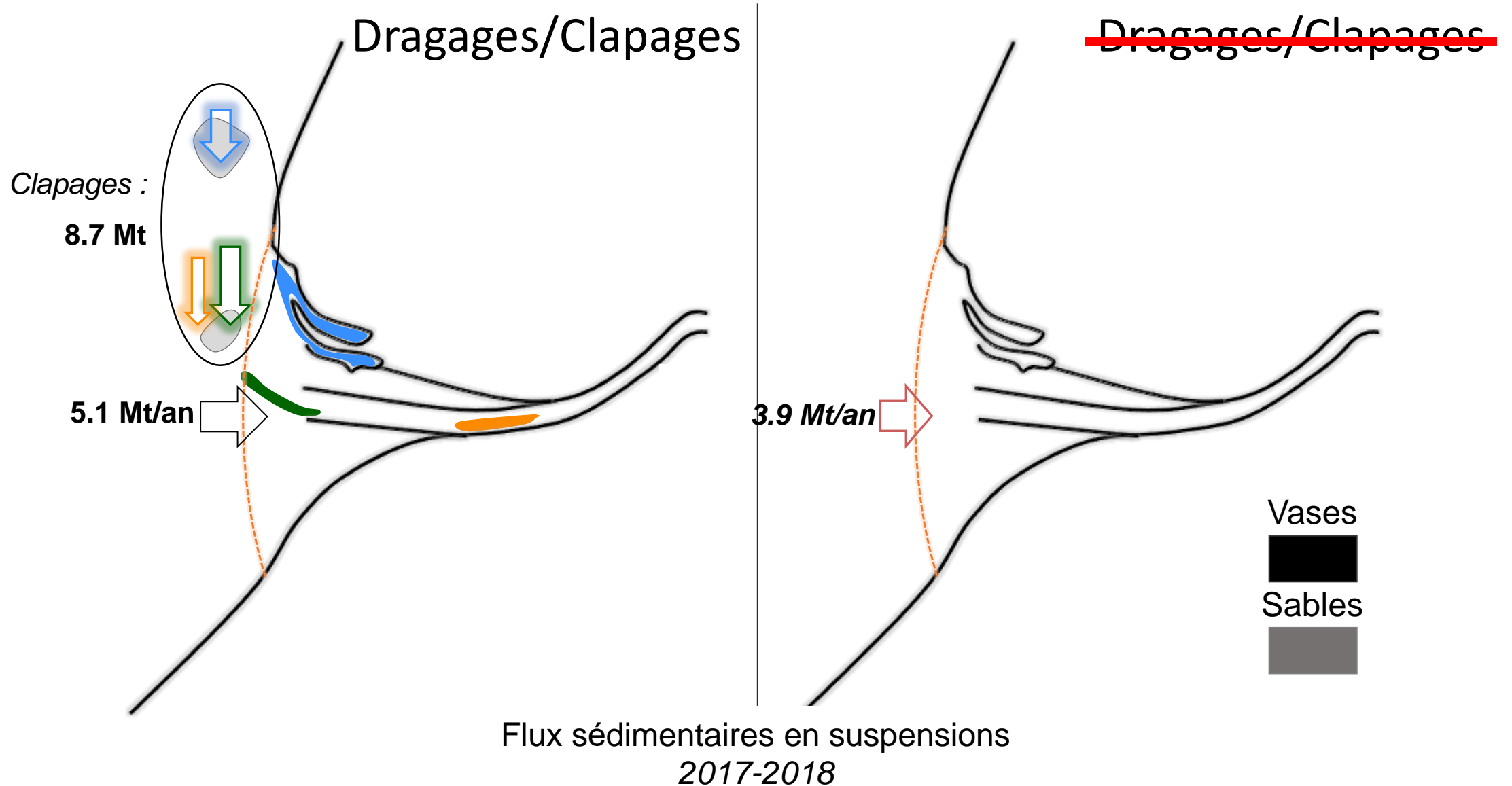


# Evolution du stock sédimentaire

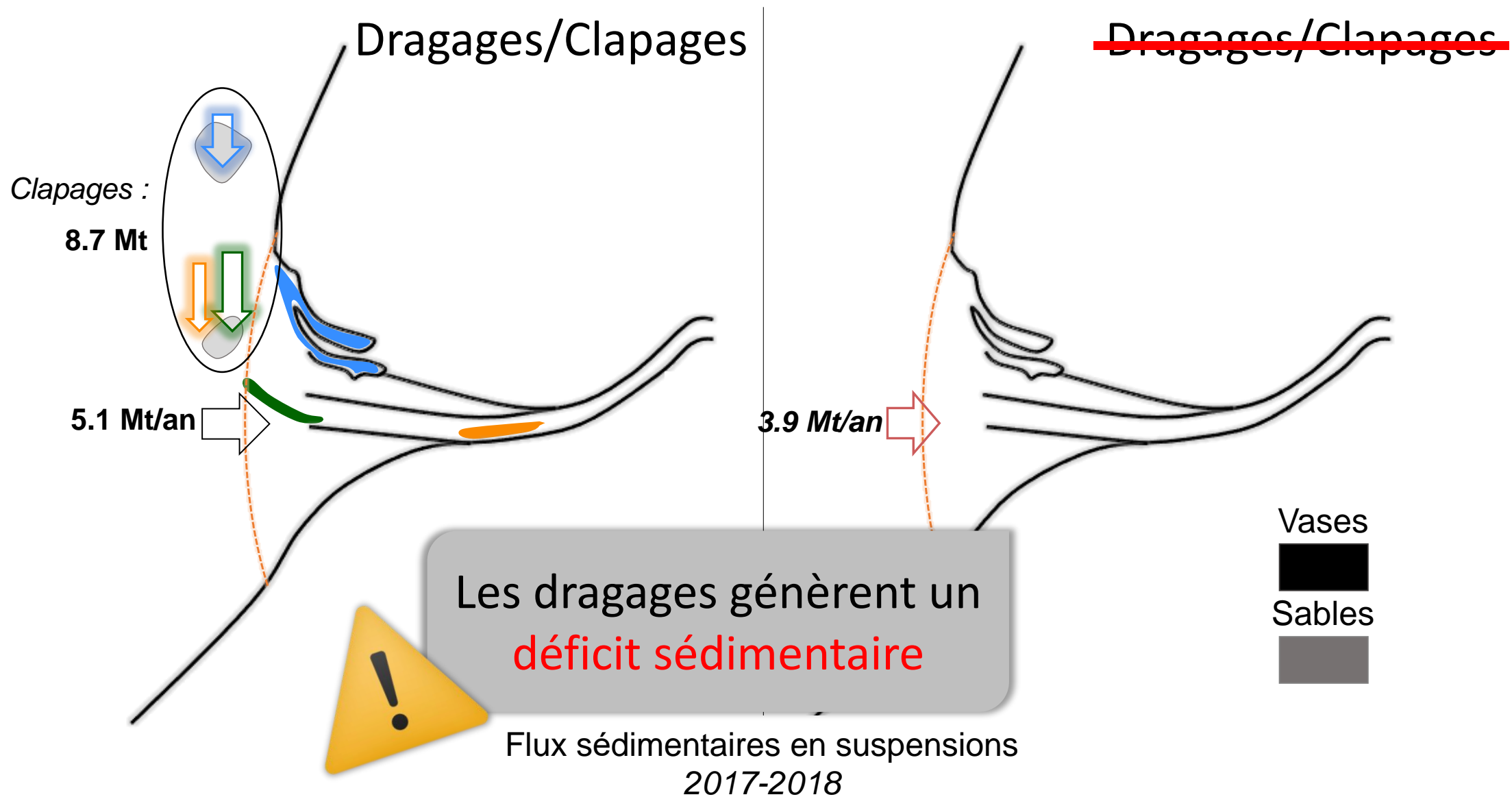




# Pourquoi ces effets?



# Pourquoi ces effets?



# Quels effets des dragages sur la dynamique sédimentaire de l'estuaire ?

- **Turbidité** : effets minimes
  - les resuspensions naturelles sont largement supérieures aux resuspensions induites par les dragages et clapages ( x 10 000 !)
- **Morphologie** : effets considérables !
  - Immersion : pas d'effets
  - Le dragage empêche le comblement de l'estuaire et contribue à son érosion ( 50 M.m<sup>3</sup> sur 10 ans )
- **Dragages** : sensibles aux immersions
  - Après 20 ans de clapages GPMR :
    - Kannik: 25% des sédiments dragués ont déjà été dragués
    - Machu: 18% | Octeville : 6%







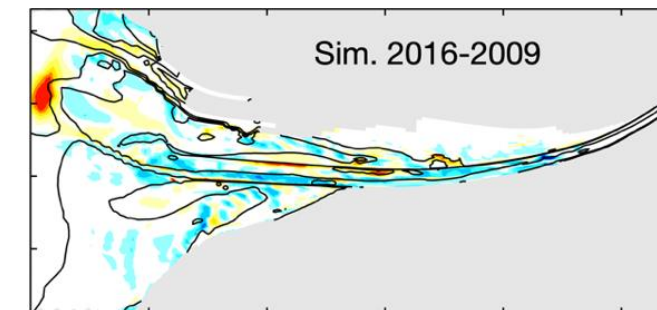
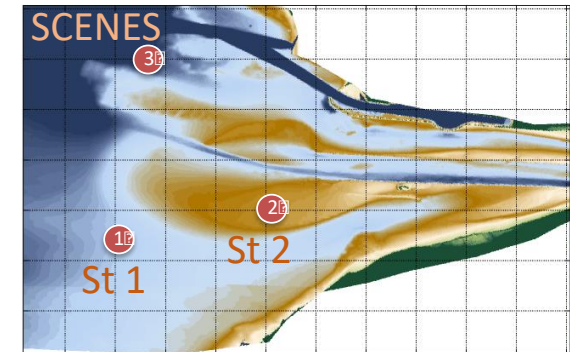
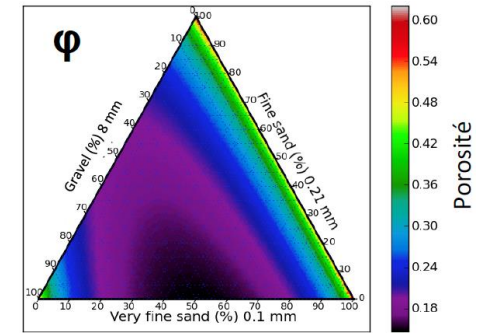
Merci pour votre attention

*<https://www.seine-aval.fr/projet/meandres/>  
Manuscrit de thèse disponible avant le 1<sup>er</sup> mai 2021...*



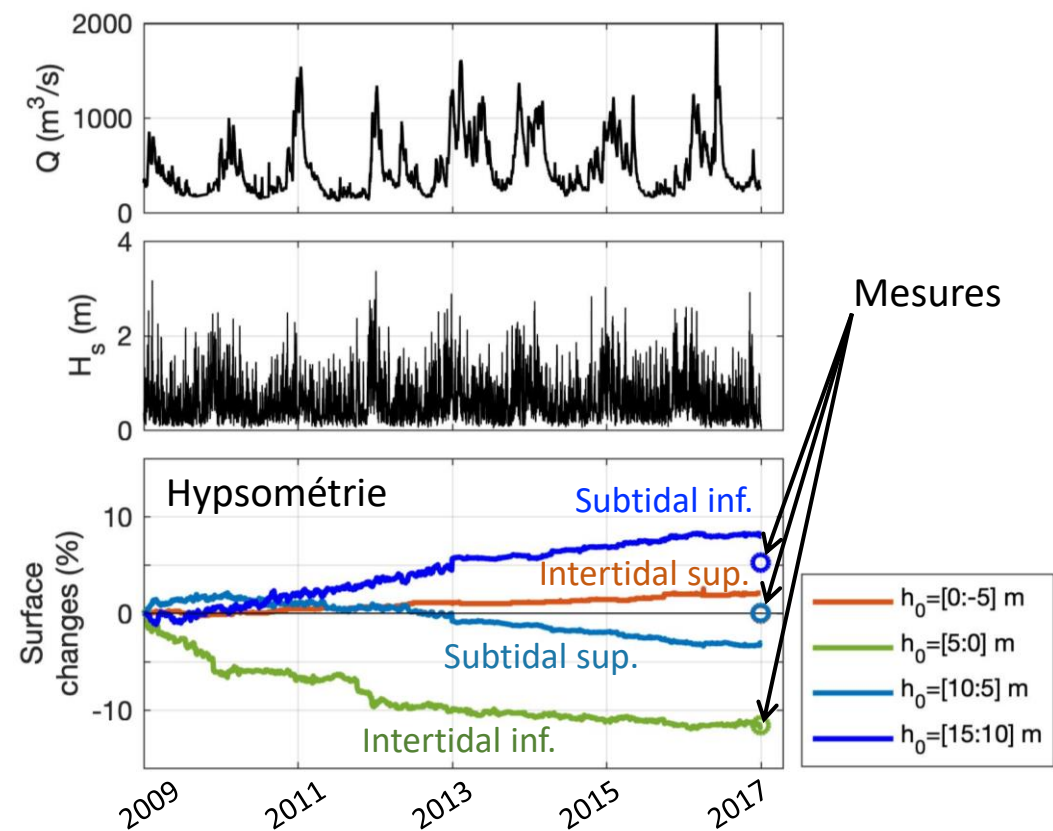
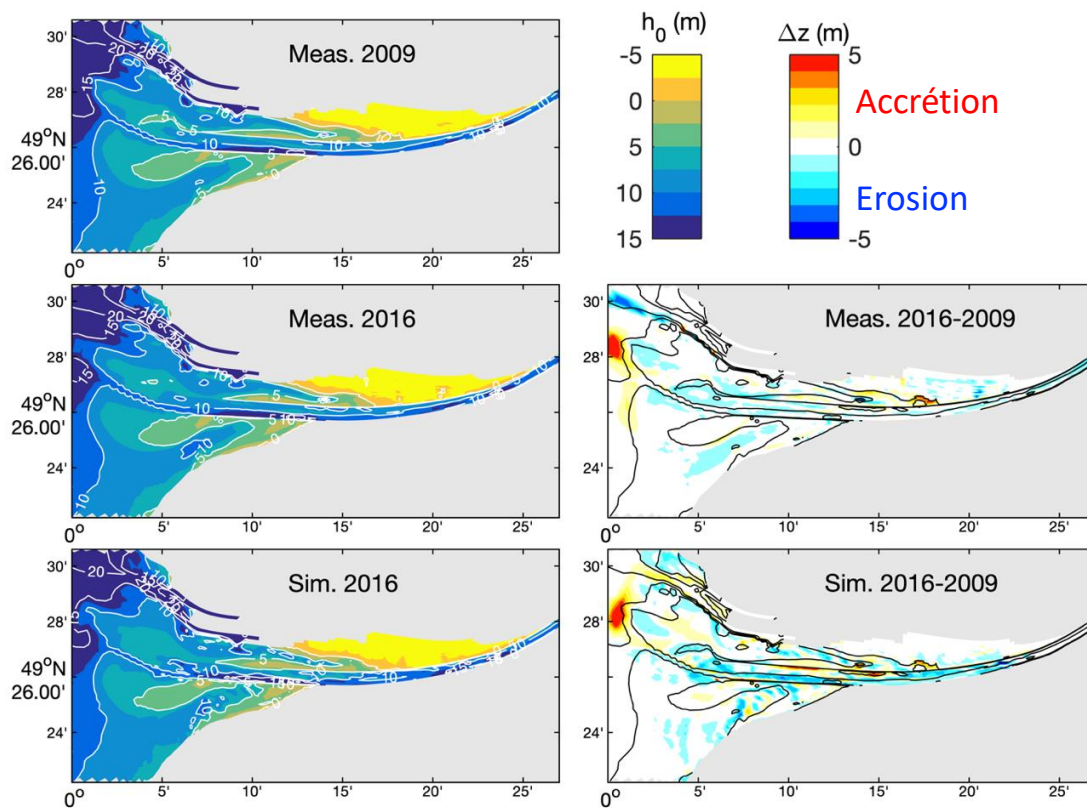
# Projet MORPHOSEINE

- Développement et amélioration du modèle *CurviSeine*
  - Processus de mélange, couplage modèles MARS3D/WW3 (vagues)
- Mesures *in situ* de la dynamique hydro-sédimentaire à l'embouchure
  - Déc. 2018 – Fév. 2019 (2 stations de fond)
  - Influence des événements de tempêtes sur les flux sédimentaires
- Simulations morphodynamiques à 10 ans
  - Plus de réalisme des évolutions morphologiques + dragages (MEANDRES)
- Simulations morphodynamiques à plus long terme (20-50 ans)
  - Simulations rétrospectives sur 20 ans (événements morphogènes)
  - → Simulations prospectives à 50 ans



# Vers quelle évolution morphologique ?

- Quelles sont les trajectoires morpho-sédimentaires potentielles de l'estuaire à 50 ans ?
  - Couplage morphodynamique
  - Comparaison pluriannuelle modèle/mesures (2009 -> 2016)
    - Difficultés à quantifier précisément les changements
    - Capacité à reproduire les tendances d'évolutions





## ■ Analyse cubatures MARS3D (M3D) / TELEMAC3D (T3D)

### ■ TELEMAC3D (ARTELIA, objectif : méandres nord)

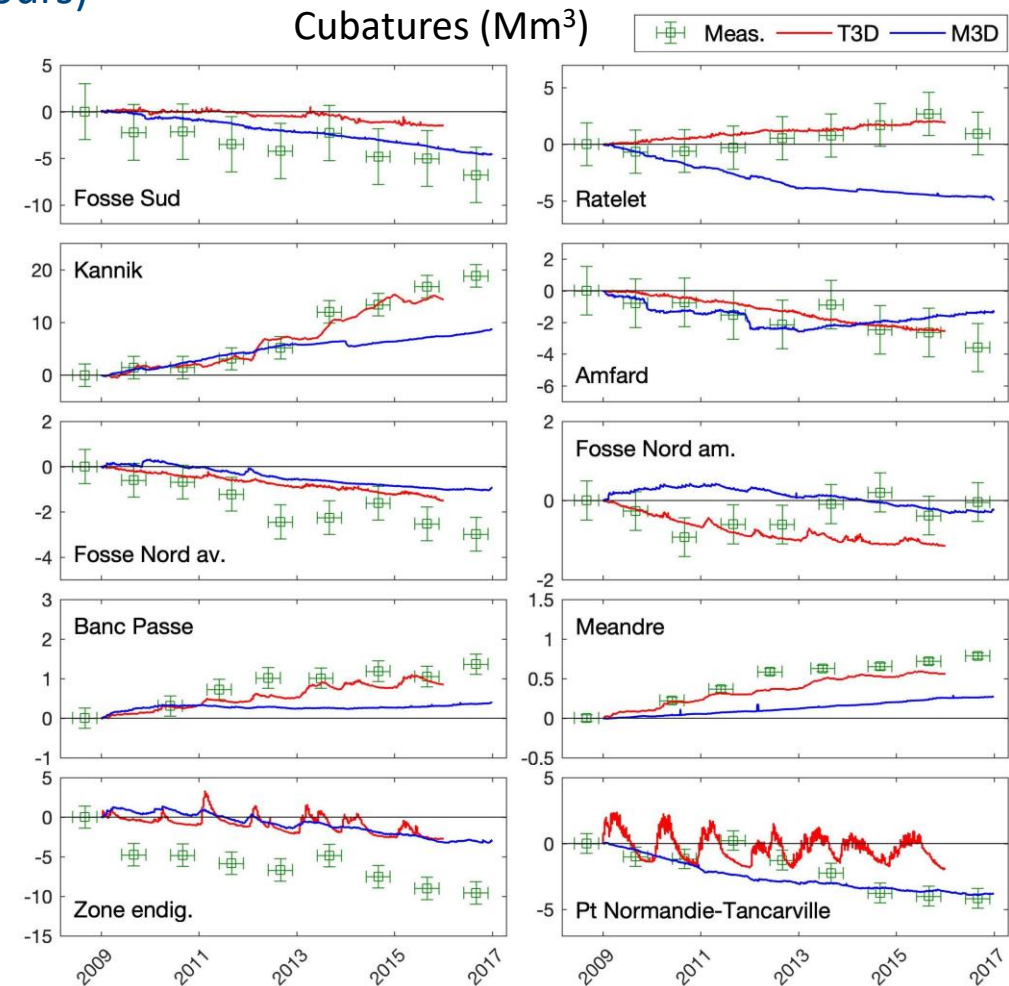
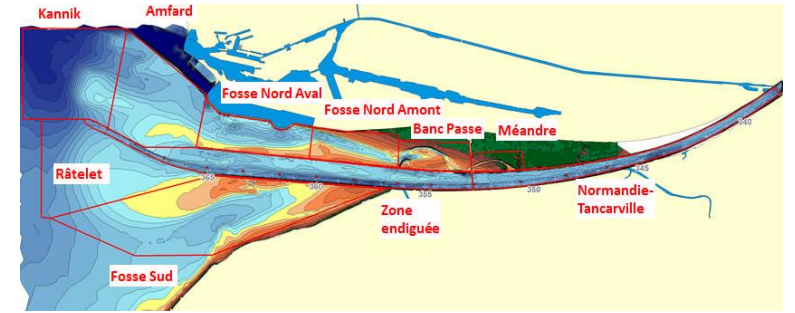
- ↗ résolution (-> 20 m), ↗ tps calcul (x5 : 1 an en 5 jours)
- Dragages **simulés**, mais clapages **forcés** (mesures)
- Banc du Râtelet « **figé** » (limite d'érosion)

### ■ Tendances

- T3D + performant : Râtelet, Kannik, Méandres
- M3D + performant : Fosse Sud, Pt Norm. - Tanc.
- Similaires : Fosse Nord, Zone endig.

### ■ Apporte un autre regard sur les simulations

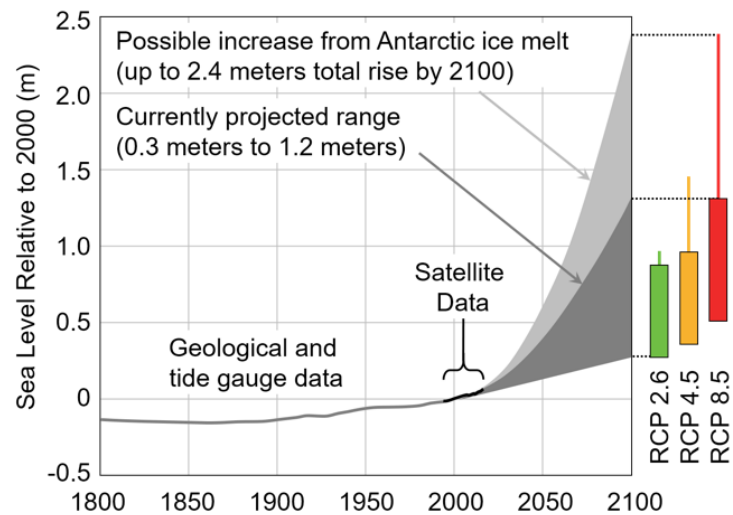
- + confiance (convergence des modèles)
- + réserve (divergence des modèles)



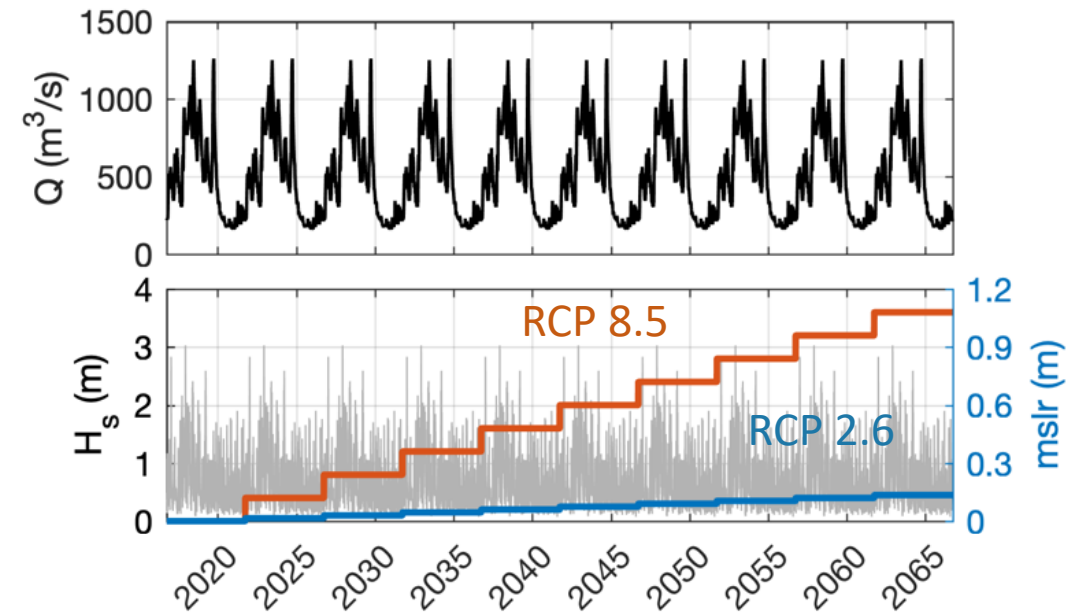
# Evolution potentielle après 50 ans

## ■ Simulations idéalisées sur 50 ans (2016 - 2066)

- Forçages réalistes (année 2016)  
(10 années x facteur d'accélération morpho 'MF=5')
- 2 scénarios de montée du niveau de la mer (NM)
  - RCP 2.6 : +3 mm/an ( $\rightarrow$  NM<sub>2066</sub> +0,135 m)
  - RCP 8.5 : +24 mm/an ( $\rightarrow$  NM<sub>2066</sub> +1,08 m)

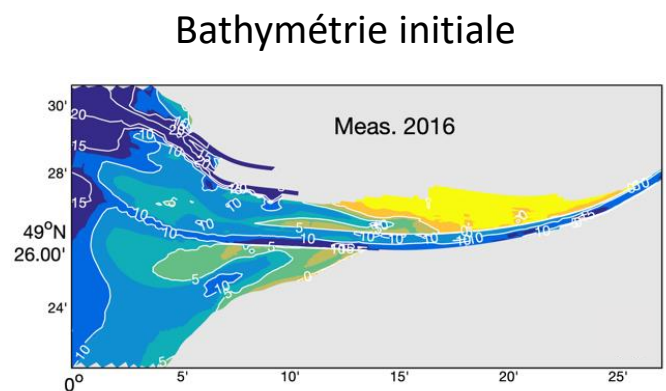


*Sweet et al. [2017]*

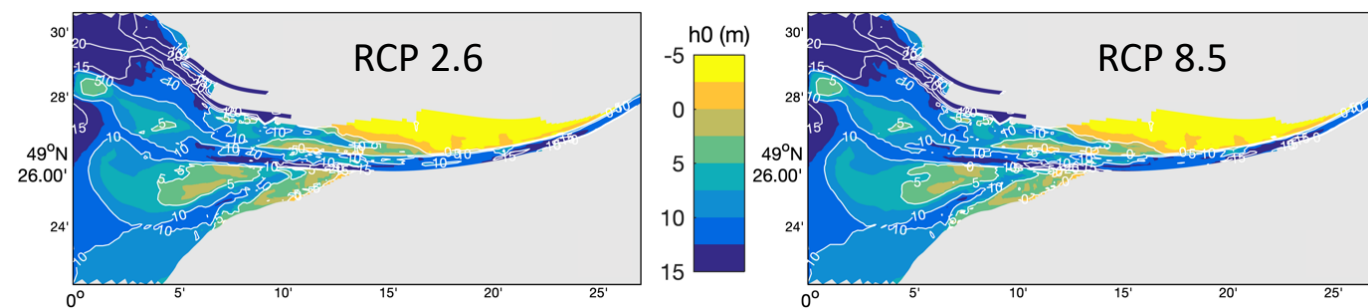


# Evolution morphologique à 50 ans

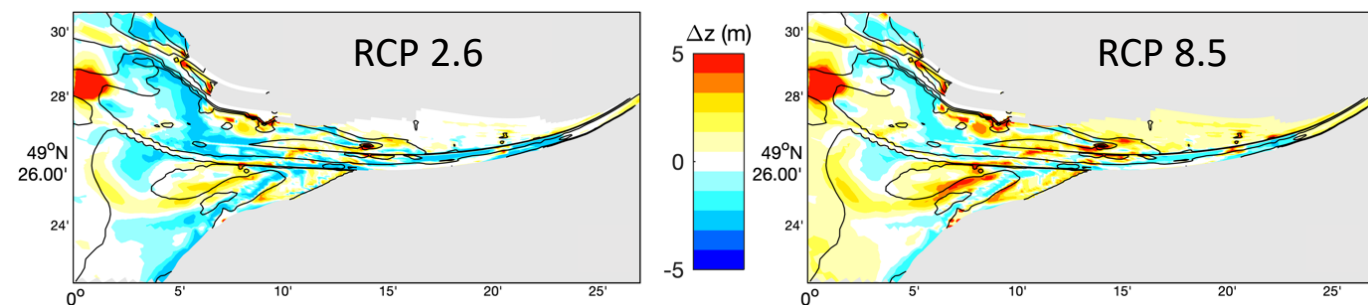
- Evolutions bathymétriques similaires pour RCP 2.6 et 8.5
- Accrétion sédimentaire plus marquée pour RCP 8.5
  - → Adaptation à la montée du NM ?



Bathymétries finales (+50 ans)



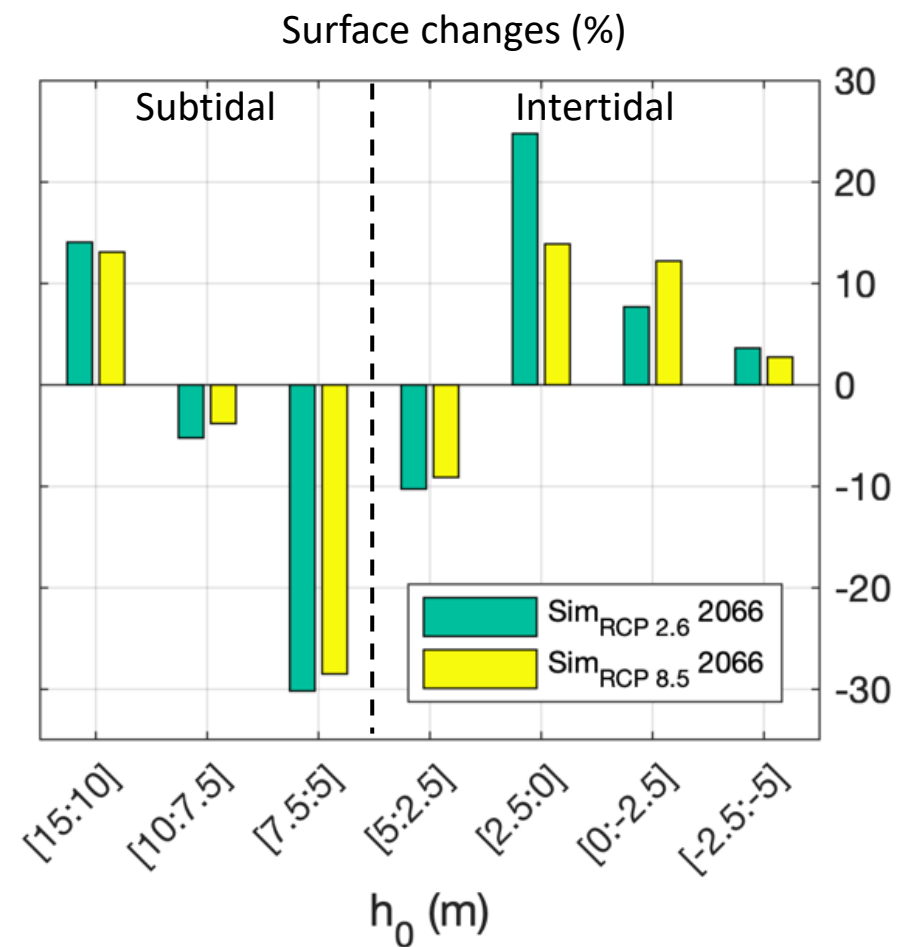
Différentiels d'élévation (fin - ini)



# Evolution hypsométrique à 50 ans

## ■ Evolution des surfaces subtidales et intertidales

- Tendances similaires pour RCP 2.6 et 8.5
- ↗ des estrans moyens et supérieurs ( $h_0 = [2,5 : -5] \text{ m}$ )
- ↘ des zones subtidales ( $h_0 = [10 : 2,5] \text{ m}$ )



$h_0 = 0$  : niveau moyen de la mer au repos



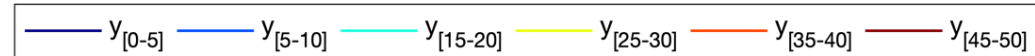
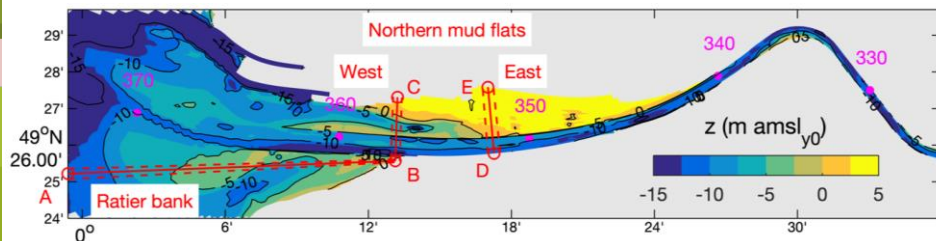
# Radiales caractéristiques

## ■ Longitudinale (banc du Ratier)

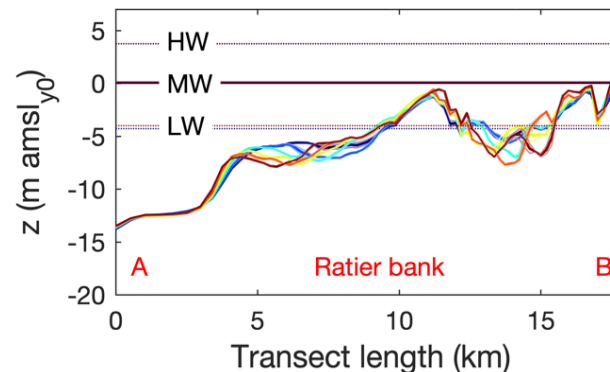
- Progradation (RCP 8.5 : ~8 m/an)
- Elévation (RCP 8.5 : ~2 cm/an)
- Evolution + faible pour RCP 2.6

## ■ Transversales (Vasière Nord)

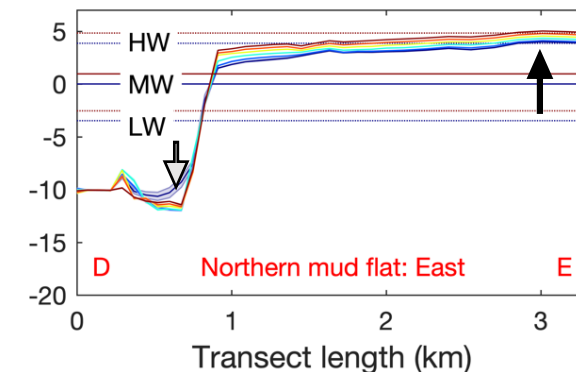
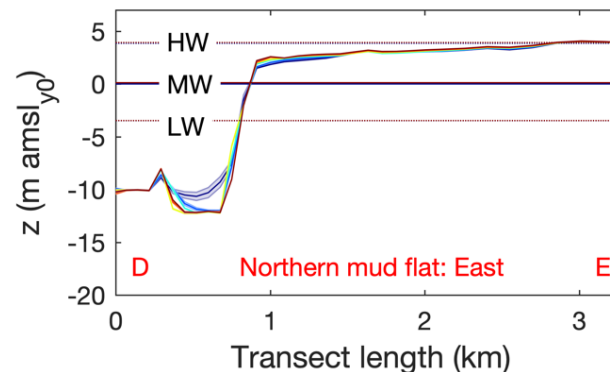
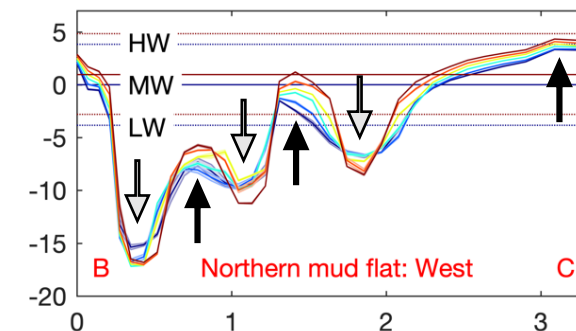
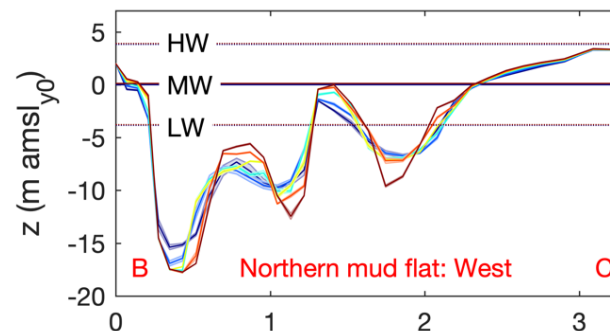
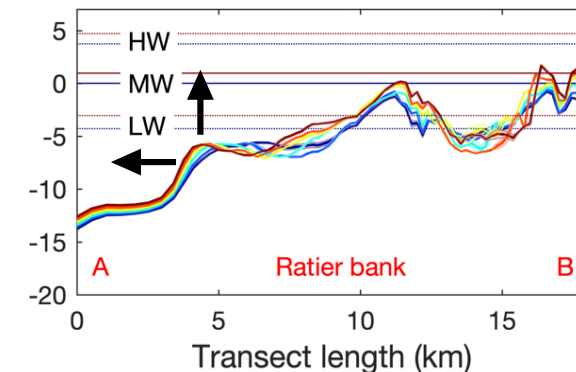
- Approfondissement des chenaux
- Accrétion des vasières (RCP 8.5 : ~2 cm/an)
- Evolution + faible pour RCP 2.6



RCP 2.6 (+3 mm/an)



RCP 8.5 (+24 mm/an)





# Conclusions

- Modélisation hydro-morpho-sédimentaire long terme (50 ans)
  - Fortes incertitudes
  - Capacité à simuler des trajectoires potentielles
- Vers quelles évolutions morphologiques à 50 ans ?
  - Progradation des bancs, approfondissement des chenaux, accrétion des vasières
  - Effets de la montée du NM
    - RCP 2.6 (+3 mm/an) et RCP 8.5 (+24 mm/an)
    - ↗ accrétion pour RCP 8.5 (adaptation au NM)
    - ≠ adaptation entre les vasières (équilibre morphodynamique local)
- Des systèmes estuariens (type Seine) peuvent s'adapter à la montée du NM
  - Suffisamment de sédiments disponibles
- Couplage morphodynamique indispensable pour simuler les effets potentiels de la montée du NM
  - ↗ progressive du NM (+1 m/50 ans) ≠ ↗ instantanée (+1 m)

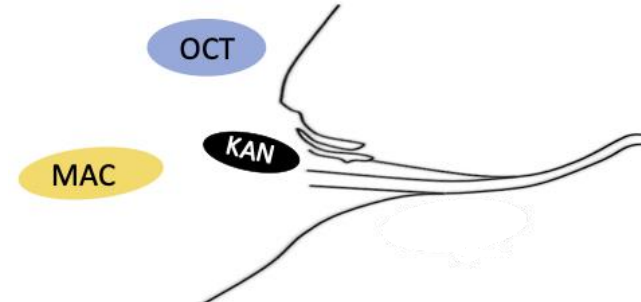


# Merci de votre attention





# Effets d'un changement de site d'immersion



- **Kannik → Machu : pas d'effet sur 10 ans**

- idem Octeville

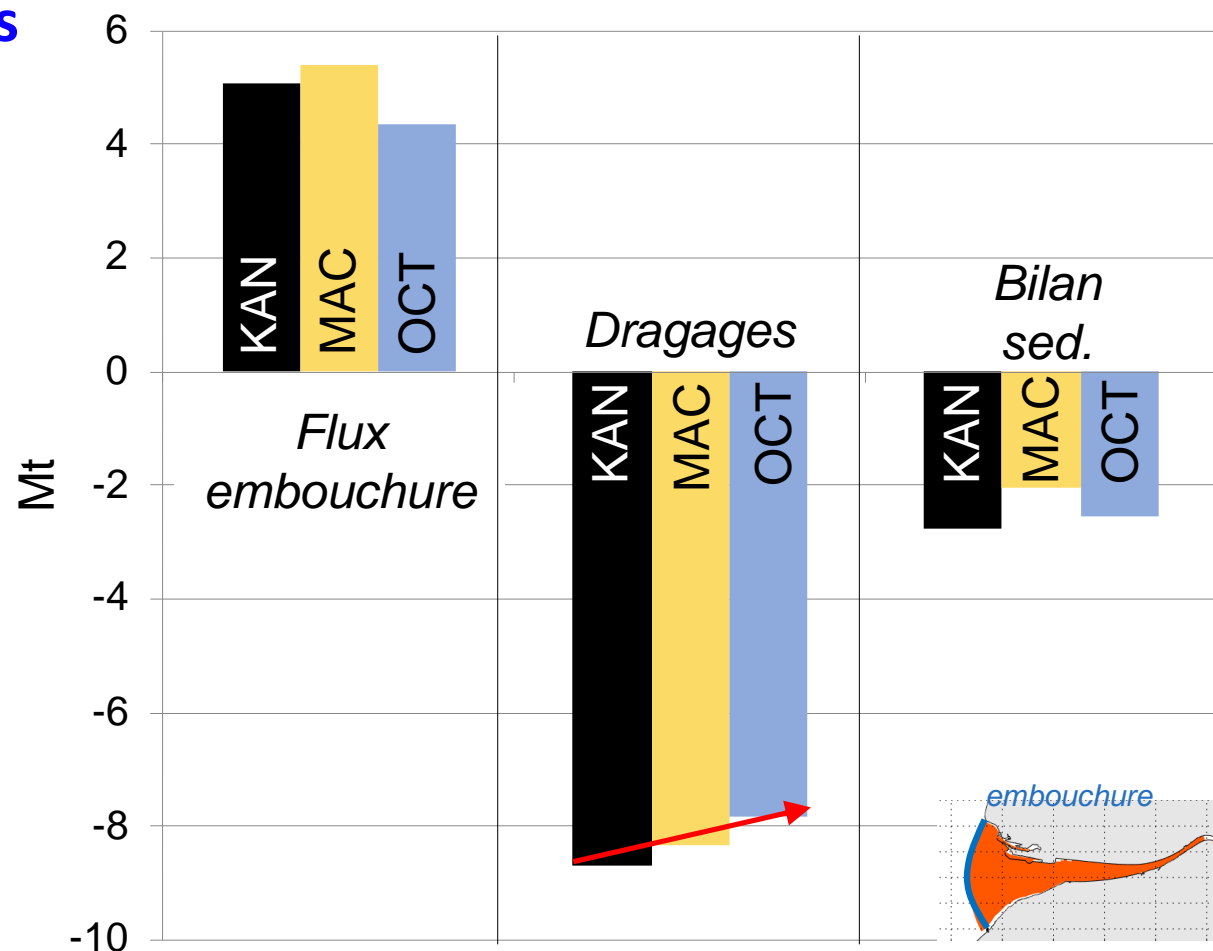
- **Dragages : Kannik > Machu > Octeville**

- **Flux à l'embouchure** différents selon les scénarios

- **Bilans sédimentaires différents**

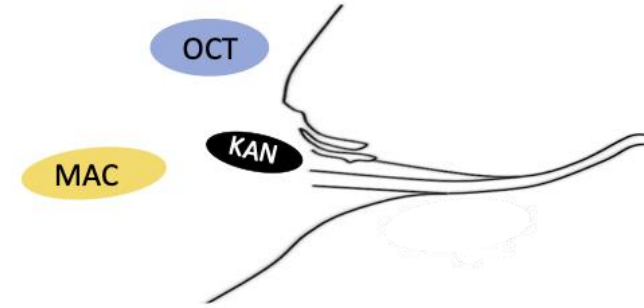
→ *évolution à long terme (>10ans)*

*adaptation de l'estuaire après 50 ans d'immersion au Kannik*



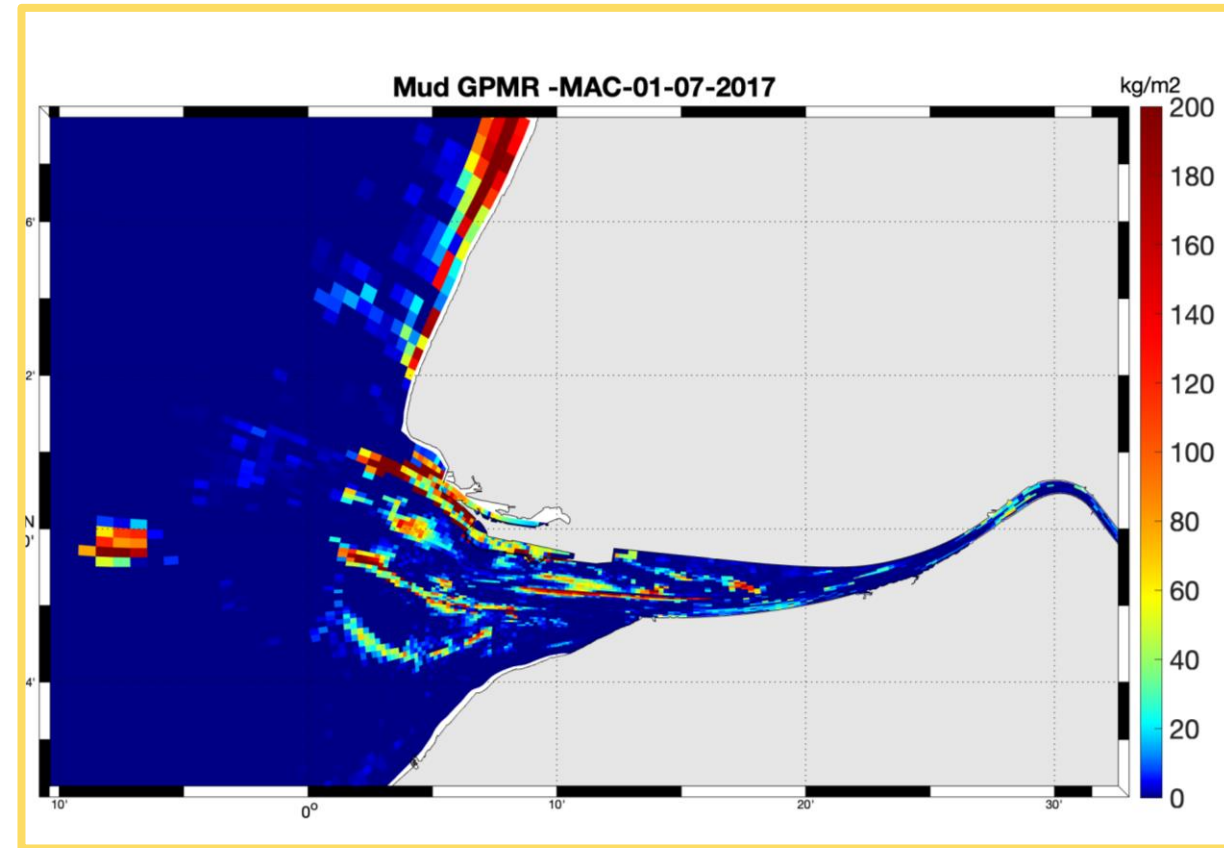
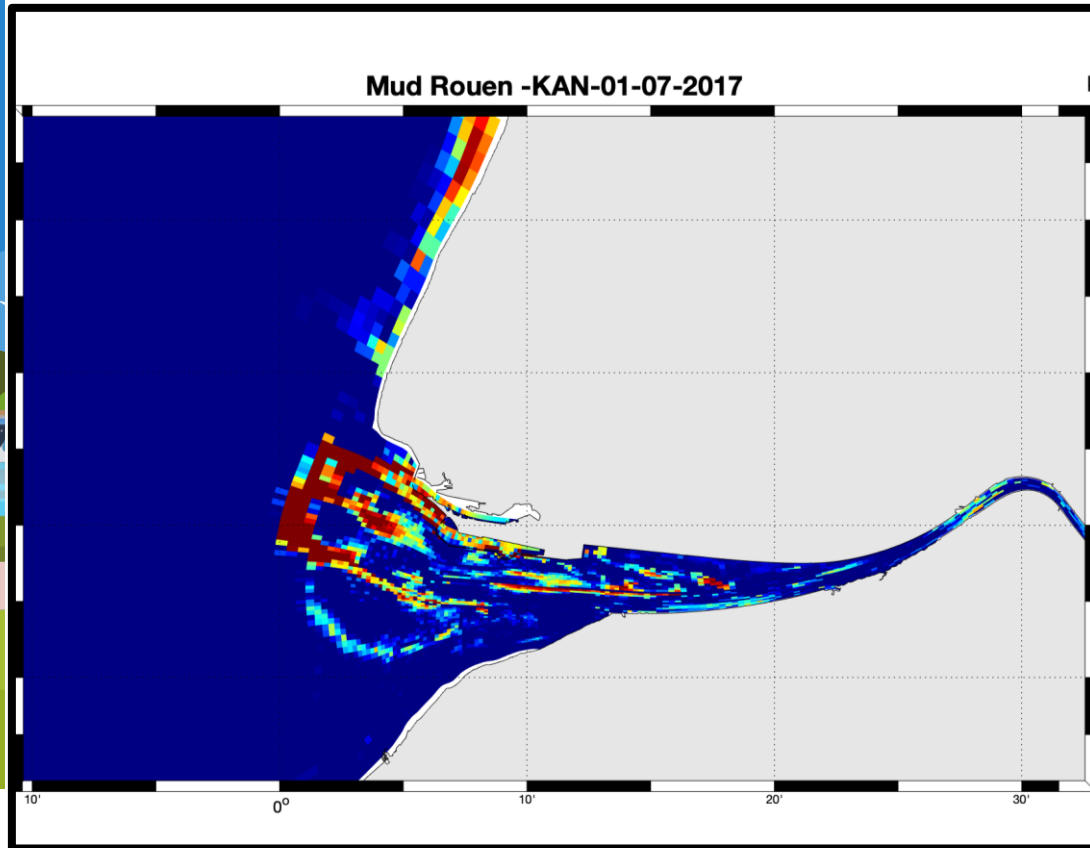
Flux à l'embouchure, quantités draguées et bilans sédimentaires dans l'estuaire interne, au cours de l'année hydro. 2017-2018

# Effets d'un changement de site d'immersion



## • Effets sur la dispersion des vases draguées ?

- aucune différence significative - les différences sont dans la marge d'incertitude!



# L'envasement des plages ?

- **Phénomène naturel**

→ *dynamique hydro-sédimentaire de la Baie de Seine*

## Environnement vaseux

Stocks en place  
Apports fluviaux  
Apports marins



## Forçages intenses

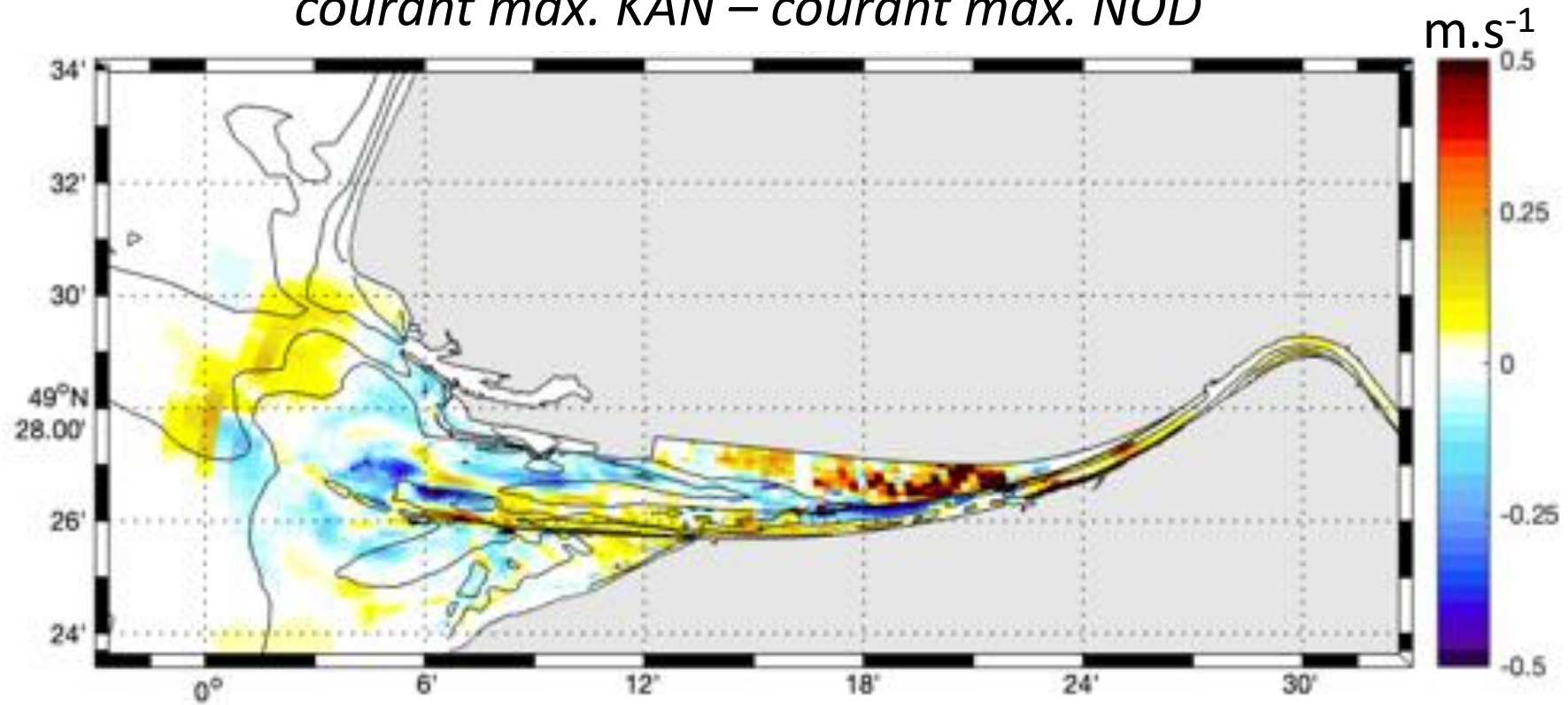
Mélange eau douce/salée  
Courant de marée  
Vagues

**Flux sédimentaires  
Importants!**

*Episodes d'envasements  
après crue et tempêtes...*



*courant max. KAN – courant max. NOD*



*Différence des intensités des vitesses barotropes maximales entre les scénarios KAN et NOD (KAN - NOD). Période du 20 sept 2017 au 21 juin 2018 (après 9 ans de simulations)*



