

Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : Rôle des dragages d'entretien

J.P. Lemoine, P. Le Hir



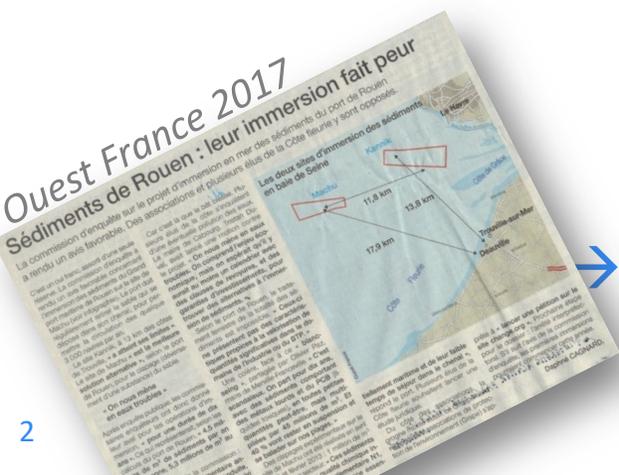
Les dragages d'entretien en Seine *

* secteur aval

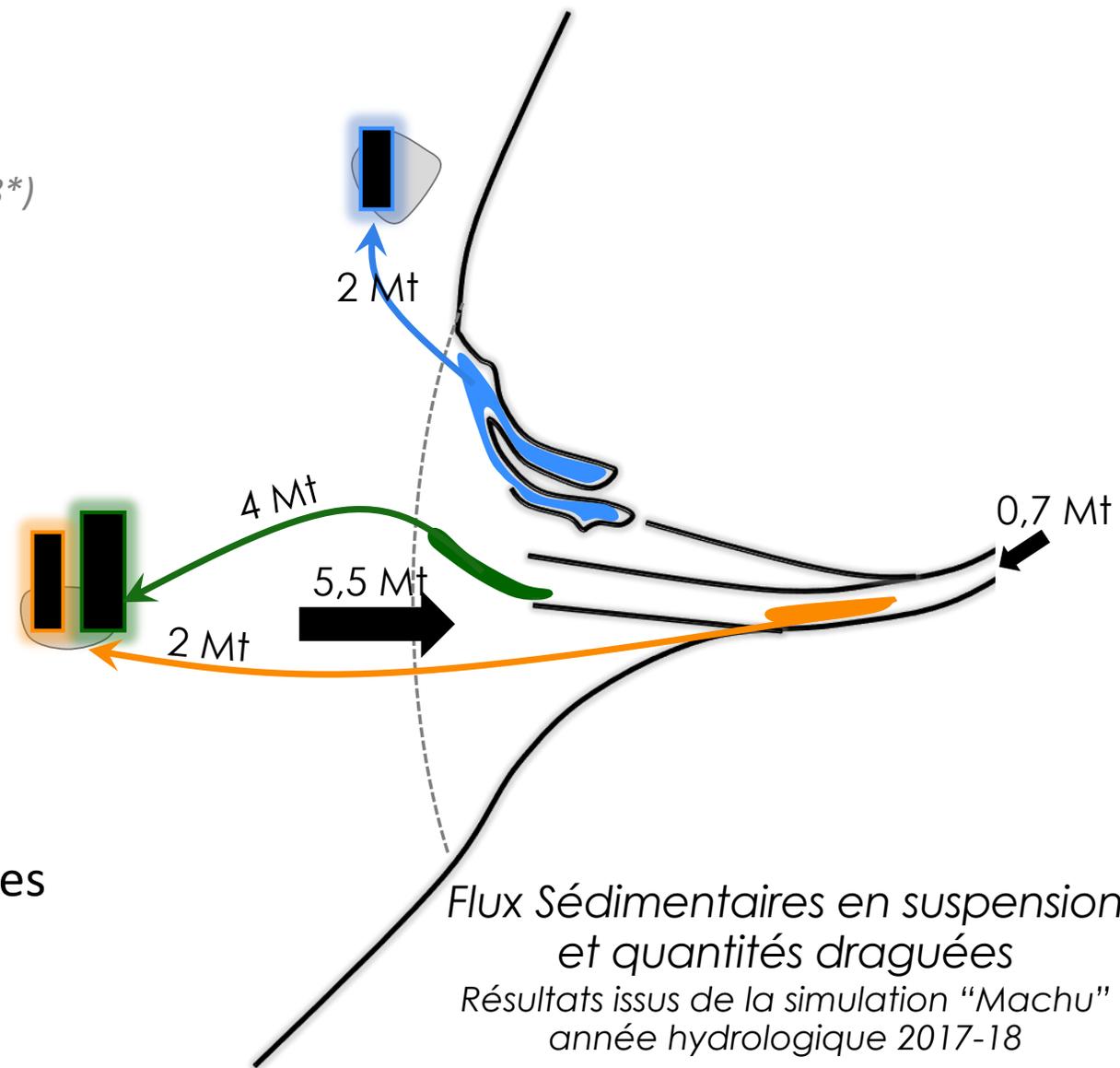
Flux induits par les dragages :

- comparables aux apports marins (e.g. Schultz 2018*)
- x10 / aux apports de la Seine (e.g. Avoine 1995)

“Lorsque les dragages déplacent des quantités comparables aux mouvements naturels de sédiments, cela devient problématique”
(Zhao et al. 2018)



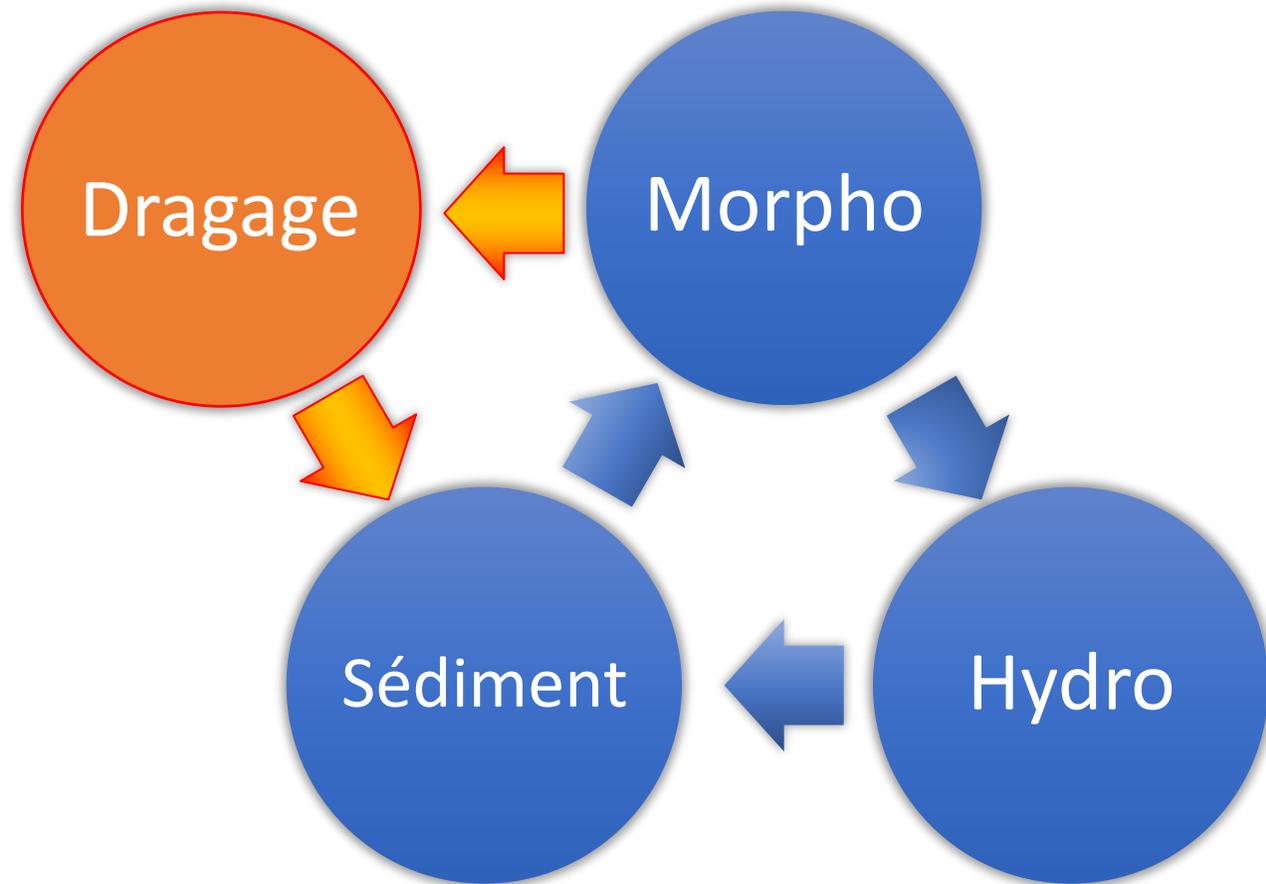
→ Sujet d'actualité : Evolution des pratiques...



Objectif du projet

“ Etudier l’effet des dragages/clapages sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de l’estuaire de la Seine, et sur ses tendances évolutives en tenant compte des couplages hydro-morpho-sédimentaires...”

...Cette analyse devrait permettre ultérieurement l’étude de ces effets sur le fonctionnement écologique de l’estuaire, en termes d’évolutions d’habitats notamment. ”



Plan de la présentation

- i. Modélisation des dragages
- ii. Variabilités et déterminisme des dragages
- iii. Effets des dragages/clapages**
- iv. Conclusions/discussions et perspectives



Modélisation des dragages

Octeville

Cap de la Hève

Le Havre

Canal de Tancarville

Rade de la Carosse

Le Port du Havre

Port 2000

A131

Canal de Tancarville

Machu

Kannik

L'Engainement

Banc d'Amfard

Fosse Nord

Digue Basse Nord

Banc Aval

Vasière Nord

pk360

Digue Basse Sud

Vasière Sud

Les Ratelets

Ratier

Fosse Sud

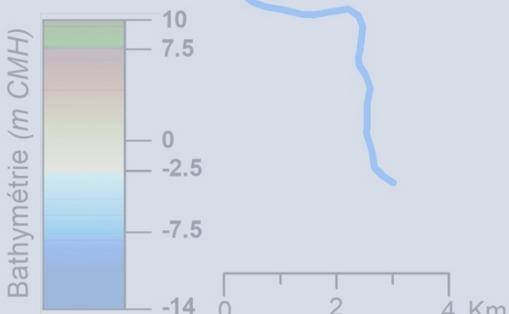
Honfleur

La Brèche

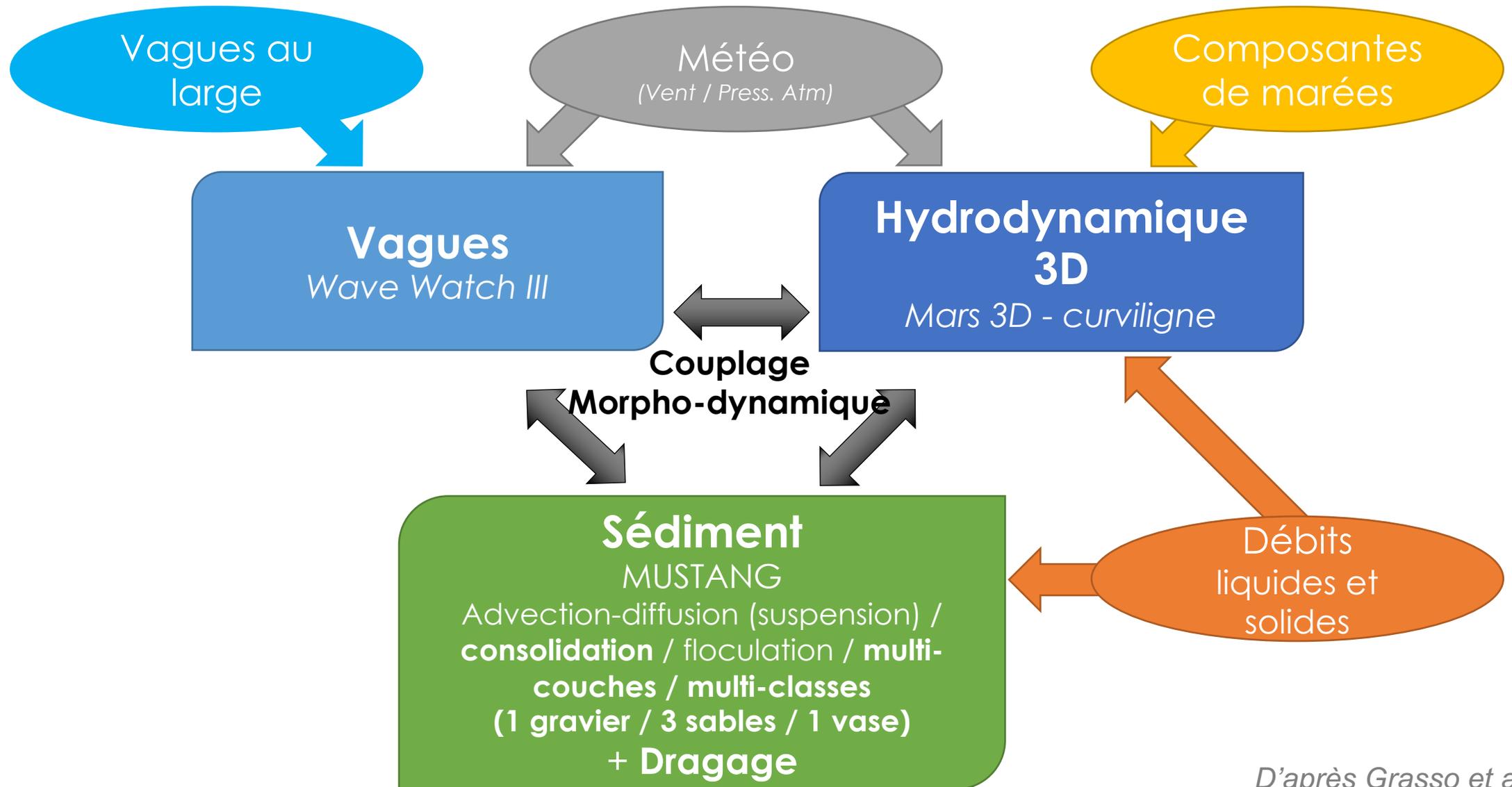
Fatouville

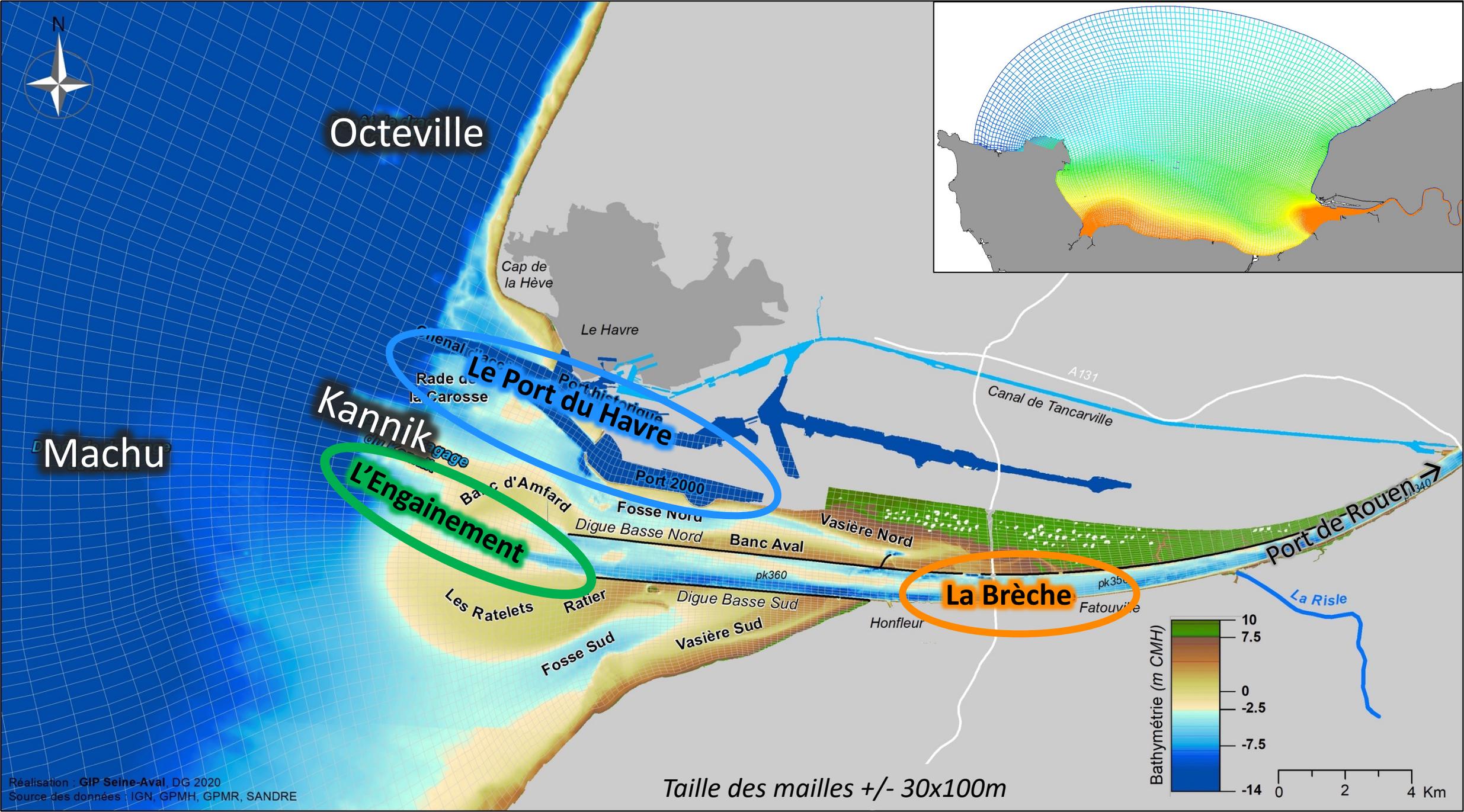
Port de Rouen

La Risle



Modélisation des dragages





Réalisation : GIP Seine-Aval, DG 2020
 Source des données : IGN, GPMH, GPMR, SANDRE

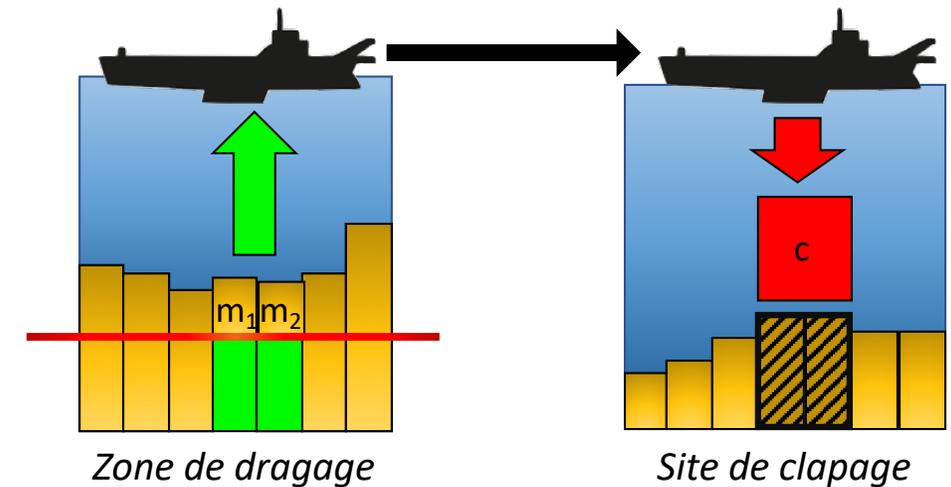
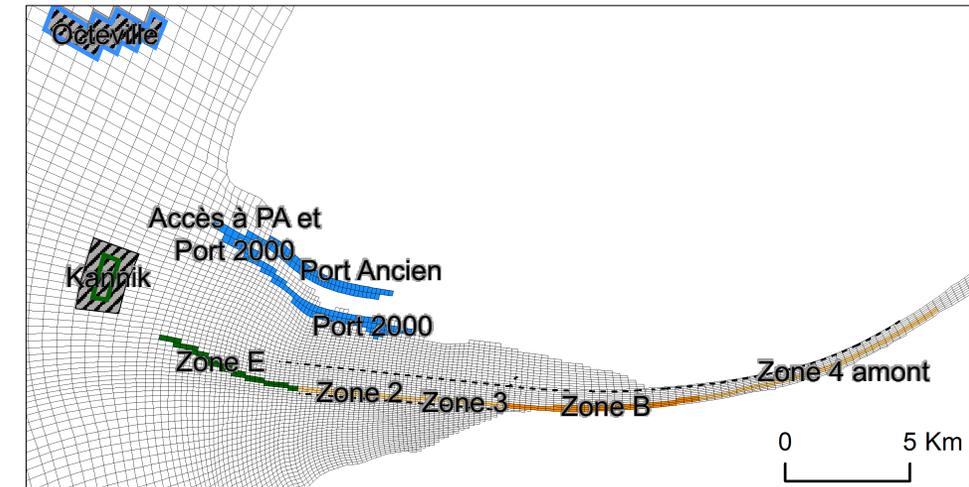
Modélisation des dragages

Dragages :

- 9 zones contrôlées toutes les 10 minutes
- Dragage maille par maille
 - épaisseur de **50cm** de sédiment consolidé (>300 g/l)

Immersion :

- Selon provenance : Kannik ou Octeville
- Dilution sur toute la surface des sites
(Ex. Kannik 6 mailles, 100ha)
 - Sables : couche de fond // Vases : moitié inférieure de la colonne d'eau



Modélisation des dragages

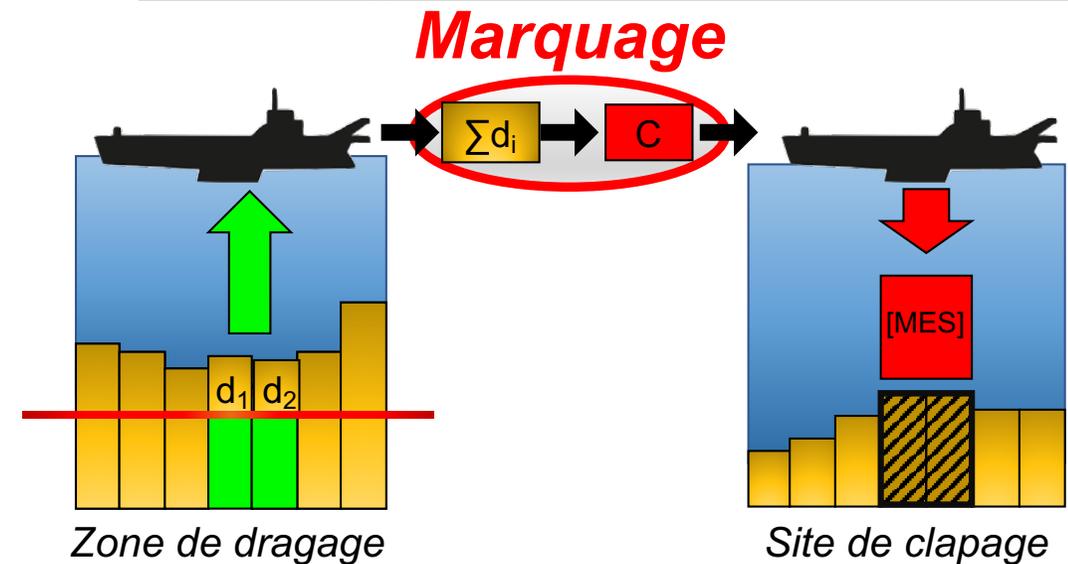
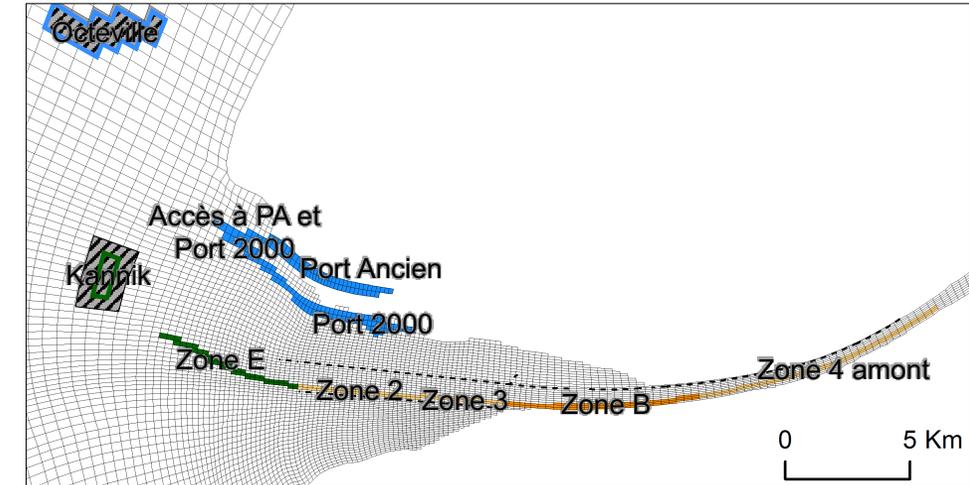
Dragages :

- 9 zones contrôlées toutes les 10 minutes
- Dragage maille par maille
 - épaisseur de **50cm** de sédiment consolidé (>300 g/l)

Immersions :

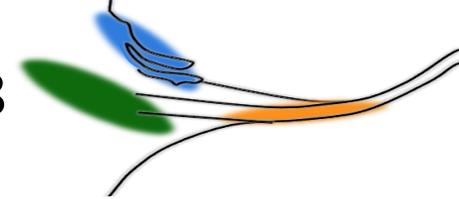
- Selon provenance : Kannik ou Octeville
- Dilution sur toute la surface des sites
(Ex. Kannik 6 mailles , 100ha)
 - Sables : couche de fond // Vases : moitié inférieure de la colonne d'eau

→ **Marquage**



Validation du modèle

➤ Simulation 10 ans 2009-18



Hydrodynamisme

- Hauteur d'eau / marégraphes
- Vagues

Dynamique des MES

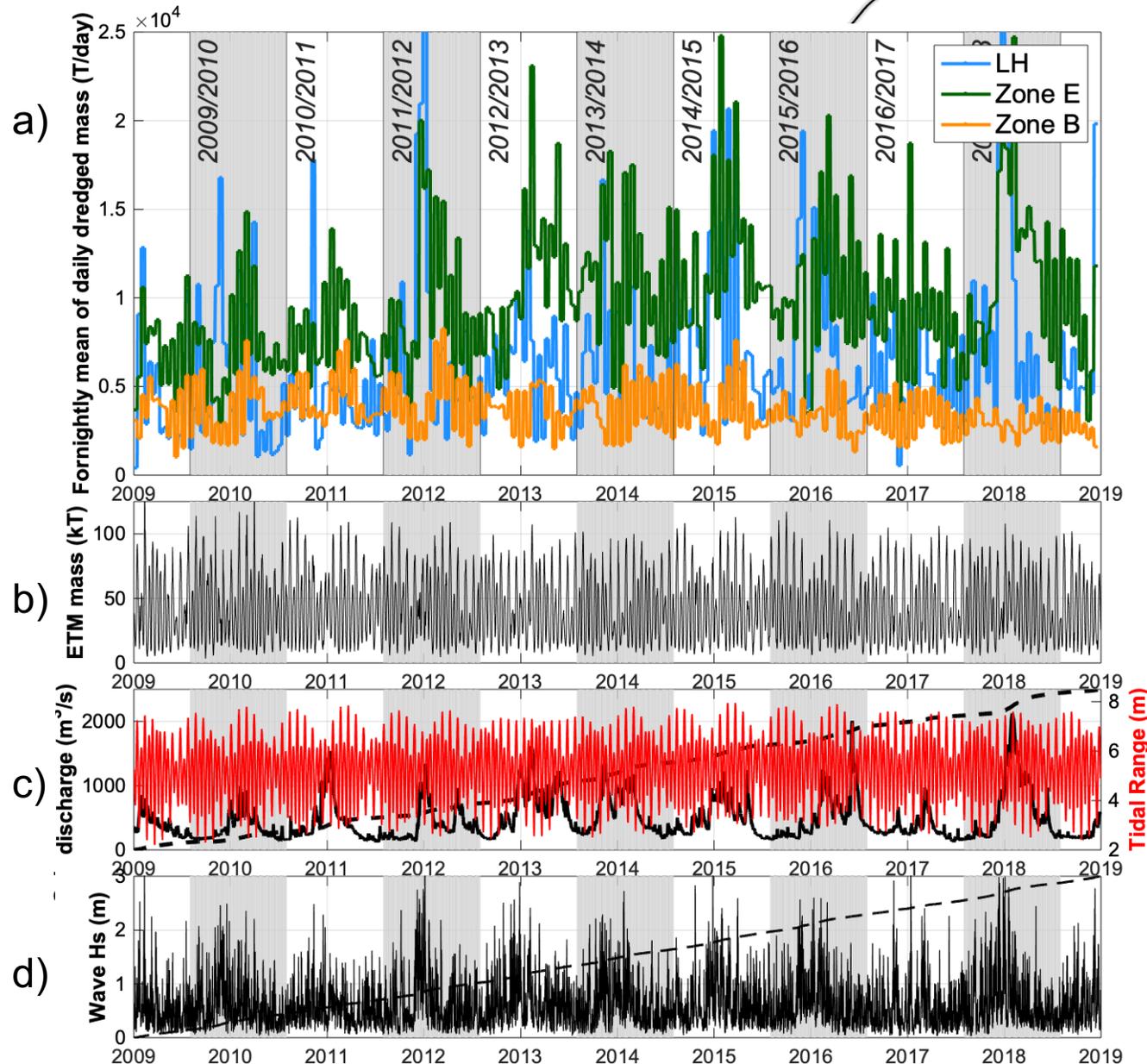
- Points fixes / SYNAPSES
- Dynamique du bouchon vaseux / biblio

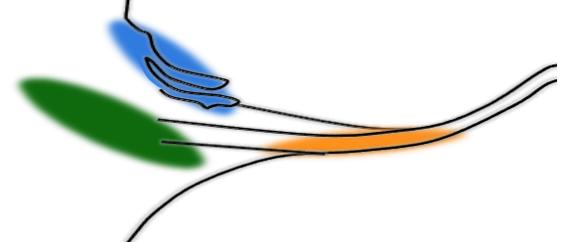
Evolutions morphologiques

- Comparaison levés bathy GPMR
- Cubatures par zones /10 ans
- Hypsométrie

Dragages

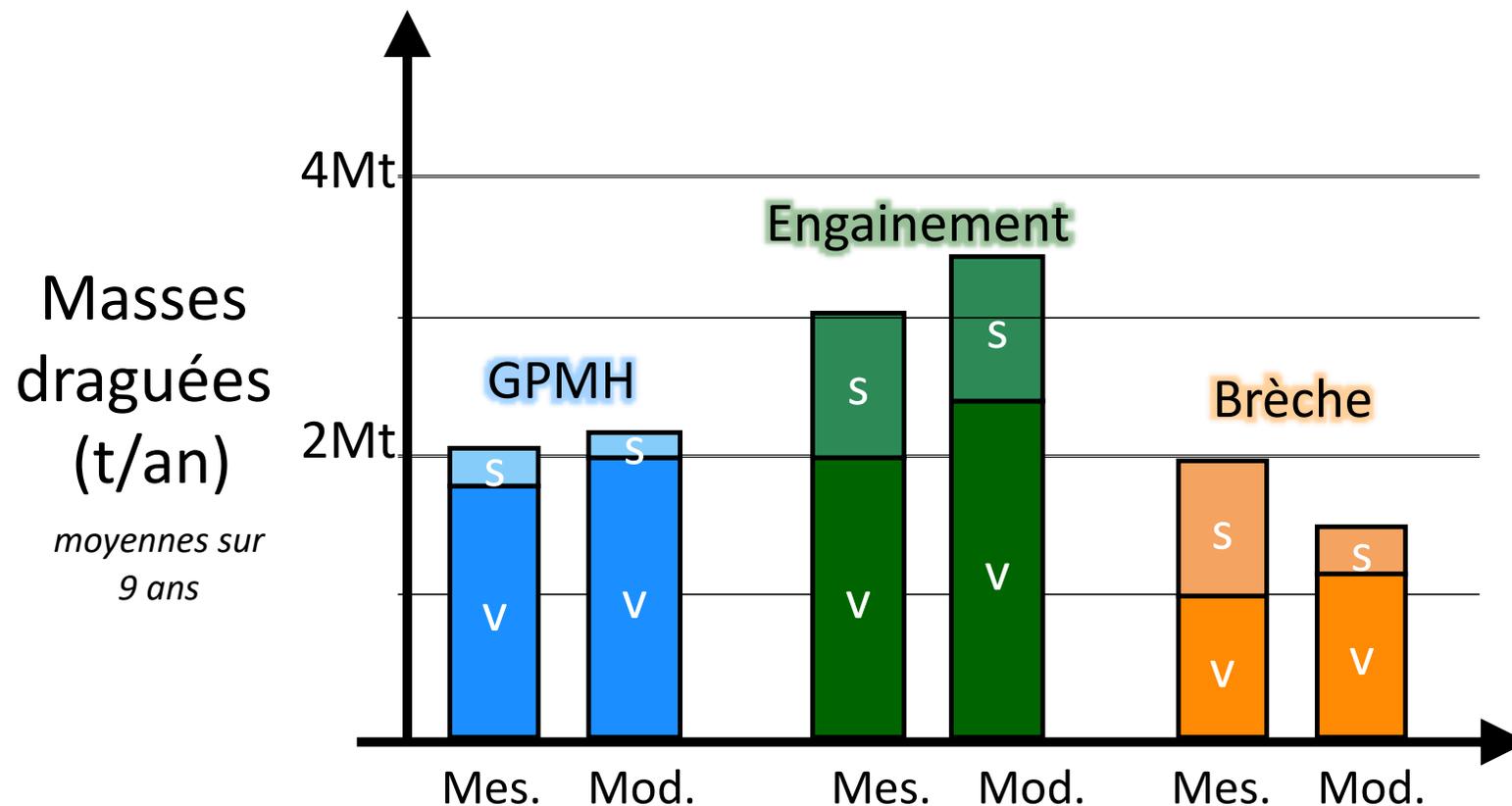
- **Quantités et natures des sédiments**
- **Stabilité des sites d'immersions**





Quantités dragués

- Variabilité des quantités draguées in-situ liées à la dispo des engins de dragages et non à la variabilité naturelle des dépôts
→ Validation en moyenne sur la période simulée 2009-2018



Stabilité des sites d'immersions

In-situ : ratio des volumes sur sites (\neq bathymétrie) / masses clapées (mesurée par les dragues)
→ hypothèses de densité

	Kannik	Octeville
<i>Hypothèse densité "PORT"</i>	1,8	1,4
Stabilité constatée in-situ	60%	10%
Stabilité Volumique Apparente	62%	11%

$$stabilité_{in-situ} = \frac{Vol_dépot_{I_{t_{fin}}} - Vol_dépot_{I_{t_{début}}}}{Masse_clapée_I \div \underline{densité_{in-situ}}}$$

Stabilité des sites d'immersions

In-situ : ratio des volumes sur sites (\neq bathymétrie) / masses clapées (mesurée par les dragues)
→ hypothèses de densité

In-silica : ratio des masses* sur sites et des masses clapées (sur 9ans)
* Apparente : tous sédiments

	Kannik	Octeville
<i>Hypothèse densité "PORT"</i>	1,8	1,4
Stabilité constatée in-situ	60%	10%
Stabilité Volumique Apparente	62%	11%
Densité modélisée (t/m³)	1,58	→ 1,9
Stabilité Apparente modélisée*	→ 55%	16%

* avec la densité modélisée



≠
densité modélisée et hypothèses Ports

- ➔ Non accessible par la mesure : **validation Impossible ...**
- ➔ légère surestimation de la stabilité constatée *in-situ* sur Kannik ?
- ➔ densité forte: simulation d'apports sédimentaires sableux sur Octeville ?

Stabilité des sites d'immersions

In-situ : ratio des volumes sur sites (\neq bathymétrie) / masses clapées (mesurée par les dragues)
→ hypothèses de densité

In-silica : ratio des masses* sur sites et des masses clapées (sur 9ans)

* Apparente : tous sédiment

* Effective : sédiment dragué (marqué)

	Kannik	Octeville
<i>Hypothèse densité "PORT"</i>	1,8	1,4
Stabilité constatée in-situ	60%	10%
Stabilité Volumique Apparente	62%	11%
Densité modélisée (t/m ³)	1,58	1,9
Stabilité Apparente modélisée	55%	16%
Stabilité Effective vases	19%	→ 0,2%
Stabilité Effective sables	→ 91%	20%
Stabilité Effective totale	48%	2%

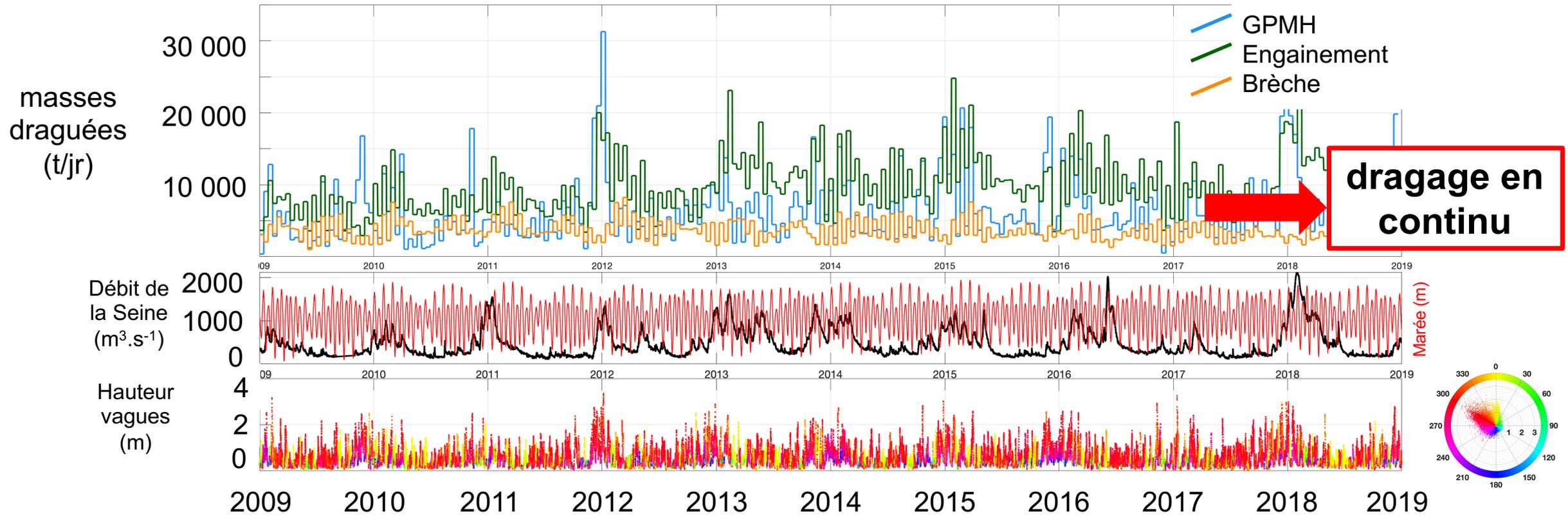
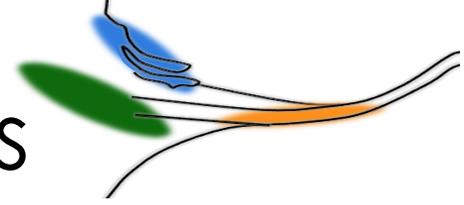
→ **Kannik** : forte stabilité des sables

→ **Octeville** : très forte dispersion des vases

Variabilités et déterminisme des dragages

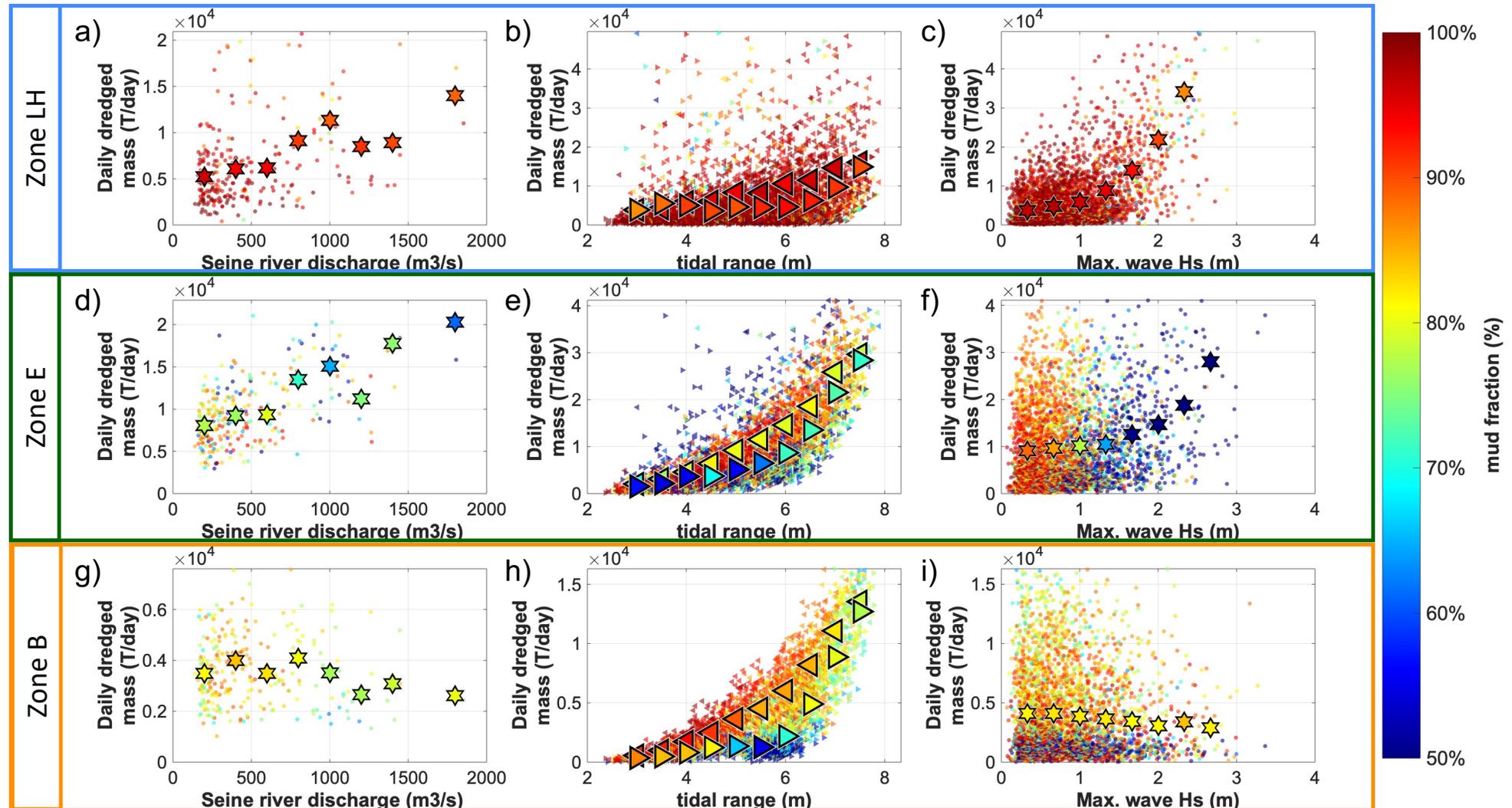
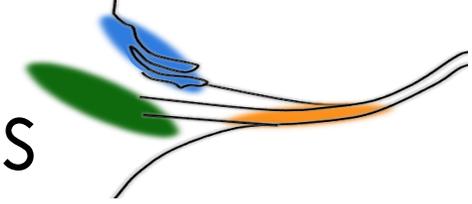


Variabilités et déterminisme des dragages

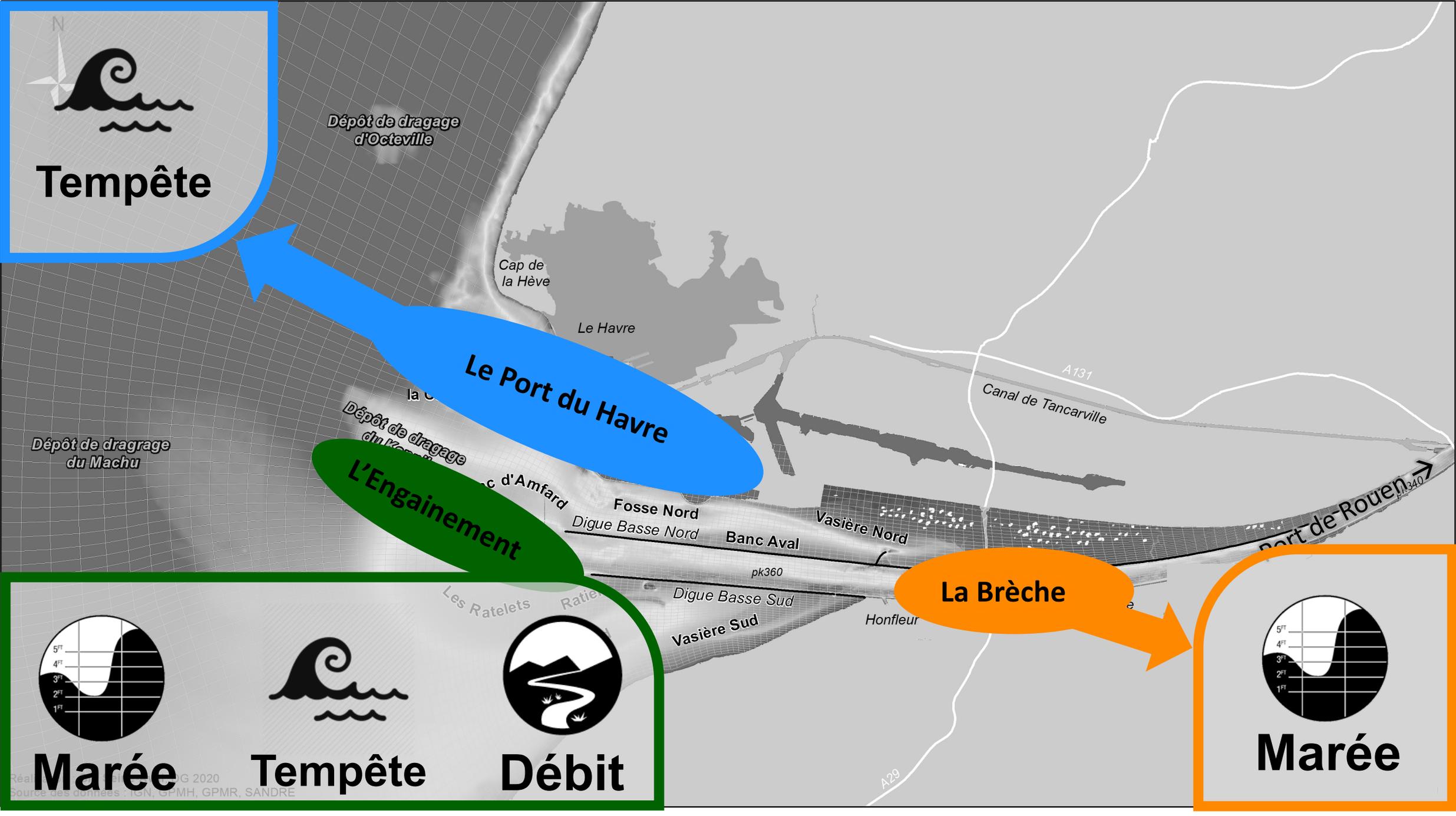


➤ Les zones de navigation agissent comme des **pièges à sédiment**

Variabilités et déterminisme des dragages



➤ Relations entre les dragages (*nature et quantité*) et les forçages



Tempête

Le Port du Havre

L'Engainement

La Brèche

Marée

Tempête

Débit

Marée

Réalisation : G 2020
 Source des données : IGN, GPMH, GPMR, SANDRE



Tempête

Dépôt de dragage
d'Octeville

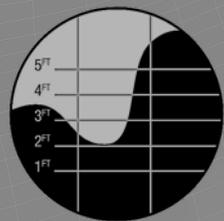
Cap de
la Hève

Dépôt de dragage
du Machu

Quelles variabilités interannuelles des dragages?



sainement



Marée

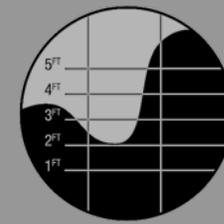


Tempête



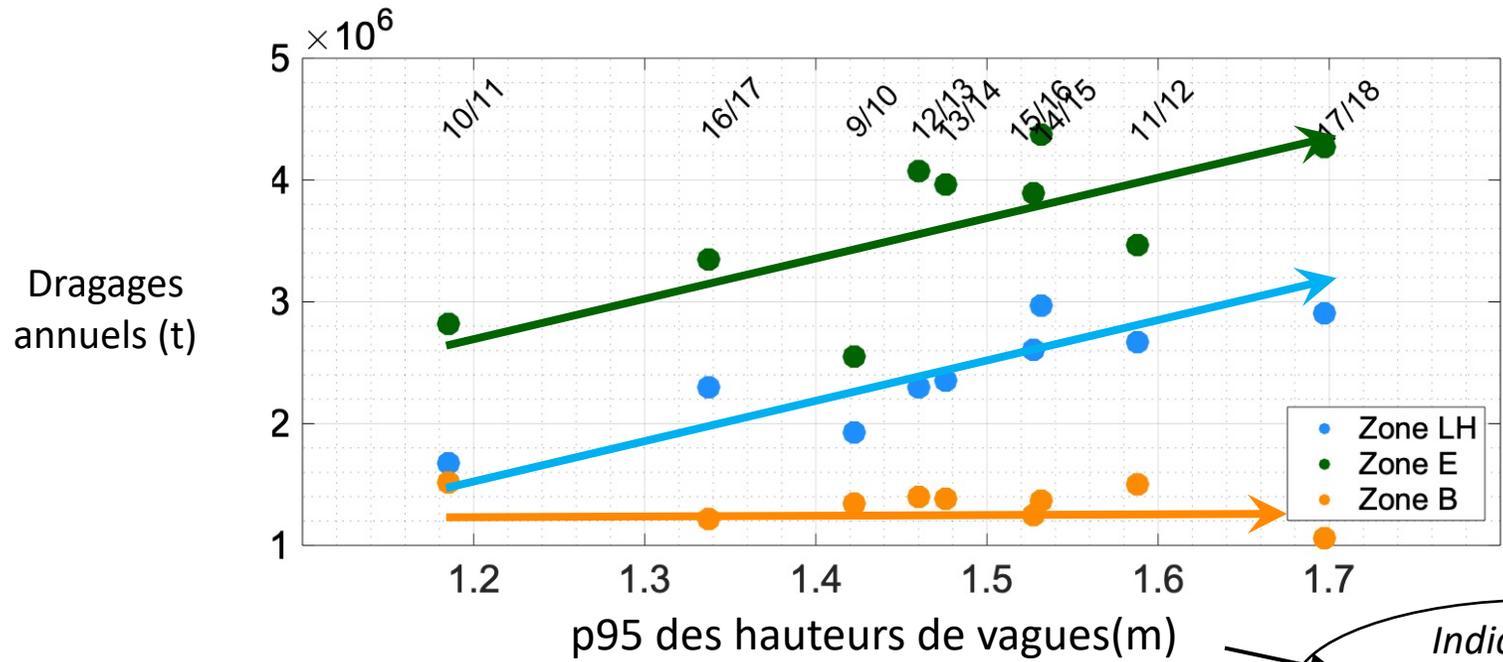
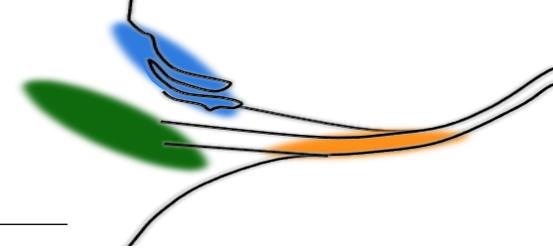
Débit

La Brèche



Marée

Variabilité interannuelle des dragages



Indicateur de l'intensité des tempêtes

- La **variabilité interannuelle** des forçages génère une variabilité des besoins en dragages proche de **50%**



Crue de la Seine à Rouen et Tempête Eleanor à l'entrée du port du Havre
Janv. - Fév. 2018

Effets des dragages



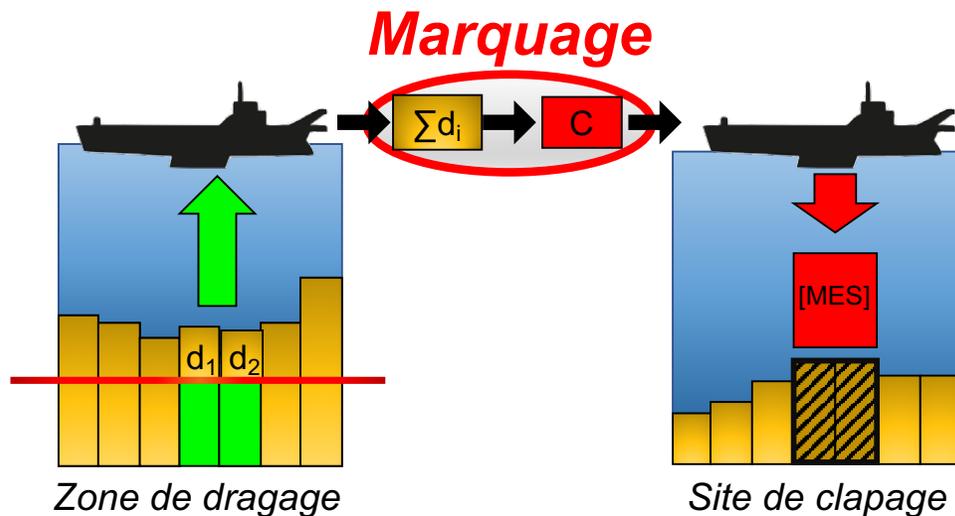
Les effets des dragages

- **3 simulations: avec ou sans dragages et/ou clapages**

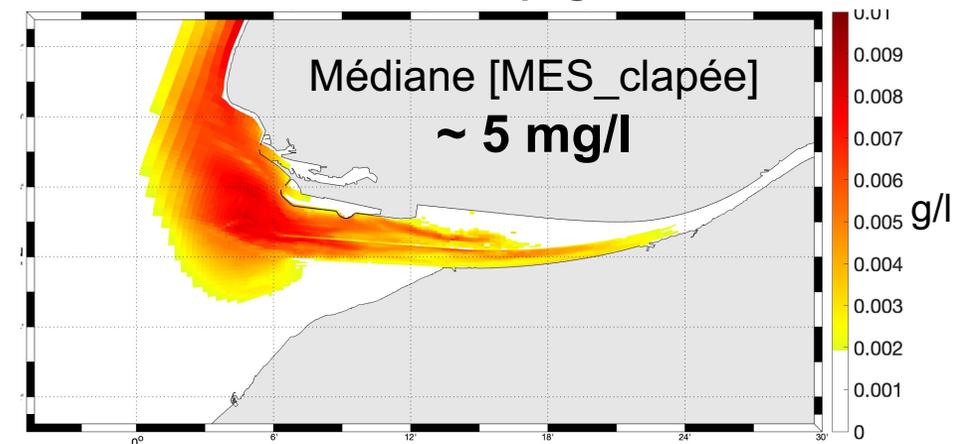
- Tendanciel (immersion GPMR → Kannik) **KAN**
- Dragage sans immersions (*eq.* mise à terre) **NOC**
- NO dredging **NOD**

- **+ le traçage numérique** *cf. présentation en CSES juin 2018*

- suivi des immersions + des apports continentaux et marins



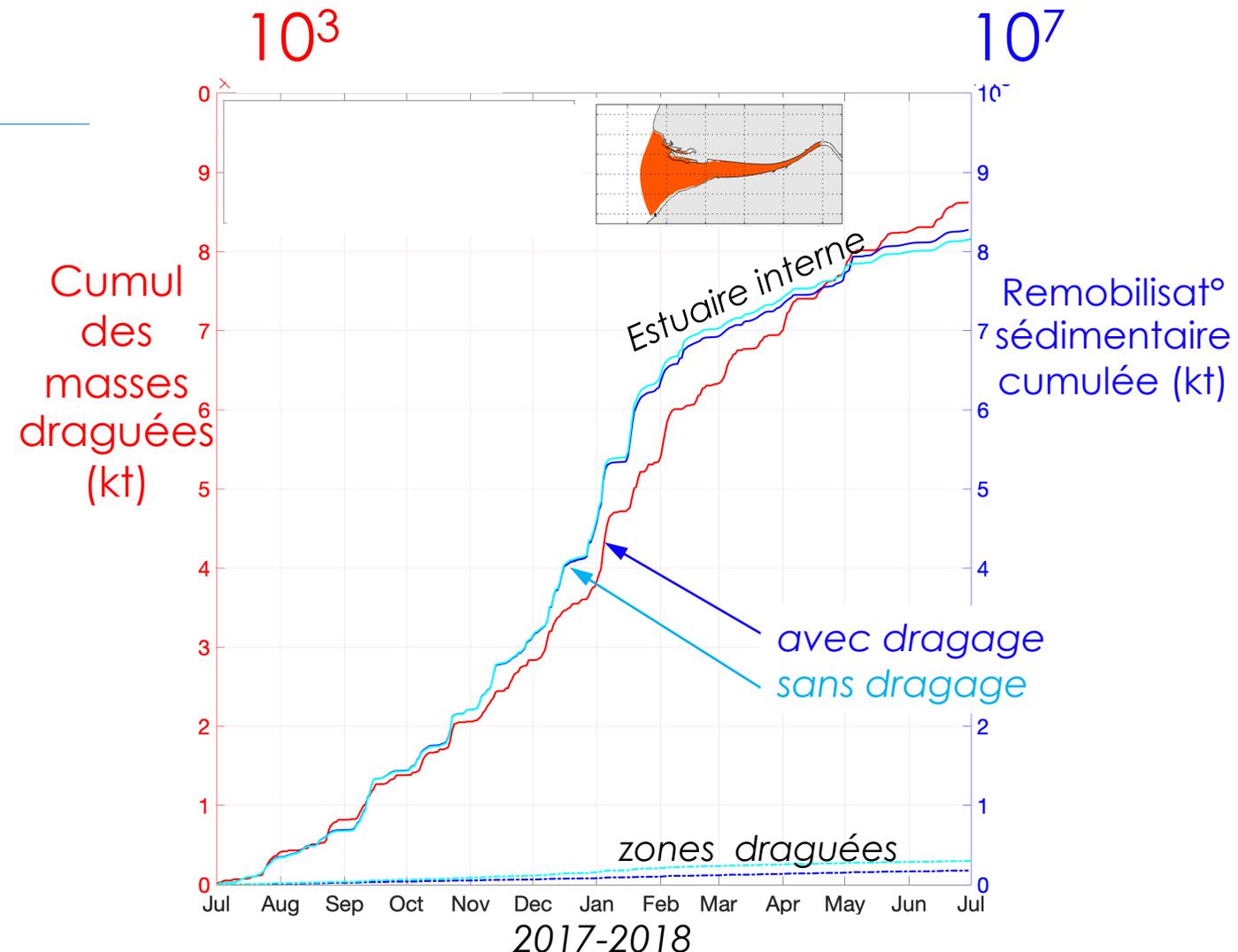
médiane **MES issues des clapages** – année 2017/2018



Effets sur la turbidité

Remobilisation sédimentaire : *Indicateurs de l'intensité de la dynamique sédimentaire*

- Comparable avec et sans dragage
- Dragages = **1/10 000** des remobilisation à l'échelle de l'estuaire interne



Remobilisation sédimentaire = échange sédimentaire
entre la surface et le fond
calculée comme le cumul des dépôts (t,x,y) sur 1 an

Effets sur la turbidité

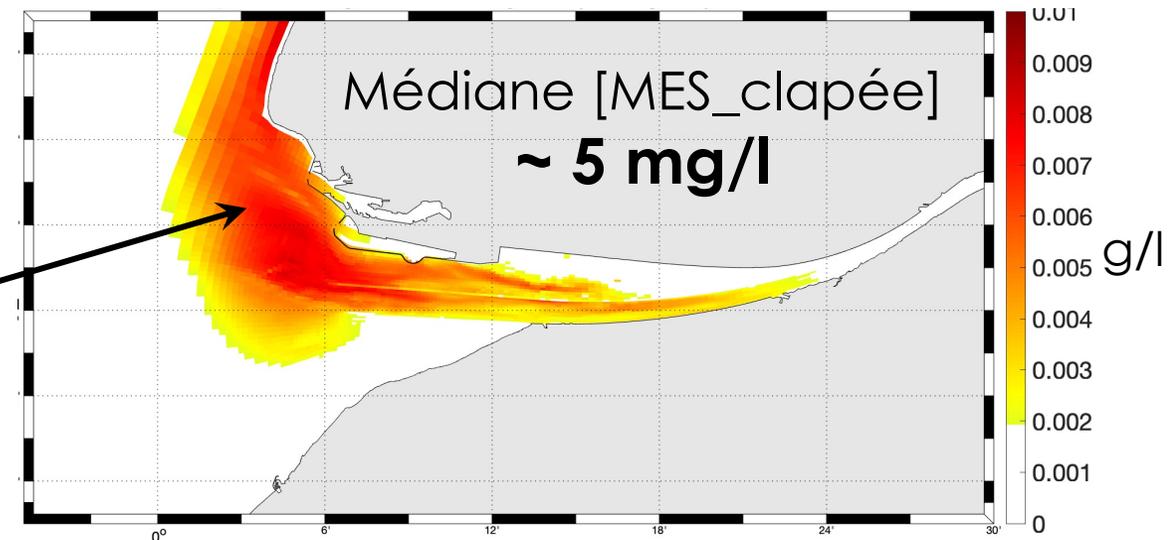
➤ *Dynamique des sédiments clapés*

- importante dispersion
- maximum à proximité des sites

➔ ~ 5mg/l

médiane **MES issues des clapages** – année 2017/2018

↗ des MES localisées à proximité du Kannik



Effets sur la turbidité

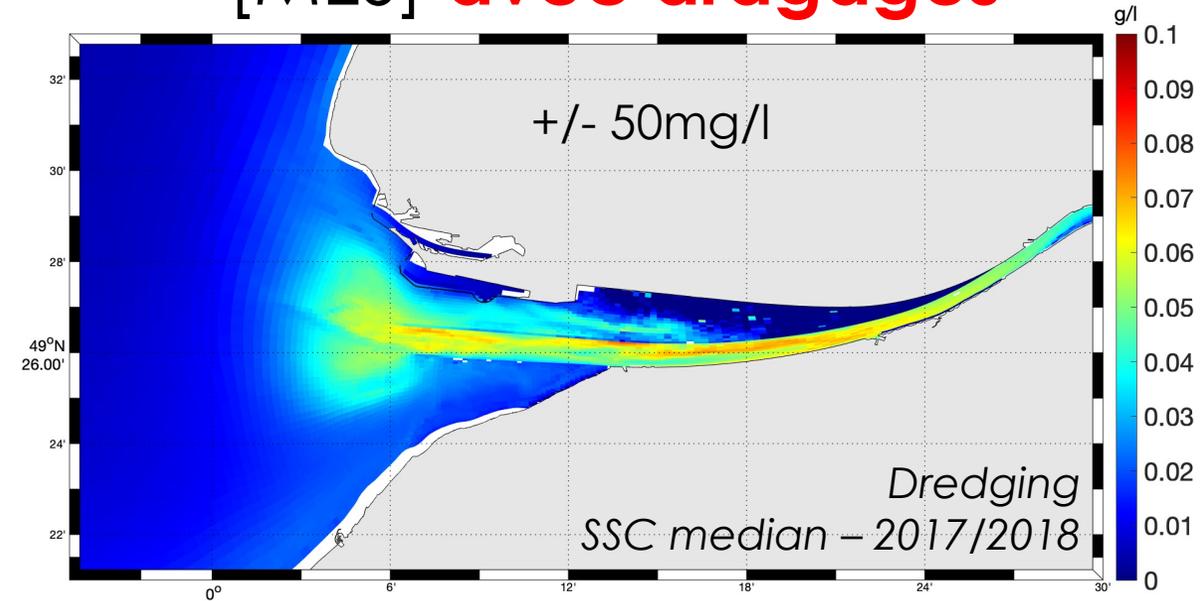
➤ *Dynamique des sédiments clapés*

- importante dispersion
- maximum à proximité des sites
→ ~ 5mg/l

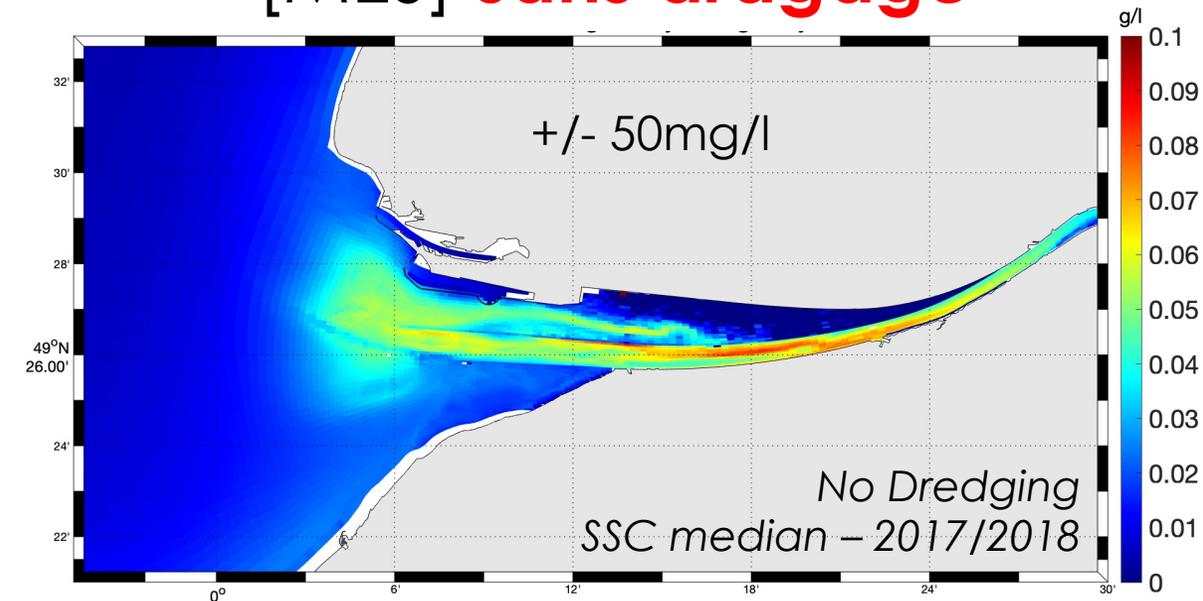
➤ *Turbidité à l'embouchure*

- ~ 50mg/l : 10x plus que celle induites par les sédiments clapés
- distribution spatiale non impactée

[MES] avec dragages



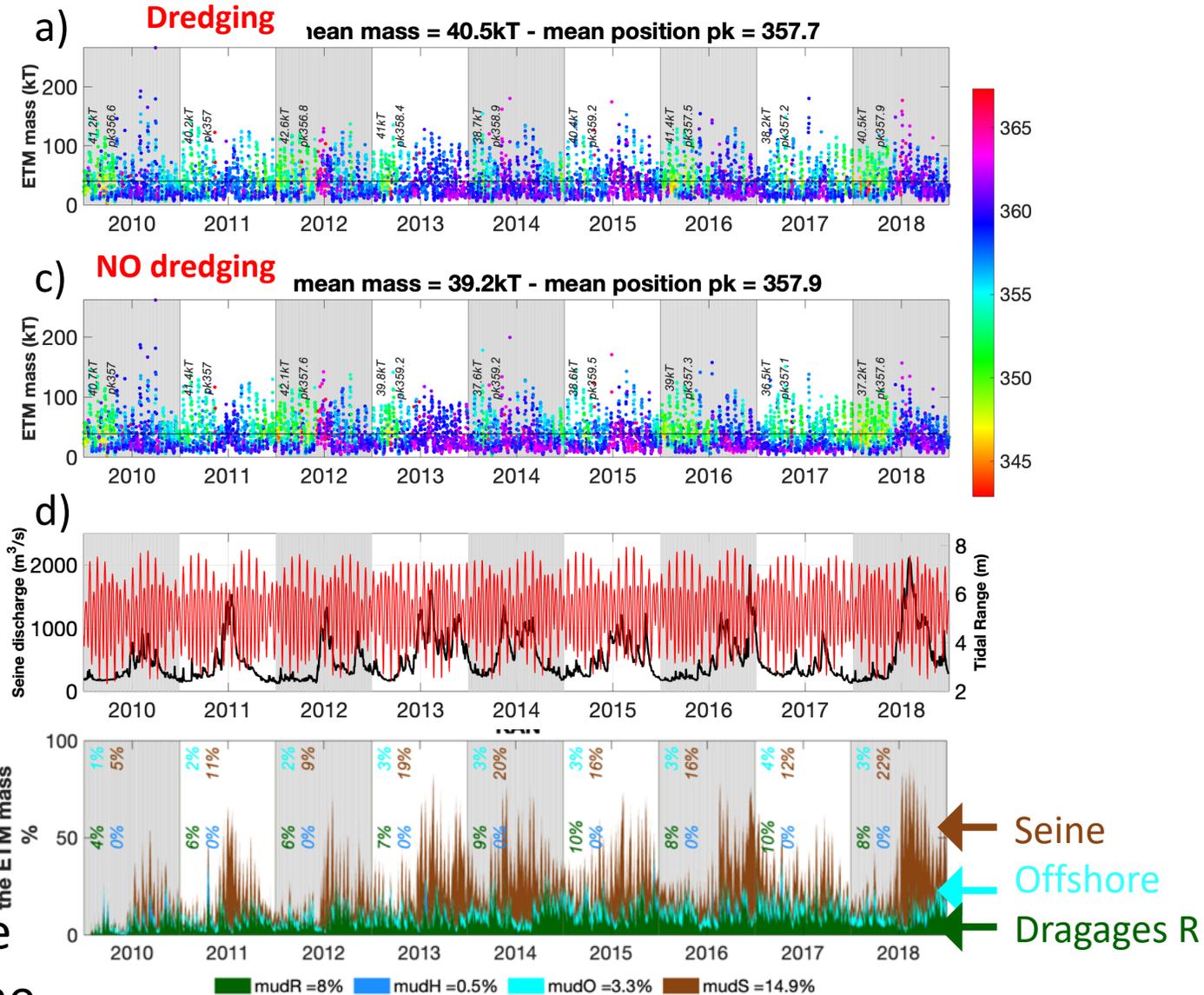
[MES] sans dragage



Effets sur la turbidité

- *Dynamique des sédiments clapés*
 - importante dispersion
 - maximum à proximité des sites
 - ~ 5mg/l
- *Turbidité à l'embouchure*
 - ~ 50mg/l : 10x plus que celle induites sédiments clapés
 - distribution spatiale non impactée
- *Bouchon vaseux*
 - masses et positions semblables
 - Sédiment dragués : ~ **10%** de la masse vs. **15%** pour les sédiments de la Seine

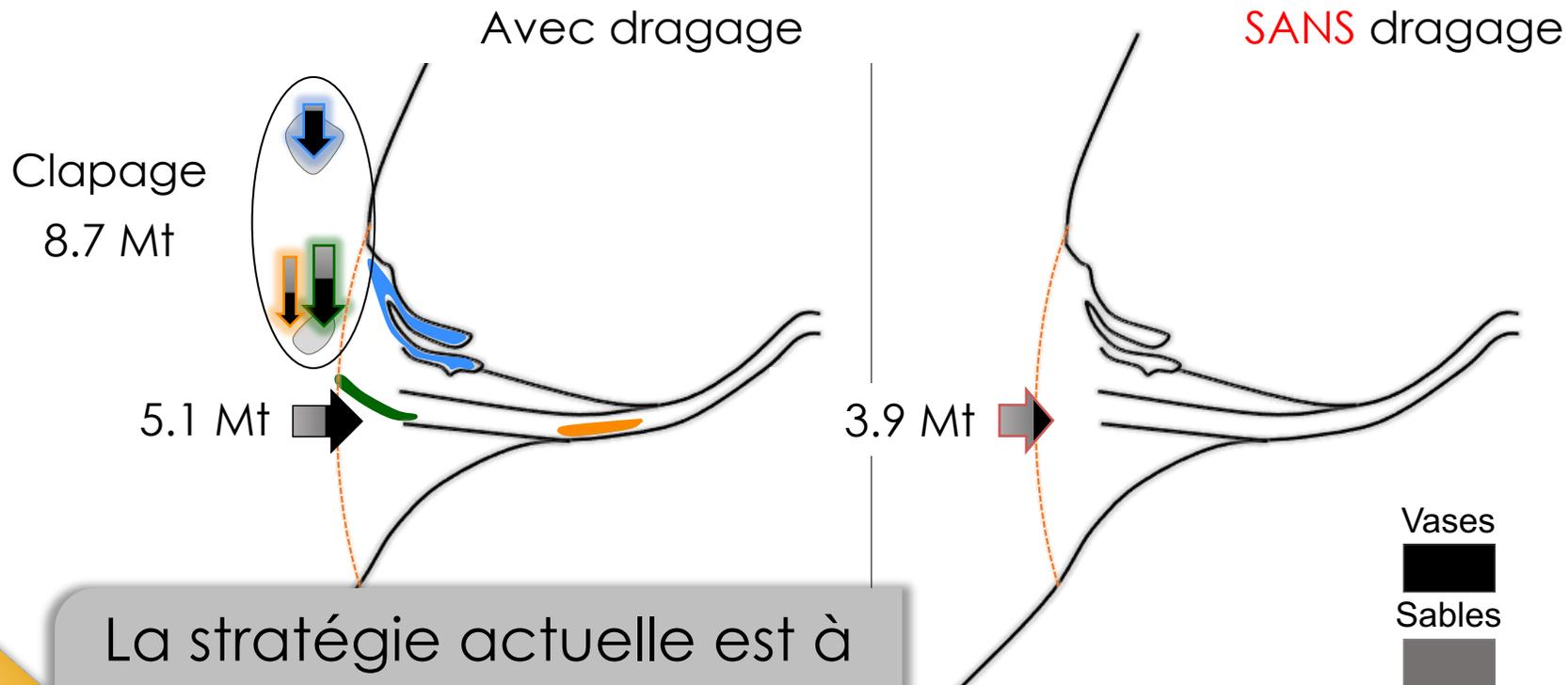
Dynamique du bouchon vaseux



Effets sur les flux sédimentaires et les évolutions morphologiques



Effets sur les flux

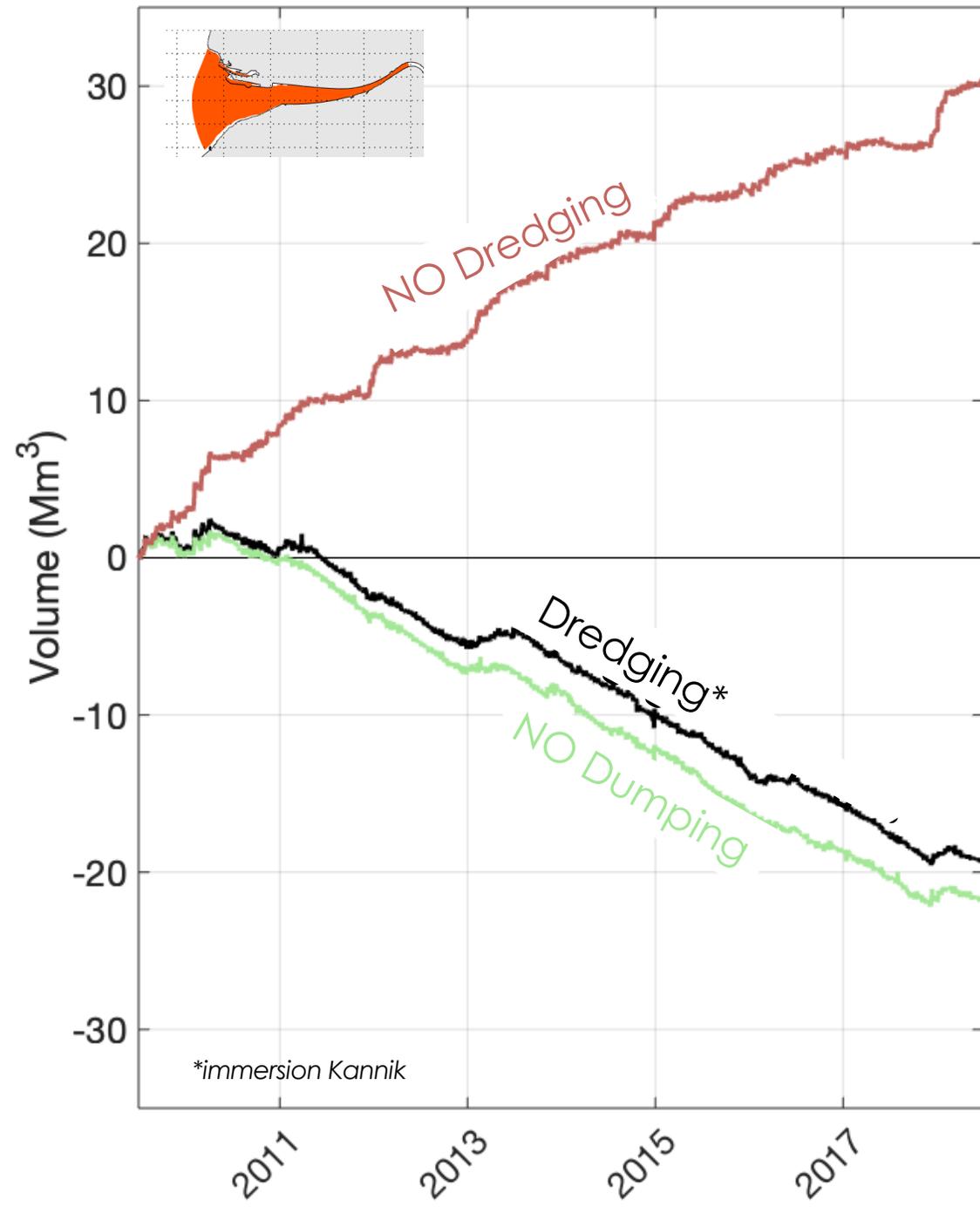


La stratégie actuelle est à l'origine d'un déficit sédimentaire de **3Mt**

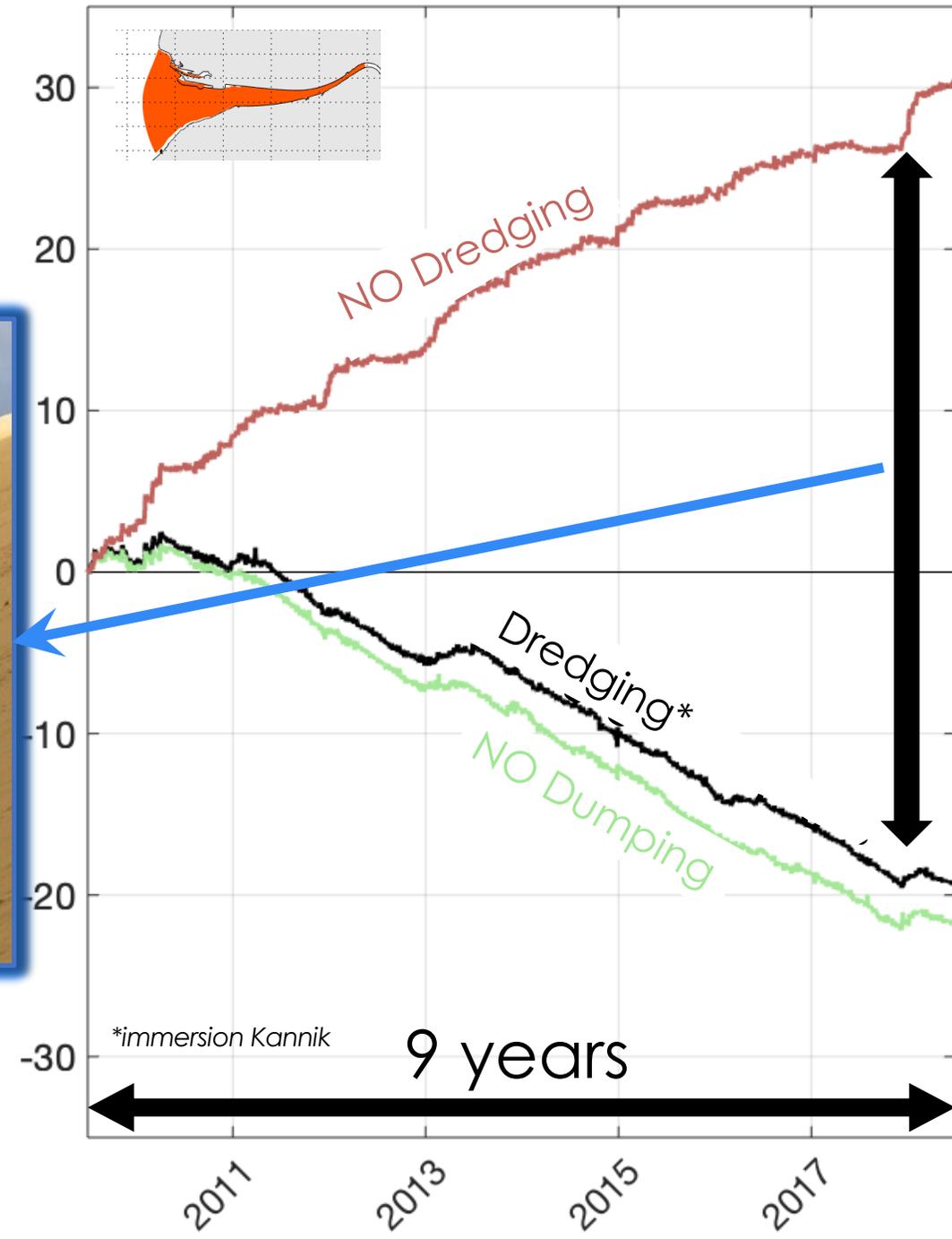
Flux en suspension simulés sur l'année 2017-2018
(simulation Kannik)

Bilan sédimentaire

- Comblement sans dragage
 - 30 Mm³ / 9 ans
 - *tendance naturelle*
- Erosion globale avec dragage
 - 20 Mm³ / 9 ans
 - accentuée par le retrait des sédiments (*eq.* mise à terre)



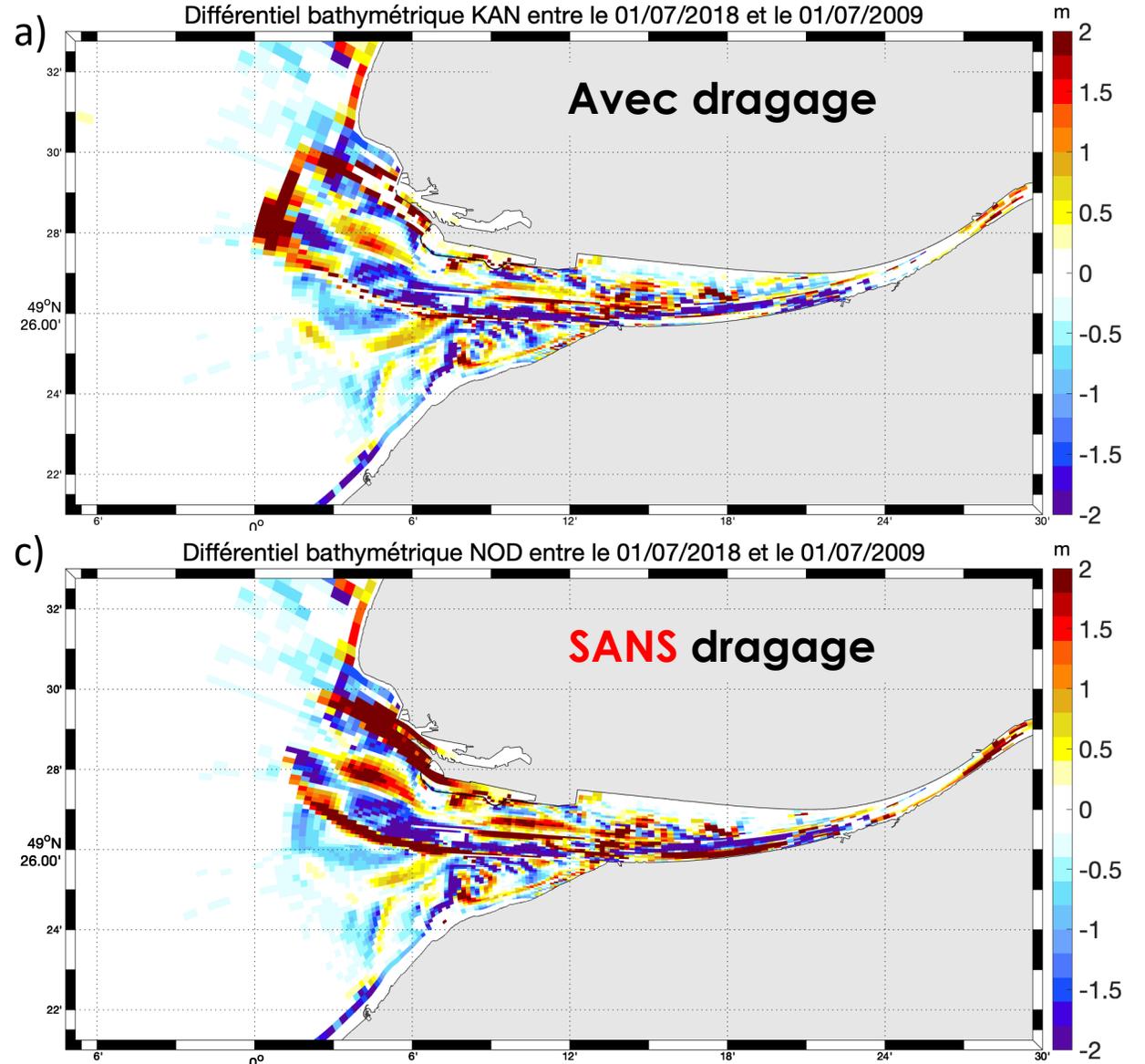
Bilan sédimentaire



Evolutions morphologiques

➤ Après 9 ans

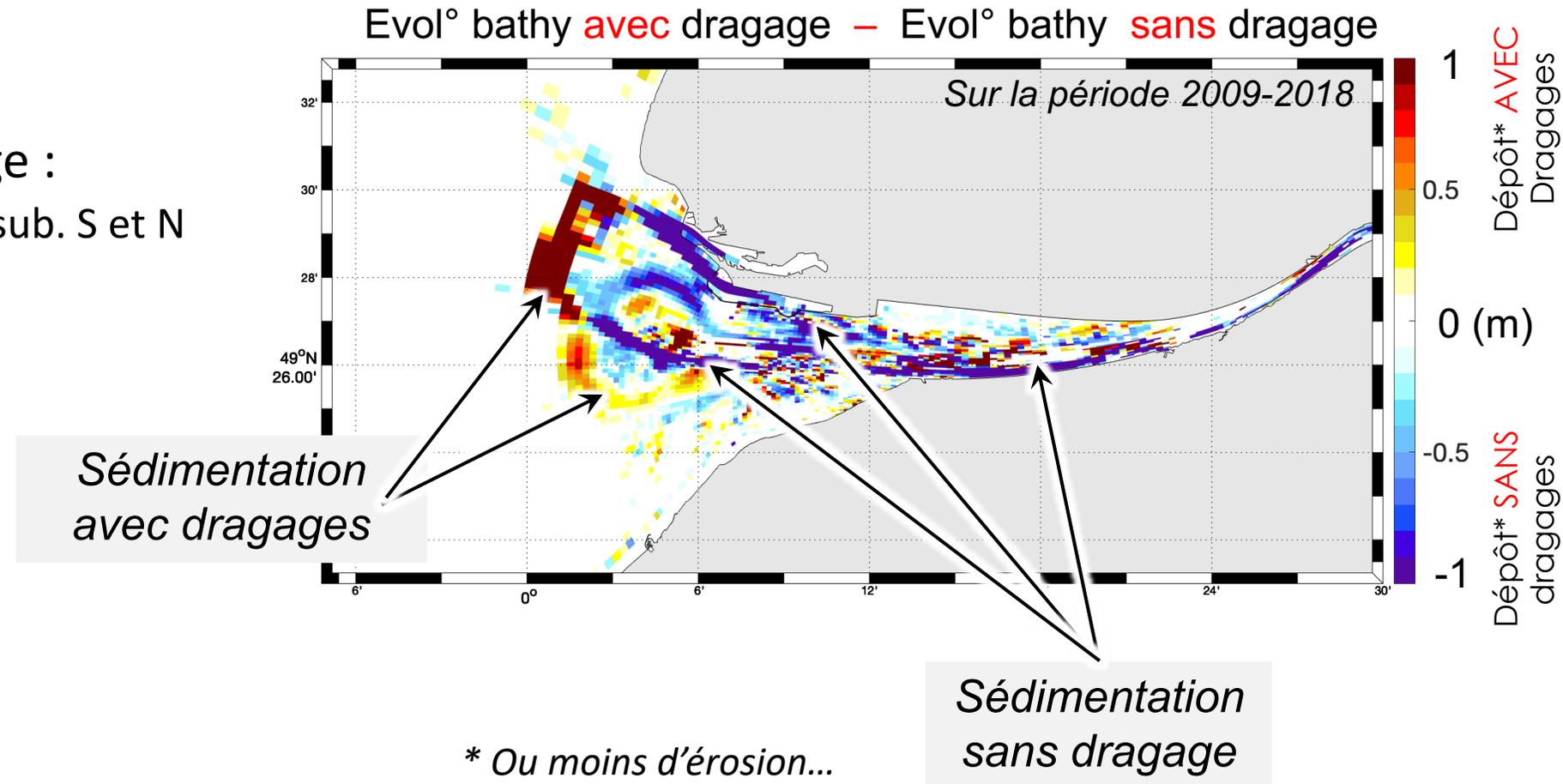
- Effets sur les évolutions de tout l'estuaire interne



Evolutions morphologiques

➤ Après 9 ans

- Effets sur les évolutions de tout l'estuaire interne
- Dépôts* sans dragage :
 - Entre les digues sub. S et N
 - Fosse nord

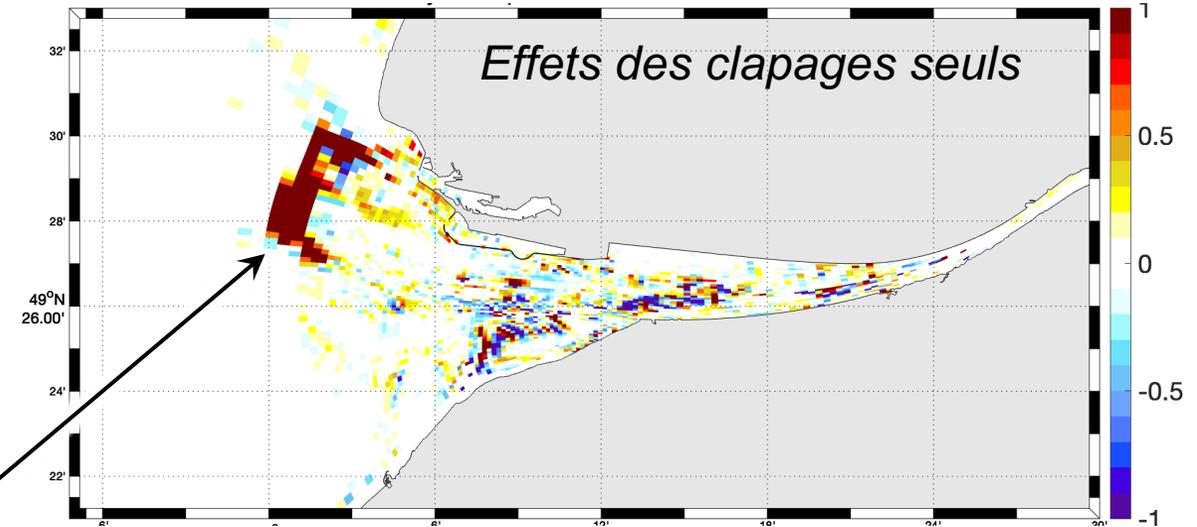


Dragages ou clapages ?

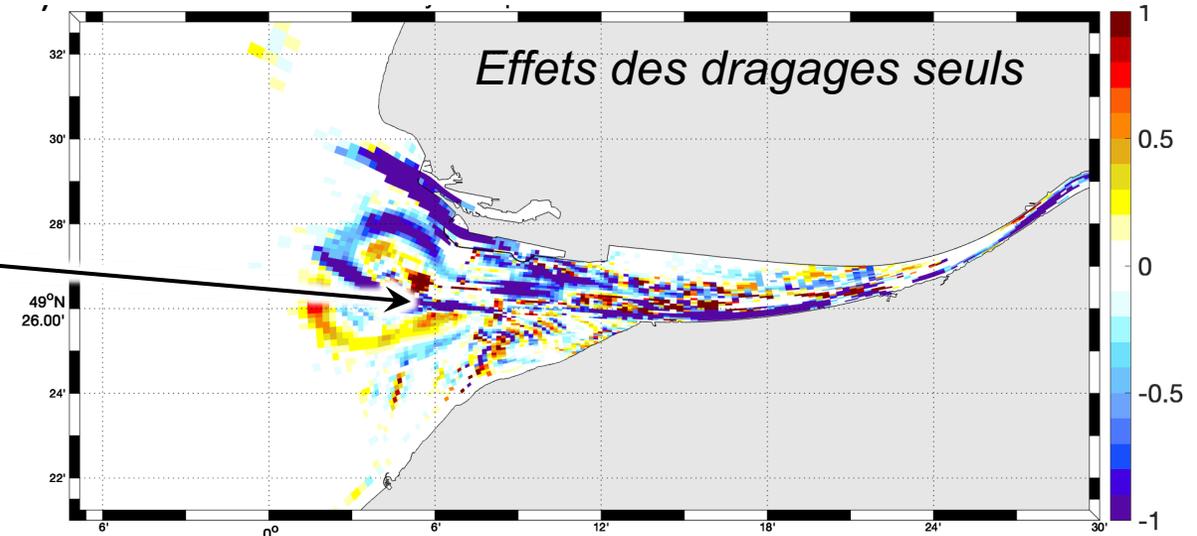
Les clapages affectent principalement la proximité du site d'immersions

Les dragages ont des effets sur les évolutions morphologiques de toute l'embouchure

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



Evol° bathy **sans** clapage – Evol° bathy **sans** dragage



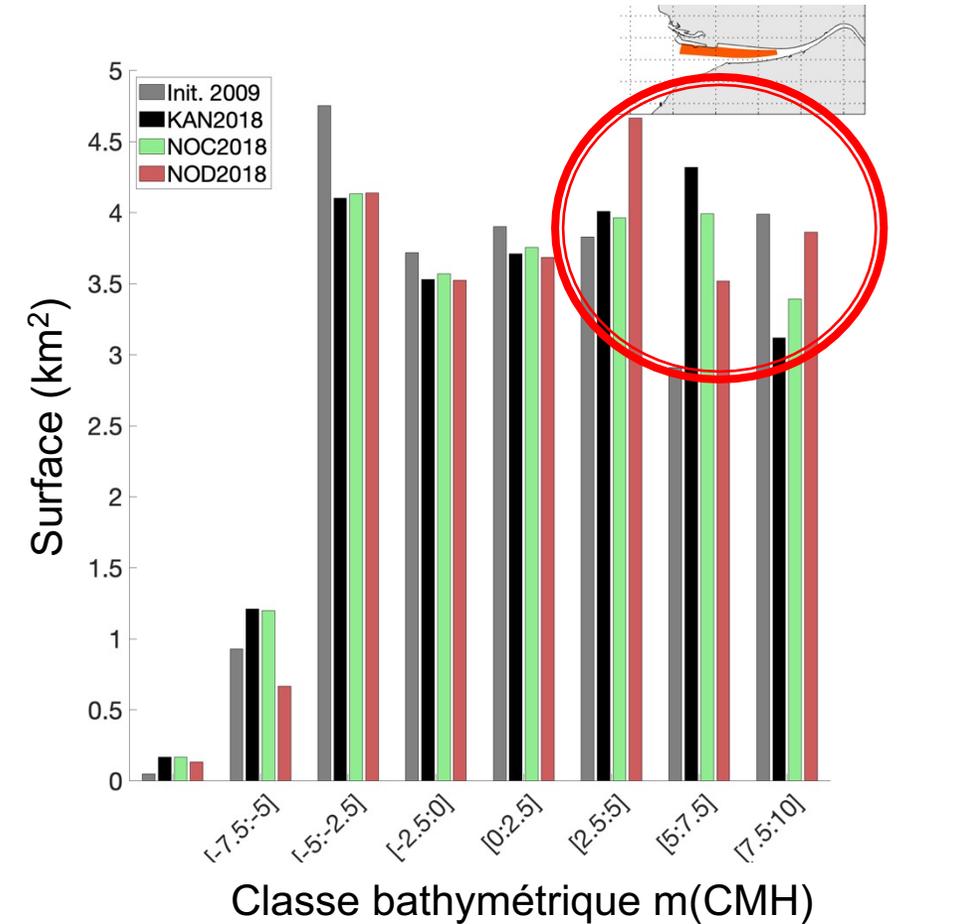
Zoom sur les effets des dragages sur la fosse nord



Effets sur la fosse nord

Sans dragage :

➤ *+ de zones intertidales*



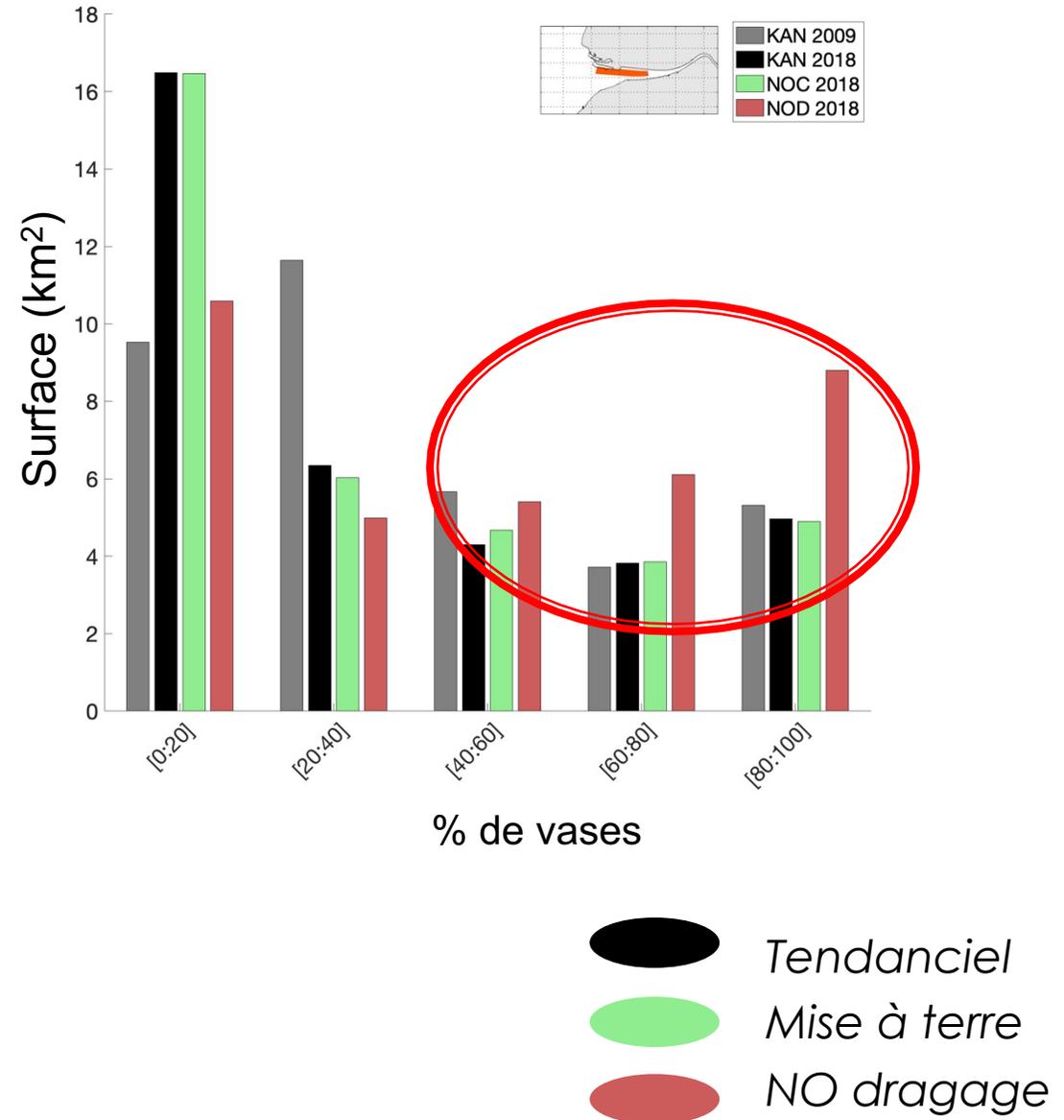
- Tendancier
- Mise à terre
- NO dragage

Effets sur la fosse nord

Sans dragage :

➤ *+ de zones intertidales*

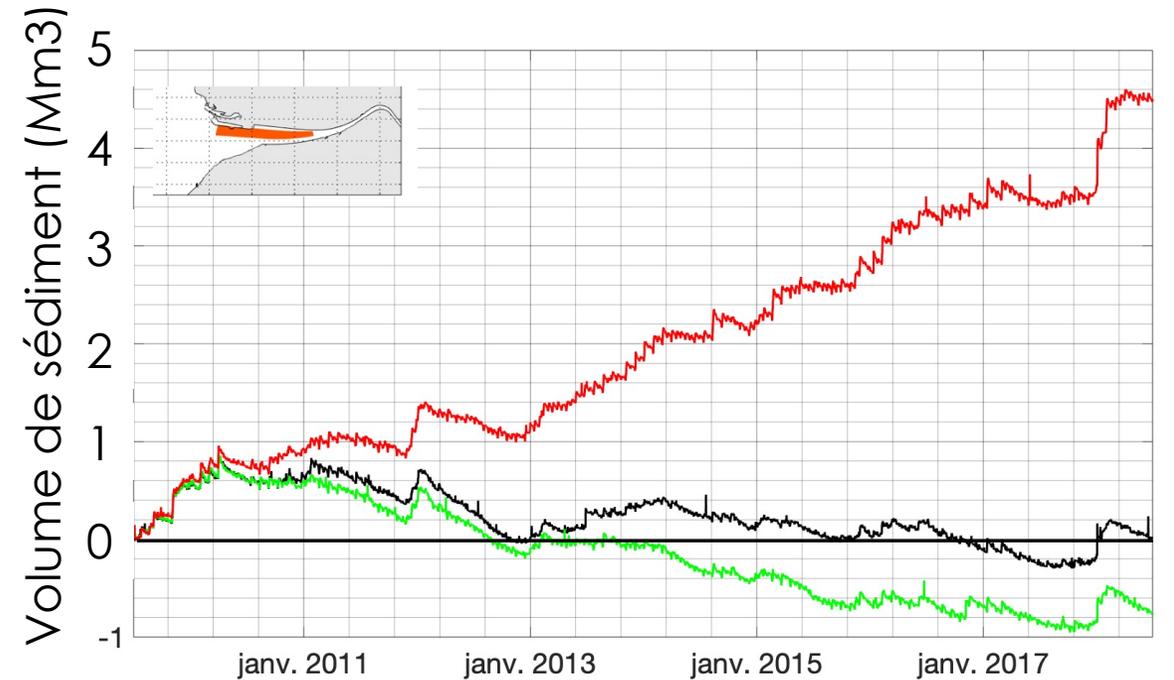
➤ *+ de faciès vaseux*



Effets sur la fosse nord

Sans dragage :

- *+ de zones intertidales*
- *+ de faciès vaseux*
- **Mais un comblement marqué**
stabilité avec exploitation du Kannik



- Tendancier
- Mise à terre
- NO dragage

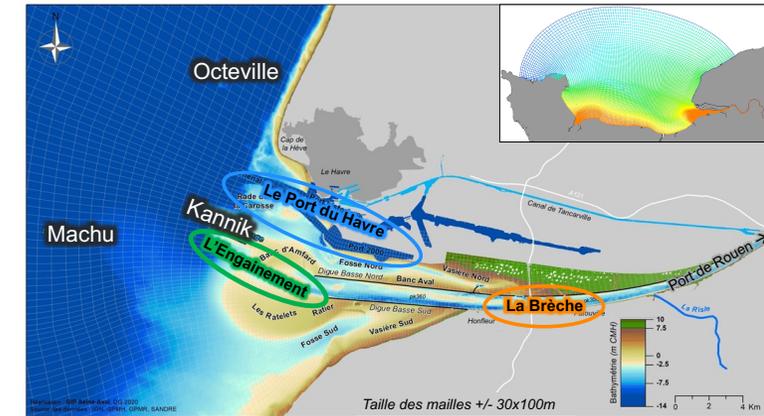
Conclusions / Discussions / Perspectives



Modélisation des dragages

Modélisation validée du fonctionnement HMS de l'estuaire

- *bouchon vaseux stable*
- *évolutions morphologiques réalistes*
- *Reproduction des dragages + stabilité des sites*
→ ATTENTION à la stabilité in-situ...



Déterminisme des dragages

- Inaccessible par la mesure
- Dragages continus, ↗ avec marée, débits Seine et tempêtes
- Nature des sédiments dragués (sable/vase) dépend des forçages
- Variabilité forçages → variabilité saisonnière (plus en hiver) et interannuelle des dragages (~ 50%)



Maintenance dredging in a macrotidal estuary: Modelling and assessment of its variability with hydro-meteorological forcing - Lemoine & Le Hir 2021

Rôle des dragages dans le fonctionnement HMS

Turbidité :

stock sédimentaire suffisant + remaniement naturel >> dragages

→ *effets limités*

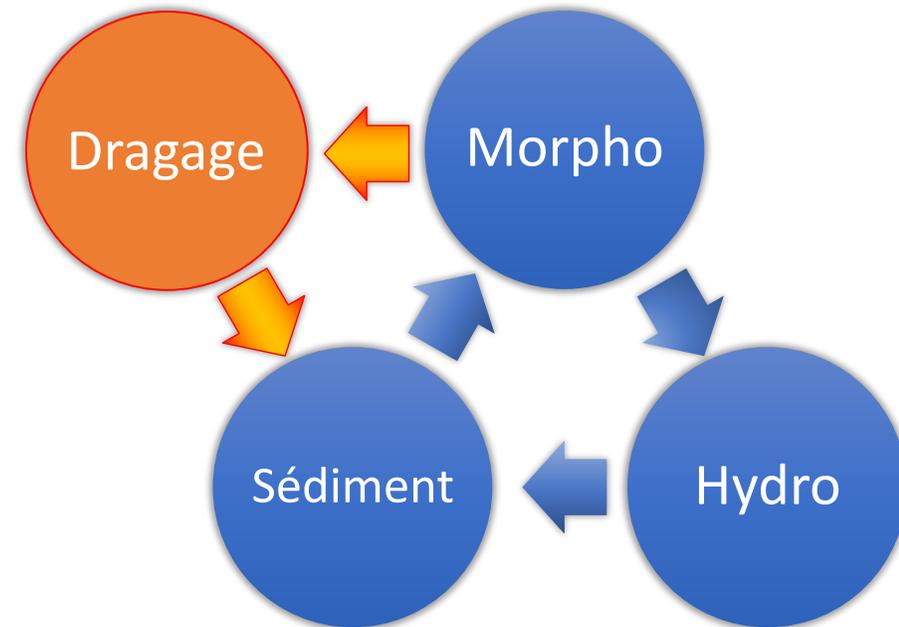
Flux sédimentaire et évolutions morphologiques :

immersions aux larges + taux de retour de 50%

→ déficit sédimentaire & érosion de l'estuaire

Le dragage empêche/ralentit la tendance naturelle au comblement de l'estuaire

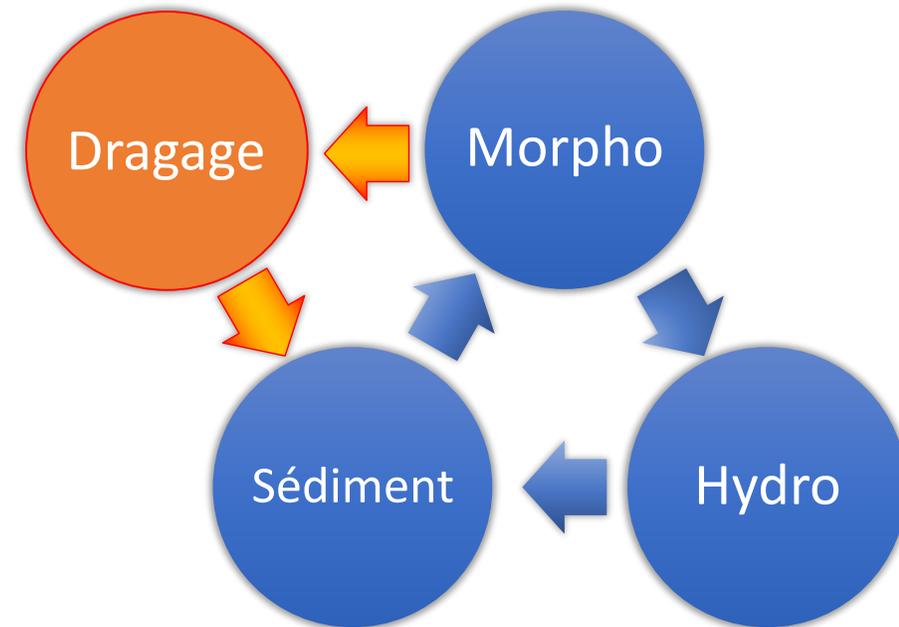
→ **effets « limités » après 9 ans**



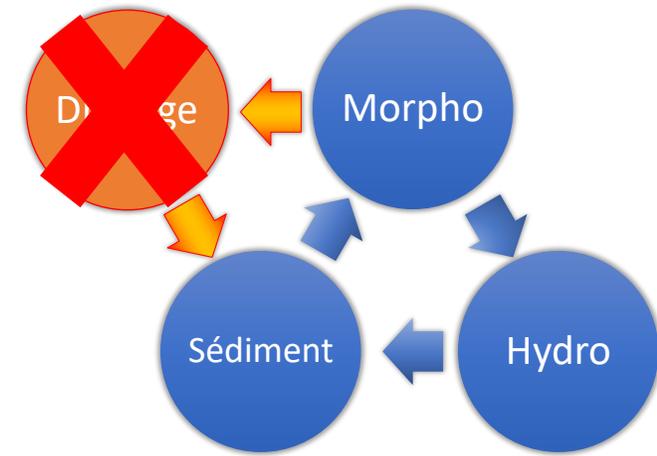
Rôle des dragages dans le fonctionnement HMS

MAIS...

nos simulations de 9 ans étudient un estuaire dans lequel des dragages d'entretien sont effectués depuis plus de **50 ans**

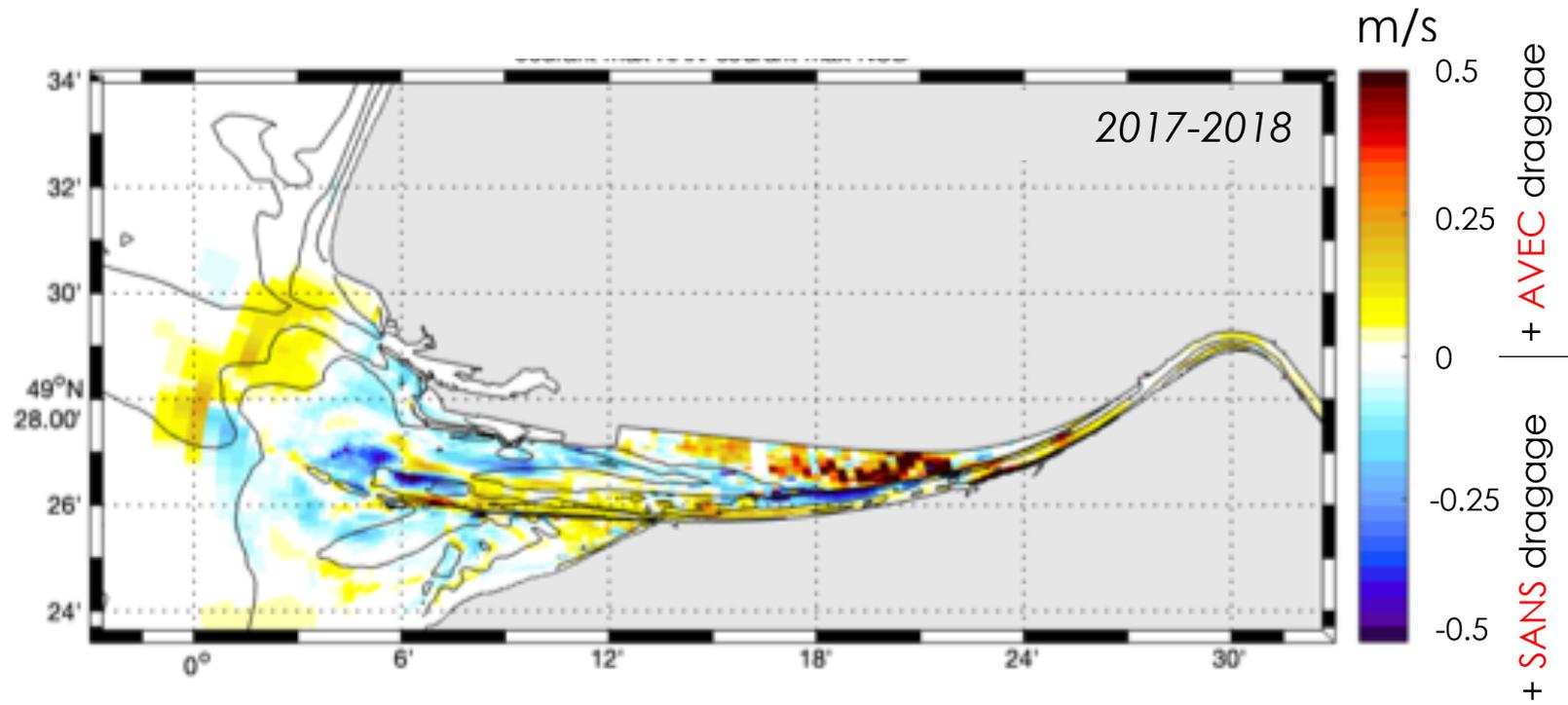


Sans dragage : un autre estuaire ?



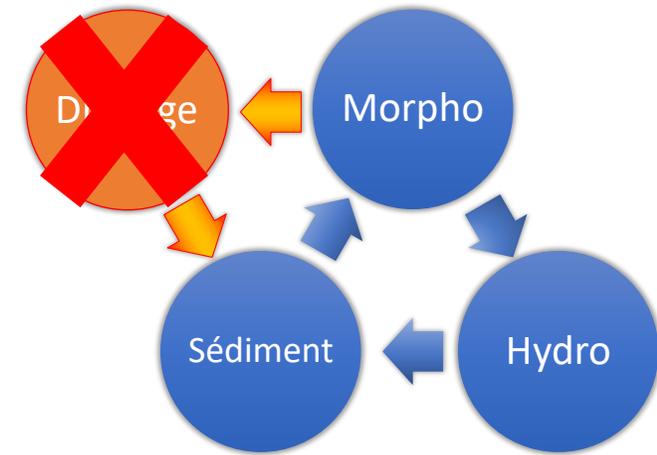
Evolutions morphologiques induites par l'arrêt des dragages pendant 9 ans :

- Evolution de l'hydrodynamisme



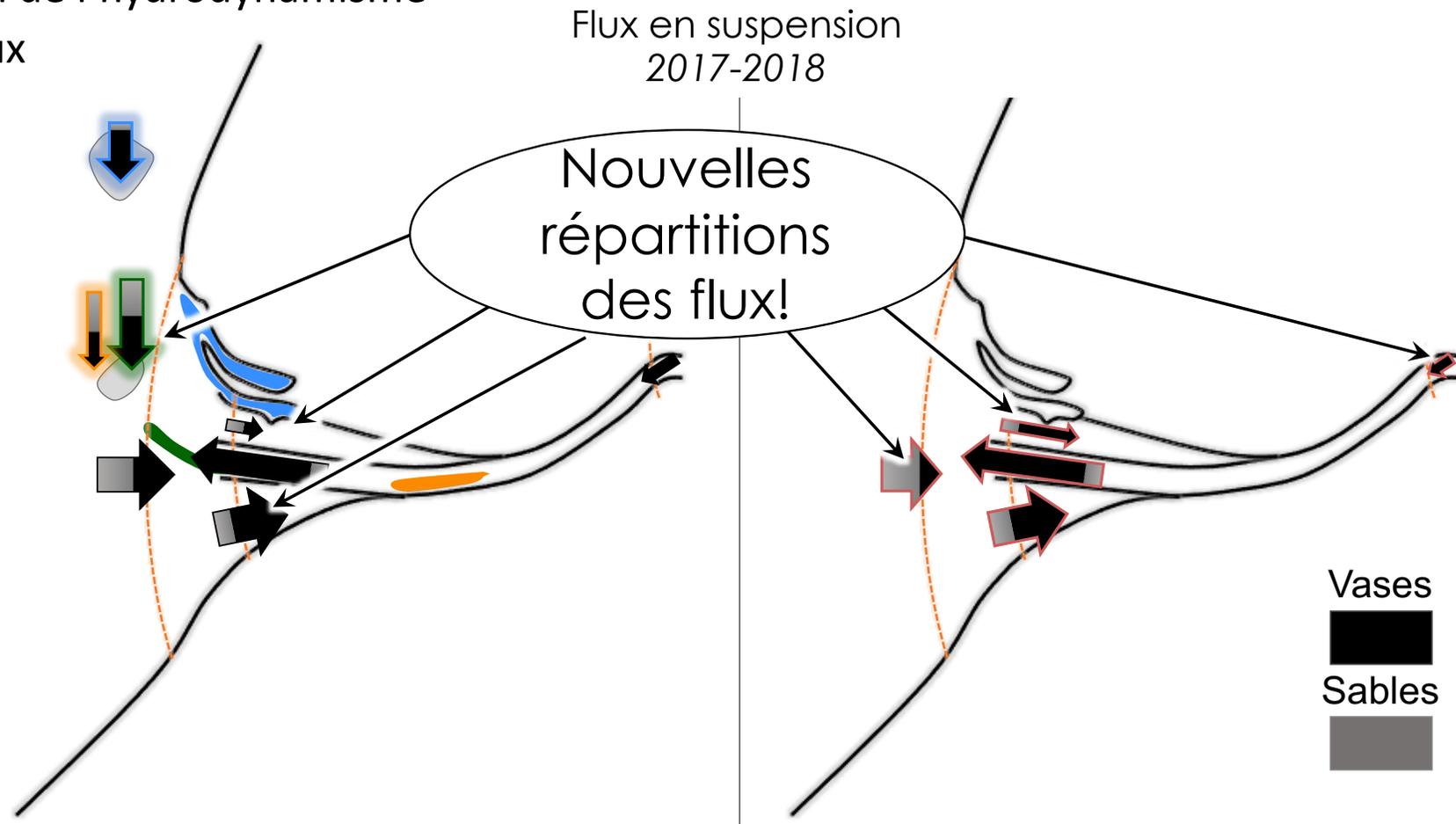
Vitesses barotropiques Max. AVEC dragages – SANS DRAGAGES

Sans dragage : un autre estuaire ?

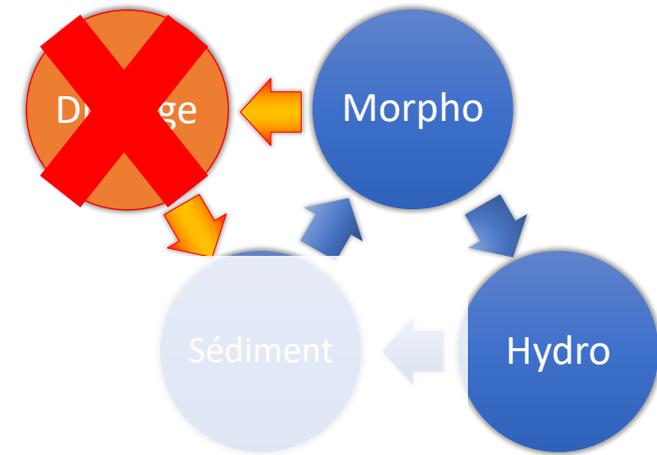


Evolutions morphologiques induites par l'arrêt des dragages pendant 9 ans :

- Evolution de l'hydrodynamisme
- et des flux



Sans dragage : un autre estuaire ?



Evolutions morphologiques induites par l'arrêt des dragages pendant 9 ans :

- Evolution de l'hydrodynamisme
- et des flux



Sans dragage : un autre estuaire ?

Evolutions morphologiques induites par l'arrêt des dragages pendant 9 ans :

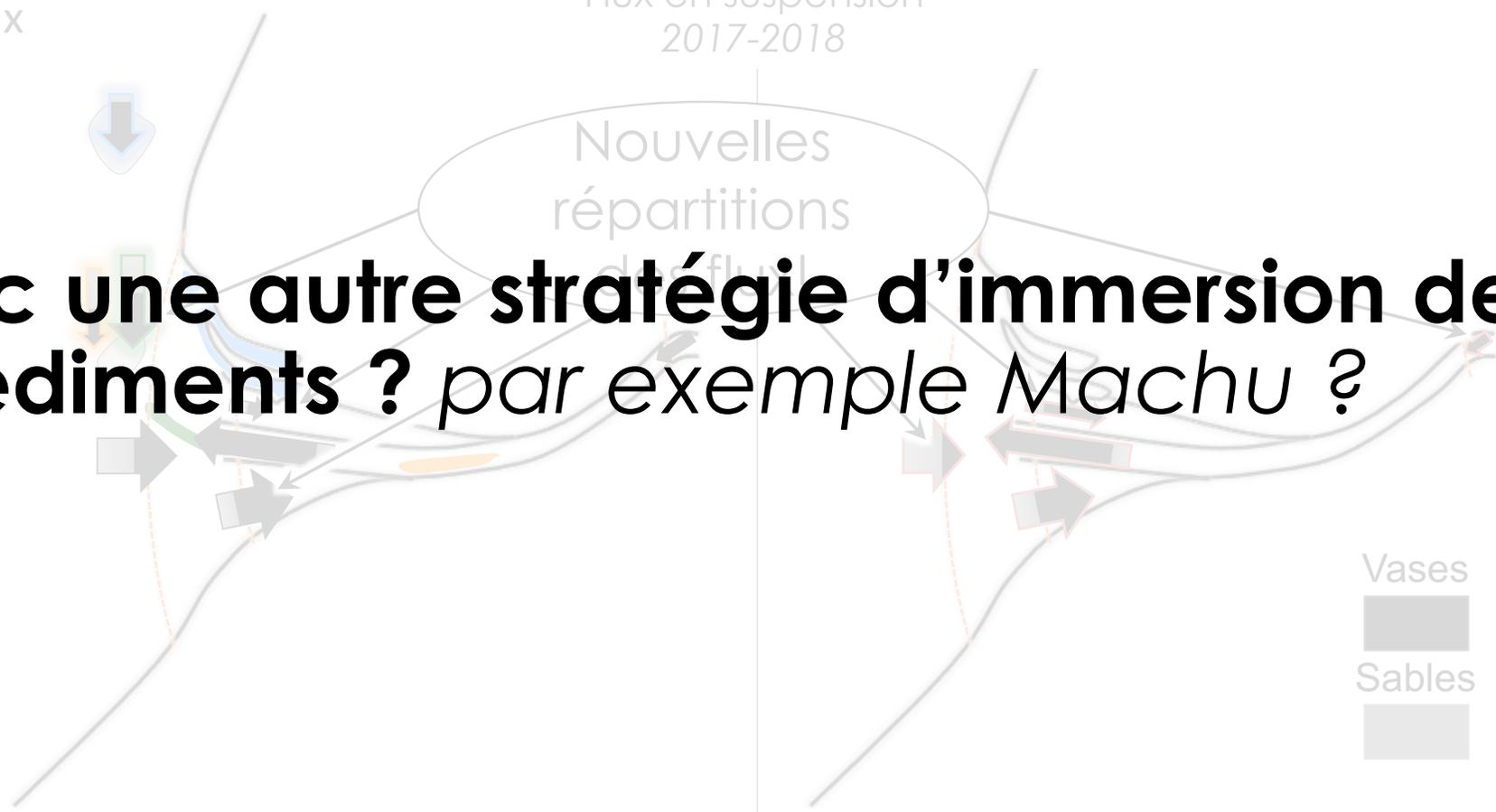
- Evolution de l'hydrodynamisme
- et des flux

Un nouvelle trajectoire d'évolution

Flux en suspension
2017-2018

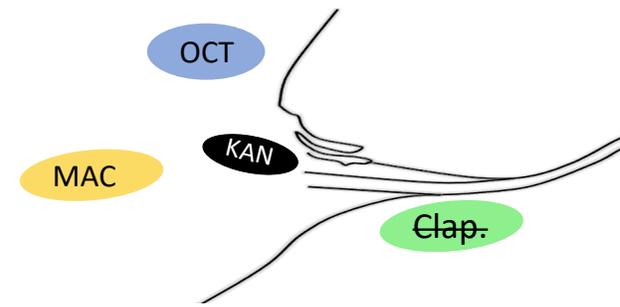
Nouvelles
répartitions
des flux

Et avec une autre stratégie d'immersion des sédiments ? *par exemple Machu ?*



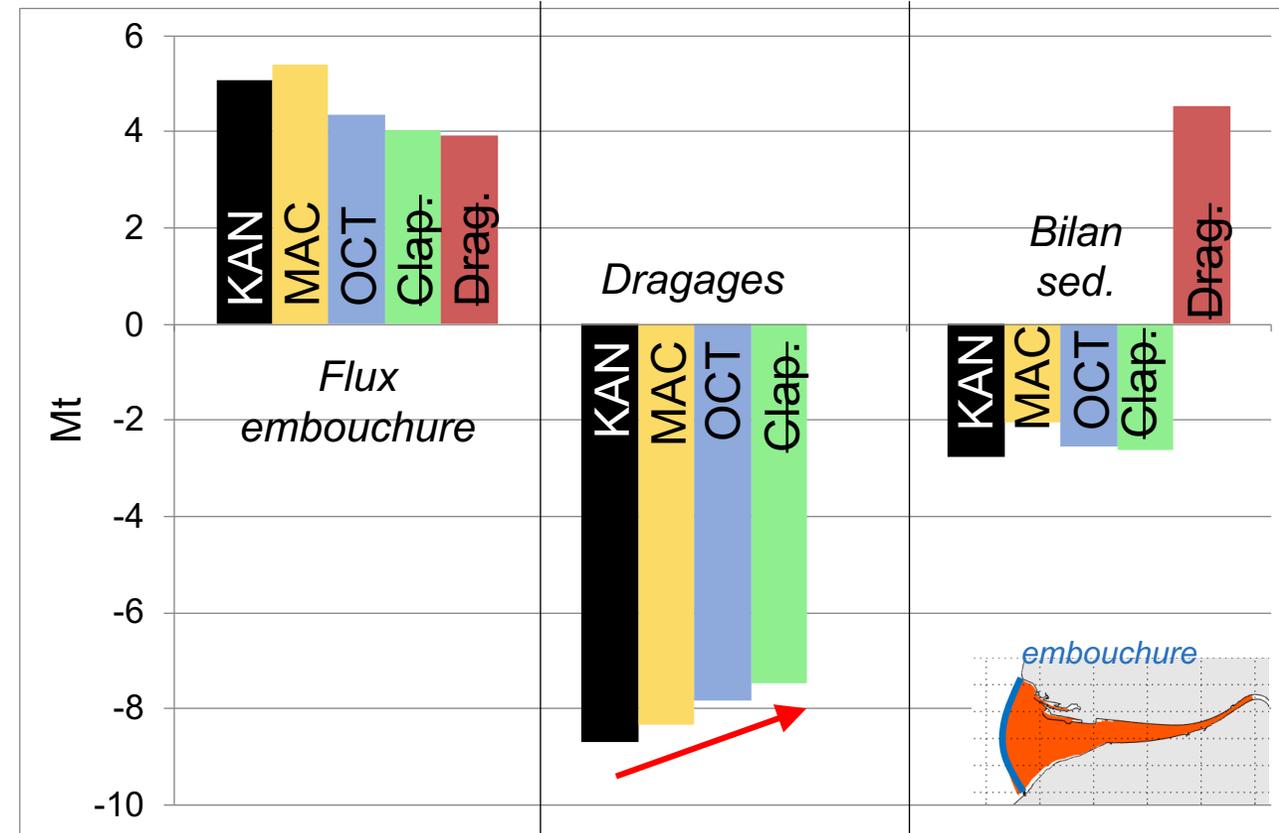
Changement de site de clapage?

détaillés dans le chapitre V de ma thèse



- [MES] et bouchon vaseux : *idem*
- Evolution morphologiques : *effets limités à l'échelle de la période simulée*
- Dragages : Kannik > Machu > Octeville
- Impacts sur les flux naturels :
 - Flux de sédiments à l'embouchure différents selon les scénarios

➔ **Bilans sédimentaires déficitaires**
mais différents



Flux à l'embouchure (sables et vases), quantités draguées et bilans sédimentaires dans l'ensemble de l'estuaire interne, simulés au cours de l'année hydrologique **2017-2018**

Sans dragage : un autre estuaire ?

Evolutions morphologiques induites par l'arrêt des dragages pendant 9 ans :

- Evolution de l'hydrodynamisme
- et des flux

Un nouvelle trajectoire d'évolution

Flux en suspension
2017-2018

Nouvelles
répartitions
des flux

Et avec une autre stratégie d'immersion des sédiments ? *par exemple Machu ?*

**Un trajectoire d'évolution similaire*
mais légèrement "différente"**

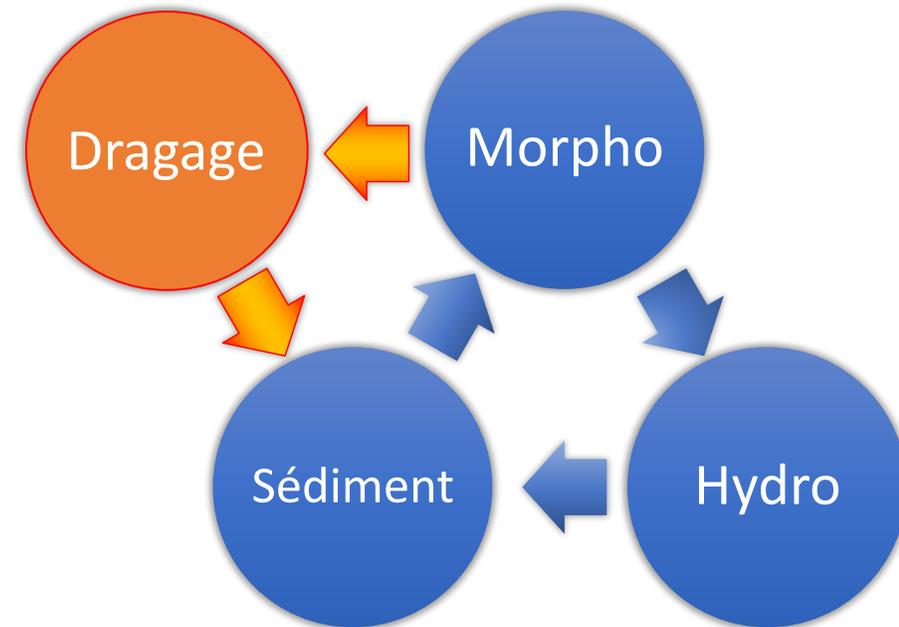
Vases
Sables

* Bilans sédimentaires déficitaires différents

Rôle des dragages dans le fonctionnement HMS

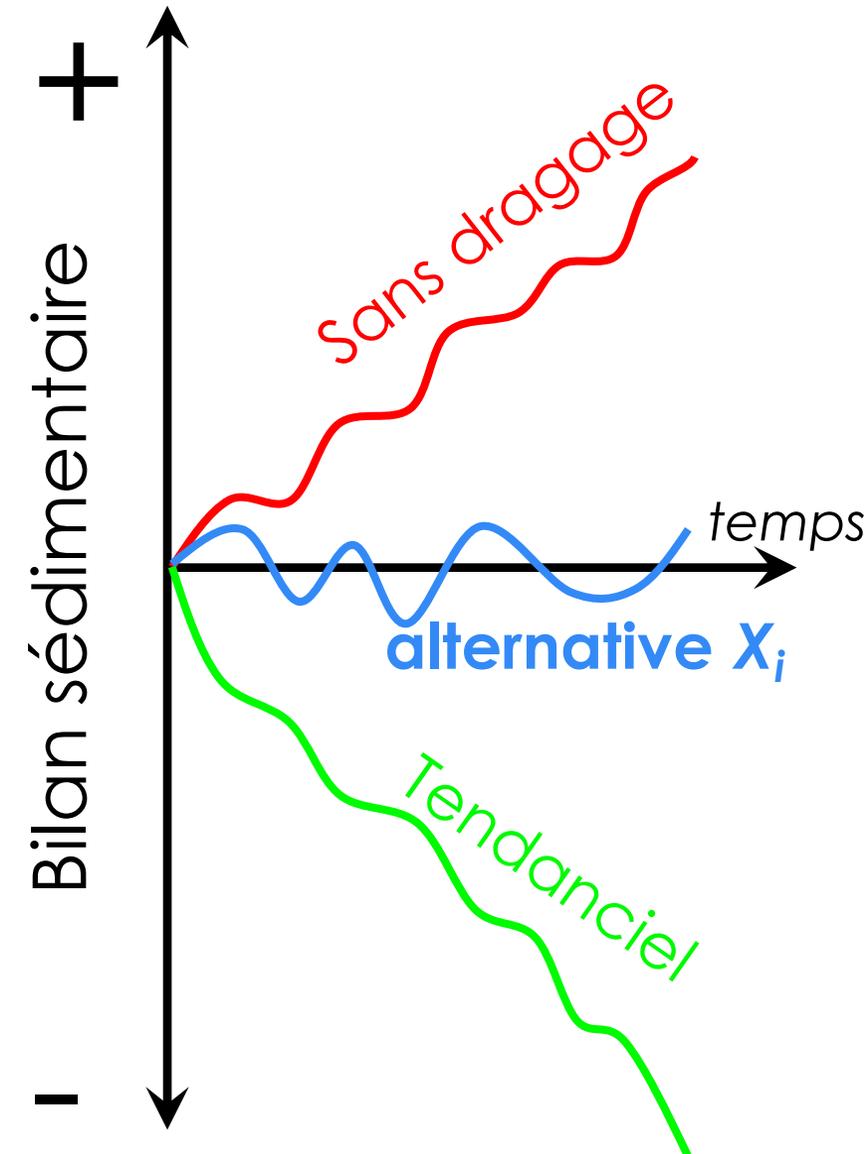
En résumé :

- Les **dragages** d'entretien ont un rôle important
- Comparativement aux dragages, les **clapages** ont un **rôle secondaire** : *à priori non négligeable sur le long terme*



Perspectives possibles

- Scénarios **alternatifs** : *Vers un bilan sédimentaire stable?*
 - ↑ taux de retour des immersions
 - Immersions en estuaire (cf. expérimentation - Port de Rouen)
 - Dragages par injection d'eau
 - Morphological dredging* (cf. discussion reposoir sur dune)
 - Piège à sédiment + *Bypass**
 - *suggestions ?*



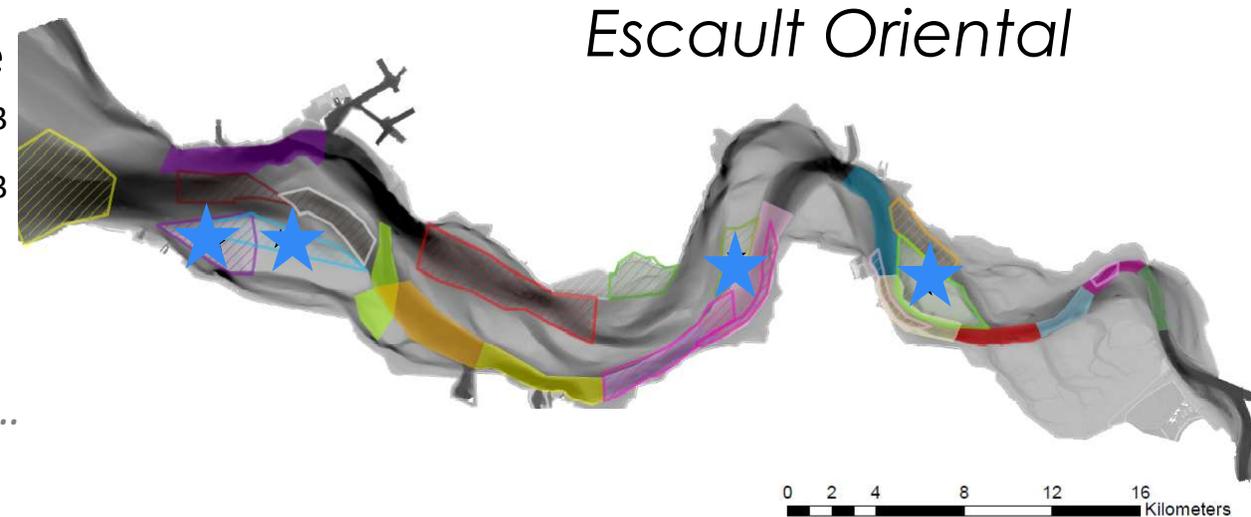
Morphological dredging

“A tool to improve nature values in river and estuaries ”

- Immersion des sédiments → influencer positivement les évolutions morphologiques
- depuis les 70's dans le delta du Zaïre
- depuis 2004 par le port d'Anvers : **Long Term Vision** (e.g. Plancke et al., 2009)

Optimiser l'accessibilité portuaire, Maintien de l'écosystème (intégrité du système multi-chenaux), Sécurité face aux submersions

- 2002-2003 : modélisation physique et numérique
- 2004 : Expérimentation sur site pilote 500 000 m³
- 2006 : Expérimentation sur site pilote 900 000 m³
- depuis **2010** :
 - 100% de l'approfondissement
 - **20 % de l'entretien 3M m³** (le reste en estuaire..)
 - associé à un **programme de suivi**



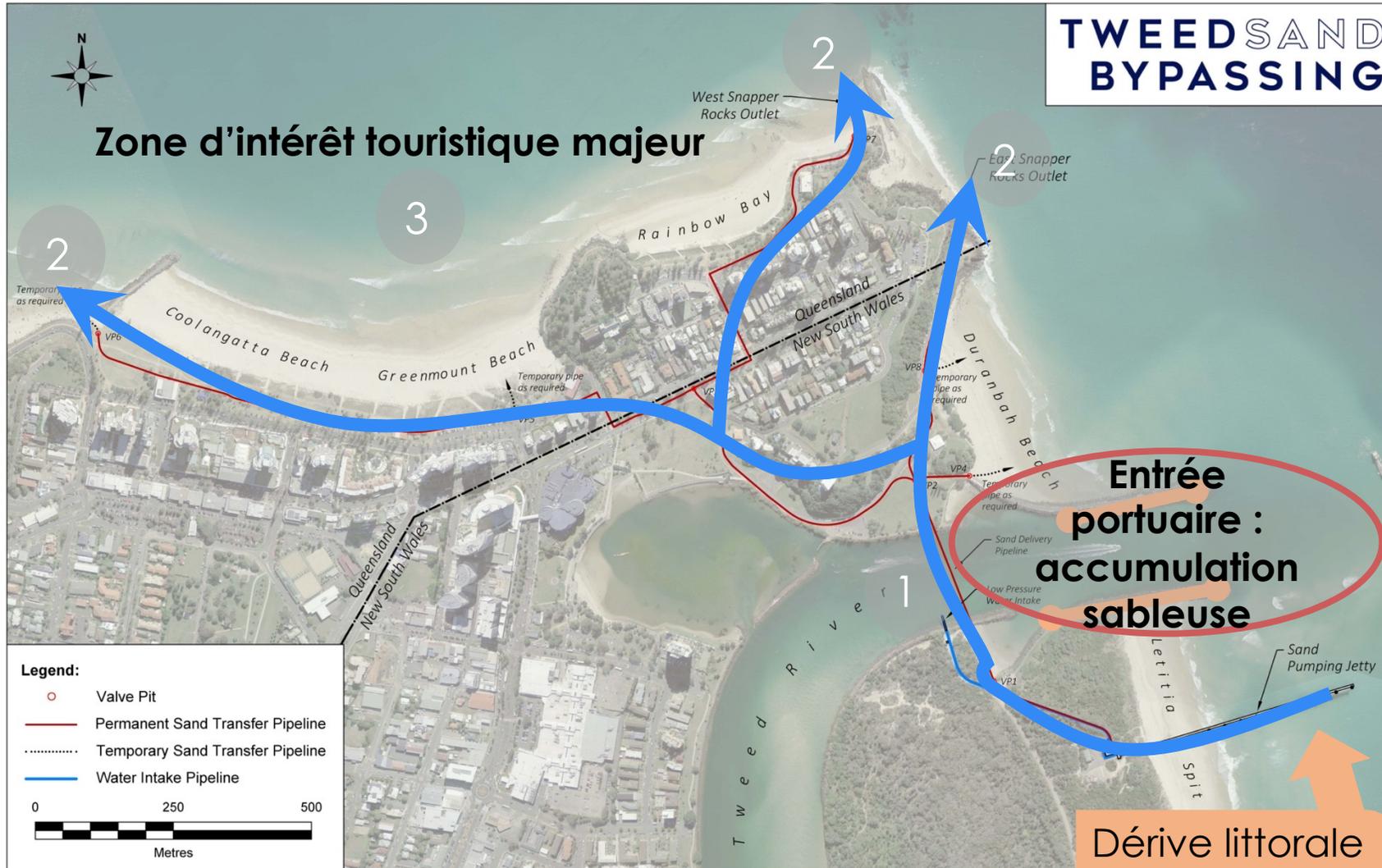
★ Morphological dredging

“ Who trust a strategy based on expertise and monitoring rather than on modelling ? ”

J.J. Peters, 2008

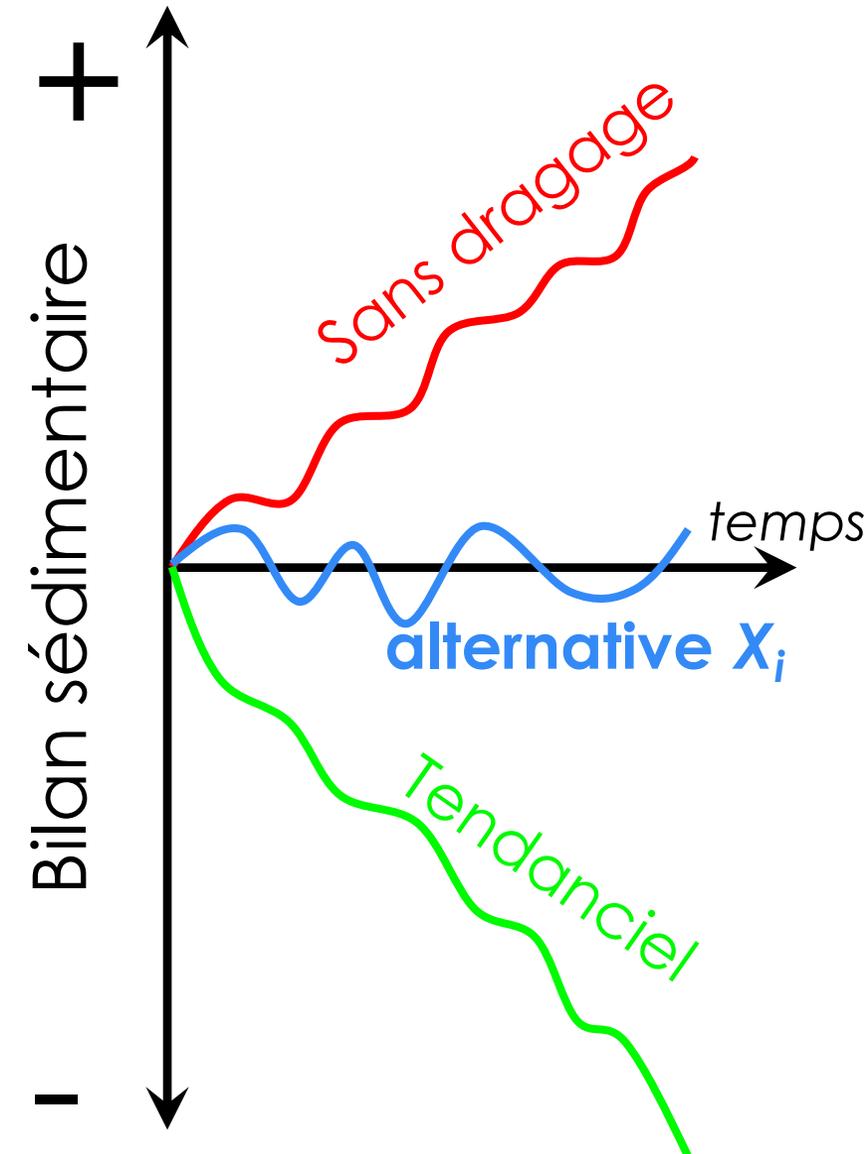
Sand bypass system

- *Exemple :* Tweed River : 2001 | 500 000m³/an | 5 M\$ + 0.5-1 \$/m³
 Gold Coast : mise en service en 1986 | 500 000m³/an



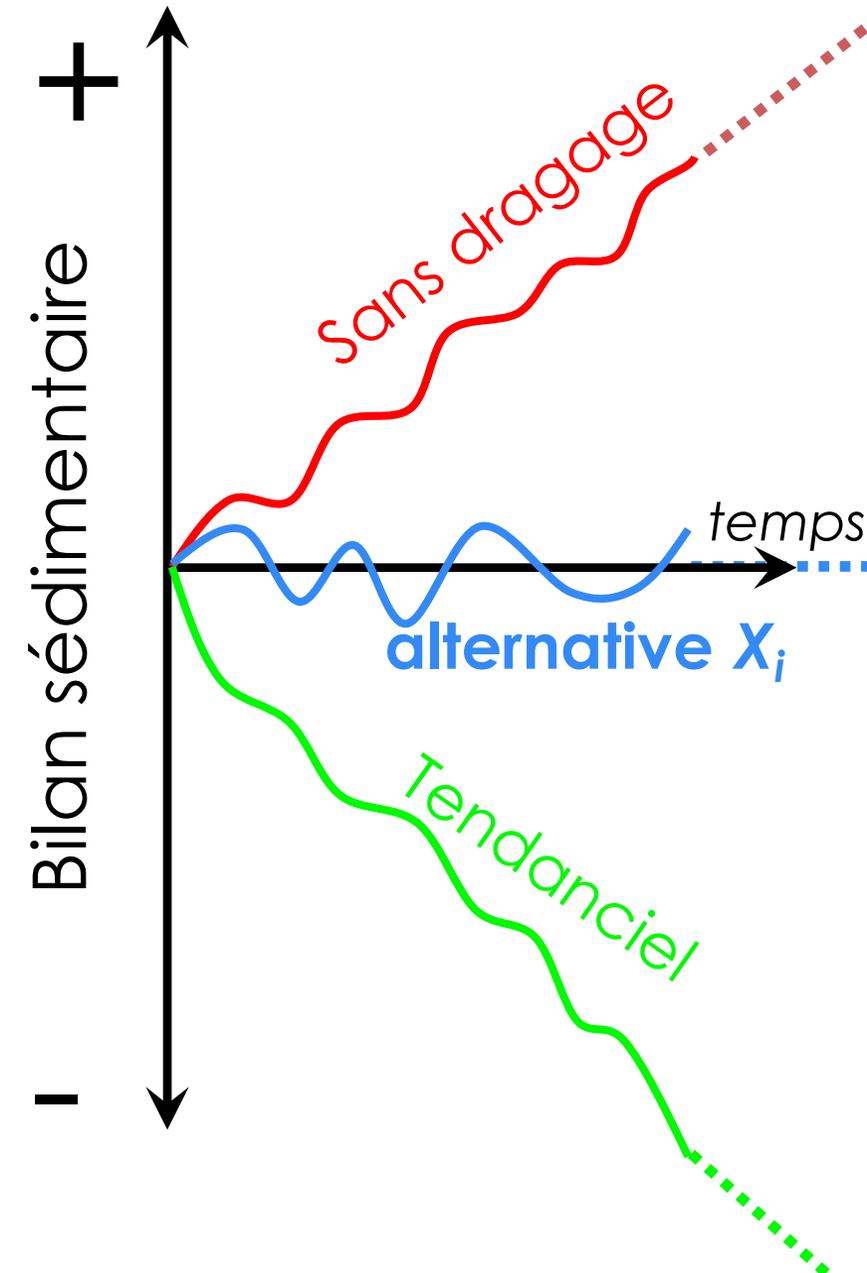
Perspectives possibles

- Scénarios **alternatifs** : *Vers un bilan sédimentaire stable?*
 - ↑ taux de retour des immersions
 - Immersions en estuaire (cf. expérimentation - Port de Rouen)
 - Dragages par injection d'eau
 - Morphological dredging* (cf. discussion reposoir sur dune)
 - Piège à sédiment + *Bypass**
 - *suggestions ?*



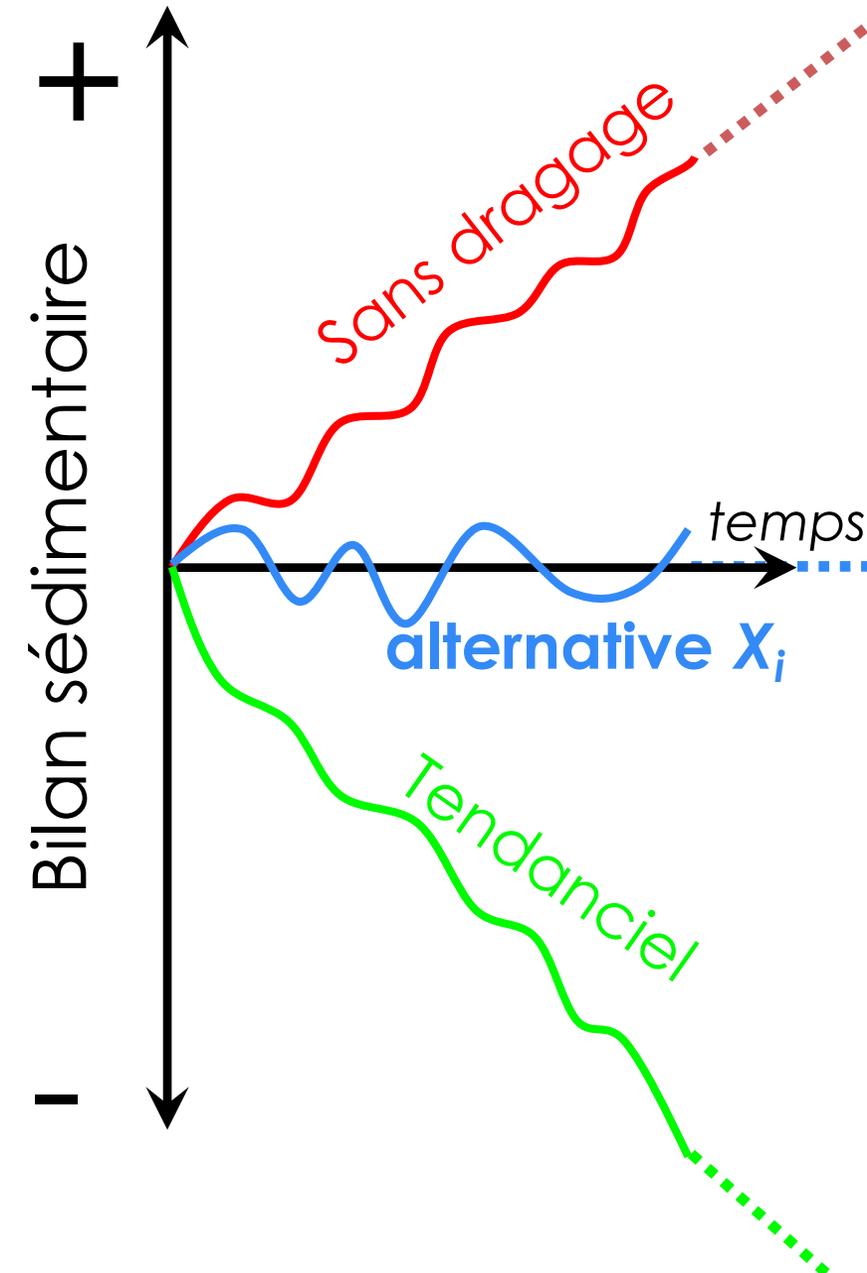
Perspectives possibles

- Scénarios **alternatifs** : *Vers un bilan sédimentaire stable?*
 - ↑ **taux de retour des immersions**
 - Immersions en estuaire (*cf.* expérimentation - Port de Rouen)
 - Dragages par injection d'eau
 - Morphological dredging* (*cf.* discussion reposoir sur dune)
 - Piège à sédiment + *Bypass**
 - *suggestions ?*
- Long terme (*i.e.* 50ans)
 - trajectoires morphologiques / différents scénarios...



Perspectives possibles

- Scénarios **alternatifs** : *Vers un bilan sédimentaire stable?*
 - ↑ **taux de retour des immersions**
 - Immersions en estuaire (*cf.* expérimentation - Port de Rouen)
 - Dragages par injection d'eau
 - Morphological dredging* (*cf.* discussion reposoir sur dune)
 - Piège à sédiment + *Bypass**
 - *suggestions ?*
- Long terme (*i.e.* 50ans)
 - trajectoires morphologiques / différents scénarios...
- Répercussions sur le fonctionnement écologique
- Résilience/Résistance de l'estuaire aux changements climatiques...





Merci pour votre attention